

木製治山ダムの強度、耐久性および環境影響評価に関する研究
Study on strength, durability and environmental assessment
of the timber check dam

2015年3月

野田 龍

Ryu Noda

目次

第1章 序論	
1.1 諸言	1
1.2 治山ダムとは	5
1.2.1 コンクリート製治山ダム	5
1.2.2 鋼製治山ダム	6
1.3 国内に現存する木製治山ダム	7
1.3.1 青森県坪毛沢	7
1.3.2 長野県御岳濁沢	8
1.3.3 静岡県流沢	9
1.3.4 秋田県北秋田	10
1.4 秋田県で開発された木製治山ダムの概要	11
1.4.1 オールウッド型木製治山ダム	12
1.4.1.1 単材の断面寸法	12
1.4.1.2 堤体の構築	12
1.4.1.3 構造物としての一体性の確保	13
1.4.1.4 浮力の影響	15
1.4.1.5 施工手順	16
1.4.2 ハイブリッド型木製治山ダム	17
1.4.2.1 堤体の構築	18
1.4.2.2 中詰材の単位体積重量	19
1.4.2.3 堤体の安定性	19
1.4.2.4 中詰材の流出防止	19
1.4.2.5 施工手順	20
1.4.3 これまでに得られた知見と課題	21
1.4.3.1 強度試験	21
1.4.3.2 安定計算に用いる諸因子	27
1.4.3.3 枠ダム型との比較	32
1.4.3.4 まとめ	35
第2章 オールウッド型木製治山ダムの強度性能	
2.1 はじめに	36
2.2 接合部強度試験	37
2.2.1 実験方法	37
2.2.1.1 面圧試験	37
2.2.1.2 一面せん断試験	38
2.2.1.3 引き抜き試験	41
2.2.2 実験結果	43
2.2.2.1 面圧試験	43

2.2.2.2 一面せん断試験	46
2.2.2.3 引き抜き試験	51
2.2.3 まとめ	60
2.3 実大の堤体載荷試験	61
2.3.1 試験体	61
2.3.2 試験方法	64
2.3.3 試験結果	65
2.3.3.1 鉛直変位	65
2.3.3.2 水平変位	69
2.3.4 まとめ	72
2.4 摘要	73
第3章 腐朽調査	
3.1 はじめに	74
3.2 調査箇所	77
3.2.1 秋田県内	77
3.2.2 熊本県内	78
3.2.3 調査箇所の気象	79
3.3 調査方法	81
3.3.1 ピロディン打込み深さの測定	82
3.3.2 応力波伝播速度の測定	83
3.4 調査結果	84
3.4.1 秋田県内	84
3.4.2 熊本県内	92
3.5 まとめ	99
3.6 摘要	100
第4章 環境影響評価および経済性	
4.1 はじめに	101
4.2 ライフサイクルアセスメント(LCA)の考え方	103
4.3 対象とした治山ダムの概要	104
4.4 評価方法	105
4.4.1 CO ₂ 排出量の評価方法	105
4.4.1.1 対象治山ダムの設計	105
4.4.1.2 評価範囲の設定とインベントリ分析	107
4.4.2 経済性の評価方法	112
4.5 評価結果	114
4.5.1 CO ₂ 排出量の評価結果	114
4.5.2 経済性の評価結果	118
4.6 まとめ	125

4.7 摘要	126
第5章 結論	
5.1 オールウッド型木製治山ダムの強度性能	127
5.2 オールウッド型木製治山ダムの腐朽実態	127
5.3 木製治山ダムの環境影響と経済性の評価	128
5.4 総括	129
謝辞	135
参考文献	136

第1章 序論

1.1 諸言

利用期に達しつつある森林の適切な維持・培養、森林資源としての有効利用を目的として、農林水産省は2009年12月に「森林・林業再生プラン」を公表した¹⁾。同プランは、木材などの森林資源を最大限活用し、10年後の木材自給率50%以上を目指すべき姿としている。しかし、現在の我が国の木材自給率は、2012(平成24)年で27.9%²⁾と、近年の回復傾向にも関わらず30%にも満たず、目標を確実に達成するためには、新たな木材利用先の開拓もまた重要であり、その候補の一つとして土木構造物への適用が挙げられる。土木分野においては、高度経済成長期を境に木材利用率が激減したが、景観との調和、炭素固定効果といった環境保全の観点に加え、森林整備を通じた雇用の創出、地域の活性化といった観点から木材利用が見直され、近年、橋梁(写真1.1)³⁾⁻¹⁰⁾や治山ダム^{3), 11)-27)}、軟弱地盤対策としての木杭^{3), 28)-35)}、用水路護岸対策としての木柵工(写真1.2)³⁶⁾⁻³⁸⁾や多自然型護岸工³⁹⁾⁻⁴¹⁾、ガードレール(写真1.3)⁴²⁾⁻⁴⁵⁾や遮音壁(写真1.4)⁴⁶⁾⁻⁵²⁾といった土木構造物への地域産材の活用が盛んに行われるようになってきた。こうした施設は主に公共工事において建設されている。



写真 1.1 木橋



写真 1.2 用水路護岸木柵工



写真 1.3 木製ガードレール



写真 1.4 木製遮音壁

このうち治山事業に着目すると、林野庁治山課が主催する治山研究発表会が1961年から毎年開催されている。治山研究発表会とは、国（森林管理局）や県で実施される治山事業について、事業を遂行するにあたっての問題点や課題の抽出、新たな知見等を発表する場であり、近年、木材利用に関する発表も増加している。治山研究発表会のこれまでの発表件数と木材をテーマとした発表件数をまとめたものを図1.1に示す。治山研究発表会では毎年、その時代の社会情勢等に応じて3つないし4つのテーマを掲げ、これに沿った発表が行われている。1997年に木材に関するテーマが初めて取り上げられ、テーマ名は「治山事業における木材利用の推進」であった。これ以降、テーマ名を変えながらも木材利用に関するテーマが現在まで毎年設定されている。全体の発表件数に占める木材利用に関する発表の割合は、1997年にテーマが設定されて以降上昇し、2000年から2006年の間には20%を超えるまでに発表件数が増えている。それ以降も10%台で推移しており、治山事業担当者の木材利用に関する意識の高さがうかがえる。発表内容は、土留工や治山ダムに木材を用いた事例発表が多く、特に溪流の荒廃や侵食を防止するために設置される治山ダムにおいては、その規模から大量の木材使用の拡大が期待でき、今後の研究の推進が期待される。

治山ダムの主材料は、かつては木材が使われていたが、明治時代に入ると次第に石材が使われるようになり、そして終戦後はコンクリートに取って替わるようになった。しかし、木材を治山ダムの主部材として使用する研究が1998年頃から石川ら^{53), 54)}によって進められ、安全性や耐久性に関する調査結果に基づく基本的で統一的な設計指針⁵⁵⁾が示されたことで、木製治山ダムの取組みは全国的に広がった。指針に示された木製治山ダムには全国各地で考案された多様な構造形式が紹介されているが、その多くの構造は枠ダム型（写真1.5、図1.2）と呼ばれるものであり、ボルト等で連結された木製枠の中に中詰材として玉石や割石等を充填した重力式構造となっている。

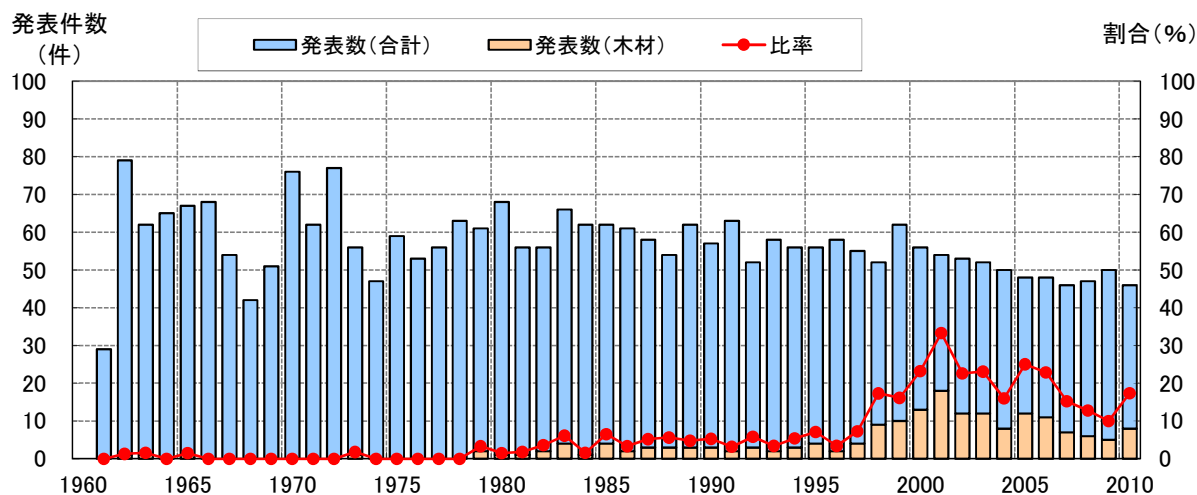


図 1.1 発表件数の推移

全国7位の森林面積を有する秋田県においても、地域産材の需要拡大を目的として2001年から木製治山ダムの取り組みが始まっている。ここでも、他県の事例に倣った形式が多く、変形ラムダ型(写真1.6、図1.3)と呼ばれる枠ダム型の木製治山ダムがこれまでに30基以上施工されてきたが、枠ダム型堤体における木材使用率は15~20%に留まることから大幅な需要拡大とまでは至らないこと、使用する木材の寸法がこの地域での需要が期待される寸法とは必ずしも一致しないこと等から、秋田県の現状に即した新たな堤体構造の開発が求められていた。

このような背景の下、ダム堤体における木材使用率の向上、支障間伐材や需要の少ない径級の丸太の需要拡大、木材産業を中心とした地域の活性化を促すことを目的として、秋田県独自の二つのタイプの木製治山ダムの開発が行われた。その一つは、建築資材等としても需要の低い末口径300mmを超える大径材から製材した大断面の角材を主要部材として使用したもので、中詰め材を使用しないオールウッドタイプの堤体構造である。このオールウッド型木製治山ダムの木材使用率は90%以上にもなる。もう一つは、森林整備により発生する中・小径の本数調整伐材を鋼製枠の中に詰め込んでいく構造であり、このハイブリッド型木製治山ダムの木材使用率は80%以上を実現している。



写真 1.5 枠ダム型木製治山ダム

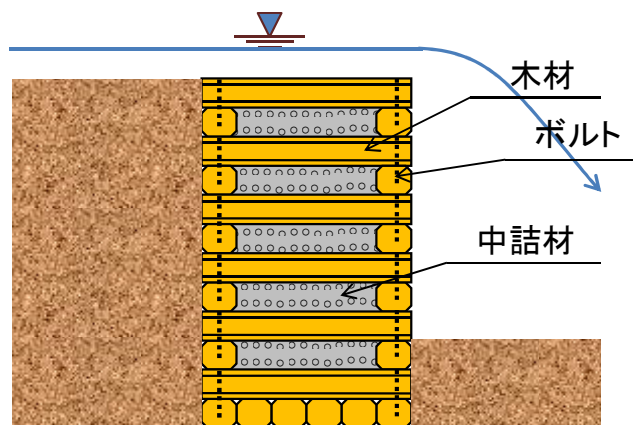


図 1.2 枠ダム型構造断面図



写真 1.6 変形ラムダ型木製治山ダム

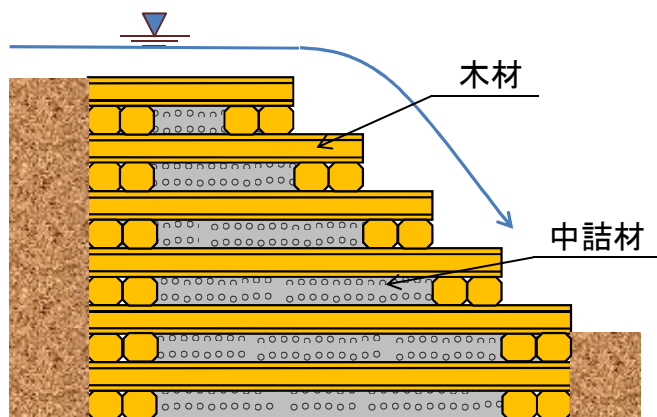


図 1.3 変形ラムダ型構造断面図

本論文の第1章では、秋田県で開発された2種類の木製治山ダムの概要を述べ、これまでに行った各種試験および調査結果を整理し、オールウッド型およびハイブリッド型木製治山ダムに関する知見と残された課題を抽出する。次に、それぞれの課題に対する検証を行い、特に秋田県において木製治山ダムの標準タイプとなったオールウッド型木製治山ダムについて、より汎用性のある木製治山ダムとするための提案を行った。

第2章では、オールウッド型木製治山ダムを対象にコスト縮減タイプの強度性能を評価するため、接合部強度試験として面圧試験、せん断試験、引き抜き試験を実施した。さらに、実大寸法の堤体の供試体を対象に水平載荷試験を実施し、コスト縮減の可能性について検証を行った。

第3章では、オールウッド型木製治山ダムの維持管理手法の基本データに資する目的で既設の木製ダムを対象に現地調査を実施し、劣化状況の把握を行った。

第4章では、木製治山ダムと一般的なコンクリート製および鋼製の治山ダムを対象にライフサイクルにおけるCO₂排出量の比較検討を行った。さらに、経済性についても比較検討を行い、環境面、経済面の双方より木製ダム導入の効果を検証した。

第5章では、2章から4章までの結果を総括したうえで、実用的な木製治山ダム構造の提案を行った。

1.2 治山ダムとは

治山ダムとは荒廃した溪流または荒廃の恐れのある溪流に対して、溪床の勾配を緩やかにし、水の流れを緩和することで溪床や溪岸の侵食防止と堆積土砂の下流域への流出を抑止することで、溪流の荒廃や溪流沿いの斜面崩壊を防止する森林土木構造物である。治山ダムは「谷止工」と「床固工」に大別される。谷止工はダム上流に貯砂機能を有したダムであり、土石流のような上流域より流下してくる土石や流木を捕捉することができるタイプのため、ダムの規模（高さ）は比較的大きくなる。一方、床固工はダム上流に貯砂機能を有していないダムであり、溪床勾配を緩やかにし、溪岸侵食を防止することを主目的としている。そのため、床固工の高さは一般的に5m以下である。木製治山ダムはこれらの構造のうち、床固工に分類される治山ダムである。

以下に治山ダムとして実績の多いコンクリート製、鋼製の概要を述べる。

1.2.1 コンクリート製治山ダム

コンクリート製治山ダム（写真 1.7）は治山ダムの中で最も一般的な構造物で、耐久性が高く、構造物自身の重量が必要とされる重力式構造物として最も適している。また、コンクリート製は局所的な破壊や劣化の進行が治山ダム全体の安定性に影響を及ぼすことが少ないため、現場条件に幅広く対応できる。



写真 1.7 コンクリート製治山ダム

1.2.2 鋼製治山ダム

鋼製治山ダム（写真 1.8）は一般的に鋼材とボルトを用いて外枠を作製し、その中に中詰材としてφ150～200mm程度の割栗石を充填した構造となっている。コンクリート製に比べ構造物の自重が軽く、部材同士はボルト連結によりフレキシブルな構造となっているため、堤体の浮沈に対する追随性が高い。また、鋼製治山ダムの建設は鋼材の組立て、割栗石の投入が主のため、コンクリート製のように打設後の養生期間が不要で、災害時などに短期間施工が求められる場合や現場に石礫や転石等の中詰め材料が容易に入手しやすい場合に適している。ただし、土石流などの衝撃荷重が作用する恐れのある場合は不向きである。



写真 1.8 鋼製治山ダム（提供：日鐵住金建材株式会社）

1.3 国内に現存する木製ダム

既設の木製ダムのうち、施工後数十年が経過しても治山ダムとしての機能を十分に維持している木製ダムが全国にはいくつか現存している。ここでは青森県坪毛沢（五所川原市）の木製床固工、長野県御岳濁沢（木曾郡大滝村）の木製床固工と木製護岸工、静岡県流沢（静岡市）の木製床固工、秋田県鷹巣の木製床固工について紹介する。

1.3.1 青森県坪毛沢

坪毛沢流域は斜面勾配が大きく、第三紀の頁岩及び泥岩を基岩とし、碎屑物が厚く覆われているが、溪流はV字型浸食を受け荒廃し易い山地である。地質は緑色凝灰岩であるためコンクリート用の骨材採取が困難である。そのため、大正初期より現地に生育するヒバ材を用いて木製床固工が建設されてきた（写真 1.9）^{56), 57)}。古いものでは大正 5 年、昭和 28、29 年さらには昭和 32、33 年に施工された 6 基の木製堰堤が現在も機能している。なお、坪毛沢に施工された一連の木堰堤群は、2013（平成 25）年に林野庁が公表した「後世に伝えるべき治山～よみがえる緑～」60 選に選定され、その中で「先人たちの知恵とヒバの耐久性を伝える木製堰堤」と紹介されている⁵⁸⁾。



写真 1.9 坪毛沢木製床固工（昭和32年施工）

1.3.2 長野県御岳濁沢

長野県木曾郡王滝村において、昭和 59 (1984) 年 9 月 14 日午前 8 時 48 分、マグニチュード 6.8 の地震が発生した。震央は御岳山の南東方向約 12.5km で、その深さは約 2.0km の浅い直下型地震であった。この地震のため御岳山山腹斜面には数箇所の大規模な崩壊が発生し土石流となり、死者行方不明者は 29 名に上り、公共施設や林野、住宅等が被災した。なかでも御岳山南西斜面で発生した大崩壊からの土石流は、渓谷や斜面を削り、そのあとに広大な荒廃地を残した⁵⁹⁾。濁沢及び下流の濁川周辺に残されたこれらの荒廃地を復旧するため、山腹面や溪流に数多くの治山・砂防施設が計画・施工され、以降 17 年余りにわたって工事が続けられた。

それらの施設の一部には堆積した土砂の流出防止や、荒廃地の復旧のため、周辺のカラマツ間伐木を使用した木製の床固工や護岸工等が施工され、現在もこれらの施設を多く見ることができる (写真 1.10)。



写真 1.10 御岳濁沢木製床固工

1.3.3 静岡県流沢

昭和3年に東京電力(株)が山梨県早川町内に田代第2発電所を建設するにあたり、発電用水を確保するため、大井川上流である静岡市田代地内に発電用調整池として田代ダムを建設したが、その後、当調整池に流入する溪流からの流出土砂が多く田代ダム湖の堆砂が進行し、有効貯水量の低下が懸念された。このため、東京電力(株)は昭和34~35年にかけて、流沢を対象として溪岸崩壊防止対策及び流出土砂防止対策のため、周辺のもみ、ツガを用いて木製床固工5基と木製副堰堤1基を建設した(写真1.11)。木製床固工のダム高は5~10mと比較的高い。その後、経年により腐朽・破損が目立ったため、昭和58年、平成2年、平成3年に補修工事が行われた。補修は5基のうち、No.1、3、4、5の木製床固工を対象に行われたが、下流法側を補強する形で行われている。補修に使用された木材は輸入材のベイマツ、ベイツガであった⁶⁰⁾。



写真 1.11 流沢木製床固工

1.3.4 秋田県北秋田

昭和33年および34年に北秋田市鷹巣町七日市地区の東北森林管理局米代東部森林管理所管内に設置された治山ダムで、周辺のスギ間伐材を用いて設置されたものである（写真1.12、図1.4）⁶¹。写真1.12は2003年の調査時に撮影されたものであるが、その後治山ダムの上を重機が伐採用進入路として使用したため、破損の程度は大きくなっている。



写真 1.12 鷹巣町に現存する木製治山ダム（昭和34年施工）

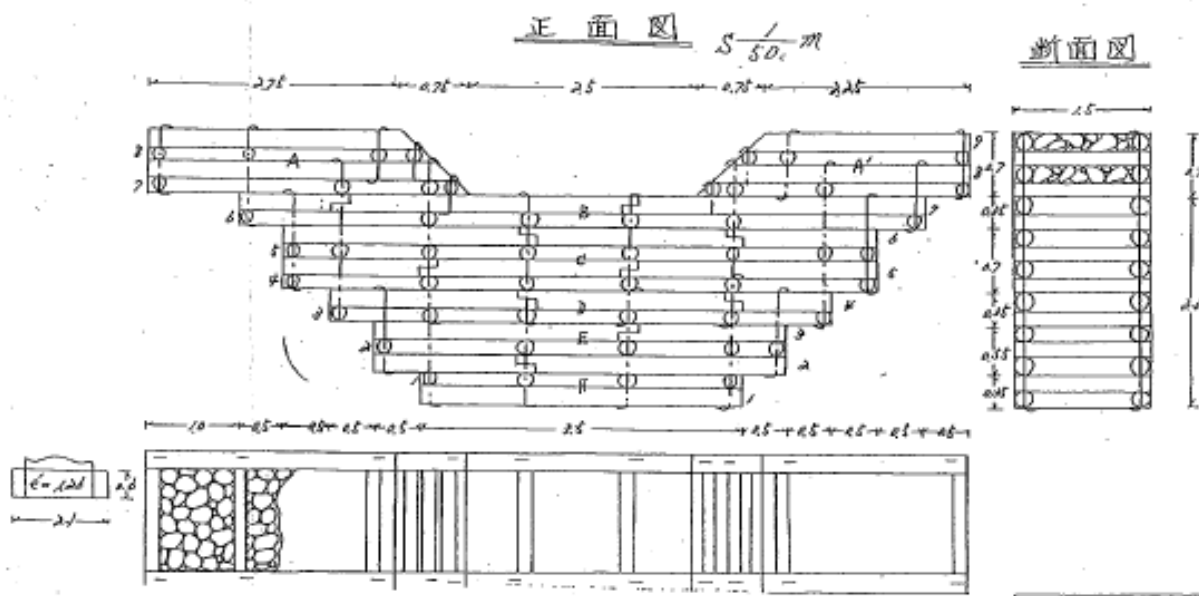


図 1.4 構造図（提供：北秋田森林組合）

1.4 秋田県で開発された木製治山ダムの概要

1.3 で述べたように、現存する木製ダムのうち、施工後数十年が経過してもその機能を十分に維持しているものがある。秋田県内においても、施工後 40 年以上が経過したスギ材を用いた木製ダム（写真 1.12）が現存しており、治山ダムの機能を十分に維持していることが確認された。木質構造物を屋外で建造する場合、腐朽による経年劣化が懸念される上、他の樹種に比べ一般的に強度が低い⁶²⁾とされるスギ材を用いた木製ダムが、設置環境によっては建設後 40 年以上を経てもその機能を維持していることが確認されたことから、秋田県産スギ材を用いた新たな木製治山ダムの開発の取り組みが秋田県農林水産部を中心に 2000 年頃から始まった。1.3 で記した木製ダムはすべて枠ダム型であるが、1.1 で示したように、堤体における木材使用率が低い。そこで、秋田県では堤体における木材の使用率向上を目的とし、「オールウッド型木製治山ダム」と「ハイブリッド型木製治山ダム」の開発が行われた^{63), 64)}。これらの木製治山ダムは使用する木材に応じて使い分けられるが、構造はともに重力式構造で、耐力はそれぞれ実大試験等を行って確認している。詳細を以下に示す。

1.4.1 オールウッド型木製治山ダム

森林面積で全国第7位、人工林面積で全国第4位⁶⁵⁾と日本を代表する森林県である秋田県であっても、末口径300mmを超える大径材の市場への年間供給数は決して多くはないが、建築資材として需要がほとんどないため、供給過多の状態となっていた。この大径材の有効利用と大量利用を目的とし、「オールウッド型木製治山ダム」が考案された(写真1.13)。設計に当たっては、堤体を使用する単材の断面寸法、堤体の構築、構造物としての一体性の確保、堤体に作用する浮力の影響が検討した。また、実大寸法の堤体構造の強度試験や、施工後の堤体に作用する外力のモニタリングを行うことで、堤体の安全性や設計に供する浮力の考え方の検討を行った。さらに、設置後の腐朽調査などから耐久性に関する定量的評価も行っている。



写真 1.13 第1号のオールウッド型木製治山ダム (槐^{さい}岱^{かち}道^{たい}下^{みち}No.2)

1.4.1.1 単材の断面寸法

単材の断面寸法は、製材歩留まりや製材機の加工能力から幅300mm×高さ250mmとした。単材1本当たりの長さは、秋田県における原木の採材長さが3650mmだったことから、歩留まりを考慮し600~3600mmとした。なお、堤体の通水性を向上させるため、単材は4面角落としとした。

1.4.1.2 堤体の構築

スギ材の単位体積重量は、一般的に350~400kg/m³と言われ⁶⁶⁾、コンクリート(同2300kg/m³)や鋼材(同7850kg/m³)に比べて小さいため、木材のみで重力式構造物を構成するのは困難であり、何らかの方法で重量を補う必要があった。そこで、堤体は複断面型にし、堤体上流側の埋戻し土砂を釣合い上載荷重として用いることで堤体の自重を補うことにした(図1.5)。

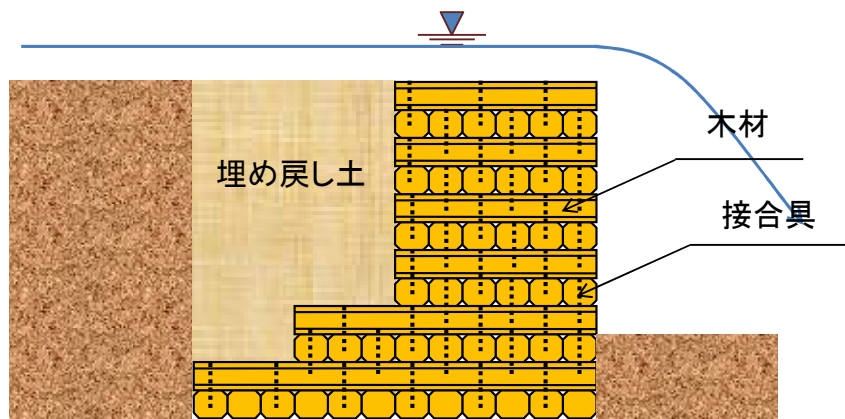


図 1.5 オールウッド型木製治山ダム断面図

1.4.1.3 構造物としての一体性の確保

堤体は、単材を上下流方向および左右岸方向に交互に一段ずつ直交するよう積み上げ、各段の単材同士を上下に接合具にて一体化する構造とした。重力式構造物としての転倒、滑動、地盤支持力（木材同士については木材の支圧耐力）について、堤体全体および各段で土圧等の外力に対する安定性の照査を行った結果、断面 A-B 面より上の断面では合力の作用位置がミドルサード内（堤体中心より 1/3 の範囲内）に入らず、堤体の上流側にはせん断力に加え引張力が作用することが明らかとなった（図 1.6）。そこで、接合具には、中大規模な木質構造物で用いられるラグスクリュー（写真 1.14、図 1.7）を採用することにした。浮力の作用影響が不明確であることと施工時の混乱を避けることから、ラグスクリューは堤体全体に用い、図 1.8 に示すように千鳥状に配置した。ただし、建築分野においては引張力に対してラグスクリューの使用は認められていない⁶⁷⁾ことから、単材同士の接合部強度性能を定量的に評価するため、接合部強度試験を行うこととした。なお、このとき試算されたラグスクリュー1本当たりに作用する引張力、せん断力はそれぞれ約 0.83kN、0.82kN であった⁶⁸⁾。

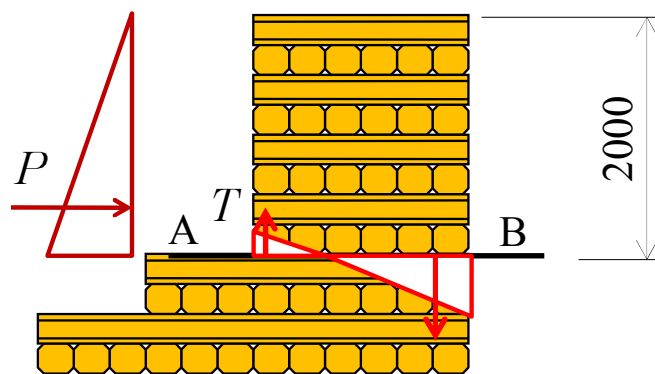


図 1.6 断面 A-B 面の合力位置（単位：mm）



写真 1.14 施工状況と接合具（ラグスクリュー）

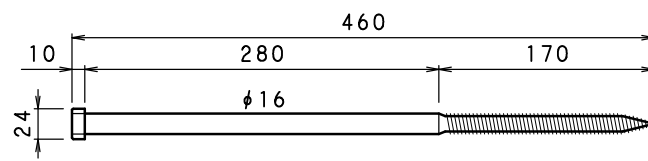


図 1.7 ラグスクリューの形状（単位：mm）

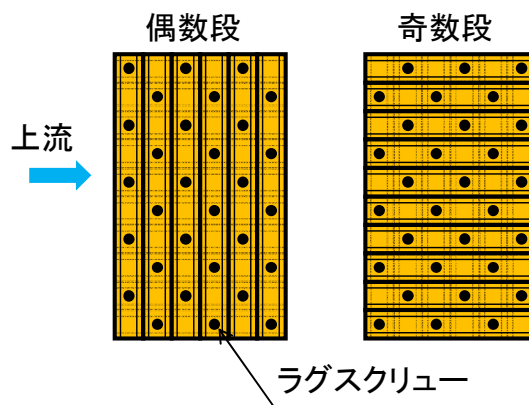


図 1.8 ラグスクリューの配置例（平面図）

1.4.1.4 浮力の影響

堤体は木材の積み重ねで構築するため、木部材間に隙間が生じ得るし、製材精度や施工精度、含水率変化によっても隙間は生じ得る。溪流に設置するオールウッド型木製治山ダムにおいては、これらの隙間から堤体内に水が滞水し、堤体には浮力が作用することが考えられた。そこで、堤体に作用する浮力の算定は、鋼製不透過型砂防えん堤の考え方⁶⁹⁾を参考に、上流上端部より下流下端部を結んだ線(浸潤線)より下部の木材について作用すると仮定した(図 1.9)。この仮定を検証するため、実構造物を対象に、現地モニタリング調査を行った。

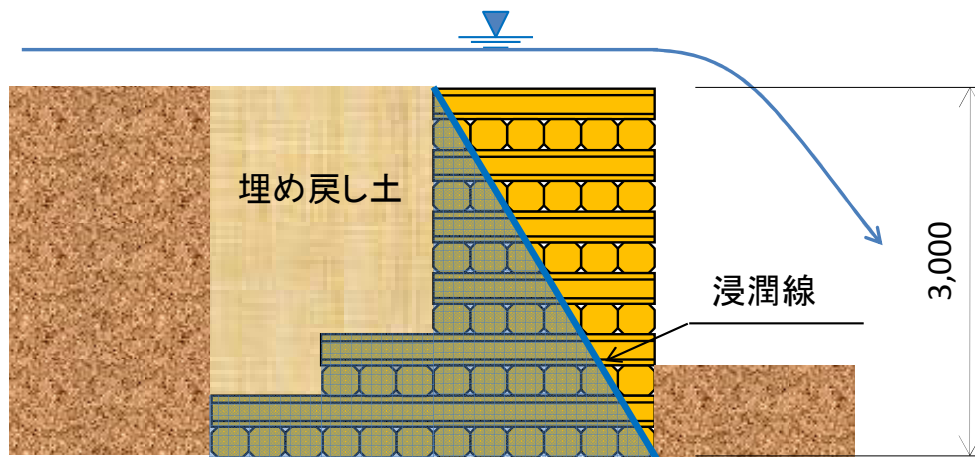


図 1.9 浸潤線の位置 (単位 : mm)

1.4.1.5 施工手順

オールウッド型木製治山ダムの施工手順は図 1.10 のとおりである。



①横木と縦木を交互に並べる



②接合具 (ラグスクリュー)



③接合具を打ち込むための先孔あけ
(先孔径：φ15mm)



④インパクトレンチでラグスクリューの締め付け



⑤①→③→④を繰り返す、所定の
高さまで積み上げる



⑥ダム下流側に水叩き工を、上流
側に土砂を埋め戻して完成

図 1.10 施工手順

1.4.2 ハイブリッド型木製治山ダム

木材価格の低迷による採算性の悪化、それに伴う森林所有者の施業意欲の低迷等により、全国的に間伐が適切に行われていない場合が多く、間伐が行われても、丸太を搬出し有効利用されているとは言い難い。秋田県では、これまで間伐などの森林整備によって発生する本数調整伐材を木柵工等の緑化基礎工やコンクリート製治山ダムの残存型枠、または木質バイオマス等へ利用することによる間伐材の利用に積極的に取り組んできており、更なる間伐材利用を目指し、鋼材で骨組みされた鋼製枠の中に、中詰め材として間伐丸太（皮付き）を使用し、木材間の隙間には砕石（C-20）を充填した木・鋼混合型の「ハイブリッド型木製治山ダム」が考案された（写真 1.15）⁷⁰⁾。ハイブリッド型木製治山ダムは使用する木材の直径に自由度があるため、使用材料のロスが少ない。設計に当たっては、堤体の構築、中詰め材の単位体積重量、堤体の安定性、中詰め材の流出等について検討を行った。



写真 1.15 ハイブリッド型木製治山ダム

1.4.2.1 堤体の構築

堤体はH型鋼等を骨組みにし、ボルトで連結した鋼製枠を外枠として、壁材には間伐材を素材とした角材（または太鼓落とし）を使用（写真 1.16）し、中詰めには所定の長さにカットした間伐丸太を皮付きのまま縦方向に詰め（写真 1.17）、丸太間の隙間には砕石（C-20）を目潰し材として充填する構造となっている。オールウッド型木製治山ダムと同様、堤体に木材を大量に使用することから重量不足となる恐れがある。したがって、オールウッド型と同様に、堤体は複断面型にし、堤体上流側の埋戻し土砂を釣り合い上載荷重として用いることで堤体の自重を補うことにした（図 1.11）。



写真 1.16 下流側に設置した壁材（角材）



写真 1.17 皮付き間伐材の投入状況

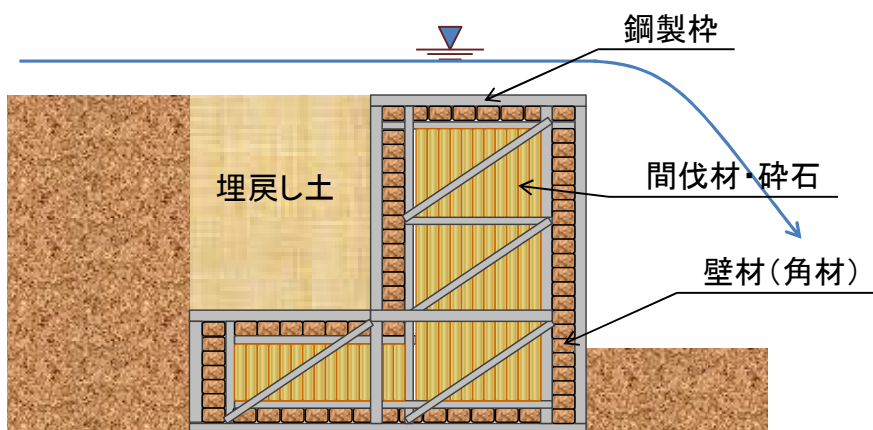


図 1.11 ハイブリッド型木製治山ダム断面図

1.4.2.2 中詰材の単位体積重量

中詰め材（間伐材＋砕石）の単位体積重量は、投入する木材の径、本数、砕石の量によって変化するため、現地にて試験施工を行って重量計測を行い、施工上のばらつきを考慮して決定した。

1.4.2.3 堤体の安定性

堤体の安定性を確認するため、重力式構造物としての転倒、滑動、地盤支持力について土圧等の外力に対する安定性の照査を行った。また、外枠の鋼製枠については、堤体に外力が作用する際の中詰め材の挙動が不明であることから、外力に対して骨組みのみで抵抗させることとして部材ごとの安定性の照査を行った。さらに、実大寸法の供試体による水平載荷試験を行って構造物の安定性の確認を行った（写真 1.18）⁶⁴。



写真 1.18 水平載荷試験

1.4.2.4 中詰材の流出防止

枠構造物にとって、中詰め材の流出による堤体重量の軽量化は、所定の安定性が確保できなくなる恐れがある。そこで、中詰め材の流出防止対策には、壁材として堤体上下流面に、底面材として底面に間伐材を整形した角材（または太鼓落とし）を隙間なく設置した（写真 1.16）。なお、将来的には腐朽によって壁面材が破損し、中詰め材が流出することも考えられるので、下流面には追加の壁材を取り付けられる構造とした。中詰め材の流出は施設の安定性に大きく影響することが考えられるので、今後、現地モニタリング調査を実施して効果を検証していく予定である。

1.4.2.5 施工手順

ハイブリッド型木製治山ダムの施工手順は図 1.12 のとおりである。



①鋼製枠を組み立てる



②鋼材の隙間に木材を落とし込み、壁を作る



③木材（皮付き丸太）を立て込む



④隙間に砂利を投入し充填する



⑤中詰め材が流出しないよう、天井に木材を敷き詰める



⑥鋼板で固定して完成

図 1.12 施工手順

1.4.3 これまでに得られた知見と課題

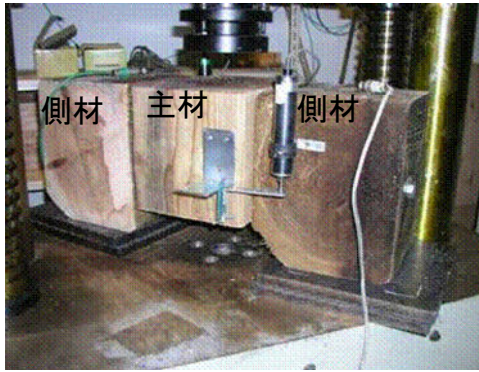
1.4.3.1 強度試験

オールウッド型木製治山ダムは単材を積み上げて堤体を構築しているため、単材同士の連結部が構造上最も重要であり、接合部単体としての強度特性とそれらの集合体として構築される堤体の強度特性を定量的に評価する必要がある。そこで、強度試験では、接合部単体の引き抜き試験とせん断試験、実大寸法の水平載荷試験を行った⁶⁸⁾。

(1) 接合部試験－せん断耐力

接合部のせん断性能を評価するため、ラグスクリュー接合部の一面せん断試験を行った(写真 1.19)。供試体にはオールウッド型木製治山ダムに用いられる断面寸法と同一のスギ心持ち材(幅 300mm、高さ 250mm)とラグスクリュー(φ16mm、L=460mm(ねじ部 170mm))を用い、ラグスクリューの打ち込み深さは実施工と同じ 200mm とした。試験体数は 15 体、常水状態にある使用環境状態を想定して湿潤状態(平均含水率約 150%)とした。試験体は写真 1.19 に示すように主材の両側に側材を配置し、それぞれの側材から主材に向けてラグスクリューを打ち込み、2つの接合面を有する一面せん断試験体となるように製作した。オールウッド型木製治山ダムの堤体は単材を千鳥状に組み上げる構造のため、偶数段と奇数段で木材の繊維方向に対するラグスクリューの打ち込み方向が異なる。そこで、試験は主材の繊維方向加力(側材が繊維直交方向、RLR)、主材の繊維直交方向加力(側材が繊維方向、LRL)のそれぞれについて行った。

試験結果を図 1.13 に示す。図中に示した降伏耐力および終局耐力の計算値は、木質構造の接合部の設計で用いられるヨーロッパ型降伏理論式(EYT 式)⁷¹⁾を用いて求めたもので、EYT 式の計算結果では、ラグスクリューの打ち込み長さが 150mm 以上であれば RLR と LRL で違いがないが、試験でもこれと同じ結果となった。また、長期及び短期許容せん断耐力としてそれぞれ 3.3kN、6.6kN が得られ、オールウッド型木製治山ダムの安定計算(有効高 3000mm)で算定されるラグスクリュー 1 本当たりのせん断荷重約 0.82kN⁶⁸⁾に対して十分な安全性を示すものであった。



(a) 繊維方向加力(RLR)



(b) 繊維直交方向加力(LRL)

写真 1.19 せん断試験

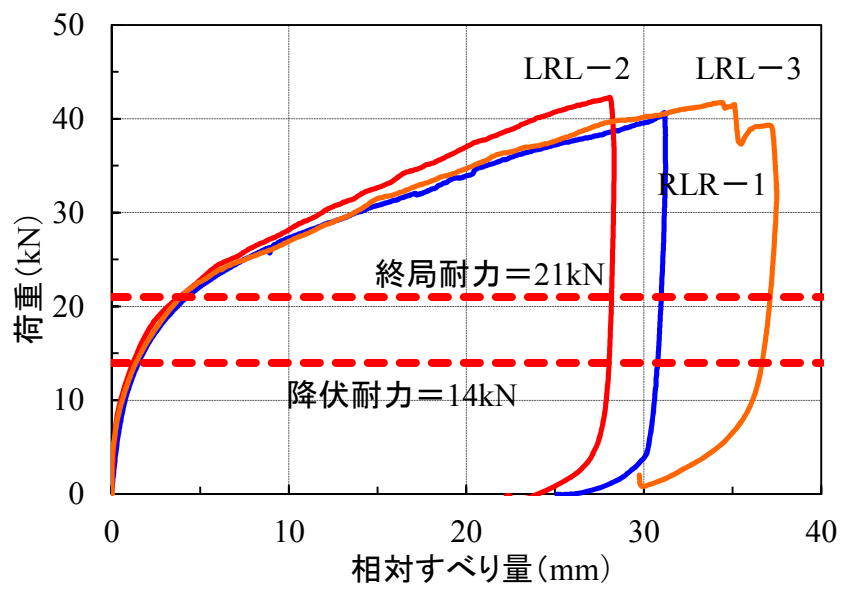


図 1.13 荷重と相対すべり量の関係

(2) 接合部試験—引き抜き耐力

木部間接合部の引張強度を評価するため、ラグスクリューの引き抜き試験を行った(写真 1.20)。供試体に用いたスギ材、ラグスクリューの寸法、打ち込み深さはせん断試験と同じで、試験体数は8体、常水状態にある使用環境状態を想定して湿潤状態(平均含水率約130%)とした。なお、木材の強度は繊維飽和点(含水率28%)以上ではほとんど変わらない^{72), 73)}とされていることから、余裕をみて試験体の含水率は100%以上となるように設定した。

試験の結果、接合部引き抜き耐力として22.25kN、および木質構造の設計で用いられる長期及び短期許容耐力としてそれぞれ7.42kN、14.84kNが得られた(図 1.14)。なお、引き抜き試験によって得られた結果は、オールウッド型木製治山ダムの安定計算(有効高3000mm)で算定されるラグスクリュー1本当たりの引張荷重約0.83kN⁶⁸⁾に対して十分な安全性を示すものであった。



写真 1.20 引き抜き試験の状況(左)と試験後の状況(右)

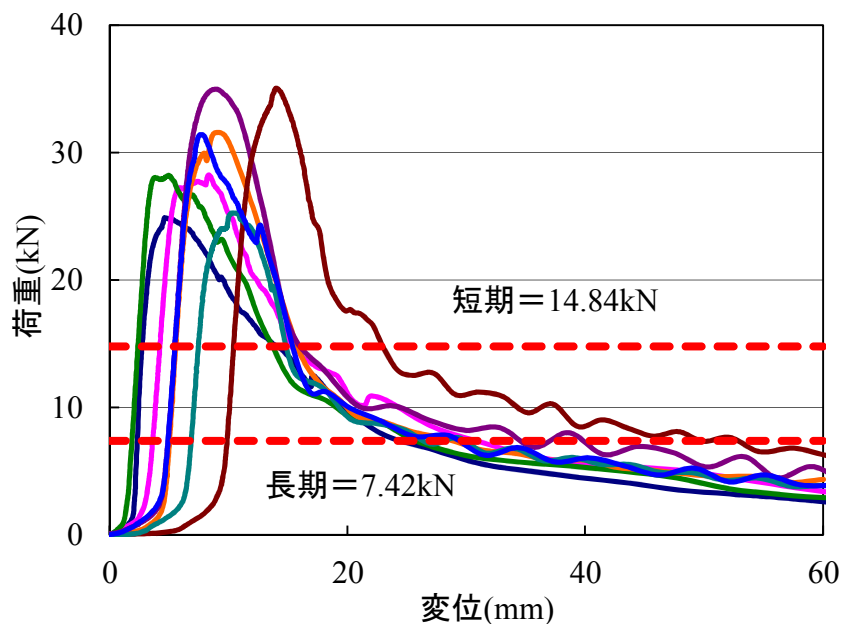


図 1.14 荷重と相対すべり量の関係

(3) 実大の堤体水平載荷試験－堤体の耐荷力

堤体水平載荷試験は、単材を連結させた集合体としての耐荷力性能を定量的に評価するため、実大寸法の供試体を作製し、行った（写真 1.21）^{68), 74), 75)}。試験は、安定計算上最もクリティカルとなる変断面の A-B 面より上部の堤体（高さ 2000mm、図 1.15）を対象に行った。供試体は、幅 300mm、高さ 250mm、長さ 900mm および 1500mm のスギ材を幅 900mm、奥行き 1500mm、高さ 2000mm となるように組み上げた。接合具はすべてせん断試験、引き抜き試験と同じ寸法、形状のラグスクリューを用いた。

試験の結果を図 1.16 に示す。堤体の耐荷力は 106kN であり、安定計算で算定される設計値 10.5kN に対して十分な安全率（約 10）を有することが明らかになった。最終的な破壊は土台と 1 層目の上流側ラグスクリューの引き抜け（写真 1.22）であったが、図 1.17 に示すように 1 段目に最大水平変位 17.6mm が現れていることから、ラグスクリューには引張力とせん断力が同時に作用する複合応力が生じていたことが示された。



写真 1.21 堤体水平載荷試験

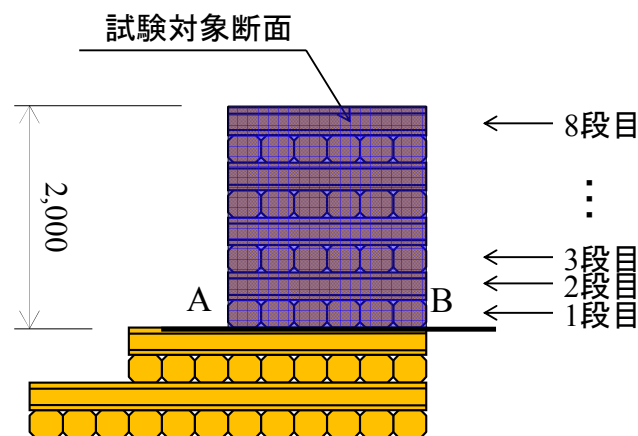


図 1.15 試験対象とした断面（単位：mm）

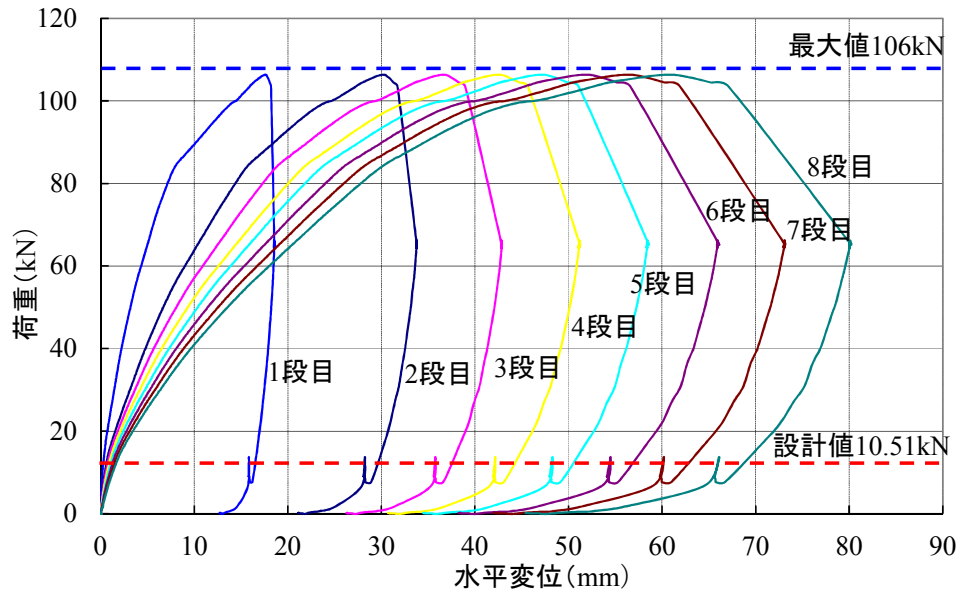


図 1.16 荷重と水平変位の関係



写真 1.22 上流側ラグスクリューの引き抜け

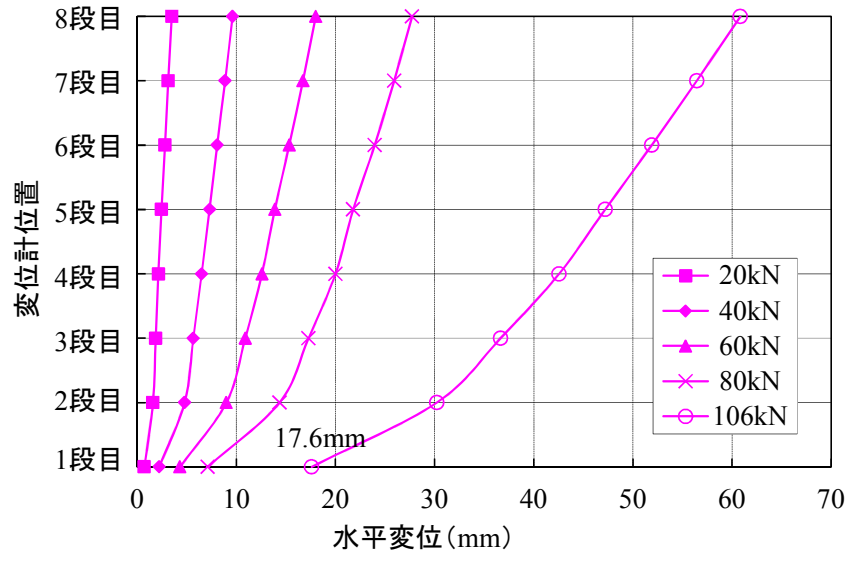


図 1.17 各荷重レベルでの堤体の変位

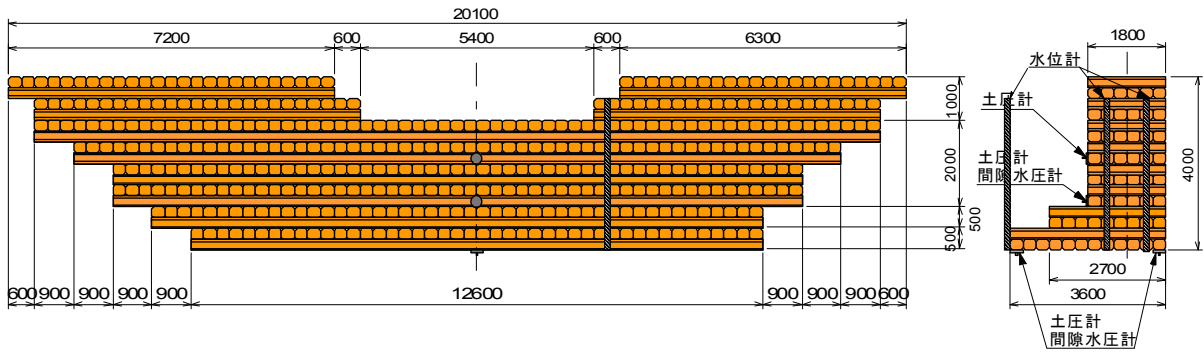


図 1.19 計測機器取り付け位置 (単位: mm)



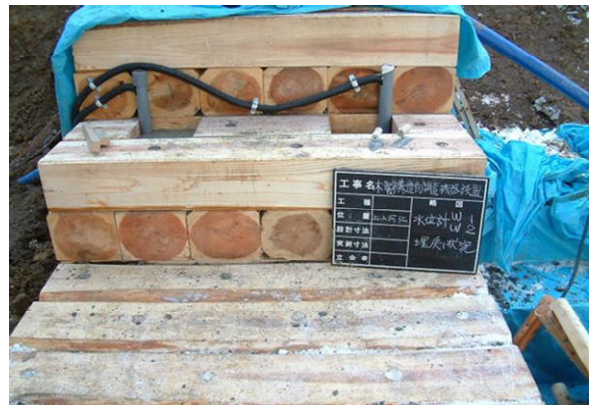
堤体底部の土圧計、水圧計



堤体上流側の土圧計、水圧計



水位計



計器取付け状況

写真 1.23 計器取付け状況

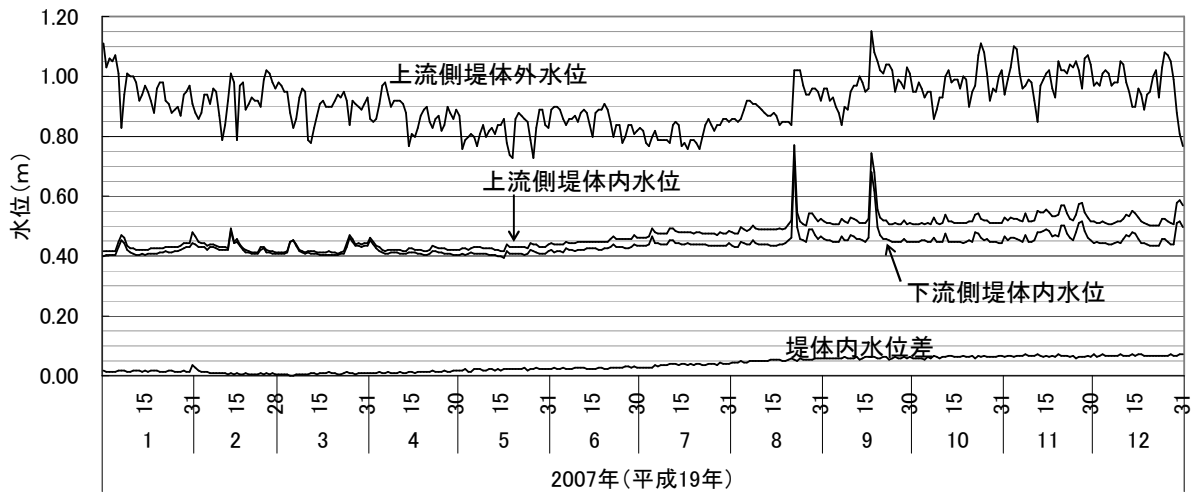


図 1.20 計測結果 (水位)

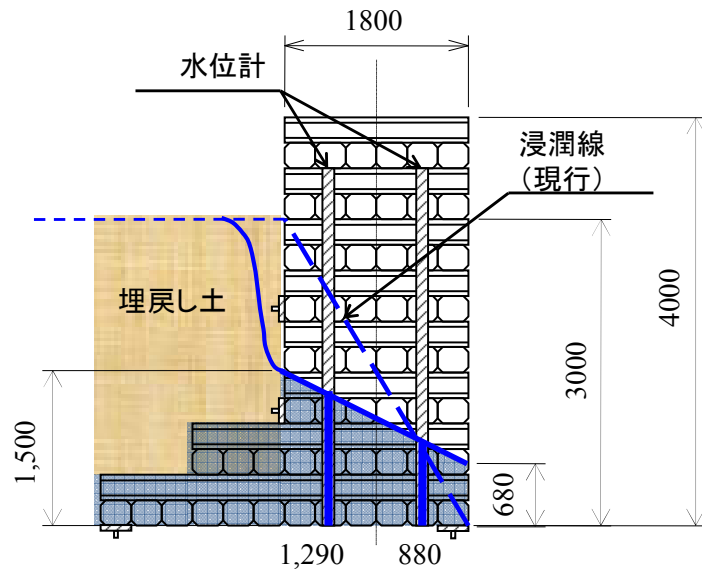


図 1.21 水位の位置 (単位 : mm)

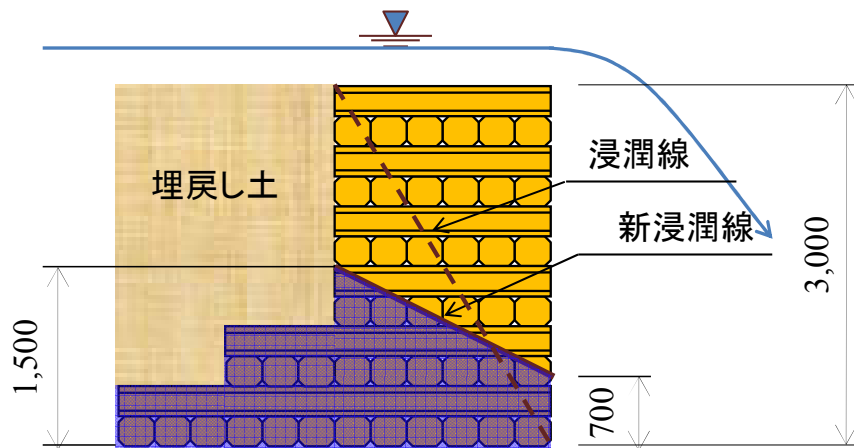


図 1.22 新浸潤線の位置 (単位 : mm)

(2) 堤体と基礎地盤間の摩擦係数

基礎地盤との摩擦係数を算出するため、実大材の杵ダム型木製治山ダムを作製し、水平載荷試験を行った（写真 1.24）。

荷重と水平変位の関係を図 1.23 に、木材、中詰材の重量、体積の測定結果、およびこれらの値から求めた単位堆積重量を表 1.1 に示す。試験体が滑動を始めたのは水平荷重が 7.06kN に達したときである。したがって、この最大水平荷重と試験体の自重から摩擦係数 f を求めると、

$$f = 7.06 / 10.28 = 0.69 \quad (1)$$

が得られる。よって、安定計算に用いる堤体と基礎地盤間の摩擦係数は 0.70 とした。なお、最大荷重時の鉛直変位は±1mm 程度であった。



写真 1.24 水平載荷試験（杵ダム型）

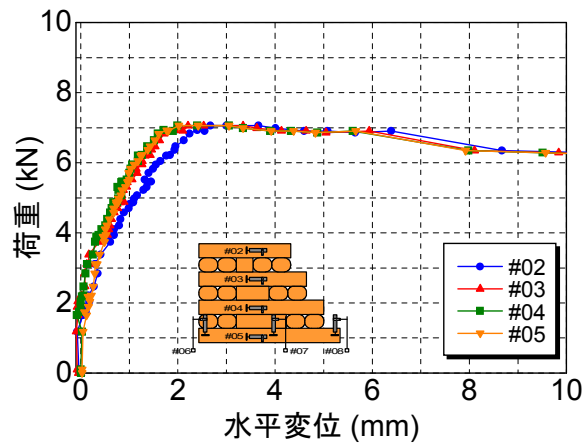


図 1.23 荷重と水平変位の関係

表 1.1 重量測定結果

区分	重量 (kN)	体積 (m ³)	単位体積重量 (kN/m ³)
中詰材	2.56	0.102	25.10
木材	7.72	1.53	5.05
合計	10.28	1.63	30.15

(3) 木材の単位体積重量

オールウッド型木製治山ダム施工地に重量測定用の実大材を残置し、約1年後に回収し、単位体積重量の測定を行った。結果を表1.2に示す。安定計算を行う放水路部で特に重量の増加が認められ、現地設置約1年後の単位体積重量は約800kg/m³となった。他県での測定結果によると、単位体積重量が約1000kg/m³となったといった報告事例もある。このことから、オールウッド型木製治山ダムの安定計算に用いる木材の単位体積重量は800kg/m³とした。

表 1.2 単位体積重量

部位	No.	幅 (mm)	高さ (mm)	長さ (mm)	重量0(kg) 2003/2/26	重量1(kg) 2004/3/18	初期含水率 MC0(%)	推定含水率 MC1(%)	単位体積重量0 (kg/m ³)	単位体積重量1 (kg/m ³)
放水路	B-1	302	251	1763	72.88	102.00	85.7	120.3	574	803
	B-2	302	250	1763	77.28	101.00	133.8	175.2	611	799
	B-3	301	250	1764	83.36	98.00	124.5	146.5	661	777
	平均								615	793
袖部	W-1	300	251	1801	71.44	84.00			555	652
	W-2	301	250	1799	84.66	95.00			658	739
	W-3	301	251	1800	70.16	74.00			543	573
	平均								585	654

1.4.3.3 枠ダム型との比較⁶³⁾

(1) 木材使用量

2010 年度末までに秋田県農林水産部の発注により施工されたオールウッド型木製治山ダムおよびハイブリッド型木製治山ダムはそれぞれ 22 基、9 基に上る（表 1.3）。なお、同部では他県の施工事例を参考に枠ダム型の木製治山ダムもこれまでに 32 基設置しているが、近年は秋田県独自のオールウッド型の施工数がより多くなっている。1 基あたりの木材使用量は、オールウッド型では最大約 360m³/基、平均約 180m³/基、ハイブリッド型木製治山ダムでは最大約 210m³/基、平均約 120m³/基であった。枠ダム型における木材使用量は 20～50m³/基程度であるので、オールウッド型およびハイブリッド型の木材使用量は枠ダム型の約 5～7 倍/基となり、地域産材の需要拡大に非常に効果的であることが示された。また、オールウッド型およびハイブリッド型は建築資材等として需要が低い木材の有効利用という目的も達しており、この点においても地域産材の需要拡大に非常に効果がある事が示された。

表 1.3 オールウッド型およびハイブリッド型木製治山ダムの施工実績
(2010年度末時点)

区分	No.	施工年度		施工地		構造物規模			
		西暦	年号	市町村名	地区名	延長 (m)	高さ (m)	幅 (m)	体積 (m ³)
オール ウッド 型 木 製 治 山 ダ ム	1	2001	H13	北秋田市	槐岱道下	11.1	1.5	1.8	39.2
	2	2001	H13	北秋田市	槐岱道下	16.5	3.0	1.8	84.2
	3	2002	H14	大館市	田の沢	27.0	3.0	1.8	148.1
	4	2002	H14	北秋田市	与助岱	21.0	2.5	1.8	188.9
	5	2002	H14	大館市	木山沢	42.6	2.5	1.8	350.2
	6	2002	H14	上小阿仁村	中茂	20.7	2.5	1.8	127.4
	7	2002	H14	上小阿仁村	中茂	20.1	3.0	1.8	179.3
	8	2003	H15	大館市	炭谷沢	35.1	3.0	1.8	324.6
	9	2004	H16	五城目町	森山	15.9	3.0	1.8	172.2
	10	2005	H17	小坂町	萩平	12.9	2.0	1.8	110.5
	11	2005	H17	五城目町	森山	18.6	2.5	1.8	164.8
	12	2006	H18	大仙市	坊田黒沢	24.9	3.0	1.8	173.0
	13	2007	H19	鹿角市	松館	18.0	3.0	1.8	184.4
	14	2007	H19	三種町	田ノ沢	13.5	3.0	1.8	100.3
	15	2007	H19	三種町	田ノ沢	16.8	2.5	1.8	96.4
	16	2007	H19	大仙市	坊田黒沢	37.2	2.5	1.8	230.4
	17	2008	H20	美郷町	七滝	30.9	2.5	1.8	362.0
	18	2008	H20	羽後町	太倉	18.0	3.0	1.8	133.4
	19	2009	H21	由利本荘市	鮎上沢	20.4	3.0	1.8	128.2
	20	2010	H22	北秋田市	幸屋堂ノ前	17.4	3.5	1.8	215.4
	21	2010	H22	北秋田市	幸屋堂ノ前	16.8	3.5	1.8	159.5
	22	2010	H22	北秋田市	菅生	22.8	2.5	1.8	203.0
合計(オールウッド型)									3,875.4
平均(オールウッド型)									176.2
ハイ ブリ ッド 型 木 製 治 山 ダ ム	1	2007	H19	美郷町	大台野	23.0	3.0	1.5	153.4
	2	2008	H20	三種町	田ノ沢	12.5	4.0	1.5	94.3
	3	2008	H20	三種町	田ノ沢	19.5	4.5	1.5	205.9
	4	2008	H20	大仙市	坊田黒沢	27.5	4.0	1.5	157.4
	5	2008	H20	北秋田市	下ノ沢	15.0	3.5	1.5	65.0
	6	2008	H20	三種町	鶺鴒木の沢	16.5	3.5	1.5	112.4
	7	2009	H21	北秋田市	下ノ沢	16.0	4.5	1.5	66.1
	8	2009	H21	男鹿市	毘沙門	19.0	4.0	1.5	104.2
	9	2009	H21	三種町	田ノ沢	13.5	6.0	1.5	154.0
合計(ハイブリッド型)									1,112.7
平均(ハイブリッド型)									123.6

(2) 経済性

コンクリート製と木製3種（オールウッド型、ハイブリッド型、枠ダム型）の治山ダムの概算直工費を表 1.4 に示す。治山ダムとして一般的に用いられるコンクリート製についても併せて示した。なお、枠ダム型およびオールウッド型木製治山ダムでは、堤体下流側に水叩き工（写真 1.25）を設置することから、コンクリート製ほど根入れを必要としないため、コンクリート製に比べダム全高は低い。

直接工事費を比較した結果、オールウッド型木製治山ダムは、コンクリート製に比べ約 1.8 倍、枠ダム型に比べ約 1.4 倍のコスト高となった。木材使用量が枠ダム型の 5～7 倍程度と多く、その分コスト高に直結してはいるが、直接工事費に占める木材の材料費と工事費の割合は 5 割程度に過ぎないため、接合金物として用いているラグスクリューのコスト高が要因である。したがって、部材接合部の改良やそれに伴う工費縮減によって、コスト縮減を図ることが今後の課題と言える。一方、ハイブリッド型はコンクリート製に比べ約 1.3 倍高く、枠ダム型と同程度となった。

表 1.4 概算直工費

種 別	延長 (m)	高さ (m)	体積 (m ³)	直工費 (円)	単価比率 (%)
コンクリート製	23.5	3.5	180.0	6,120,000	100.0
木製枠ダム型	23.1	2.5	156.0	8,112,000	132.5
木製オールウッド型	23.1	2.5	188.0	11,280,000	184.3
木製ハイブリッド型	22.5	3.0	165.0	7,875,000	128.7



写真 1.25 オールウッド型木製治山ダムの水叩き工

1.4.3.4 まとめ

これまでの一連の調査研究によって、以下の点が明らかとなった。

- 1) オールウッド型木製治山ダムにおいて、構造上最も重要である木材間接合部の接合強度はせん断力、引き抜き力ともに十分な耐力を有している。
- 2) オールウッド型木製治山ダムにおいて、構造上最も重要である変断面位置には引張力のみならず、せん断力も同時に作用する複合応力状態である。
- 3) 現地モニタリング調査により、堤体内水位勾配を結んだ水位線は、堤体上流端で約 1500mm、下流端で約 700mm となり、この水位線より下部の堤体について浮力を考慮すればよい。
- 4) 堤体と基礎地盤の摩擦係数は 0.70 である。
- 5) 現地暴露試験より、安定計算に用いる木材の単位体積重量は 800kg/m^3 が妥当であることが明らかになった。
- 6) 木製治山ダムの木材使用量は、オールウッド型木製治山ダムで最大約 $360\text{m}^3/\text{基}$ 、平均約 $180\text{m}^3/\text{基}$ 、ハイブリッド型木製治山ダムでは最大約 $210\text{m}^3/\text{基}$ 、平均約 $120\text{m}^3/\text{基}$ であった。枠ダム型の木材使用量 ($20\sim 50\text{m}^3/\text{基}$ 程度) に比べ、1基あたり約 5~7 倍の使用量となり、地域産材の需要拡大に非常に効果的であることが示された。
- 7) オールウッド型木製治山ダムの直接工事費はコンクリート製に比べ約 1.8 倍、枠ダム型に比べ約 1.4 倍のコスト高となった。ハイブリッド型木製治山ダムのコストはコンクリート製に比べ約 1.3 倍高く、枠ダム型とは同程度となった。

これらの知見が得られた一方、木製治山ダムは一般的なコンクリート製や鋼製の治山ダムに比べてコストが高いことや、古いものでも 10 数年しか経過しておらず、耐久性に関するデータが少なく将来の維持管理手法が確立していないこと、コンクリート製や鋼製から木製に代替することの環境影響評価がなされていないなど、解決すべき課題も多い。

そこで本研究では、研究段階で課題として抽出された以下の 3 点について検討を行うこととした。

- 1) オールウッド型木製治山ダムのコスト縮減（構造の改良、施工性の改善）
- 2) 木製治山ダムの腐朽実態の把握と健全度評価
- 3) 木製治山ダムの環境影響評価

第 2 章以降では、これらの課題についての詳細な検討について述べる。

第2章 オールウッド型木製治山ダムの強度性能

2.1 はじめに

オールウッド型木製治山ダムでは接合具にφ16mmのラグスクリューを使用しているが、ラグスクリューはせん断抵抗を期待した用途が一般的であり、引張抵抗を期待することは好ましくないとされる⁶²⁾。しかし、ダム堤体内部の一部のラグスクリューには土圧や水圧により、せん断力や引張力が作用する^{63), 68), 74), 75)}。そこで、引張力が作用する位置にラグスクリューを使用することで構造物の安定性にどのような影響を与えるのかを検証するため、実大寸法の載荷試験^{63), 68)}や引き抜き試験⁷⁸⁾を行い、大断面木質土木構造接合部にラグスクリューを用いたときの引き抜き性能を明らかにするとともに、オールウッド型木製治山ダムの接合具として使用した際の安全性について明らかにした。

その一方で、オールウッド型木製治山ダムは大量の木材を使用することから、木材利用の観点からは有用な施設といえるが、材料加工費の高い木材を大量に利用することから、コスト面ではコンクリート製治山ダムに比べ高く^{63), 79)}、治山ダムへの木材利用をより一層高めるには、コスト縮減が急務である。しかし、木材の有効利用を考えると木材使用量を減らすのは好ましくなく、その他の部分でコスト縮減を図る必要がある。

オールウッド型木製治山ダムで標準的に使用しているラグスクリューはφ16mm、長さ460mmと長尺なため、市場に流通しておらず、特注品として高価な材料となっている。そのため、ラグスクリューの材料費はオールウッド型木製治山ダム1基の建設コストのうち、約20~30%を占めている。一方、鉄筋コンクリートの鉄筋として用いられている異形棒鋼は市場で大量に流通し、材料費ではラグスクリューの1/10以下と安価なため、異形棒鋼をラグスクリューの代替として用いることができれば、1基あたり数百万円のコスト縮減効果が期待できる^{78), 79)}。

そこで、大断面木質土木構造接合部に異形棒鋼を用いたときのせん断性能および引き抜き性能を明らかにし、ラグスクリューの代替として異形棒鋼を使用することが可能かどうかを評価することを目的として、接合部の強度試験を行った。さらに、接合部強度試験で得られた知見が実構造物において適用可能であるかどうか、異形棒鋼を用いた時の堤体の耐荷力を評価するため、実大の堤体の供試体を対象に水平載荷試験を行い、異形棒鋼の有用性について検証を行った。

2.2 接合部強度試験

接合部強度試験では、ラグスクリューの代替として異形棒鋼を使用することの妥当性を検証するため、ラグスクリューと異形棒鋼について1面せん断試験、引き抜き試験および面圧試験を行った⁸⁰⁾。

2.2.1 実験方法

2.2.1.1 面圧試験

木質構造接合部のせん断耐力の推定には、ヨーロッパ型降伏理論（以下、EYT理論と呼ぶ）⁷¹⁾が一般に適用されている。EYT理論では、木材およびボルトを完全剛塑性体と仮定し、木材の面圧強度およびボルトの曲げ強度から接合部のせん断耐力を推定する。そのため、木材およびボルトの各種強度を適切に評価して用いることが重要となる。そこで、木材の面圧強度を把握することを目的として面圧試験を行った。

試験体は後述する一面せん断試験で用いたスギ試験体よりランダムに取り出した。試験は繊維平行方向加力および繊維直交方向加力とし、試験体数はそれぞれ8体とした。試験体寸法は幅100mm、厚さ100mm、高さ150mmとし、試験体の片側端部にφ16mmの半円形の溝を設けた。試験は写真2.1に示すように、半円形の溝にφ16mmの普通ボルトを押し込むように行い、加力速度は一面せん断試験と同じ3mm/min.とした。試験ではボルトと木材の相対変位を測定し、荷重－変位関係を評価した。試験体含水率は面圧試験終了後、試験体をそのまま用いて全乾法により求めた。その結果、繊維平行方向加力の試験体含水率は39.6%～89.3%で平均66.2%、標準偏差16.8%、繊維直交方向加力の試験体含水率は42.2%～116.7%で平均71.5%、標準偏差22.6%が得られた。なお、試験体は常水状態にある治山ダムの使用環境状態を想定して、未乾燥材を用いている。

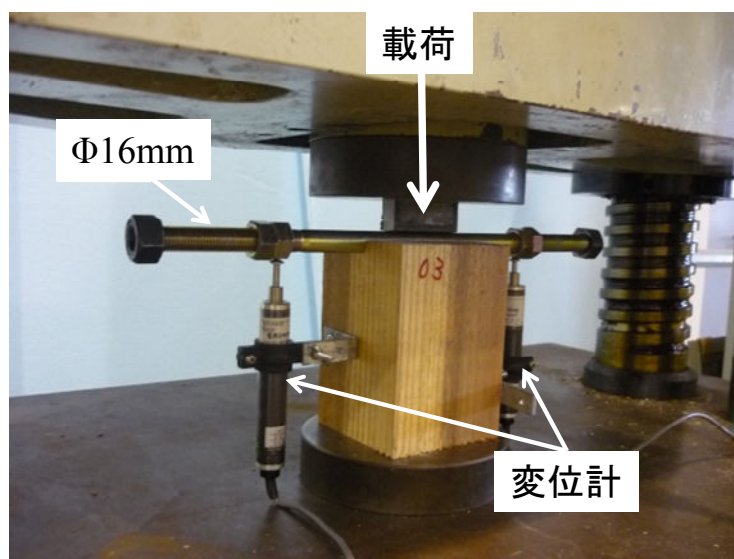


写真 2.1 面圧試験

2.2.1.2 一面せん断試験

一面せん断試験の試験体には秋田県産スギ心持ち材（幅 300mm、高さ 300mm、奥行き 225mm）と接合具として異形棒鋼（材質；SD295A、呼び径：D16、L=500mm、図 2.1）およびラグスクリュー（材質；SWRCH10、 ϕ 16mm、L=460mm（ねじ部 170mm、頭部座金含む）、図 2.2）を用いた。接合具の主材への打ち込み深さは、オールウッド型木製治山ダムの施工現場で実際に採用されている 200mm に加え、接合具の短尺化とそれに伴う施工作業の軽減によるコスト縮減を検討するため、100mm と 150mm の計 3 種類とした。

接合具の先孔は、現場で採用されている ϕ 15mm とし、ラグスクリューの打ち込みにはインパクトレンチを用いた。異形棒鋼にはボルト頭がないため、ハンマードリルの先端に内径 18mm、深さ 30mm のアースアダプタを取り付けて打込んだ⁷⁸⁾。ラグスクリューで打ち込み深さを 200mm とする際、試験体のサイズが 300mm のため、既存のラグスクリューでは打ち込み深さが足りない。そこで、ラグスクリューで打ち込み深さ 200mm とする場合は、側材に深さ 50mm の座掘り加工を施した後、打込んだ。せん断試験に用いる試験体は、図 2.3 に示すように主材の両側に側材を配置し、それぞれの側材から主材に向けて接合具を打ち込み、2 つの接合面を有する一面せん断試験体となるように製作した。オールウッド型木製治山ダムの堤体は写真 2.2 に示すように、スギ心持ち材をダムの長さ方向と幅方向に交互に並べ、積み上げて構築する構造のため、土圧や水圧などの作用により偶数段と奇数段で接合具の木材に対する加力方向が異なる。そこで、せん断試験は主材に対して繊維平行方向加力（側材が繊維直交方向、RLR）、繊維直交方向加力（側材が繊維方向、LRL）のそれぞれについて行い、加力速度は 3mm/min とした。試験条件と試験体数を表 2.1 に示す。載荷は主材上面に載せた鋼板（250mm×220mm、厚さ 12mm）を介して主材に加力するようにして行った（図 2.3）。試験は変位が 30mm を超えるまで行い、変位は主材と側材間の相対変位を 2 つの変位計を用いて測定し、その平均値を求めた。試験体含水率はせん断試験終了後、小片を切り出し全乾法により求めた。その結果、57.8%～167.1%で平均 84.5%、標準偏差 23.2%が得られた。

実構造物において、接合具に作用するせん断力は積み重ねた木材間で生じるが、堤体の下部では構造物の自重によってせん断力に対する摩擦抵抗も大きくなる。この摩擦抵抗は構造物の安定性に対して安全側に作用するため、実験では木材間に作用する摩擦抵抗は考慮しなかった。

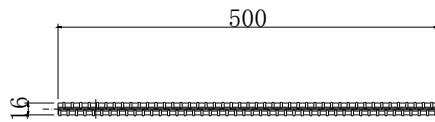


図 2.1 異形棒鋼の寸法 (単位: mm)

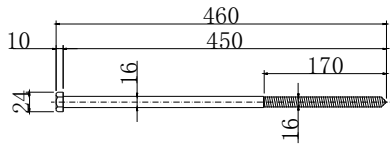
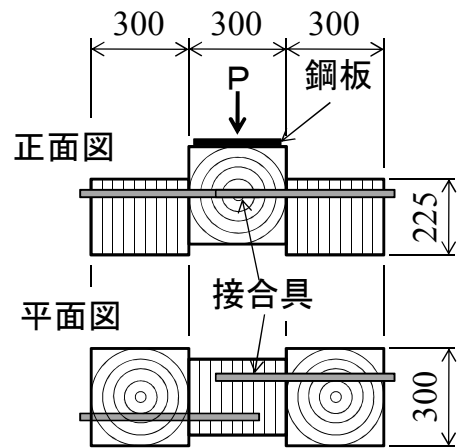
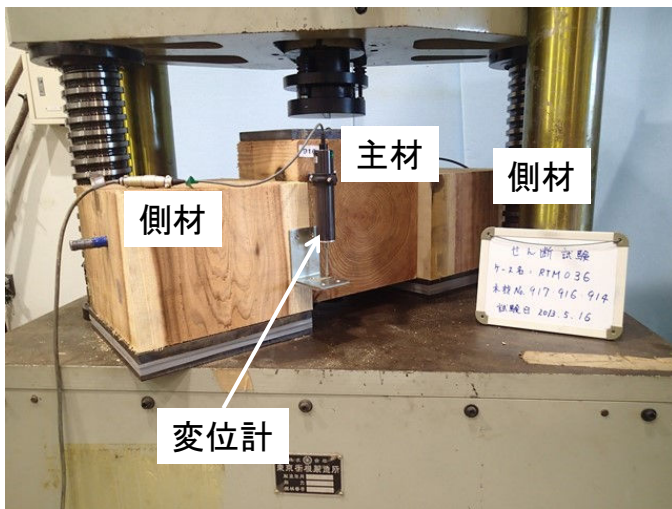
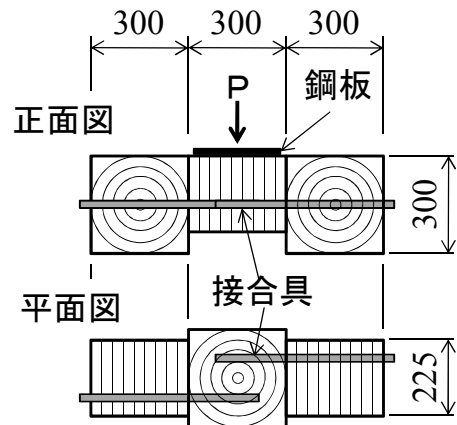
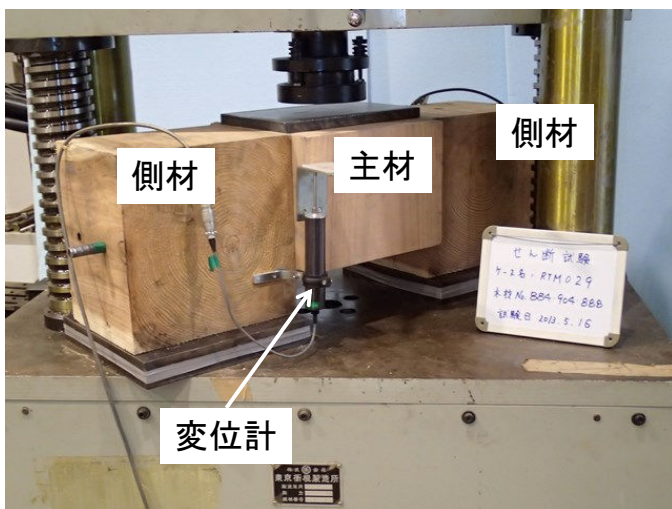


図 2.2 ラグスクリューの寸法 (単位: mm)



(a) 繊維直交方向加力 (側材が繊維方向、LRL)



(b) 繊維平行方向加力 (側材が繊維直交方向、RLR)

図 2.3 せん断試験 (単位: mm、打ち込み深さ 200mm)



写真 2.2 オールウッド型木製治山ダムの施工状況（接合具の打ち込み）

表 2.1 せん断試験体数

打ち込み深さ (mm)	異形棒鋼		ラグスクリュー	
	RLR	LRL	RLR	LRL
100	2	2	-	2
150	4	2	2	2
200	2	2	2	2

Note: RLR：繊維平行方向加力、 LRL：繊維直交方向加力

2.2.1.3 引き抜き試験

引き抜き試験の試験体は一面せん断試験で用いた心持ちスギ材試験体よりランダムに取り出した。接合具には一面せん断試験と同サイズ、同材質の異形棒鋼とラグスクリューを用いた。試験体数は7体、接合具の打ち込み深さは一面せん断試験と同様に、100mm、150mm、200mmの3種類とし、7体の木材に異形棒鋼、ラグスクリューそれぞれについて上記打ち込み深さごとにせん断試験と同様の方法で打ち込んだ。実際の現場施工では、心持ち材のほぼ中央に接合具が打込まれる（写真2.2）ため、図2.4に示すように、各孔の打ち込み位置は実施工状況に合わせて材の中心部となるようにし、かつ各孔は接合具径（ $\phi 16\text{mm}$ ）の3倍以上離し、割れなどによりそれぞれの試験に影響がないようにした。同一木材を用いたこれらの試験では、一つのケースが終わり次第、次のケースを行うように順次行った。

加力速度は一面せん断試験および面圧試験と同じ $3\text{mm}/\text{min}$ とした。試験の状況および概要を図2.5に示す。試験は供試体の上面にせん断試験で使用した鋼板（ $250\text{mm}\times 220\text{mm}$ 、厚さ 12mm 、中央穴径 18mm ）を挟み込み、接合具が引き抜けるまで行い、変位は2本の変位計を用いて試験機のクロスヘッドの移動量を測定し、その平均値を求めた。試験体含水率は試験終了後、小片を切り出し、全乾法により求めた。その結果、 $48.1\%\sim 109.0\%$ で平均 70.9% 、標準偏差 21.0% が得られた。なお、引き抜き試験終了後、試験体を解体し、すべての試験において隣接する孔どうしが干渉しなかったことを確認した（写真2.3）。

接合具に作用する引張力は堤体下部で発生するが、その部分では構造物の自重によって引き抜き抵抗も大きくなる。この引き抜き抵抗は構造物の安定性に対して安全側に作用するため、実験では考慮しなかった。

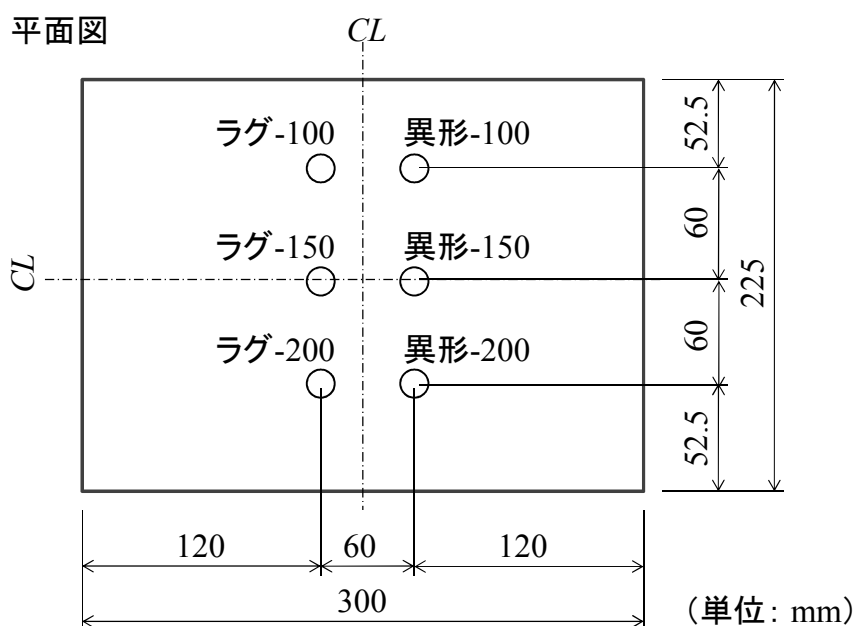


図 2.4 引き抜き試験体の打ち込み位置
(ラゲ：ラグスクリュー、异形：异形棒鋼)

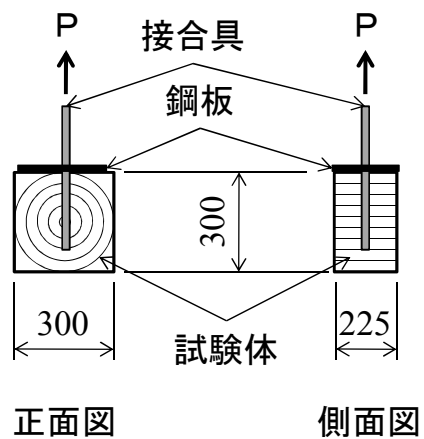
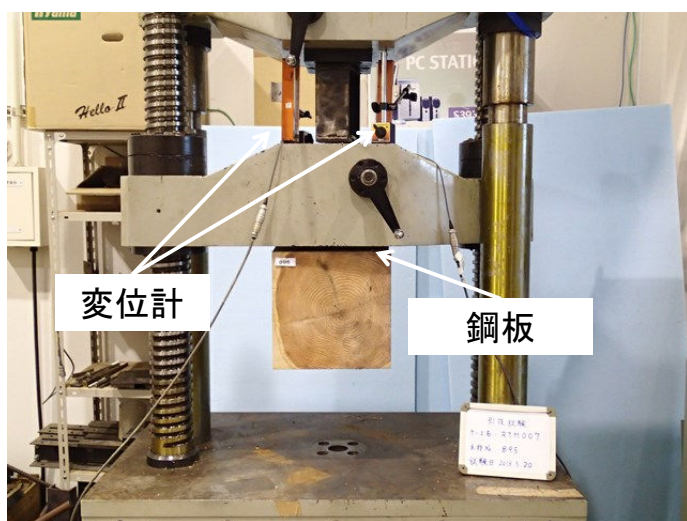


図 2.5 引き抜き試験の状況 (単位 : mm).

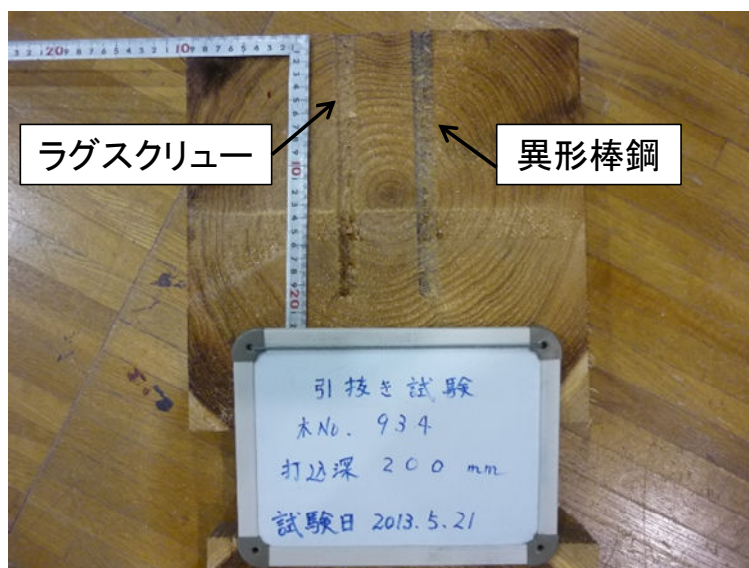


写真 2.3 引き抜き試験後の引き抜け状況 (打ち込み深さ 200mm)

2.2.2 実験結果

2.2.2.1 面圧試験

面圧応力は面圧試験から得られた荷重を試験体厚さ（100mm）とボルトの直径（16mm）で除して求めた。面圧応力を求めた後、面圧強度は ASTM-D5764⁸¹⁾に準じ、5% off-set 法から求めた。5% off-set 法による面圧強度の算出方法は、図 2.6 に示すように、応力-変位曲線上の 0.1Pmax と 0.4Pmax を結んだ直線を丸鋼の直径の 5%相当の変位だけ X 方向に平行移動し、応力-変位曲線との交点の面圧応力を面圧強度とする方法である。

しかし、繊維直交方向加力の試験においては、図 2.7 に示すように明確な降伏点が見られず、5% off-set 法が適切とは判断しづらい場合がある。そこで、面圧応力を求めることができた試験体の結果を基に降伏変位を推定し、降伏変位までの最大面圧応力を繊維直交方向の面圧強度とした。図 2.8 に示すように、5% off-set 法より求めた面圧強度と降伏変位 2.5mm 時の面圧強度の値がほぼ一致することが分かった。この結果を基に、繊維直交方向加力の試験における面圧強度は、降伏変位 2.5mm 時の面圧強度と定めることとした。以上の結果は、滝内らの実験結果^{72), 73)}と一致する。

面圧試験の結果を表 2.2 に示す。繊維平行方向および繊維直交方向の面圧強度は、繊維平行方向加力では平均 14.87N/mm²、標準偏差 1.94N/mm²、繊維直交方向加力では平均 3.32N/mm²、標準偏差 0.56N/mm² が得られた。

既往の研究より、木材の面圧強度は接合具径、評価法および加力方向にかかわらず、木材の密度の増加に伴い直線的に増加するという結果が得られている⁸²⁾⁻⁸⁴⁾。今回の試験で得られた試験体ごとの密度と面圧強度の関係を図 2.9 に示す。既往の研究結果と同様、面圧強度は密度の増加に伴い増加する結果が得られた。増加の程度は繊維直交方向加力の場合よりも繊維平行方向加力で顕著であった。

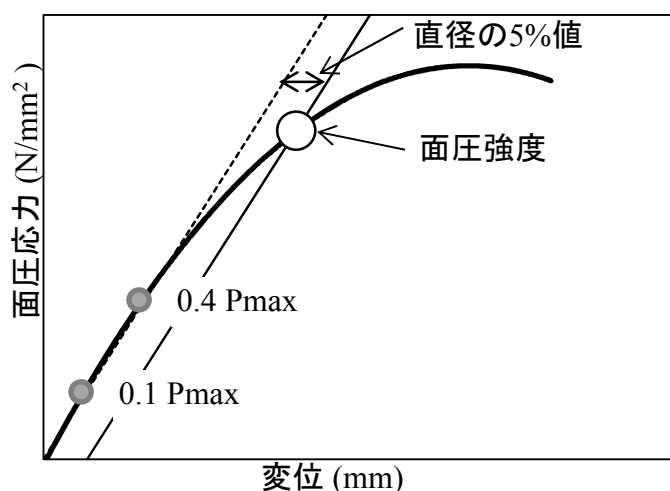


図 2.6 面圧強度の評価方法

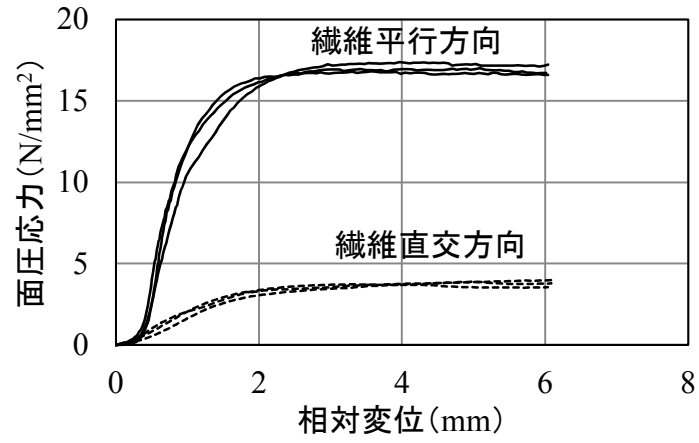


図 2.7 面圧応力-変位関係

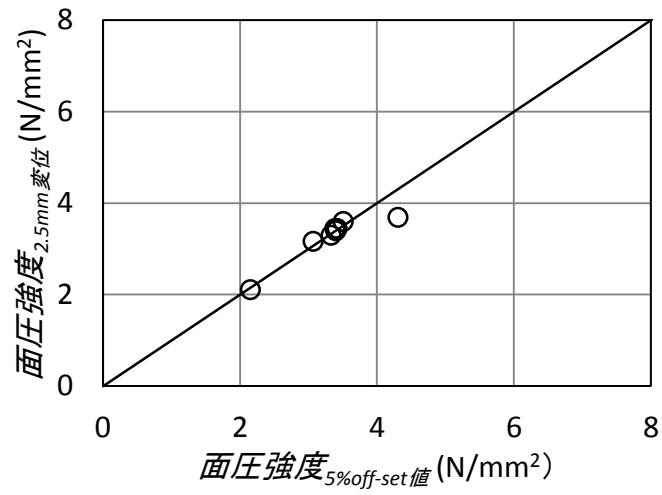


図 2.8 5% off-set 値と 2.5mm 変位時の面圧強度

表 2.2 面圧試験結果

No.	試験条件	面圧応力 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	No.	試験条件	面圧応力 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)
1	繊維 平行	15.12	440.39	51.91	1	繊維 直交	3.33	427.02	56.96
2		15.64	487.01	71.51	2		2.15	326.51	42.19
3		16.11	428.03	53.73	3		3.07	484.98	66.53
4		12.05	371.79	39.58	4		3.40	543.82	89.30
5		11.24	333.42	42.41	5		3.51	605.12	116.71
6		17.06	542.80	89.28	6		3.42	501.99	62.30
7		15.76	486.09	67.50	7		4.31	456.72	66.78
8		15.98	517.45	70.47	8		3.39	491.68	71.30
最大値		17.06	542.80	89.28	最大値		4.31	605.12	116.71
最小値		11.24	333.42	39.58	最小値		2.15	326.51	42.19
平均値		14.87	450.87	60.80	平均値		3.32	479.73	71.51
標準偏差		1.94	67.19	15.74	標準偏差		0.56	76.88	21.10

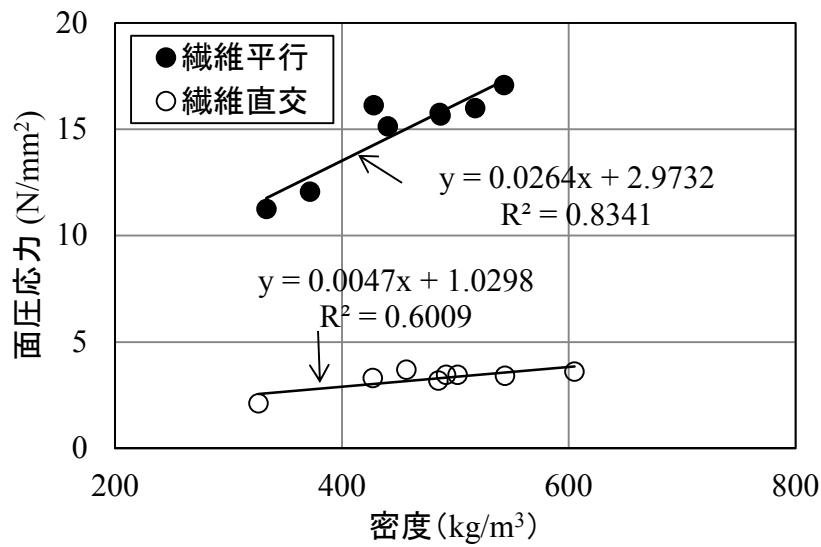


図 2.9 面圧強度と密度の関係

表 2.3 せん断試験結果(LRL).

打ち込み深さ (mm)	SB (kN)		LS (kN)		SB / LS		SB_{exp}	LS_{exp}
	exp / Mode	EYT / Mode	exp / Mode	EYT / Mode	exp	EYT	/ SB_{EYT}	/ LS_{EYT}
100 - No.1	5.40		7.00					
100 - No.2	5.90		7.90					
100 - Ave.	5.65	III	4.23	III	0.76	1.04	1.34	1.83
100 - S.D.	0.35		0.64					
150 - No.1	7.40		5.90					
150 - No.2	7.90		6.70					
150 - Ave.	7.55	IV	4.66	III	1.20	1.03	1.62	1.39
150 - S.D.	0.21		0.57					
200 - No.1	8.90		8.40					
200 - No.2	8.50		7.20					
200 - Ave.	8.70	IV	5.34	III	1.12	1.02	1.63	1.49
200 - S.D.	0.28		0.85					

注：SB は異形棒鋼、LS はラグスクリュー、exp はせん断試験値、EYT は EYT 理論値、Mode は降伏モード、Ave.は平均値、S.D.は標準偏差を表す

理論値を算出するにあたり、木材の面圧強度には面圧試験より求めた面圧強度を用いた。すなわち、繊維平行方向加力の場合、主材には繊維平行方向の面圧強度 14.9N/mm^2 を、側材には繊維直交方向の面圧強度 3.3N/mm^2 を代入し、繊維直交方向加力の場合、主材には繊維直交方向の面圧強度 3.3N/mm^2 を、側材には繊維平行方向の面圧強度 14.9N/mm^2 を代入した。接合具の材料強度には、異形棒鋼（材質 SD295A）は降伏点の公称値 295N/mm^2 とした。ラグスクリューの材質（SWRCH10）については、JIS による降伏点や引張強度の値について規定がないため、実験で使用したラグスクリューにひずみゲージを貼り付け、図 2.11 に示す方法で曲げ試験を行って降伏点を求めた。曲げ試験結果より、使用したラグスクリューの降伏点は 270N/mm^2 が得られたので、この値をラグスクリューの材料強度とした。

実験値に着目すると、異形棒鋼では打ち込み深さを深くするにつれ降伏せん断耐力は増加している。一方、ラグスクリューでは打ち込み深さを深くしても降伏せん断耐力に変化はなく、打ち込み深さ 150mm のときに最も小さな値となっている。この傾向は繊維平行方向加力（RLR）の異形棒鋼と同じ傾向である⁸⁵⁾。

実験値について異形棒鋼とラグスクリューで比較すると、打ち込み深さ 100mm の降伏せん断耐力はラグスクリューに対する異形棒鋼の比で 0.76 となり、ラグスクリューの方が異形棒鋼よりも大きい。打ち込み深さ 150mm、200mm では 1.20、1.12 となり、ともに異形棒鋼の方が降伏せん断耐力は大きい。今回の試験結果では、打ち込み深さを 150mm 以上とすれば、ラグスクリューよりも異形棒鋼の方が降伏せん断耐力が高いという結果になった。この結果は異形棒鋼とラグスクリューの降伏点の違いによるものと考えられる。異形棒鋼の降伏点は 295N/mm^2 に対し、ラグ

スクリューの降伏点は 270N/mm^2 である。この差が降伏せん断耐力の差となって表れたものと考えられる。

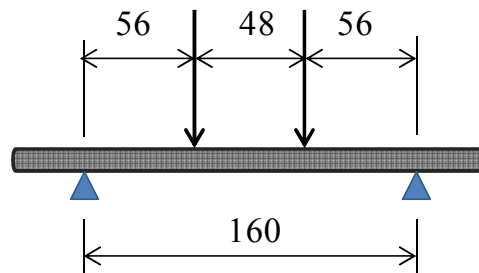
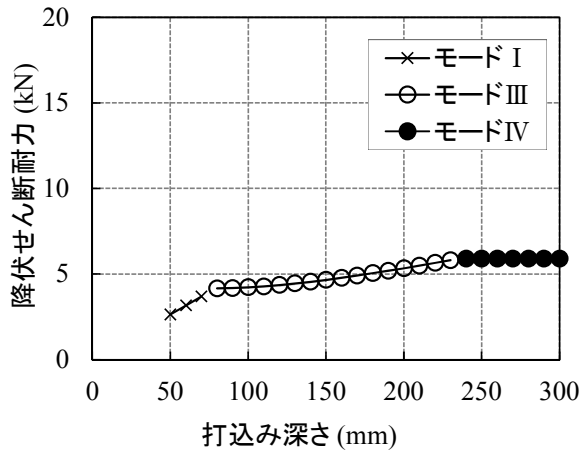
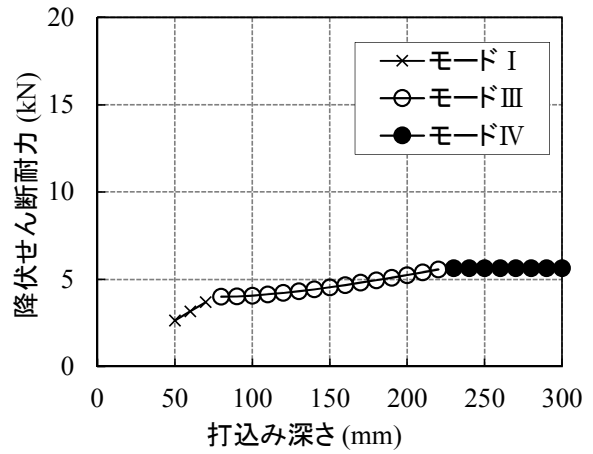


図 2.11 3等分点4点荷重法による曲げ試験 (単位 : mm).

次に、実験値と理論値に着目すると、理論値に対する実験値は、異形棒鋼で 1.34-1.63、ラグスクリーで 1.39-1.83 となり、得られたすべての降伏せん断耐力の実験値は理論値よりも大きな値となった。図 2.12 に EYT 理論を用いて求めた打ち込み深さと降伏せん断耐力の理論値の関係と降伏モードを示す。同図より、打ち込み深さによって降伏モードが変化することが分かる。各打ち込み深さにおいて推定される接合部の降伏モードを図 2.13 に示す。理論値において降伏せん断耐力が一定 (降伏モードⅣ) となる主材の打ち込み深さとそのときの降伏せん断耐力は、異形棒鋼では 240mm 以上、5.9kN、ラグスクリーでは 230mm 以上、5.7kN である (図 2.12)。これらの値は各打ち込み深さの実験値に対して、異形棒鋼では 0.66-1.09、ラグスクリーでは 0.68-0.97 と低い。また、図 2.12 より EYT 理論において降伏モードがⅢとなるのは、異形棒鋼では打ち込み深さ 80mm から 230mm、ラグスクリーでは 80mm から 220mm であるが、写真 2.4 および写真 2.5 に示すように、試験後の異形棒鋼、ラグスクリーの変形状況を確認すると、異形棒鋼の打ち込み深さ 150mm、200mm ならびにラグスクリーの打ち込み深さ 200mm において降伏モードⅣの変形状態を示していることが分かる。また、ラグスクリーの打ち込み深さ 150mm についても、降伏モードがⅢからⅣへ移行しはじめている。すなわち、今回得られた実験値は、EYT 理論から求めた理論値と合致しておらず、推定した降伏モードも合致していない。



(a) 异形棒鋼



(b) ラグスクリュー

図 2.12 打ち込み深さと降伏耐力の関係

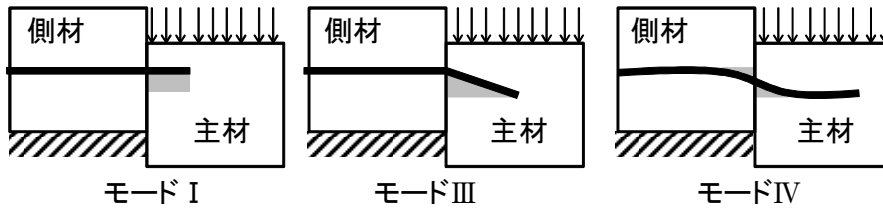


図 2.13 降伏モードパターン



(a) 打ち込み深さ 200mm (b) 打ち込み深さ 150mm (c) 打ち込み深さ 100mm

写真 2.4 せん断試験終了後の异形棒鋼の変形状況



(a) 打ち込み深さ 200mm (b) 打ち込み深さ 150mm (c) 打ち込み深さ 100mm

写真 2.5 せん断試験終了後のラグスクリューの変形状況

本研究の一連の実験において、面圧試験より求めた面圧強度は繊維平行方向 14.9N/mm^2 、繊維直交方向 3.3N/mm^2 であり、スギ材の基準支圧強度 (19.4N/mm^2 および 9.7N/mm^2)⁸⁷⁾ に比べて低いが、含水率と面圧強度の関係について研究を行った既報^{73), 74)} では、繊維飽和点 (含水率 28%) 以上の面圧強度は気乾材の強度の約 0.5 でほぼ一定となることが示されている。このときの面圧強度は繊維平行方向で $13.5\text{N/mm}^2 (=27.0 \times 0.5)$ 、繊維直交方向で $5.4\text{N/mm}^2 (=10.7 \times 0.5)$ となり、今回の実験結果と大差ないと言える。一方、木質構造設計規準・同解説では、木材を側材とするラグスクリュー接合の場合、側材の厚さ l は、胴径 d の 3 倍以上とすると示されているが、これは、北米の設計マニュアルで考慮されている径長比 l/d が 2~4 の範囲が最も多いということから導かれている⁸⁸⁾。本研究で対象とした接合部の側材厚 l は 250mm であり、ラグスクリューや異形棒鋼の直径 $d=16\text{mm}$ から、 $l/d=15.6$ となり、建築構造などで想定している一般的な接合部の径長比よりもはるかに大きい値となっている。面圧強度の違いと径長比 l/d の違いを見るために、これらの条件を変えた試験体の実験を行い、EYT 理論との適合性についてさらなる検討が必要である。

前述のとおり、本研究で得られたすべての降伏せん断耐力の実験値は理論値よりも大きな値となり、設計上安全側となる安全率の評価は理論値で決まってくる。そこで、EYT 理論から得られた降伏せん断耐力より、設計で用いる長期許容せん断耐力を求めると、異形棒鋼で 2.95kN、ラグスクリューで 2.65kN が得られる。オールウッド型木製治山ダムの安定計算 (有効高 3, 000mm) で算定される接合具 1 本当たりの最大せん断荷重約 0.82kN⁶⁸⁾ に対する安全率は異形棒鋼で 3.6、ラグスクリューで 3.2 となり、せん断性能の点ではラグスクリューの代替として異形棒鋼を木質土木構造接合部に用いることは有効であることが明らかとなった。

なお、実験値から長期許容せん断耐力を算出するには試験体数が少ないため、ばらつきを考慮した長期許容せん断耐力を算出することはできないが、2 体の平均値の 1.1/3 から長期許容せん断耐力を参考値として求めると、打ち込み深さ 200mm の場合、異形棒鋼は 3.19kN、ラグスクリューは 2.86kN が得られ、設計荷重に対する安全率はそれぞれ 3.9、3.5 であった。

2.2.2.3 引き抜き試験

今回の試験で得られた、典型的な引き抜き荷重と引き抜き変位の関係を図 2.14 に示す。また、最大引き抜き荷重 P_{max} とすべり係数 K_s の結果をそれぞれ表 2.4、表 2.5 に示す。すべり係数は、図 2.14 中の破線で示すように、初期の直線域の傾きより算出した。ここでは、初期すべりを除くため、0.2 P_{max} 時の変位と 0.4 P_{max} 時の変位を結んだ直線の傾きとした。

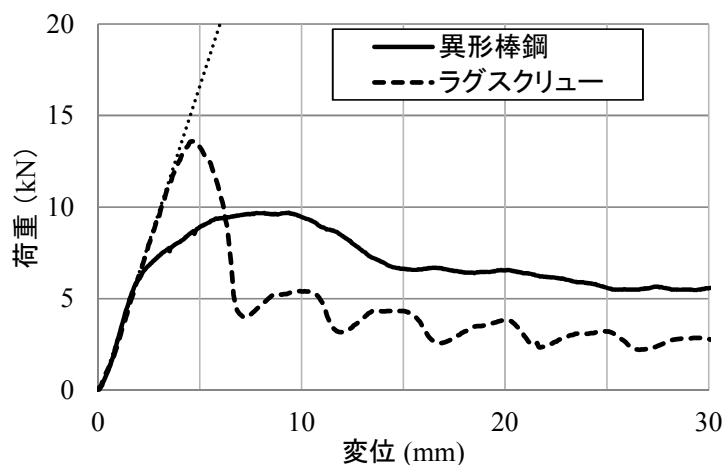


図 2.14 引き抜き荷重と変位の関係（打ち込み深さ：200mm）

表 2.4 最大引き抜き荷重

No.	P_{max-SB} (kN)			P_{max-LS} (kN)			SB/LS		
	100 mm	150 mm	200 mm	100 mm	150 mm	200 mm	100 mm	150 mm	200 mm
1	4.21	5.76	8.32	4.89	9.62	16.82	0.86	0.60	0.49
2	4.50	6.32	9.69	5.43	12.30	15.82	0.83	0.51	0.61
3	4.58	5.38	7.38	4.19	6.30	9.72	1.09	0.85	0.76
4	5.18	5.84	10.37	3.83	8.00	15.53	1.35	0.73	0.67
5	3.44	5.34	7.42	4.50	5.65	7.61	0.76	0.95	0.98
6	3.12	3.04	6.88	3.21	7.88	12.00	0.97	0.39	0.57
7	4.33	6.15	11.76	6.34	6.54	13.60	0.68	0.94	0.86
最大値	5.18	6.32	11.76	6.34	12.30	16.82	1.35	0.95	0.98
最小値	3.12	3.04	6.88	3.21	5.65	7.61	0.68	0.39	0.49
平均値	4.19	5.40	8.83	4.63	8.04	13.01	0.94	0.71	0.71
標準偏差	0.70	1.10	1.82	1.04	2.30	3.42	0.23	0.22	0.17
変動係数 (%)	16.73	20.42	20.60	22.49	28.57	26.27	24.28	30.73	24.02

注：SB は異形棒鋼、LS はラグスクリューを表す。

表 2.5 すべり係数

No.	K_{s-SB} (kN/mm)			K_{s-LS} (kN/mm)			SB/LS		
	100 mm	150 mm	200 mm	100 mm	150 mm	200 mm	100 mm	150 mm	200 mm
1	3.57	2.52	3.27	1.73	4.46	4.89	2.06	0.57	0.67
2	2.61	1.81	3.67	2.85	2.41	3.52	0.92	0.75	1.04
3	3.80	2.71	3.77	2.24	3.94	2.54	1.70	0.69	1.48
4	2.39	2.53	3.88	2.02	3.83	4.11	1.18	0.66	0.94
5	2.30	2.19	3.78	1.22	3.26	2.63	1.89	0.67	1.44
6	1.59	2.54	2.78	2.08	3.34	4.19	0.76	0.76	0.66
7	1.73	3.65	4.17	2.11	3.60	3.44	0.82	1.01	1.21
最大値	3.80	3.65	4.17	2.85	4.46	4.89	2.06	1.01	1.48
最小値	1.59	1.81	2.78	1.22	2.41	2.54	0.76	0.57	0.66
平均値	2.57	2.56	3.62	2.04	3.55	3.62	1.33	0.73	1.06
標準偏差	0.85	0.56	0.46	0.50	0.64	0.85	0.54	0.14	0.33

注：SB は異形棒鋼、LS はラグスクリューを表す。

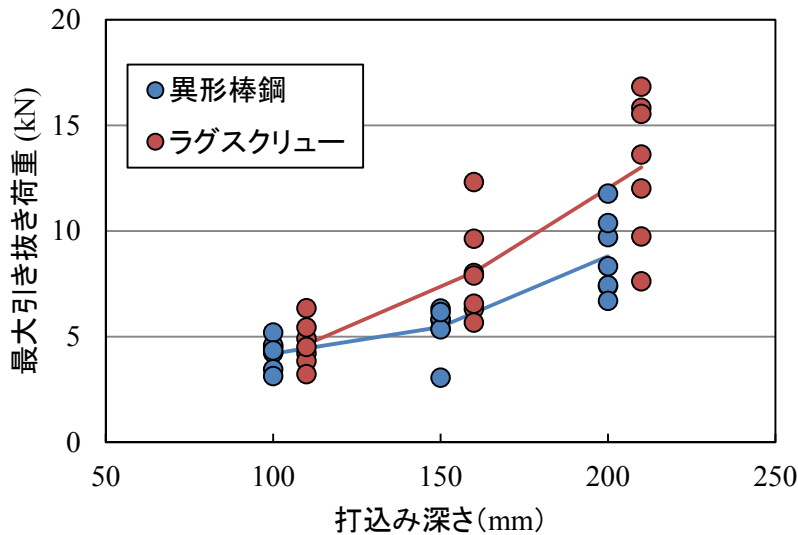


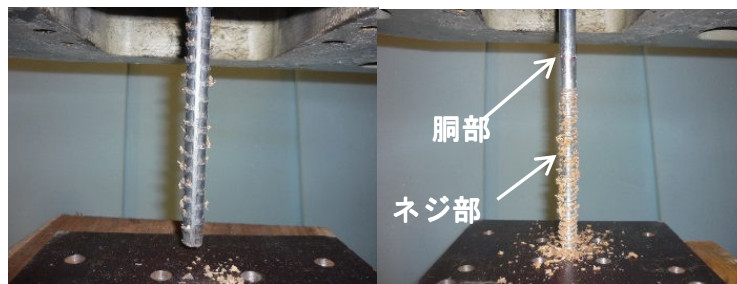
図 2.15 打ち込み深さ別の最大引き抜き荷重

(1) 打ち込み深さの影響

打ち込み深さ別の最大引き抜き荷重を図 2.15 に示す。表 2.3 と併せて、最大引き抜き荷重の変動係数は異形棒鋼、ラグスクリューともに打ち込み深さ 100mm よりも 150mm と 200mm の方が大きくなっている。また、すべての打ち込み深さで異形棒鋼よりもラグスクリューの方がばらつきが大きい。ラグスクリューでばらつきが大きくなる要因として、ねじ部と木部組織の噛み合わせによる影響が考えられる。写真 2.6 に引き抜き試験終了後の異形棒鋼およびラグスクリューに付着した木くずの状況を示す。異形棒鋼では木くずは節の凸部付近にわずかに付着しているのに対し、ラグスクリューでは胴部に付着は認められないものの、ねじ部全体に木くずが付着している。異形棒鋼では表面に凹凸が少ないため、木部組織と噛み合うことなく、ずり抜けるようにして引き抜かれる。これは、図 2.14 に示した結果にも表れている。一方、ラグスクリューではねじ部が木部組織にねじ込まれるようにしてくい

込むことによって、木部組織を破壊しながら引き抜ける。そのため、ラグスクリューは異形棒鋼よりも引き抜ける際に木材の密度や成長に伴う年輪幅の違い、ラグスクリューが打込まれている箇所の年輪の走行方向等による影響を受けやすく、それによって引き抜き抵抗力にばらつきが生じると考えられる。

表 2.4、図 2.16 より、すべり係数は異形棒鋼では打ち込み深さが深くなるにつれ値のばらつきが小さくなる。また、異形棒鋼の各打ち込み深さにおけるすべり係数の最大値は概ね一定であるのに対し、最小値は打ち込み深さが深くなるにつれ増加している。一方、ラグスクリューではいずれの打ち込み深さにおいても一定のばらつきを示した。すべり係数の最大値、最小値、平均値はいずれも打ち込み深さが深くなるにつれ大きくなっているが、打ち込み深さ 150mm と 200mm ではあまり差はみられない。異形棒鋼は全長にわたり節の凸部があり、打込んだ深さの全長で引き抜き力に対して抵抗するため、打ち込み深さが深くなるほど異形棒鋼と木材間の接触面積が大きくなり、木部組織のばらつきの影響を受けなくなるものと考えられる。一方、ラグスクリューのネジ部は 170mm であり、ネジ部長さ以上に打込んだとしても、ネジ部周辺の木部組織のばらつきの影響を受けてしまうものと考えられる。つまり、現在使用しているラグスクリューはねじ部が 170mm のため、木材の打ち込み深さを 170mm 以上とすればすべり係数はほぼ一定となる。



(a) 異形棒鋼 (b) ラグスクリュー

写真 2.6 引き抜き試験終了後に接合具に付着した木くずの状況

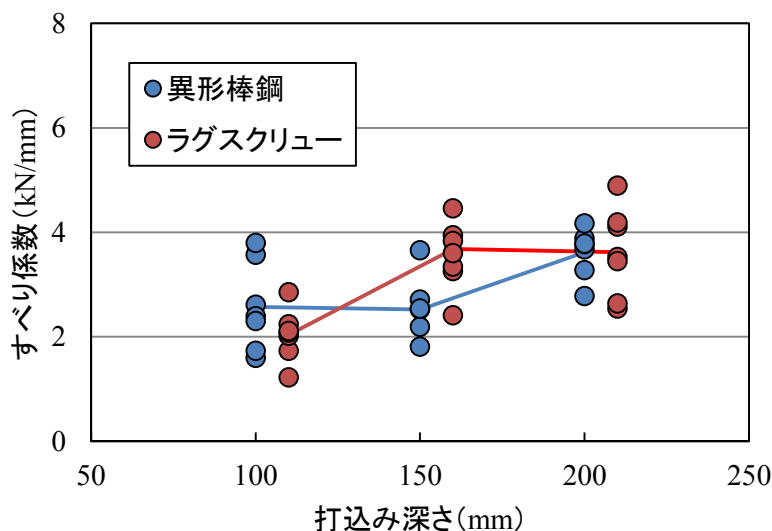


図 2.16 打ち込み深さ別のすべり係数

(2) 含水率による影響

図 2.17、図 2.18 に異形棒鋼、ラグスクリューの含水率と最大引き抜き荷重の関係を示す。

異形棒鋼、ラグスクリューともに、含水率と最大引き抜き荷重には正の相関が認められ、いずれの打ち込み深さにおいても含水率が高くなるにつれ、最大引き抜き荷重は大きくなっている。近似曲線の傾きについて、打ち込み深さ 100mm、150mm、200mm では異形棒鋼でそれぞれ 0.015、0.032、0.081、ラグスクリューで 0.041、0.031、0.097 と打ち込み深さが深くになるにつれ傾きも大きくなっている。

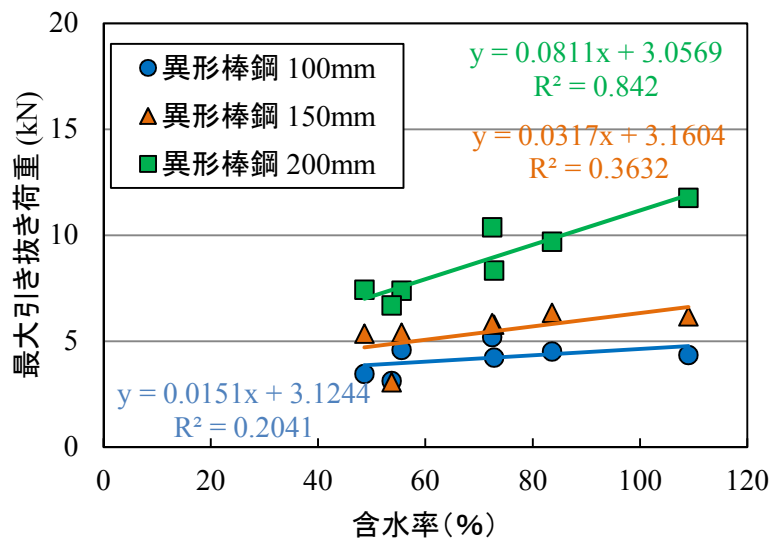


図 2.17 含水率と最大引き抜き荷重の関係 (异形棒鋼)

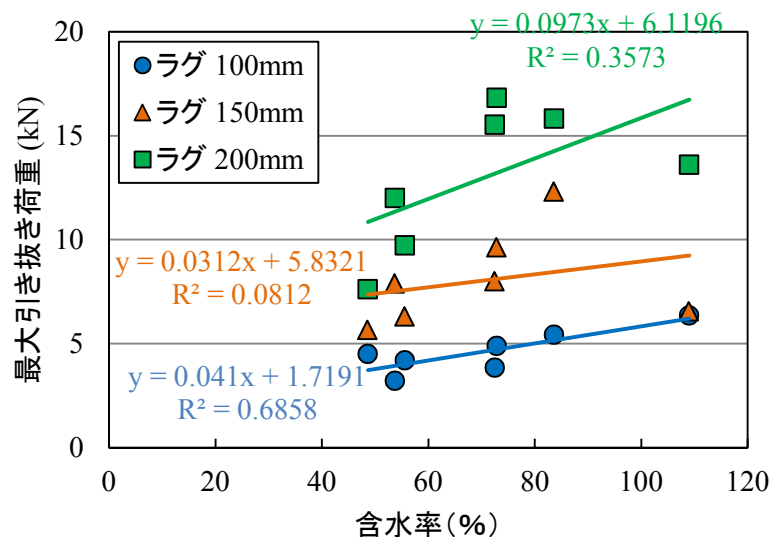


図 2.18 含水率と最大引き抜き荷重の関係 (ラグスクリュー)

図 2.19、2.20 に異形棒鋼、ラグスクリューの含水率とすべり係数の関係を示す。異形棒鋼の打ち込み深さ 150mm、200mm とラグスクリューの打ち込み深さ 100mm、200mm では含水率とすべり係数に正比例の傾向にあるが、異形棒鋼の打ち込み深さ 100mm とラグスクリューの 150mm では反比例の傾向となっている。また、 R^2 値は異形棒鋼で 0.060~0.291、ラグスクリューで 0.01~0.189 と特にラグスクリューで低く、今回の試験結果からは含水率とすべり係数に関係性はみられない。

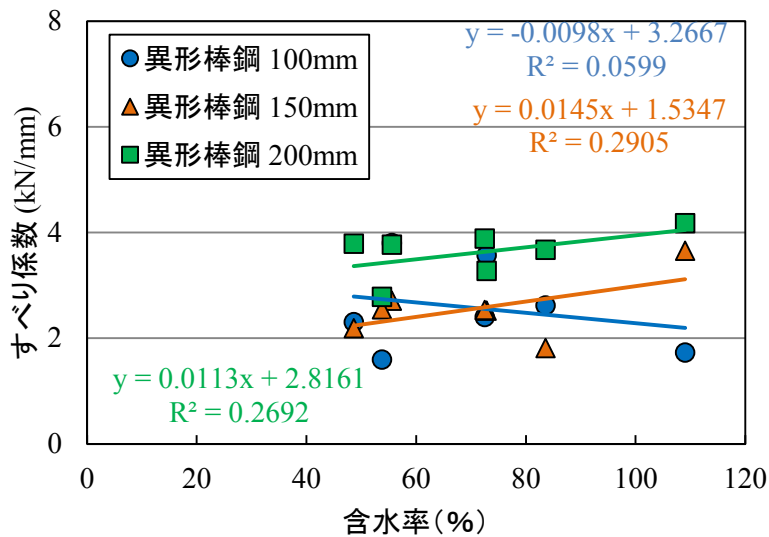


図 2.19 含水率とすべり係数の関係 (异形棒鋼)

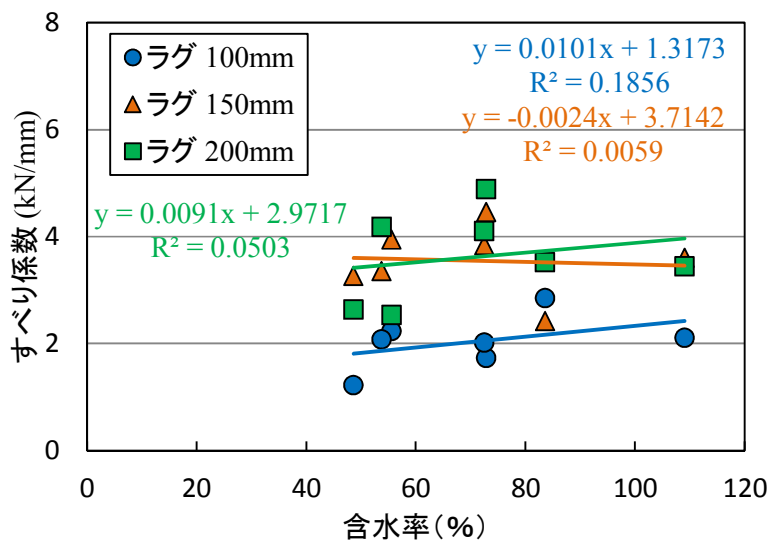


図 2.20 含水率とすべり係数の関係 (ラグスクリュー)

(3) 試験体の個体差による影響

図 2.21 に試験体別の最大引き抜き荷重と打ち込み深さの関係を、図 2.22 にすべり係数と打ち込み深さの関係を示す。

最大引き抜き荷重はほぼすべての条件においてラグスクリューの方が異形棒鋼よりも大きい。異形棒鋼とラグスクリューを比較すると、打ち込み深さが 100mm および 150mm では、最大引き抜き荷重に差がみられない場合も散見されるが、打ち込み深さが 200mm になると、最大引き抜き荷重はいずれの試験体においてもラグスクリューの方が大きい。含水率に着目すると、試験体の含水率は約 50%～約 110%と幅があるが、最大引き抜き荷重に対する飽和状態の含水率の差は見られなかった。すべり係数については試験体の個体差や含水率に対する傾向は認められなかった。

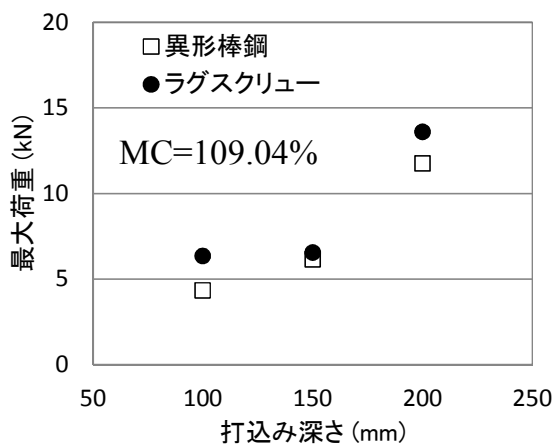
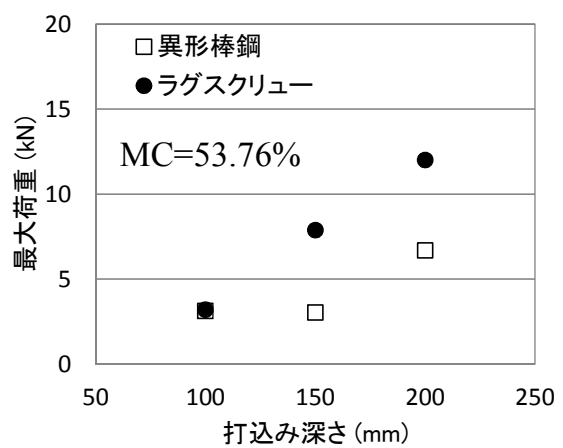
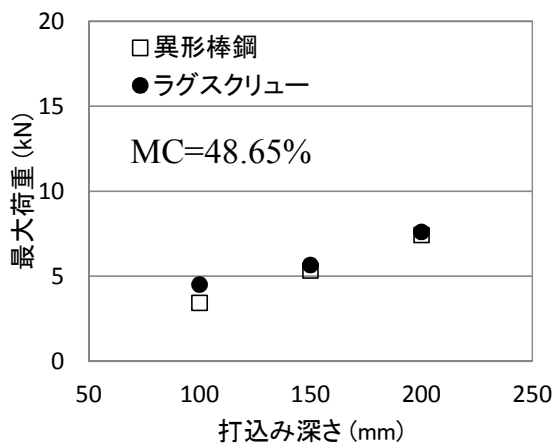
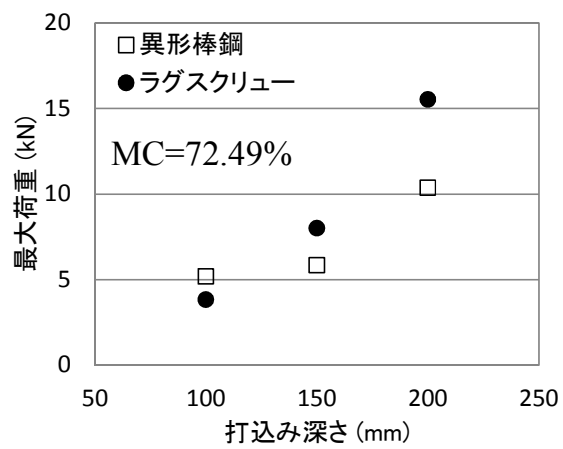
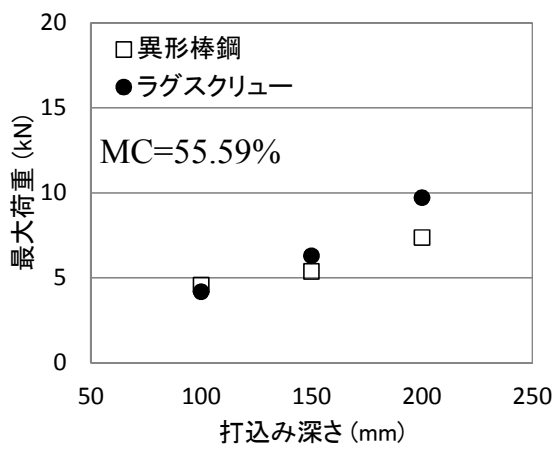
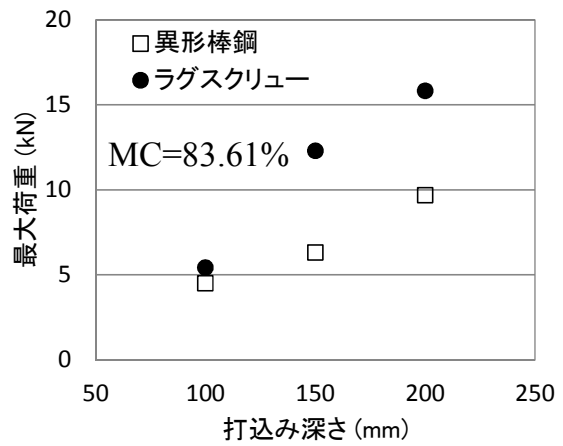
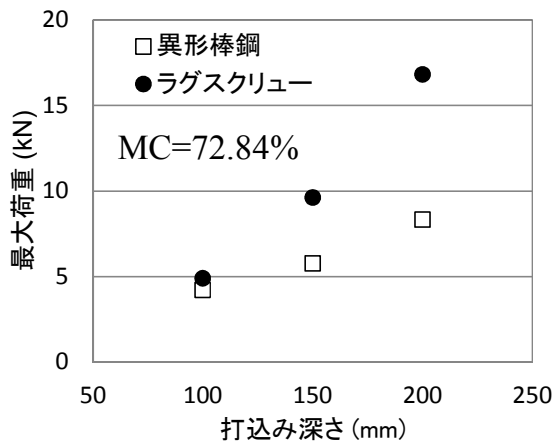


図 2.21 各試験体の打ち込み深さと引き抜き荷重の関係
注：MC: 含水率

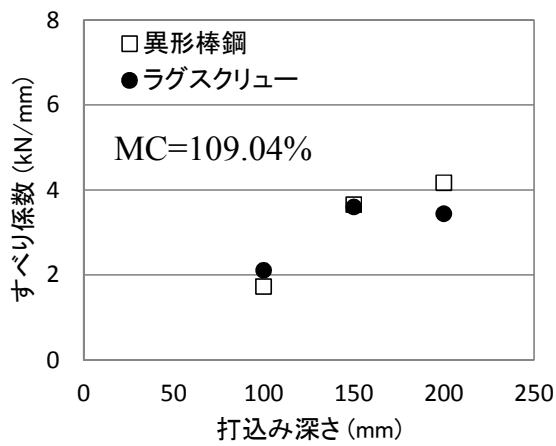
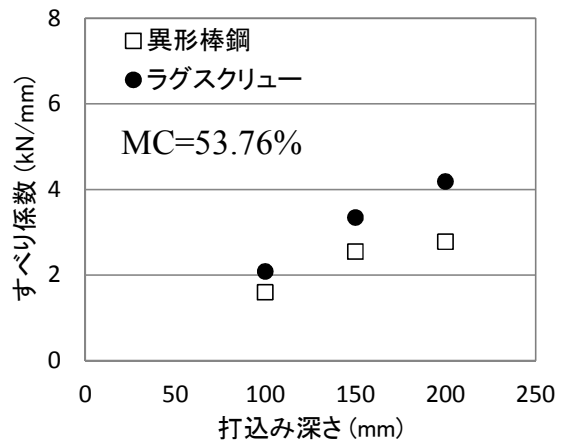
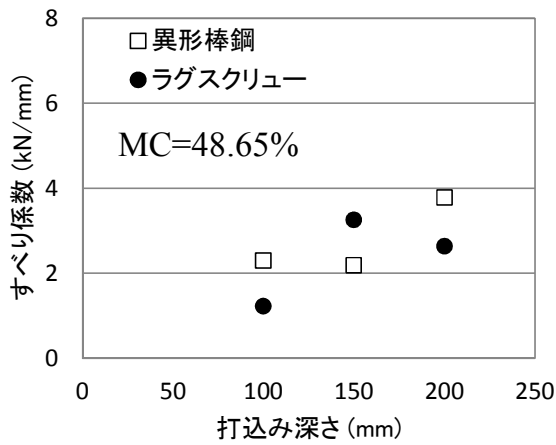
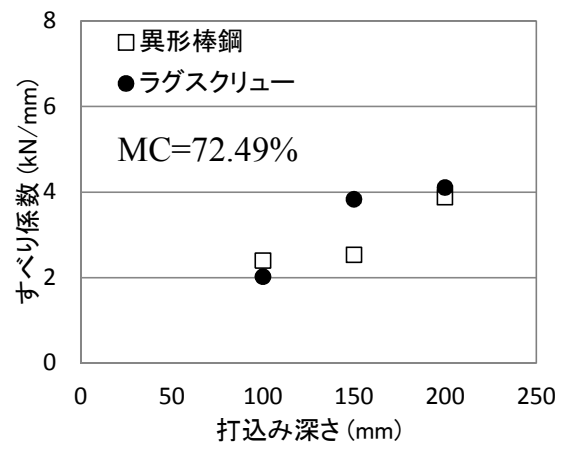
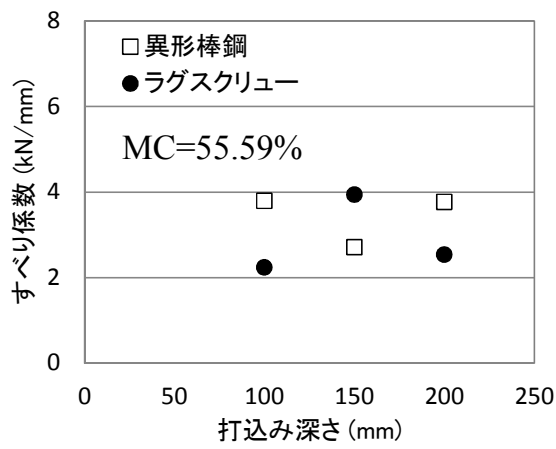
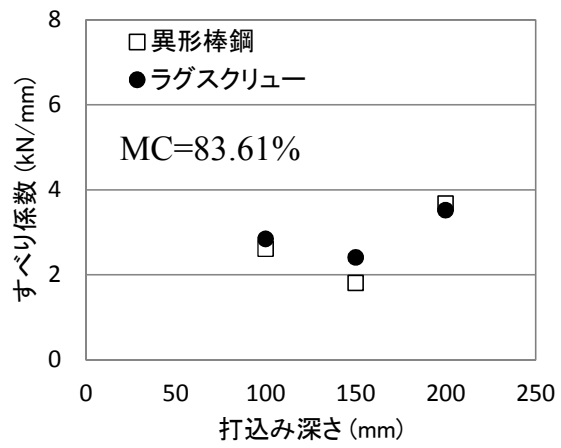
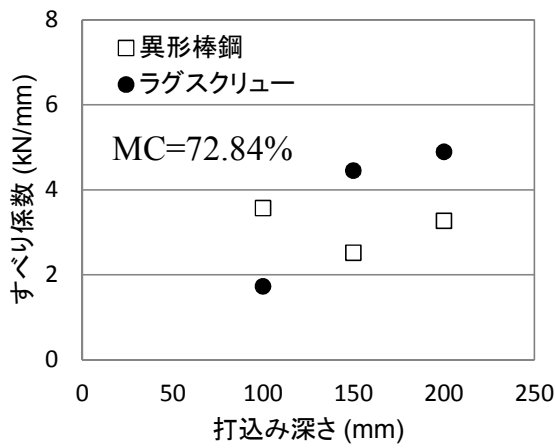


図 2.22 各試験体の打ち込み深さとすべり係数の関係
注：MC: 含水率

(4) 引き抜き耐力の算定

異形棒鋼およびラグスクリューの引き抜き耐力の下限値を(2.2)式より求める⁸⁹⁾。

$$\log TL = \bar{x} - K \cdot s \quad (2.2)$$

ここで、

TL：耐力の下限値（信頼水準 75%の 95%下側許容限界値）

\bar{x} ：試験データ（引き抜き耐力）の対数の平均値

s：試験データ（引き抜き耐力）の対数の標準偏差

K：試験体数に依存する定数

試験体数 n=7 のとき、K=2.251

結果を表 2.6 に示す。また、接合部の長期許容引き抜き耐力は、引き抜き耐力の下限値の 1.1/3⁹⁰⁾となり、その結果も表 2.5 に併記する。

ラグスクリューに対する異形棒鋼の引き抜き耐力の下限値の比は、打ち込み深さ 100mm、150mm、200mm でそれぞれ 1.02、0.70、0.83 となり、引き抜き性能の点ではラグスクリューの代替として異形棒鋼を大断面木質土木構造接合部に用いることは可能であるが、ラグスクリューよりも性能は劣る。オールウッド型木製治山ダムの安定計算（有効高 3,000mm）で算定される接合具 1 本当たりの最大引き抜き荷重は約 0.83kN⁶⁸⁾であり、異形棒鋼、ラグスクリューともに打ち込み深さ 100mm では安全率 1 をやや上回る程度である。安全率 2 以上を期待するならば、打ち込み深さは 200mm 以上とする必要がある。

なお、現状の施工条件（接合具径 16mm、先孔径 15mm、打ち込み深さ 200mm）と同程度の性能を期待するならば、D16 の異形棒鋼の先孔径を $\phi 14\text{mm}$ とすればよい⁷⁸⁾ことから、大断面木質土木構造物に $\phi 16\text{mm}$ のラグスクリューの代替として D16 の異形棒鋼を用いる場合は、先孔径を $\phi 14\text{mm}$ とする必要がある。

表 2.6 引き抜き耐力

打ち込み深さ (mm)	SB			LS			SB / LS		
	100	150	200	100	150	200	100	150	200
下限値 (kN)	2.79	3.00	5.42	2.73	4.25	6.53	1.02	0.71	0.83
長期許容引き抜き耐力 (kN)	1.02	1.10	1.99	1.00	1.56	2.39	1.02	0.71	0.83

2.2.3 まとめ

本研究では、大断面木質土木構造物の接合部に異形棒鋼、ラグスクリューを用いた場合のせん断性能および引き抜き性能を把握するため、打ち込み深さを変化させた一面せん断試験と引き抜き試験を実施した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) EYT 理論から得られた降伏せん断耐力の理論値と実験値では、すべての実験値が理論値を上回り、EYT 理論より推定した降伏せん断耐力および降伏モードは試験結果と合致しなかった。合致しない要因として、木材の面圧強度や本試験で使用した接合部の径長比は $l/d=15.6$ であり、建築構造などで想定している一般的な接合部の径長比よりもはるかに大きい値となっている点が考えられる。面圧強度と径長比の条件を変えた試験体の実験を行い、EYT 理論との適合性について、今後さらなる検討が必要である。
- 2) ラグスクリューに対する異形棒鋼の降伏せん断耐力の比は 1.1 程度であり、せん断性能の点ではラグスクリューの代替として異形棒鋼を木質土木構造接合部に用いることは有効であることが分かった。
- 3) 実験値および理論値より求めた長期許容せん断耐力は、安定計算で試算されるせん断荷重 0.82kN に対して、打ち込み深さを 200mm とした場合、安全率は異形棒鋼で 3.6 以上、ラグスクリューで 3.2 以上が得られ、せん断性能の点ではラグスクリューの代替として異形棒鋼を木質土木構造接合部に用いることは有効であることが分かった。
- 4) ラグスクリューに対する異形棒鋼の引き抜き耐力の下限値の比は 0.8 程度であり、引き抜き性能の点ではラグスクリューの代替として異形棒鋼を木質土木構造接合部に用いることは可能であると考えられる。しかし、ラグスクリューよりも性能が劣るため、現状の施工条件（接合具径 16mm、先孔径 15mm、打ち込み深さ 200mm）と同程度の性能を期待し、安定計算で試算される引き抜き荷重 0.83kN に対して安全率 2 以上を期待するならば、先孔径は $\phi 14\text{mm}$ とし、打ち込み深さは 200mm とする必要がある。

2.3 実大の堤体水平載荷試験

2.2 で行った接合部強度試験や先孔径を変えて行った引き抜き試験結果⁷⁸⁾より、接合具をラグスクリューから安価な異形棒鋼に代替できる可能性が示された。これらの試験で得られた知見が実構造物において適用可能かどうか、異形棒鋼を用いた時の堤体の耐荷力を評価するため、実大寸法の堤体の供試体を対象に水平載荷試験を行った⁹¹⁾。併せて、2007（平成 19）年度に実施したラグスクリューを用いた同様の水平載荷試験結果（1.4.3.1 (3) 実大の堤体水平載荷試験－堤体の耐荷力）⁶⁸⁾と比較検討することで、異形棒鋼を接合部に用いた場合の性能について検証を行った。

2.3.1 試験体

接合具全てに異形棒鋼を用いた実大試験体（以後、異形棒鋼試験体と呼ぶ）の正面図を図 2.23 に、側面図を図 2.24 に示す。サイズの異なる H 形鋼と溝形鋼を組み合わせた載荷フレームに、幅 300mm×高さ 250mm×長さ 2800mm のスギ土台をアンカーボルトで緊結して土台を構成した。その上に、幅 300mm×高さ 250mm×長さ 900mm（奇数段）と幅 300mm×高さ 250mm×長さ 1500mm（偶数段）の 2 種類のスギ材を直交するように交互に順次 8 段まで積み上げ、ダム幅 $b=1500\text{mm}$ ×ダム高 $h=2000\text{mm}$ ×ダム軸 $l=900\text{mm}$ の試験体を製作した。試験体の仕様は、2007（平成 19）年度に行った全ての接合具ラグスクリューを用いた実大試験体（以後、ラグスクリュー試験体と呼ぶ）と同じである。

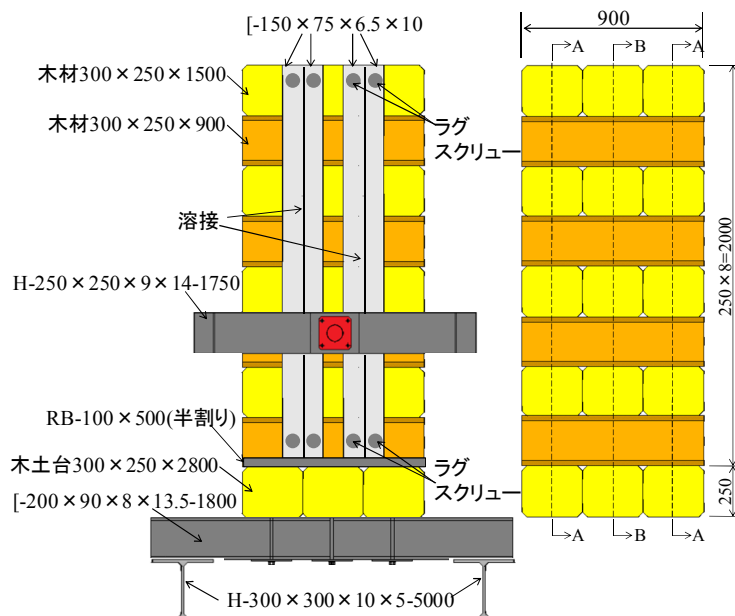


図 2.23 正面図 (単位 : mm)

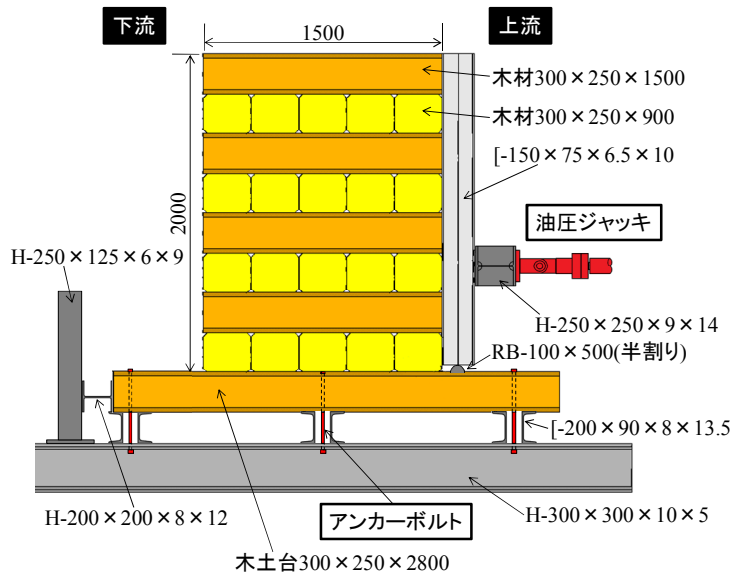


図 2.24 側面図 (単位 : mm)

図 2.23 中で示した A-A 断面における異形棒鋼の配置を図 2.25 に、B-B 断面における異形棒鋼の配置を図 2.26 に、各段における異形棒鋼の配置を図 2.27 に示す。異形棒鋼の配置はラグスクリー試験体におけるラグスクリーの配置と同じとした。異形棒鋼は市販の SD295A、D16 (節間のピッチ約 10~11mm)、長さ 5500 mm を主材 (下の段の木材) への打ち込み深さが 200mm となるよう、450mm に裁断して用いた。先孔径は $\phi 14$ mm、先孔深さは打ち込み深さと同じ 200mm とし、ハンマードリルの先端に内径 18mm、深さ 30mm のアースアダプタを取り付けて打込んだ⁷⁸⁾。異形棒鋼の両端はテーパ加工など施さず、そのまま試験に用いた。

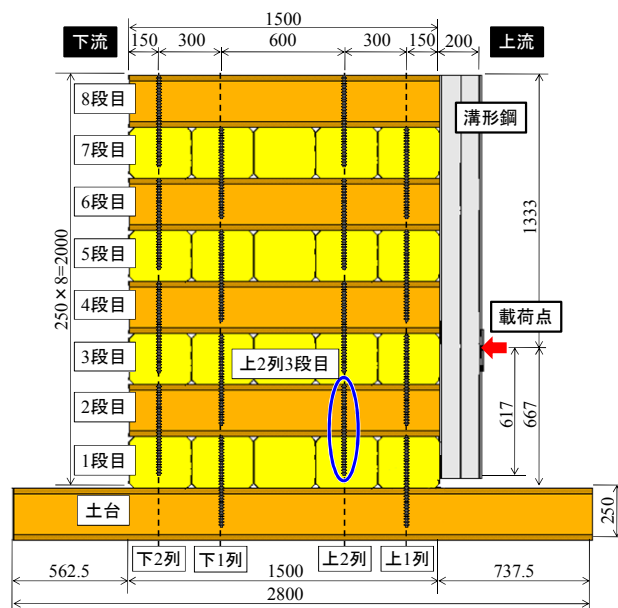


図 2.25 A-A 断面における異形棒鋼の配置 (単位 : mm)

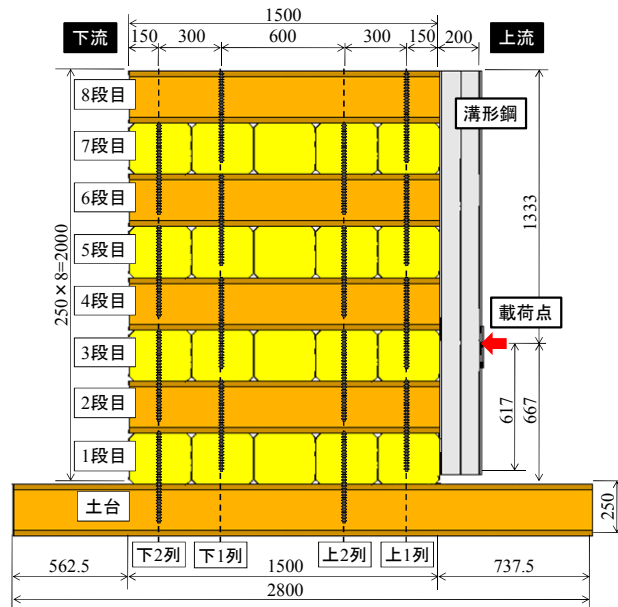


図 2.26 B-B 断面における異形棒鋼の配置 (単位 : mm)

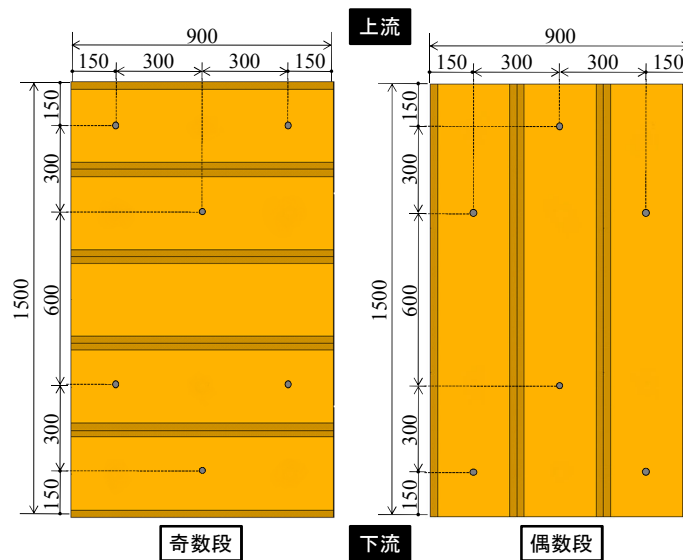


図 2.27 各段における異形棒鋼の配置 (単位 : mm)

2.3.2 試験方法

試験方法はラグスクリー試験体の水平载荷試験⁶⁸⁾に準じた。载荷は、H形鋼：H-250×250×9×14-1750mmとあらかじめ2本ずつウェブどうしを合わせて溶接した4本の溝形鋼：[-150×75×6.5×10-2000mmを介し、油圧ジャッキにより木土台から667mm（試験体高さの1/3）の位置に行った。また、溝形鋼は堤体に十分に加力が伝わる前に位置がずれないように、溝形鋼上下端付近にラグスクリーで仮止めした（図2.23）。油圧ジャッキは上下の回転自由度を有し、試験中試験体が面内に回転した場合、ジャッキも追従するので相対的な载荷位置は変わらない。

変位計設置位置を図2.28に示す。ラグスクリー試験体の試験における変位計設置位置⁶⁸⁾に加え、下1列8段目の（試験体上部）と下2列1段目に、鉛直変位を測定する変位計を追加した。下流側端部における格段と最上段の変位計は、試験体とは独立して設置したフレームに取り付けた。その他の変位計は、木部材にねじで取り付けたアングルを介して設置した。これら変位計を用いて、各段の水平変位、各上下段の相対水平変位（すべり）、最上段の鉛直変位、1段目の引き抜き変位を測定する。

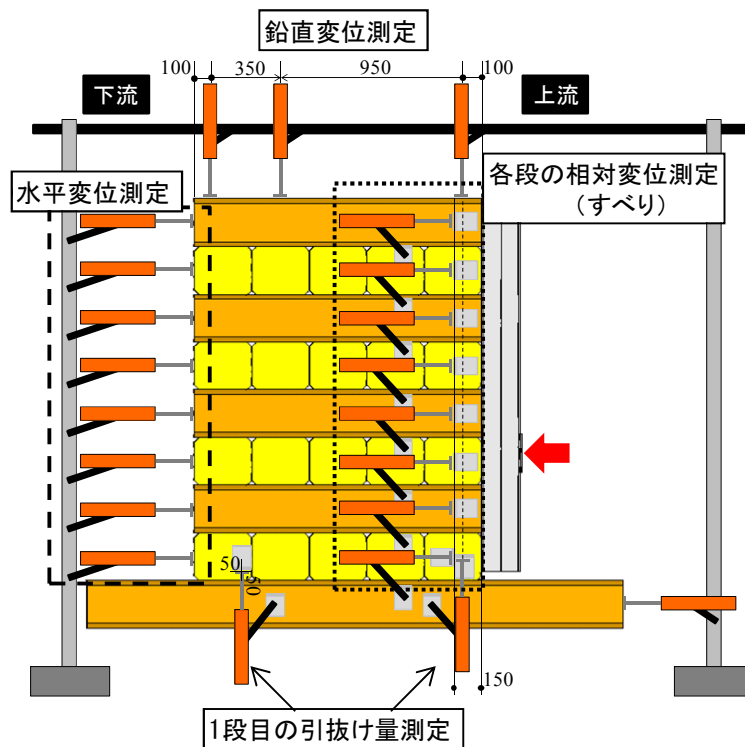


図 2.28 変位計設置位置 (単位：mm)

2.3.3 試験結果

水平載荷試験の様子を写真 2.7 に示す。試験では、載荷試験機の最大容量である 110kN 手前の 109.9kN まで載荷したが、異形棒鋼試験体は破壊しなかった。109.9kN はラグスクリュー試験体⁶⁸⁾の破壊時の最大荷重（以後、「耐力」と呼ぶ）106kN を上回る。よって、接合具として異形棒鋼のみを使用した木製土木構造物の製作が可能であることが確認された。次節からは、異形棒鋼試験体とラグスクリュー試験体の各変位を比較していく。

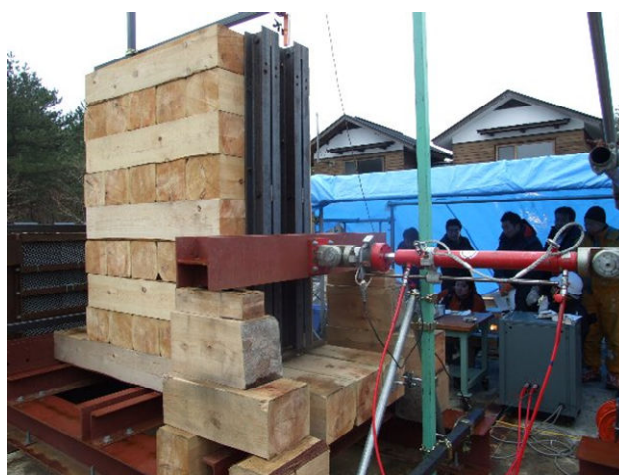


写真 2.7 水平載荷試験

2.3.3.1 鉛直変位

図 2.28 における、上 1 列 1 段目と 8 段目、下 1 列 8 段目、下 2 列 1 段目と 8 段目に設置した変位計から得られた異形棒鋼試験体の荷重-鉛直変位関係を図 2.29 に、同様に、上 1 列 1 段目と 8 段目、下 2 列 8 段目の変位計から得られた異形棒鋼試験体とラグスクリュー試験体の荷重-鉛直変位関係を図 2.30 に示す。

図 2.29 においては、異形棒鋼は 70kN 辺りから剛性が低下するものの、109.9kN まで載荷したが破壊にはいたらず、粘り強い挙動を示した。これは、図 2.31 に示した異形棒鋼単体の引き抜き試験の挙動と同じである⁷⁸⁾。なお、ここでの剛性とは、既往の研究^{78), 92)}にならい、荷重増分に対する変位増分の傾きとし、変位増分が増加する場合、剛性低下と表記する。一方、図 2.30 においては、ラグスクリュー試験体は 100kN 辺りで急激に剛性が低下し、剛性低下後 6kN ほどで破壊に至っている。こちらも図 2.31 に示したラグスクリュー単体の引き抜き試験の挙動と同じであった。変位量に関しては、異形棒鋼試験体の変位がラグスクリュー試験体の変位よりも小さい。これは、異形棒鋼試験体の変位がラグスクリュー試験体の変位よりも大きい単体の引き抜き試験（図 2.31）とは逆の結果となった。

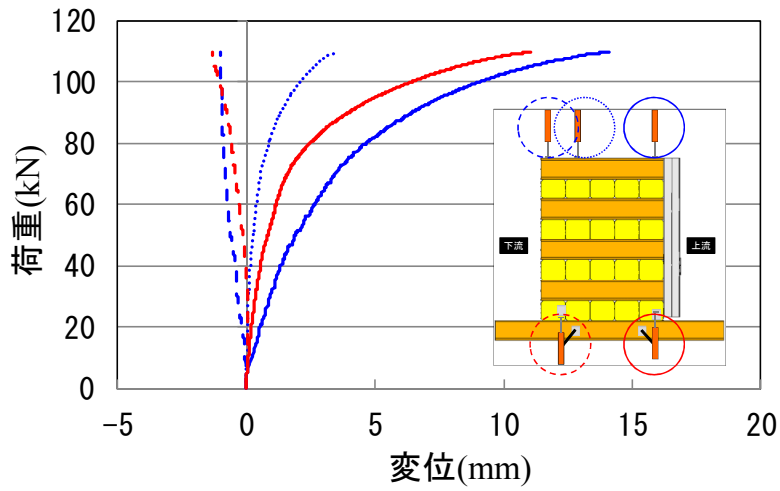


図 2.29 異形棒鋼試験体の荷重-鉛直変位関係

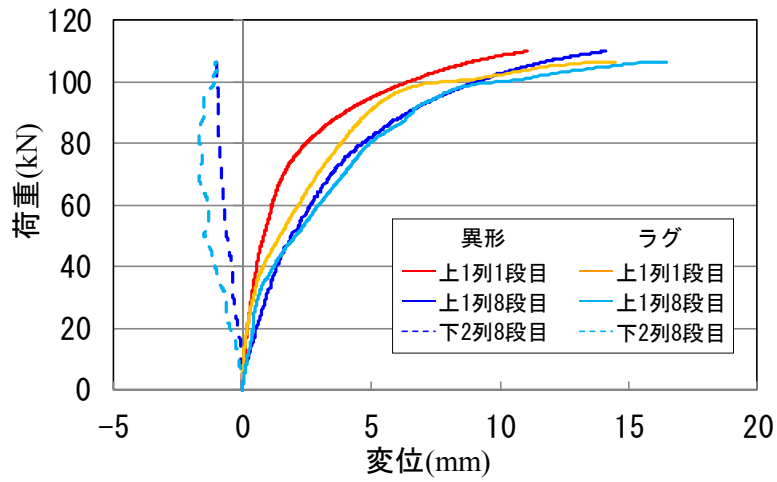


図 2.30 異形棒鋼、ラグスクリュー試験体の荷重-鉛直変位関係

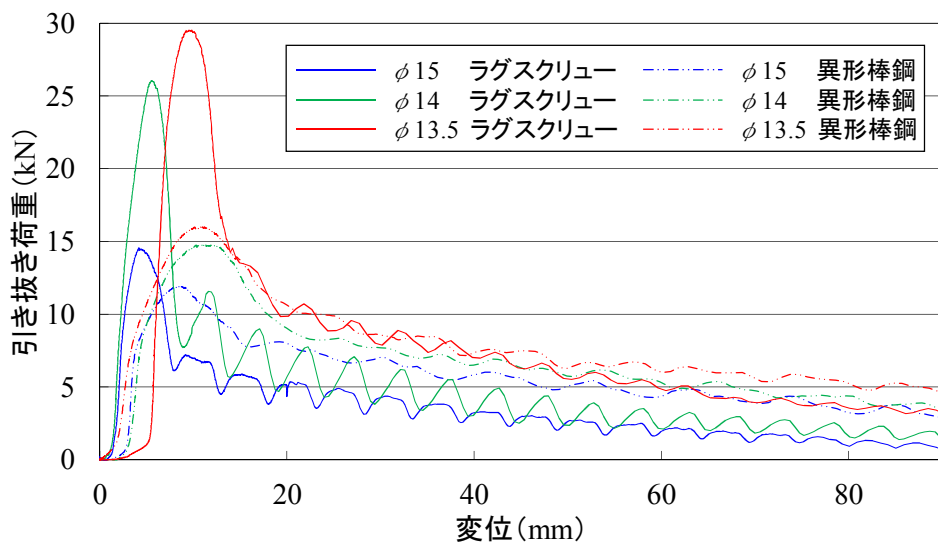


図 2.31 先孔径の異なる各接合具の荷重-引き抜き変位の関係

次に、上 1 列 1 段目の異形棒鋼に 生じた引張力を推定する。本試験で異形棒鋼に生じた引張力の推定値と部材試験の荷重-鉛直変位関係を図 2.32 に、各荷重時における 8 段目の鉛直変位を図 2.33 に、堤体底面に生じる設計上の引張力分布を図 2.34 に示す。

設計水平荷重 10.51kN 時の上 1 列 1 段目の異形棒鋼 1 本当当たりの設計引張力は 0.83kN⁶⁸⁾であり、実験結果の安全率 (109.9kN/10.51kN=10.46) を乗じて異形棒鋼 1 本に作用する引張力を推定すると、図 2.32 の青の実線となる。この値は、緑の実線で示した異形棒鋼単体の引き抜き試験⁷⁸⁾の半分ほどである。

上 1 列の異形鋼棒が引き抜き耐力に達したときを図 2.29 の剛性低下時の荷重 70kN とすると、作用モーメントは $70\text{kN} \times 0.667\text{m} = 46.69\text{kN} \cdot \text{m}$ である。これに対し抵抗モーメントは、先孔径 $\phi 14\text{mm}$ の異形棒鋼単体の引き抜き試験から得られた平均引き抜き耐力 15.12kN を 1 本当当たり異形棒鋼の引き抜き耐力と仮定した場合、 $15.12\text{kN} \times 0.33\text{m}$ (設計上の回転中心から上 1 列の異形棒鋼までの距離) $= 4.99\text{kN} \cdot \text{m}$ から、上 1 列 1 段目には 2 本の異形棒鋼が打ち込まれているので $9.98\text{kN} \cdot \text{m}$ となり、作用モーメントとつり合わない。つり合う荷重を逆算すると $9.98\text{kN} \cdot \text{m} / 0.667\text{m} = 14.96\text{kN}$ となり、これ以上の荷重の場合、回転中心が下流側に移動し、上 2 列の異形棒鋼も抵抗していると推察される。図 2.33 により、14.96kN 時に近い 15.17kN 時の回転中心を求めると、下流端部より 0.339m の位置となる (図 2.35)。この回転中心位置から、上 1 列、上 2 列、および下 1 列の異形鋼棒までの距離はそれぞれ、1.011m、0.711m、0.111m となり、抵抗モーメントは $15.12\text{kN} \times (1.011\text{m} \times 2 + 0.711\text{m} + 0.111 \times 2) = 44.68\text{kN} \cdot \text{m}$ となり、作用モーメントとつり合うことが分かる。

したがって、図 2.32 の結果は、設計上は上 1 列の 2 本で抵抗するとしているのに対し、実際には、上 2 列の 1 本、下 2 列の 2 本を加えた 5 本で抵抗している分、引き抜き荷重が小さくなっていたことによると推察される。

また、異形棒鋼単体の引き抜き試験では純粋な引張力が作用するのに対し、実大試験では、接合部にせん断力も同時に作用する複合応力状態にあり、異形棒鋼の材質はラグスクリューよりもせん断剛性が高いことから、異形棒鋼を用いた試験体の変位が、ラグスクリューを用いた試験体の鉛直変位よりも小さくなったものと推察される。

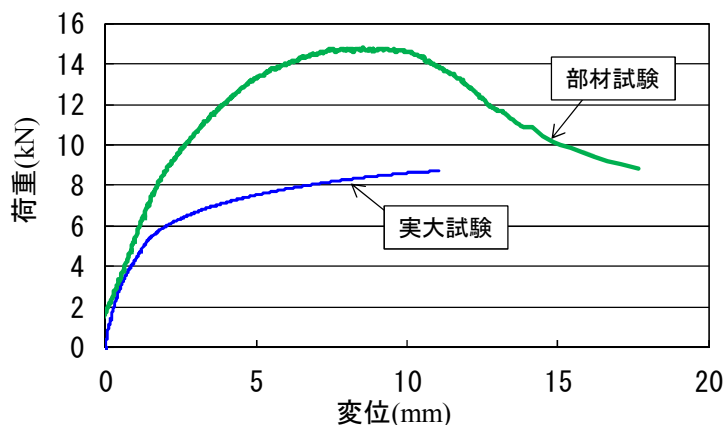


図 2.32 異形棒鋼に生じる引張力の推定値と部材試験の荷重-鉛直変位関係

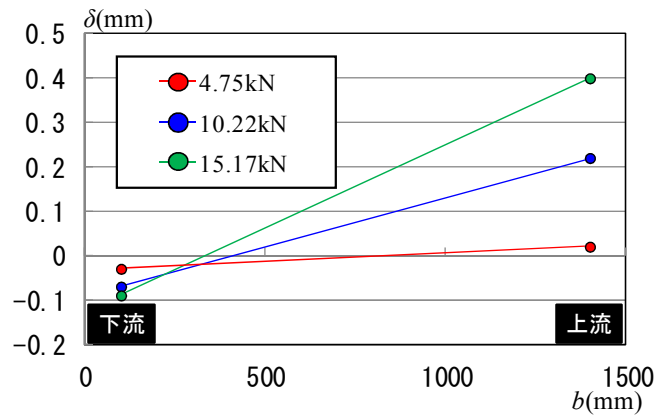


図 2.33 各荷重時における 8 段目の鉛直変位

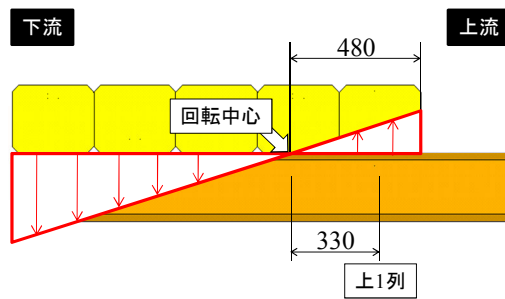


図 2.34 堤体底面に生じる引張力分布(単位 : mm)

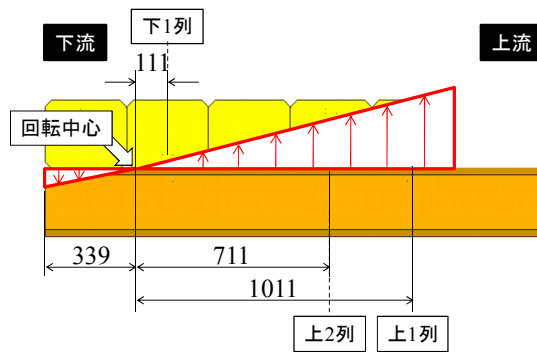


図 2.35 15.17kN 時の堤体底面に生じる引張力分布(単位 : mm)

2.3.3.2 水平変位

異形棒鋼試験体とラグスクリュー試験体の下流側端部の水平変位関係を図 2.36、異形棒鋼に生じるせん断力の推定値と部材試験の荷重-水平変位関係を図 2.37 に示す。ラグスクリュー試験体と異形棒鋼試験体の水平変位を比較すると、鉛直変位同様、異形棒鋼試験体の変位の方が小さいが、これもラグスクリューと異形棒鋼の材質（剛性）の違いによるものと推察される。

前節同様に上1列1段目の異形棒鋼のせん断力と水平変位の関係から推定を行うと、図 2.37 のようになる。設計水平荷重 10.51kN 時の異形棒鋼 1 本当たりの設計せん断力は 0.82kN⁶⁸⁾であり、実験結果の安全率 (109.9kN/10.51kN=10.46) から、異形棒鋼 1 本に作用するせん断力を推定すると、青の実線となる。このとき、1 本当たりに作用するせん断力は、1 段目の異形棒鋼の数 6 本で均等に分担するとして求めているが、一般に、機械接合の分野では一方向に並べた複数のボルトによる結合した場合、端部に近いほど大きな荷重を受け持つことが経験的に知られている。本試験の結果においても、異形棒鋼の変形状態から、上流側（載荷側）端部の荷重分担が大きくなっていることが示唆された。したがって、図 2.37 の結果は、設計上は 1 段当たりの異形棒鋼が均等にせん断を分担するとしているのに対し、実際には、上流側（載荷側）の分担率が高くなっていることを考慮すれば、部材試験の結果に近い値となるものと推察される。

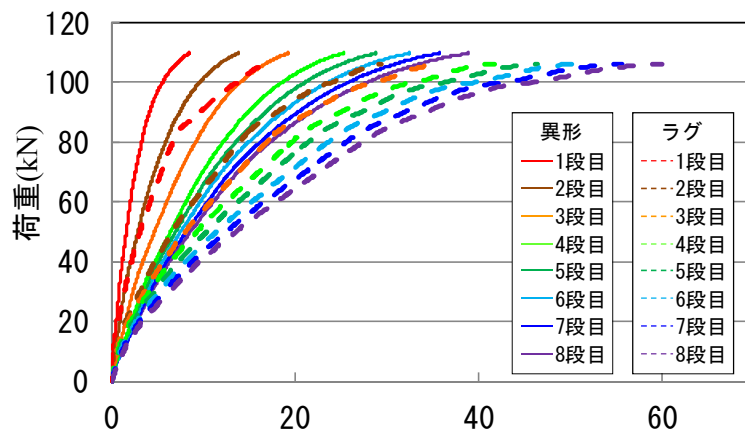


図 2.36 異形棒鋼、ラグスクリュー試験体の下流側端部の水平変位関係

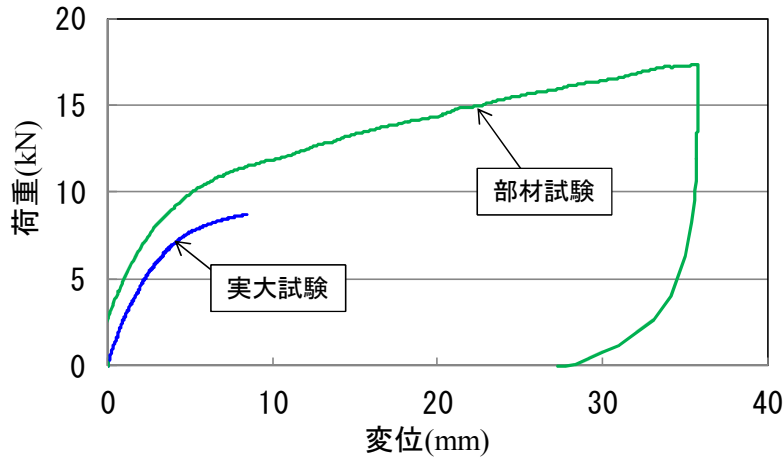


図 2.37 異形棒鋼に生じるせん断力の推定値と部材試験の荷重-水平変位関係

各荷重時における下流側端部の水平変位挙動を図 2.38 に、ラグスクリュー試験体が破壊した 106kN 時の各段の相対変位を図 2.39 に示す。図中に示した①などの表記は各段数を示したものである。各図で水平変位を比較すると、ラグスクリュー試験体は 1、2 段目の変位量が大きく、3 段目以降は値が小さくなりほぼ同じ変位量となっている。これに対し、異形棒鋼試験体は 1～4 段目までの変位量が大きく 5 段目以降は値が小さくなりほぼ同じ変位量となっている。また、どちらの試験体も 1 段目の変位量が最も大きい。図 2.38 において、同じ試験体で各荷重時における水平変位挙動を比較すると、各荷重時での変位挙動に差はない。つまり、異形棒鋼試験体の場合、20kN でも 109kN でも 1 段目の変位量が一番大きく、ついで 4 段目までの変位量が大きく、5 段目から値が小さくなるという形状は同じであった。

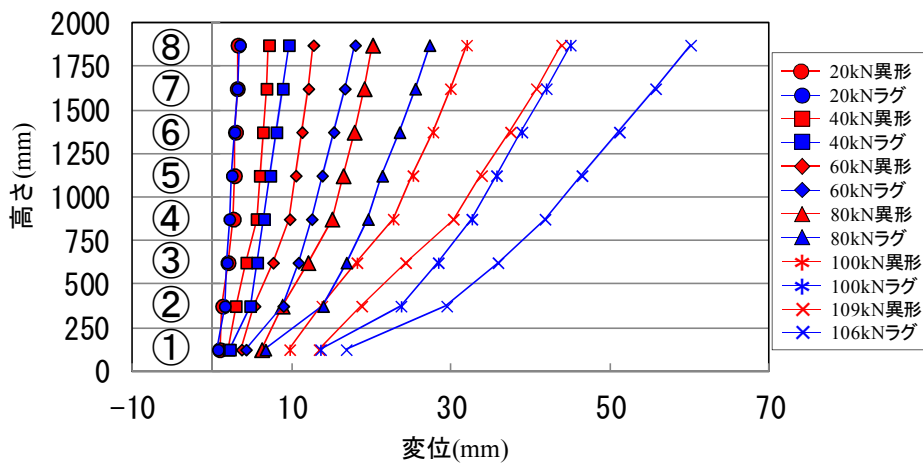


図 2.38 異形棒鋼、ラグスクリュー試験体の各荷重時における下流側端部の水平変位挙動

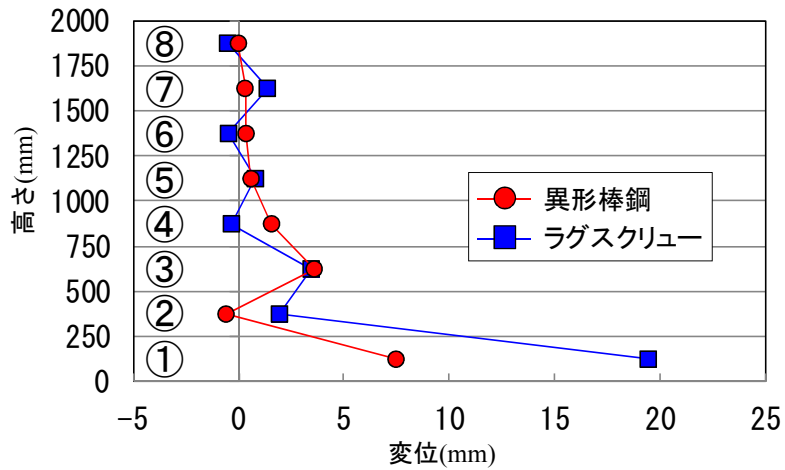


図 2.39 106kN 時の各段の相対変位

図 2.39 の各段の相対変位を見ると、いずれの試験体も、奇数段の値が大きく、その上の偶数段の値が小さい。これは、奇数段はダム幅方向に 5 部材配置されているため、各部材間の隙間やガタの影響を受けやすいのに対し、偶数段では、部材長がダム幅と等しい 1 部材であるため、影響を受けないためと考えられる。また、偶数段では木材の繊維方向にラグスクリューがめり込むのに対し、奇数段では支圧強度が低い木材の繊維直交方向にラグスクリューがめり込むため、変位が大きくなると考えられる。以上 2 つが、奇数段の相対変位が大きくなる要因であると推察される。

2.3.4 まとめ

本研究では、先孔径を変化させて行った異形棒鋼とラグスクリューの引き抜き試験⁷⁸⁾とせん断試験⁹³⁾から得られた知見をオールウッド型木製治山ダムに適用し、異形棒鋼のみを接合具とした実大試験体を製作し水平載荷試験を行った。以前行ったラグスクリューを接合具とした実大試験体の水平載荷試験結果と比較検討することで、異形棒鋼を引き抜き抵抗型の木質構造物の接合具として利用することが可能かどうかの検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 水平載荷試験においては、載荷試験機の最大容量である 110kN 手前の 109.9kN まで載荷したが、異形棒鋼試験体は破壊しなかった。109.9kN はラグスクリュー試験体の破壊時の最大荷重 106kN を上回った。また、異形棒鋼を用いた構造物は、ラグスクリューを用いた構造物よりも剛性の低下が早い段階で生じるが、その後も荷重に抵抗し続けることが確認された。
- 2) 異形棒鋼に作用する引張力とせん断力の推定も併せて行った。引張力に関しては、低荷重域で回転中心が下流側にずれ、上 1 列の異形棒鋼だけでなく、上 2 列、下 1 列と、荷重が上がるにつれ複数の異形棒鋼で抵抗することが示された。せん断力については、ラグスクリュー試験体の挙動と大きな差は見られなかった。
- 3) 以上から、異形棒鋼をオールウッド型木製治山ダムに標準的に使用することが可能であることが示された。加えて、今後、異形棒鋼を接合具として、他の木質構造物への適用の可能性が示された。

2.4 摘要

本章では、オールウッド型木製治山ダムのコスト縮減対策として着目した異形棒鋼の接合具としての使用について、従来のラグスクリューとの性能評価を行った。具体的には接合部強度としてのせん断性能、引き抜き性能および堤体としての耐荷力性能を検証するため、接合部強度試験と実大堤体載荷試験を行った。結果は以下のとおりであった。

- 1) 2.2 では、異形棒鋼とラグスクリューを用いて1面せん断試験、引き抜き試験、面圧試験を行った。その結果、オールウッド型木製治山ダムの接合具としての異形棒鋼の性能はラグスクリューに比べ、せん断性能は同等以上、引き抜き性能はやや劣るものの、代替は可能であることが示された。また、ラグスクリューによる現状の施工条件(接合具径 16mm、先孔径 15mm、打ち込み深さ 200mm)と同程度の引き抜き性能を期待する場合、先孔径を $\phi 14\text{mm}$ 、打ち込み深さは 200mm とする必要があることが分かった。
- 2) 2.3 では、接合具に異形棒鋼を用いたときの堤体としての耐荷性能を明らかにすることを目的として、実大寸法の堤体載荷試験を行った。過去にラグスクリューを用いて行った同様の試験結果とも比較することで、異形棒鋼の有用性について検証を行った。その結果、ラグスクリュー試験体の破壊時の最大荷重 106kN を上回る耐荷性能が確認された。また、異形棒鋼を用いた構造物は、ラグスクリューを用いた構造物よりも剛性の低下が早い段階で生じるが、その後も荷重に抵抗し続けることが確認された。異形棒鋼に作用する引張力とせん断力について、引張力では荷重が上がるにつれて、上流側1列の異形棒鋼だけでなく、その下流側に位置する異形棒鋼と併せて、複数の異形棒鋼で荷重に抵抗することが示された。せん断力については、ラグスクリュー試験体の挙動と大きな差は見られなかった。

第3章 腐朽調査

3.1 はじめに

溪流の荒廃や溪床に堆積している不安定土砂を固定し、溪床の安定を図ることを目的とした治山ダム（床固工）への木材利用は、その規模から大量の木材利用が望まれ、環境への負荷軽減や景観性、地域材の需要拡大などの効果が期待されている。これらの木製治山ダムが有する機能を長期間にわたって発揮させるためには、適切な維持管理を行うことが必要であり、点検調査時に木材の健全度を簡便かつ的確に調査し、腐朽しつつある木材の残存強度を判定する手法を確立することが求められる。さらに、こうした調査結果に基づく適切な補修・補強、更新手法を確立することも課題である。

野外に設置された木材の耐朽性能の評価や耐用年数に関する調査・研究は古くから行われており、なかでも土中に埋め込んだ杭の耐久性を評価した調査・研究が多い。たとえば、本邦産 13 種の針葉樹材と 12 種の広葉樹材に対する試験を実施した北島⁹⁴⁾、北村⁹⁵⁾の報告があり、北村は 25 樹種について全長の 1/2 を砂中に埋め込んで 5 年間放置し、3 年目以降の経過年ごとにその断面の観察と、地上と地下 2 部分の圧縮強度の減少率を求めている⁹⁶⁾。雨宮ら⁹⁷⁾は 1963 年、野外杭試験における杭の被害程度を評価する方法として、表 3.1 に示したような目視判定基準を定め、被害度 3 を使用不能目安とすることを提案している。また、雨宮、松岡ら⁹⁸⁾⁻¹⁰²⁾は国産 49 樹種、外国産 16 樹種、合計 65 樹種の野外杭試験を実施し、経過年数と被害度、縦圧縮強度変化等の関係について報告するとともに、樹種ごとの耐久性区分表を作成している^{98), 99)}。その後も継続して研究が進められ、1984 年の松岡ら¹⁰¹⁾の報告では心材の耐久性区分が示された。その他にも野外杭試験は防腐処理を施した材の耐久性評価等の目的で実施されている（例えば文献¹⁰²⁾⁻¹¹³⁾）。

表 3.1 目視による 6 段階評価法

被害度	観 察 状 態
0	健全
1	部分的に軽度の虫害または腐朽
2	全体的に軽度の虫害または腐朽
3	2 の状態のうえに、部分的に激しい虫害または腐朽
4	全面的に激しい虫害または腐朽
5	虫害、または腐朽により形がくずれる

木製治山施設に関する調査・研究をみると、長谷川ら¹¹⁴⁾⁻¹¹⁷⁾は、富山県下に設置された治山木杭の耐久性調査を実施、被害度と縦圧縮強度の関係の調査、および、被害度の経時変化に Richards 生長曲線式を当てはめることにより治山木杭の耐用年数の推定を試みている。その結果、木杭の治山機能として、杭 10 本のうち 1 本が折損する時点までは機能を保つと考えた場合、耐用限界被害度として 3.4、これに対応するスギの耐用年数は約 7.4 年、カラマツ 8.4 年という数値を算出している。また、飯島¹¹⁸⁾はスギ材を用いた木製構造物に対する調査を実施し、腐朽度とピロディン打ち込み深さの関係について報告している。津島ら¹¹⁹⁾⁻¹²³⁾は、大分県下全域の 171 箇所の木製構造物の劣化状況の調査を行い、木材腐朽菌およびシロアリによる被害が主であり、使用部材の耐用限界基準を被害度 3.4、ピロディン貫入深さの平均値 33mm、使用不能材率 70%としたときの耐用年数を、これらの劣化指標値と経過年数との間の関係を直線回帰式に当てはめて求め、無処理材 6 年、処理材 16 年としている。倉岡ら¹²⁴⁾は、熊本県内 25 箇所に設置された木柵工の小径丸太について、部位ごとの劣化の経年変化を調査した。その結果、含水率が常に高い縦杭・横木の地際部では、他の部位に比べて劣化の進行が早いこと、縦杭の頂上部は木口となり、含水率が同程度であっても縦杭中央部よりも劣化の進行が早いことを明らかにした。町田ら¹²⁵⁾は、落石防護柵の緩衝材に使用されているスギ間伐材丸太の経過年数と残存強度の関係を調査し、使用部位や設置環境によって劣化の程度は異なるものの、劣化が最も進行している部位では 5 年経過時点で健全材の 20%まで低下することを示している。上野¹²⁶⁾は、使用条件による耐用年数の違い等を検討するため、北海道内の 119 施設（すべてカラマツを使用）について目視およびドライバ刺しこみ等による調査を実施し、防腐処理を施すことで長期間の機能維持が期待できることを示した。また、植生の回復状況を考慮すると、概ね 20 年程度は施設の機能を維持する必要があるとの考えを示した。その他にも、井戸ら¹²⁷⁾による落石防止壁の緩衝材に使用されている間伐材丸太の劣化調査、大橋ら¹²⁸⁾によるカラマツ杭を用いた木柵工の調査、石川ら^{129), 130)}による木製治山床固工および護岸工の調査、大堂¹³¹⁾による木製床固工、木柵流路工、木製根固工の腐朽状況調査、菊池¹³²⁾、森川ら¹³³⁾による木製治山ダムの追跡調査等がある。また、生田ら¹³⁴⁾は木製土留工を対象にピロディンを用いて防腐処理を施した場合の耐用年数について報告している。秋田ら¹³⁵⁾⁻¹³⁹⁾や海老原ら¹⁴⁰⁾、山内ら^{141), 142)}は長野県内に設置された山腹工や治山ダムを対象にピロディンやレジストグラフを用いて部材劣化調査を実施している。土屋ら¹⁴³⁾、阿部ら¹⁴⁴⁾は京都府内に設置された治山ダムを対象に曲げ破壊試験やファコップを用いた応力波伝播速度試験、レジストグラフによる穿孔抵抗試験を実施し、維持管理手法の検討を行っている。安田ら¹⁴⁵⁾は使用期間等に応じた適切なメンテナンス方法を検証するため、木柵を 5 年間暴露し、防腐処理条件、メンテナンス方法の違いによる腐朽状況について報告している。

以上のように、これまで数多くの調査・研究が行われているが、木材の腐朽速度やその進行は、設置場所の水分条件や気温等の環境条件、土壌との接触条件等により大きく異なり、一様ではないため、明確な基準が示されていないのが現状である。また、木製治山ダムに用いられるような、比較的断面の大きい木材では、小径丸太

などの断面が小さい木材とは心材率が異なり、腐朽速度や強度の低下速度等、腐朽実態が異なると考えられる。秋田県内に設置された木製治山ダムについても腐朽調査が行われている¹⁴⁶⁾が、データの蓄積数はあまり多くない。

また、1.3.4 で述べたように、スギ材を用いた木製ダムが施工後 40 年以上経過しても施設としての機能を維持している実例がある一方で、同年代やそれ以降に建造された木製ダムであっても、腐朽により施設としての機能を失っている堤体も存在しており、オールウッド型木製治山ダムとしての定量的な腐朽の評価は今後の維持管理を含めて重要な課題である。

そこで、オールウッド型木製治山ダムの維持管理手法を確立するための基礎データを得ることを目的として、これまでに秋田県および熊本県で建設されたオールウッド型木製治山ダムを対象に腐朽調査を実施した¹⁴⁷⁾⁻¹⁴⁹⁾。

3.2 調査箇所

3.2.1 秋田県内

秋田県では、2001（平成 13）年度よりオールウッド型木製治山ダムの施工が開始され、その数は 2011（平成 23）年度までに 30 基を超えている。本研究では、これらのオールウッド型木製治山ダムのうち、6 地区 7 基について木材の劣化状況調査を行った。

調査対象施設の位置を図 3.1 に、各施設の緒元を表 3.2 に示す。

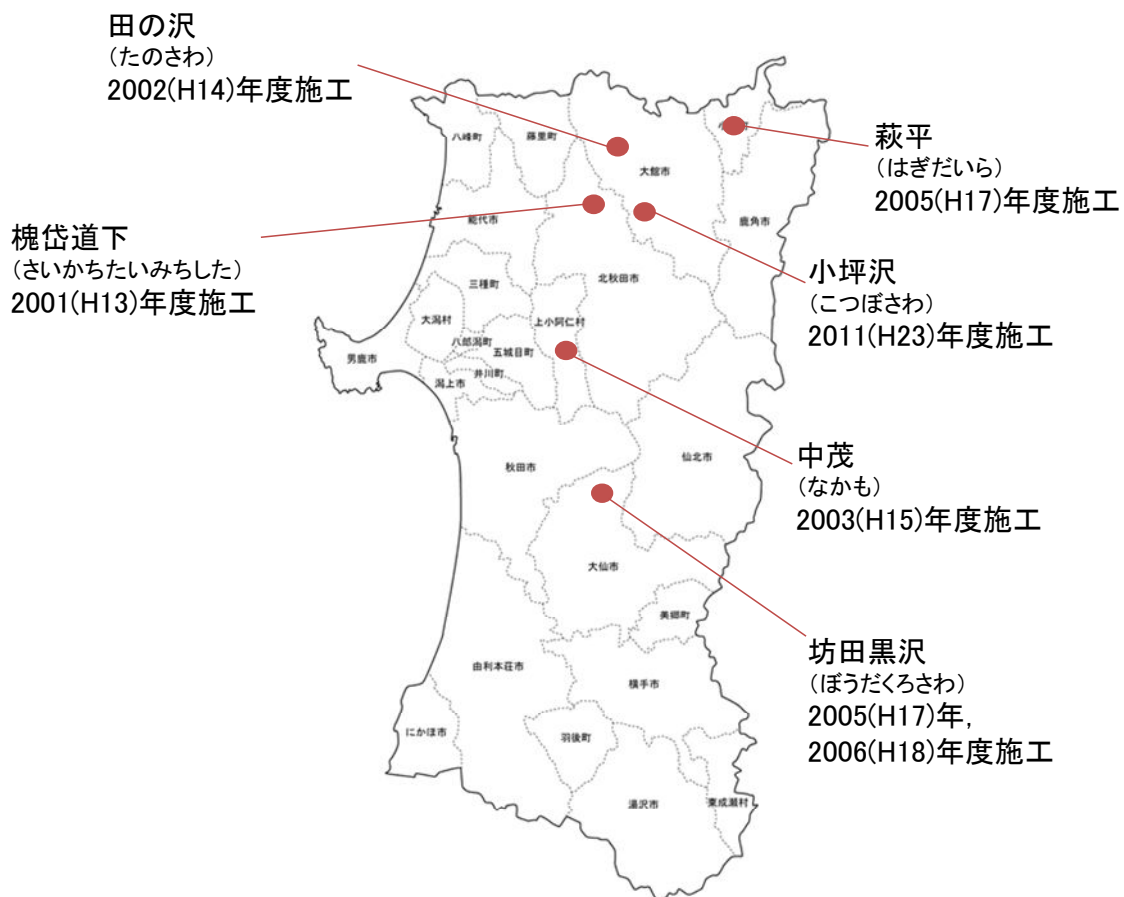


図 3.1 調査対象施設（秋田県内）

表 3.2 施設緒元

地区名	名称	所在地	施工年月	調査年月	経過年数(年)	堤長(m)	堤幅(m)	堤高(m)	袖高(m)	木材使用量(m ³)
小坪沢	No. 1	大館市	2011.10	2012.09	1.0	18.9	1.8	2.5	1.0	139.1
中茂	No. 2	上小阿仁村	2003.3	2012.09	9.5	20.7	1.8	2.5	1.0	127.4
田の沢	No. 2	大館市	2002.12	2012.08	9.75	27.0	1.8	3.0	1.0	148.1
槐岱道下	No. 3	北秋田市	2002.3	2012.09	10.5	16.5	1.8	3.0	1.0	84.2
萩平	No. 3	小坂町	2005.12	2013.06	7.5	12.9	1.8	2.0	1.0	110.5
坊田黒沢	No. 12	大仙市南外	2007.10	2013.10	6.0	37.2	1.8	2.5	1.0	230.4
坊田黒沢	No. 14	大仙市南外	2007.3	2013.10	6.6	24.9	1.8	3.0	1.0	173.0

3.2.2 熊本県内

熊本県内に設置されたオールウッド型木製治山ダムは1地区4基である。調査対象施設は図 3.2 に示すように、熊本県北東部の阿蘇郡南小国町に位置し、最下流部にコンクリート製の床固工 (No.1 床固工) を配し、その上流に4基のオールウッド型木製床固工 (No.2~No.5 床固工) が連続して配置されている (図 3.3)。各施設の緒元を表 3.3 に示す。



図 3.2 調査対象施設 (熊本県内)

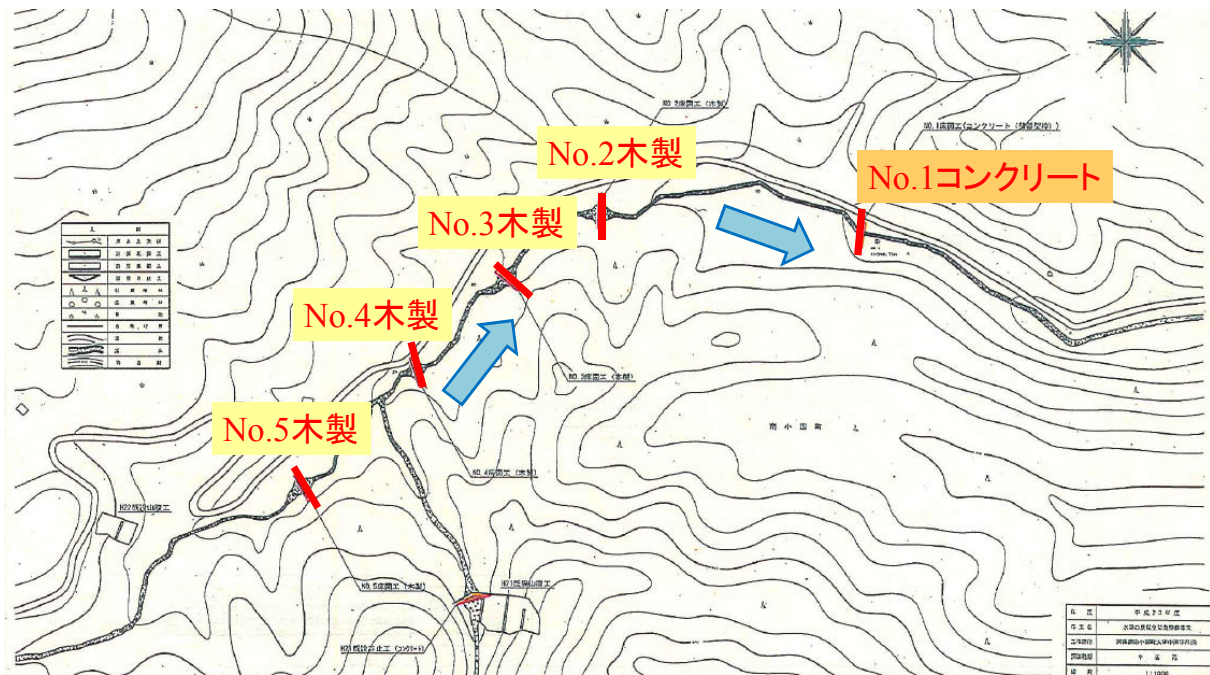


図 3.3 調査対象施設位置図（熊本県）

表 3.3 施設緒元

	経過年数 (年)	延長 (m)	幅 (m)	高さ (m)	袖高 (m)	体積 (m ³)	木材使用量 (m ³)	備考
No.1 コンクリート	2.2	18.00	1.50	3.00	1.20	88.18	6.23	木材は残存型枠として使用
No.2 木製	2.2	26.40	1.80	2.50	1.25	186.49	186.49	
No.3 木製	2.2	18.00	1.80	2.00	1.00	99.41	99.41	
No.4 木製	2.2	21.90	1.80	2.00	1.00	113.85	113.85	
No.5 木製	2.2	23.10	1.80	2.00	1.00	119.66	119.66	

3.2.3 調査箇所の気象

オールウッド型木製治山ダムが設置されている近隣のアメダス観測所の 20 年間の気象データ（1993 年～2012 年）を整理した結果を表 3.4 に示す。表中の温量指数とは、月平均気温 5℃以上の月について、月平均気温から 5℃を減じて加算した値のことで、暖かさを示す指数である¹⁵⁰⁾。温量指数による気候帯は表 3.5 のとおりである。

各地域の温量指数と年間平均降水量の関係を図 3.4 に示す。熊本県南小国町の芹原地区は秋田県内の地域に比べ、温量指数、年降水量ともに高く、温量指数 104.0℃、年間平均降水量は 2,437mm に達した。秋田県内の地域で見ると、坊田黒沢、田の沢でやや温量指数が高く、暖温帯の気候に位置している。その他の地域間に温量指数の差はほとんどなく、いずれの地域も冷温帯に区分される。年間平均降水量では中茂地区で 2,000mm を超えている（同 2,020mm）が、その他の地域は約 1,400～1,700mm で全国平均値（1,500～1,600mm 程度）と同程度であった。

表 3.4 各地域の気象条件

地区名	名称	所在地	アメダス観測地点		気温 (°C)			温量指数		降水量 (mm)			年最大積雪深 (cm)	
			地点名	標高(m)	平均	最高	最低	(°C)	区分	年平均	最大日	最大時間	~	~
芹原	No.2	南小国町	南小国	448	13.1	36.3	-12.9	104.0	暖温帯	2,437	306	98	-	-
小坪沢	No.1	大館市	大館	49	10.2	37.5	-19.0	83.8	冷温帯	1,682	163	67	-	-
中茂	No.2	上小阿仁村	阿仁合	120	9.9	36.8	-14.1	81.1	冷温帯	2,020	192	56	194	~ 337
田の沢	No.2	大館市	能代	6	11.4	36.8	-12.4	90.8	暖温帯	1,527	118	57	41	~ 228
槐岱道下	No.3	北秋田市	鷹巣	29	10.4	37.4	-16.2	84.2	冷温帯	1,707	169	57	102	~ 303
萩平	No.3	小坂町	大館	49	10.2	37.5	-19.0	83.8	冷温帯	1,682	163	67	-	-
坊田黒沢	No.12 No.14	大仙市南外	横手	59	11.1	36.9	-13.9	92.2	暖温帯	1,738	178	59	164	~ 449

※：観測地点「南小国」、「大館」では積雪の観測は行われていない。

表 3.5 温量指数による気候帯区分

温量指数	気候帯
15°C未満	寒帯
15°C以上55°C以下	亜寒帯
55°C以上85°C以下	冷温帯
85°C以上180°C以下	暖温帯
180°C以上240°C以下	亜熱帯
240°C以上	熱帯

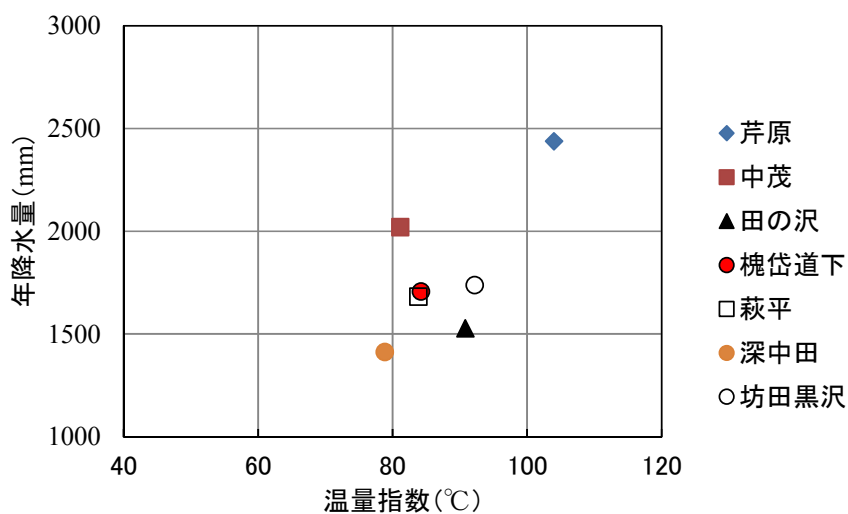


図 3.4 各地域の温量指数と年降水量

3.3 調査方法

目視観察を行ったあと、劣化状況の把握には打ち込み試験機（PILODYN；ピロディン）と応力波伝播速度測定器（FAKOPP；ファコップ）を使用した。測定箇所は写真 3.1 に示すように、放水路及び袖部の天端材とした。天端材を測定対象としたのは、オールウッド型木製治山ダム の堤体は単材を上下流方向および左右岸方向に交互に積み重ねて構築されているため、腐朽がより進行しやすく、堤体に何らかの損傷が起こる可能性が高いためである。

なお、熊本県内のオールウッド型木製治山ダムについて、流水の影響のない袖部については参考として、高周波含水率計を用いて部材表面の含水率測定を行った。

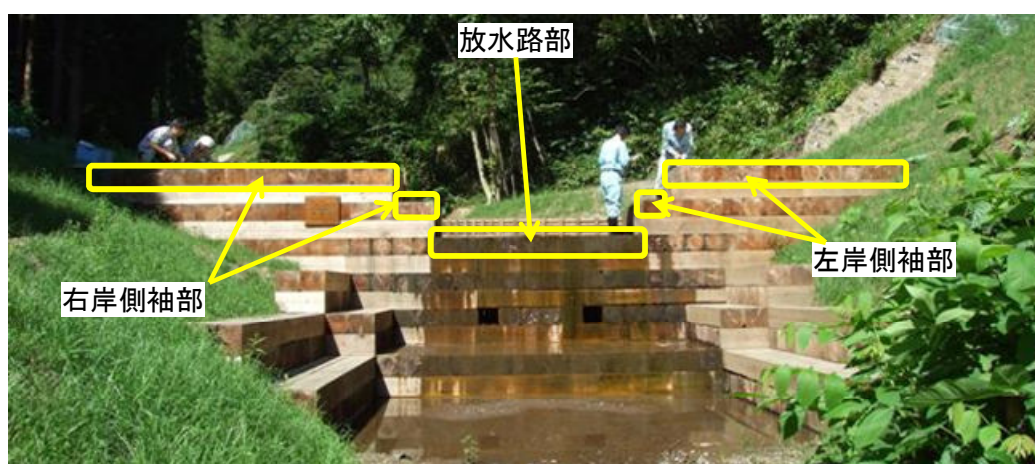


写真 3.1 測定箇所（下流側より望む）

3.3.1 ピロディン打ち込み深さの測定

打ち込み深さの測定に用いるピロディンは、内蔵されたバネを一定のエネルギーにより、先端の鋼製ピンを木材の表面から内部に向かって打ち込み、その打ち込み深さを測定するものである。最大打ち込み深さは40mmである。

ピロディンによる測定では、1部材につき両端部より200mmの位置と中央の3箇所で測定を行い、その平均値を該当部材の測定値とした(図3.4、写真3.2)。1箇所につき2回の測定を行い、平均値を求めた。2回の値の差が3以上となった箇所についてはもう1回測定を追加し、計3回の平均値を求めた。

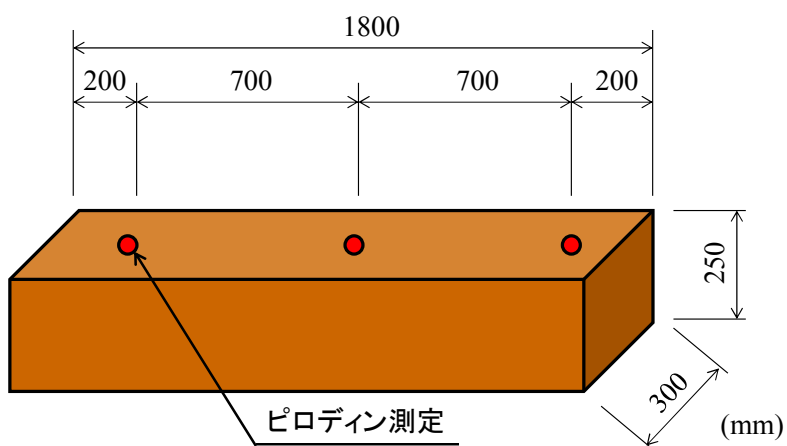


図 3.4 計測位置



写真 3.2 ピロディンと現地計測状況

3.3.2 応力波伝播速度の測定

応力波伝播速度の測定では、部材の両端部より 200mm の位置にセンサーを打ち込み、片方のセンサーを打撃して応力波を発生させ、他方のセンサーに到達するまでの時間を計測、これをセンサー間距離で除することで応力波伝播速度を算出して比較した（図 3.5、写真 3.3）。測定方向は各部材の長さ方向（繊維方向）とした。同一部材についてセンサーの設置位置を変えながら計 5 回以上の測定を行い、該当部材の平均値を求めた。

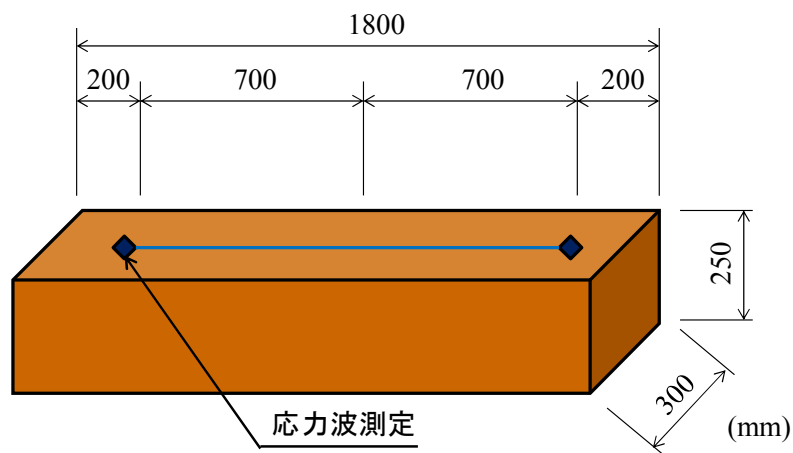


図 3.5 計測位置



写真 3.3 応力波伝播速度測定器（FAKOPP；ファコップ）と現地計測状況

3.4 調査結果

3.4.1 秋田県内

各施設の状況を写真 3.4～3.8 に示す。経年に伴い、木製ダム周辺に植生が侵入・繁茂し、木製ダムが自然の景観に溶け込んでいくのが分かる。木製ダムを含む治山ダムは、1.2 で述べたように溪床の侵食を防ぎ、かつ溪床に堆積した不安定土砂の移動を抑止することで、溪流の荒廃や溪流沿いの斜面崩壊を防止するために設置するものである。植生が進入・繁茂するのは溪床が安定してきている証拠で、オールウッド型木製治山ダムが施設としての機能を発揮していることが伺える。

目視観察によると、腐食は袖部や地際部、水際部で進行していることが認められる。これらの部位に共通していることは、乾湿を繰り返しやすい部位であることが挙げられる。また、風の通りにくい箇所でも腐朽は進行しやすいようであるが、時間経過に伴う周辺環境の変化もあり、定量的な評価は出来ていない。調査したいずれの施設も放水路部は流水があり、これらの部位では目立った腐朽は認められなかった。木材保存学の分野では、木材の腐朽（木材腐朽菌の生育）は、栄養（木材自身）、温度、水分、酸素の 4 条件が揃うことで生じ、このうち一つでも条件を満たさなければ腐朽しにくいことが知られている。したがって、放水路部は、これらの条件のうち栄養、水分、温度の条件は満足するが、流水があることで酸素の条件は満足せず、腐朽しにくい環境にあると言える。



写真 3.4 現地の状況（小坪沢 No.1、経過年数 1.0 年）

施工後約6ヶ月経過



施工後約9年6ヶ月経過



写真 3.5 現地状況（中茂 No.2、経過年数 9.5 年）



木材に付着している腐朽菌

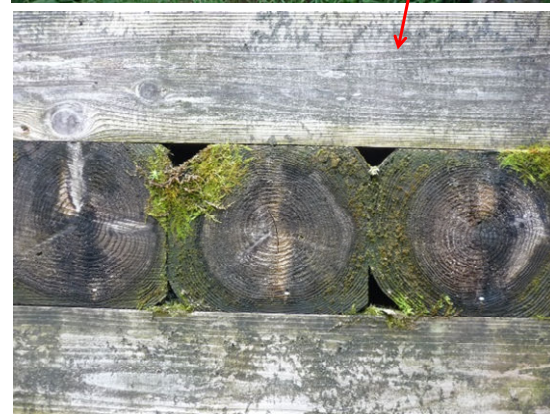
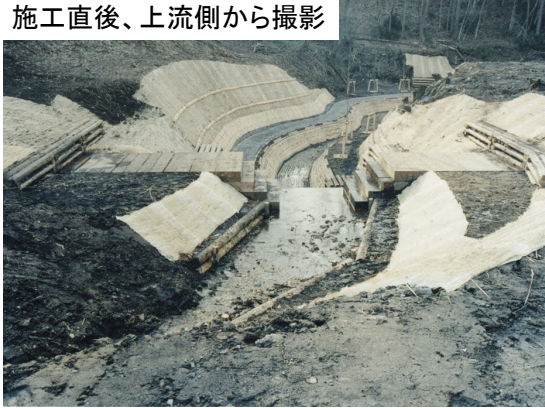


写真 3.6 現地状況（田の沢 No.2、経過年数 9.75 年）

施工直後、上流側から撮影



施工後約10年6ヶ月経過



下流側に設置された木製流路工



写真 3.7 現地状況（槐袋道下 No.3、経過年数 10.5 年）

施工直後



施工直後、右岸側から撮影



施工後約7年6ヶ月経過



写真 3.8 現地状況（萩平 No.3、経過年数 7.5 年）

各施設の測定結果をまとめたものを表 3.4 に、測定したピロディン値 (P 値) を図 3.6 に、ピロディン値を高低順に順位化した結果を図 3.7 に示す。

経過年数が 9 年以上の施設に着目すると、中茂 No.2 (経過年数 9.5 年) の袖部、放水路部のピロディン平均値はそれぞれ 34.7mm、29.4mm であった。同様に、槐岱道下 No.3 (経過年数 10.5 年) では 35.1mm、28.7mm、田の沢 No.2 (経過年数 9.75 年) では 25.1mm、29.0mm となり、田の沢 No.2 を除く 2 施設では袖部で腐食の進行が認められた。また、その他の施設においても袖部では最大値で 40mm を越えている部位が散見され、袖部での腐食の進行が認められる。一方、経過年数がわずか 1 年の小坪沢 No.1 でも袖部の最大値で 38.0mm を記録しており、スギ材そのものの硬さや含水率条件などが影響していることが伺える。放水路部では最大値で 40mm を越えている箇所はなかったが、いずれの施設でも平均値は 30mm 前後を記録した。

変動係数に着目すると、袖部では施設によって 9.8%~21.5% とばらつきが大きい。放水路部では槐岱道下 No.3 (経過年数 10.5 年) の 24.0%、坊田黒沢 No.14 (経過年数 6.6 年) の 17.1% が比較的大きいが、その他 5 施設では経過年数に関わらず、13.0%~14.7% とばらつきが小さかった。

経過年数に着目すると、袖部では年数の経過に伴いピロディン値が大きくなる傾向が伺えるが、相関は低い ($R^2=0.18$)。それに対し、放水路部では経年とともにピロディン値はやや低くなる傾向が伺える ($R^2=0.56$) が、目視観察の結果では経年に伴う劣化は生じていないと思われる。

なお、ピロディンの最大打ち込み深さが 40mm のため、これ以上の深さまで腐食が進行していると計測できない。そのため、小坪沢 No.1 および田の沢 No.2 を除く 5 施設の平均値は表中の値よりも大きくなっていることも考えられる。

表 3.4 調査結果

小坪沢 No.1	袖部		放水路部		中茂 No.2	袖部		放水路部	
	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)		P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)
1.0年					9.5年				
max	38.0	4828.0	37.0	3614.0	max	40.0	3324.9	38.0	3324.1
min	24.0	3034.2	24.0	3215.0	min	24.0	970.0	22.0	2595.6
ave.	28.1	3854.6	32.8	3360.3	ave.	34.7	2383.0	29.4	2918.4
S.D.	3.4	482.2	4.3	117.4	S.D.	7.0	948.7	4.3	201.9
C.V.	12.2	12.5	13.1	3.5	C.V.	20.2	39.8	14.7	6.9
田の沢 No.2	袖部		放水路部		槐岱道 下No.3	袖部		放水路部	
	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)		P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)
9.75年					10.5年				
max	33.0	4710.1	34.0	3290.8	max	40.0	3837.0	39.0	3252.8
min	17.0	2619.0	24.0	2394.4	min	28.0	2066.2	20.0	2764.1
ave.	25.1	3671.6	29.0	2857.9	ave.	35.1	2882.2	28.7	2996.3
S.D.	4.2	602.7	3.8	337.0	S.D.	3.5	616.5	6.9	162.8
C.V.	16.9	16.4	13.0	11.8	C.V.	9.8	21.4	24.0	5.4
萩平 No.3	袖部		放水路部		坊田黒 沢No.12	袖部		放水路部	
	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)		P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)
7.5年					6.0年				
max	40.0	1729.1	40.0	2462.5	max	40.0	4510.6	38.0	2986.5
min	16.0	474.7	22.0	607.8	min	17.0	3196.1	20.0	2607.6
ave.	29.9	846.4	29.6	1251.3	ave.	26.5	3804.0	27.9	2782.0
S.D.	6.1	359.2	4.1	699.9	S.D.	5.5	349.6	3.9	160.1
C.V.	20.5	42.4	13.9	55.9	C.V.	20.6	9.2	14.0	5.8
坊田黒 沢No.14	袖部		放水路部						
	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	伝搬速度 (m/sec)					
6.6年									
max	40.0	4340.5	40.0	3626.9					
min	18.0	3124.1	20.0	2480.8					
ave.	29.1	3686.0	31.1	3083.7					
S.D.	6.3	390.8	5.3	356.1					
C.V.	21.5	10.6	17.1	11.5					

注：ピロディン値（P 値）の最大値、平均値では、P 値 \geq 40 の値を P 値=40 として求めている。

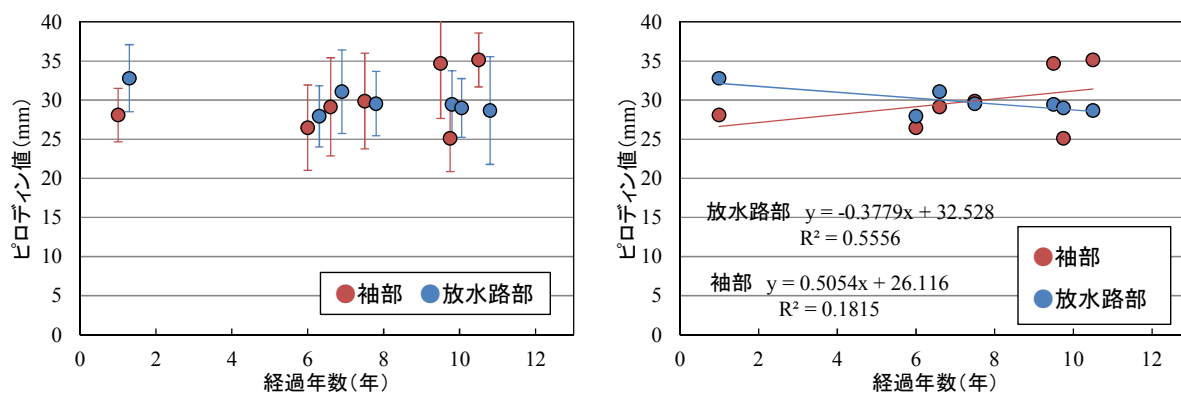
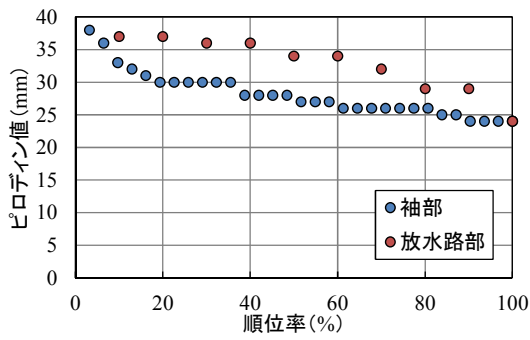
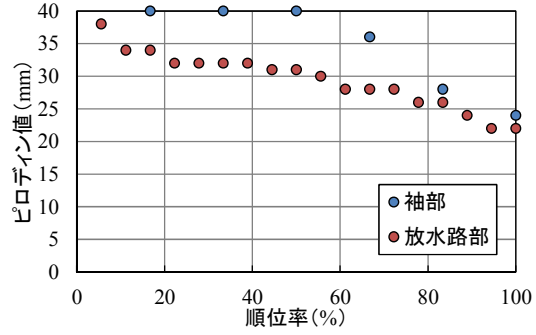


図 3.6 部位別のピロディン値
○：平均値、エラーバー：標準偏差の幅

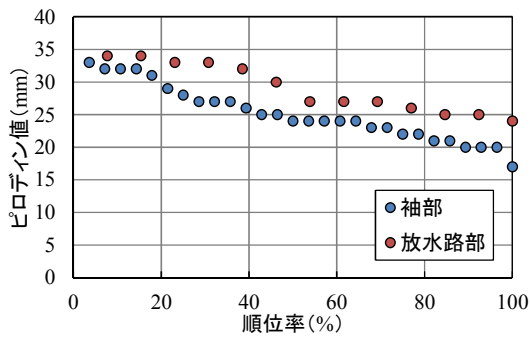
小坪沢No.1 経過年数:1.0年



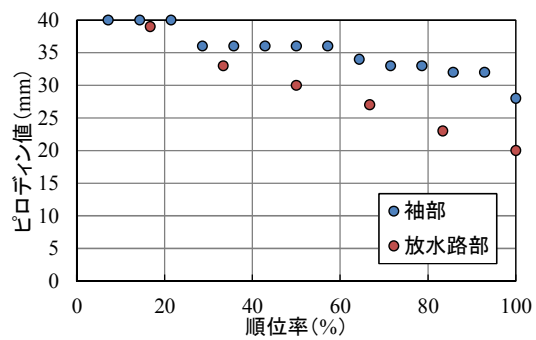
中茂No.2 経過年数:9.5年



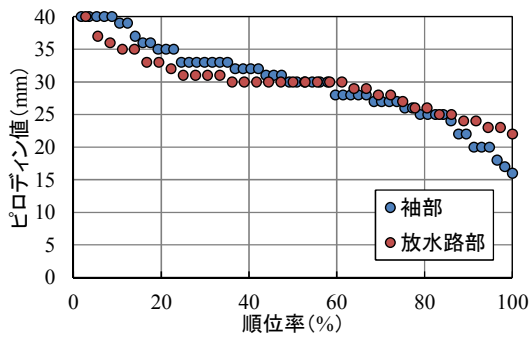
田の沢No.2 経過年数:9.75年



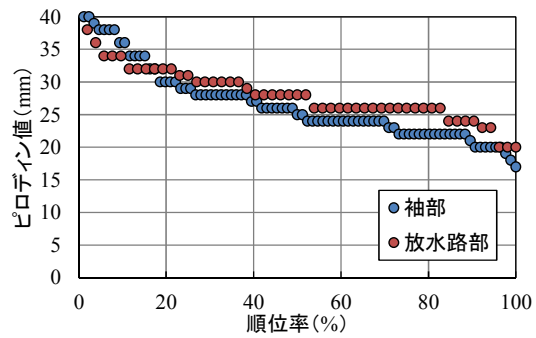
槐岱道下No.3 経過年数:10.5年



萩平No.3 経過年数:7.5年



坊田黒沢No.12 経過年数:6.0年



坊田黒沢No.14 経過年数:6.6年

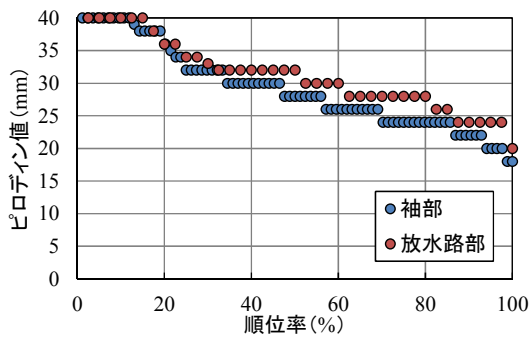


図 3.7 部位別のピロディン値順位率

伝播速度の測定結果を図 3.8 に示す。伝播速度は密度に依存し、密度が大きくなると伝播速度は小さくなる。そのため、常時水に浸かっている放水路部では含水率（密度）が高く、伝播速度は小さくなっている。放水路部の伝播速度値のばらつきは概ね一定の値を示しているのに対し、袖部ではばらつきが大きい。この理由として、放水路部では常水状態にあるため、酸素の供給がなく、腐朽が進行せず健全な状態を保っているものと考えられる。萩平 No.3 では一様に伝播速度値が小さいが、放水路部においてばらつきが大きい。

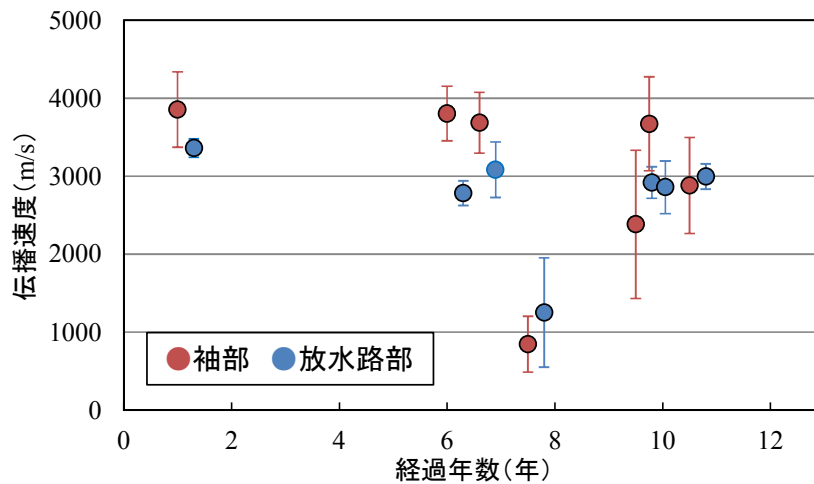
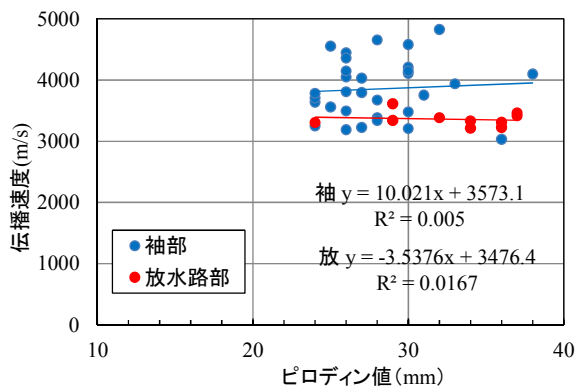


図 3.8 部位別の伝播速度

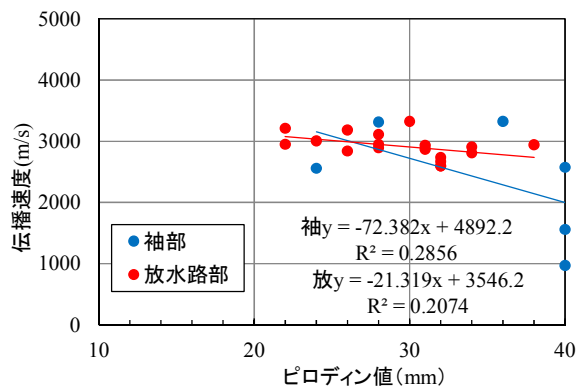
○：平均値、エラーバー：標準偏差の幅

伝播速度とピロデイン値の関係を図 3.9 に示す。いずれの施設においてもピロデイン値と伝播速度値の相関は袖部で $R^2 = 0.005 \sim 0.286$ 、放水路部で $R^2 = 0.001 \sim 0.291$ と低く、相関は得られなかった。この結果は、木製防風柵工を対象に行われた既往の結果 ($R^2 = 0.273$) と同程度またはそれ以下であった¹⁵¹⁾。

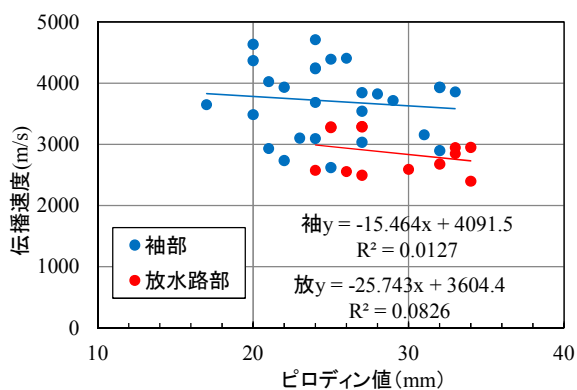
小坪沢No.1 経過年数:1.0年



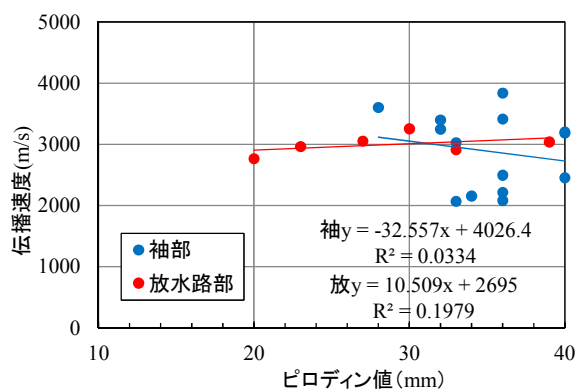
中茂No.2 経過年数:9.5年



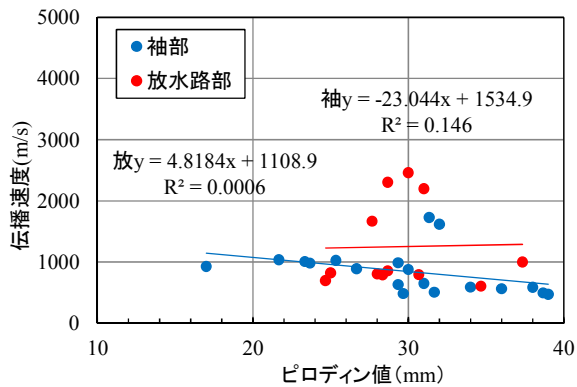
田の沢No.2 経過年数:9.75年



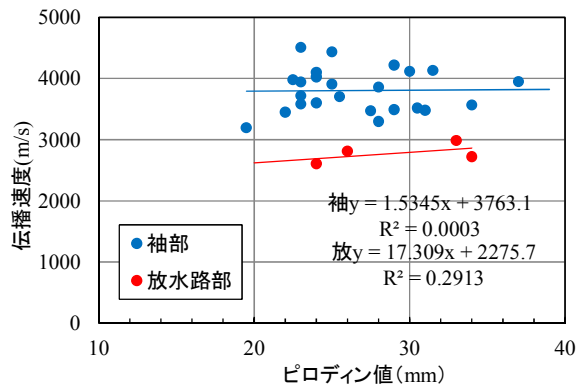
槐袋道下No.3 経過年数:10.5年



萩平No.3 経過年数:7.5年



坊田黒沢No.12 経過年数:6.0年



坊田黒沢No.14 経過年数:6.6年

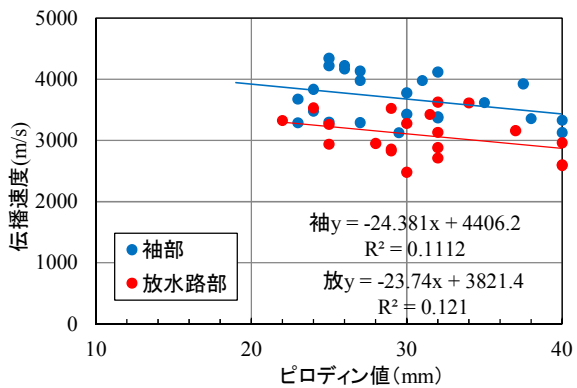


図 3.9 部位別の伝播速度とピロディン値の関係

3.4.2 熊本県内

各施設の状況を写真 3.9～3.12 に示す。設置後 2 年程度と短いですが、木製ダム周辺に植生が侵入・繁茂し始めているのがわかる。

目視観察によると、目立った腐食は認められないが、秋田県内の施設と同様、劣化は袖部や地際部から進行しているようである。

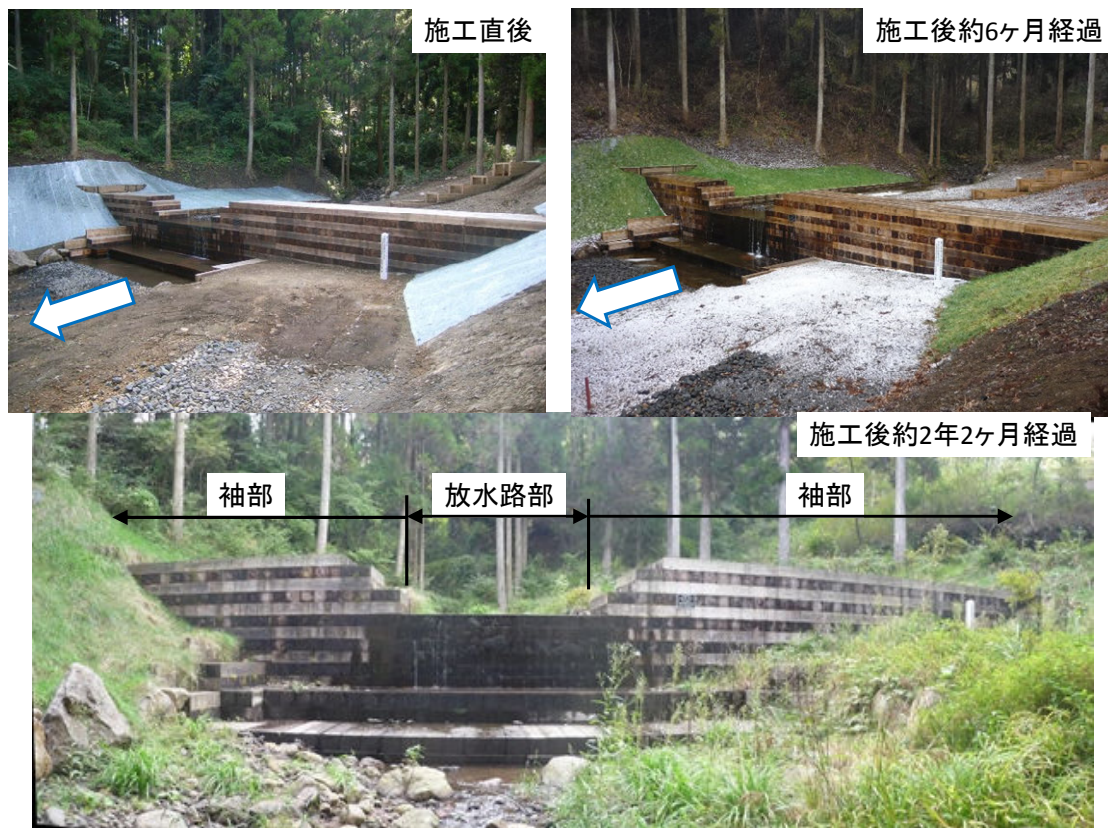


写真 3.9 現地状況（芹原 No.2、経過年数 2.2 年）



写真 3.10 現地状況（芹原 No.3、経過年数 2.2 年）



写真 3.11 現地状況（芹原 No.4、経過年数 2.2 年）



施工後約2年2ヶ月経過



写真 3.12 現地状況（芹原 No.5、経過年数 2.2 年）

各施設の測定結果をまとめたものを表 3.5 に、測定したピロディン値（P 値）を図 3.10 に、ピロディン値を高低順に順位化した結果を図 3.11 に示す。

各施設のピロディン平均値は袖部で 18.8mm～21.0mm、放水路部で 21.8mm～23.0mm とどちらの部位も健全な状態であると言える。放水路部の方が袖部よりもピロディン平均値が高いのは、放水路部では常に水に浸された状態にあり、含水率が高く木部材表面が軟らかくなっているためと考えられる。袖部と放水路部での標準偏差、変動係数を比較すると、袖部で 2.8mm～4.5mm、13.3%～23.3%、放水路部で 2.3mm～3.4mm、10.1%～15.3%と放水路部の方がばらつきは小さい。この理由として、雨水等によって乾湿が繰り返される袖部よりも放水路部は常水があり酸素の供給が妨げられるため、腐食の進行等に差が生じにくいと考えられる。3.4.1 で示したように、秋田県で行った調査でも同様の傾向がみられており、今後、経年に伴い袖部と放水路部での劣化程度の違いが明らかとなっていくものと推察される。

表 3.5 調査結果概要

袖部	No.2			No.3			放水路部	No.2			No.3		
	P値 (mm)	含水率 (%)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	含水率 (%)	伝搬速度 (m/sec)		P値 (mm)	MC (%)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	MC (%)	伝搬速度 (m/sec)
max	29.3	67.0	4149.5	26.7	130.5	3986.8	max	29.7	—	3069.2	28.0	—	2996.9
min	14.5	6.0	2172.0	13.0	29.5	1970.7	min	17.5	—	1841.2	17.5	—	2263.6
ave.	21.0	25.4	3207.7	18.8	54.9	3223.4	ave.	22.8	—	2648.8	21.8	—	2679.9
S.D.	2.8	11.0	606.2	3.6	20.0	446.0	S.D.	3.1	—	348.3	2.6	—	228.1
C.V.	13.3	43.2	18.9	19.1	36.3	13.8	C.V.	13.8	—	13.1	11.9	—	8.5
袖部	No.4			No.5			放水路部	No.4			No.5		
	P値 (mm)	含水率 (%)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	含水率 (%)	伝搬速度 (m/sec)		P値 (mm)	MC (%)	伝搬速度 (m/sec)	P値 (mm)	MC (%)	伝搬速度 (m/sec)
max	30.7	125.0	3760.8	35.0	111.5	3677.2	max	28.7	—	2931.3	27.3	—	2875.7
min	12.0	25.5	1562.1	10.5	17.5	727.3	min	17.5	—	2477.9	18.7	—	1869.9
ave.	20.0	54.5	3082.0	19.3	37.2	3030.4	ave.	22.2	—	2720.4	23.0	—	2342.9
S.D.	3.0	18.6	530.4	4.5	14.7	460.3	S.D.	3.4	—	166.0	2.3	—	336.3
C.V.	15.0	34.2	17.2	23.3	39.4	15.2	C.V.	15.3	—	6.1	10.1	—	14.4

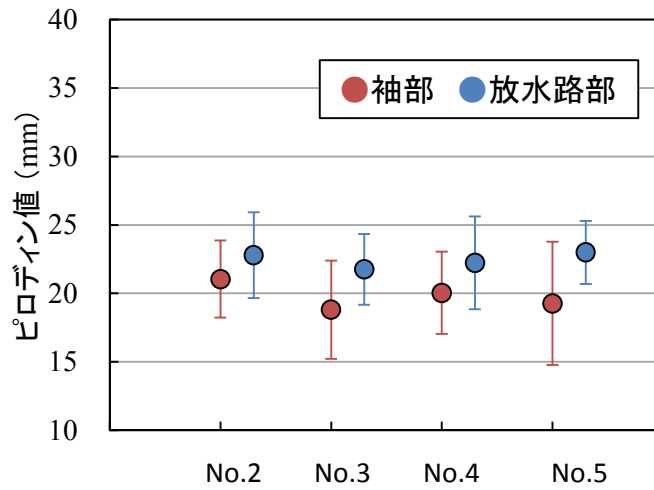
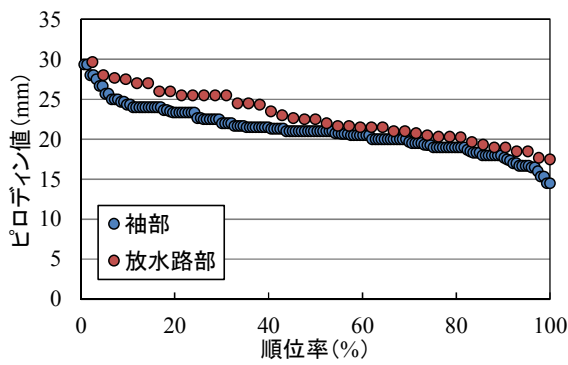
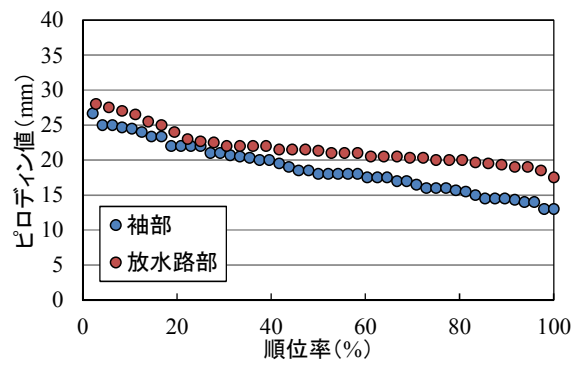


図 3.10 部位別のピロデイン値
○、●：平均値、エラーバー：標準偏差の幅

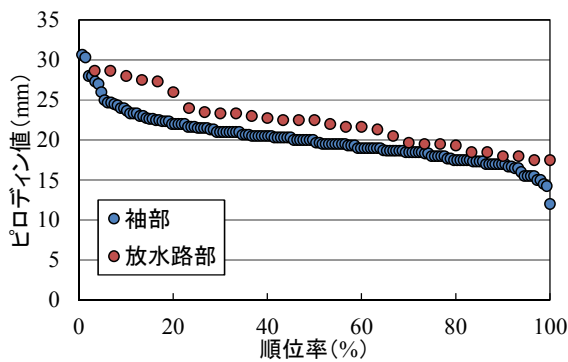
No.2 経過年数:2.2年



No.3 経過年数:2.2年



No.4 経過年数:2.2年



No.5 経過年数:2.2年

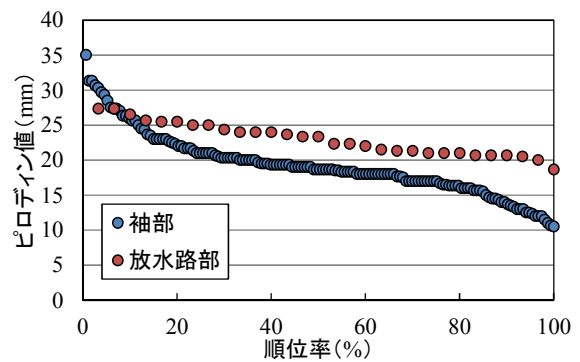


図 3.11 部位別のピロデイン値順位率

部位別の伝播速度を図 3.12 に示す。No.5 の放水路部を除いて、袖部、放水路部ともにほぼ一定の値を示している。変動係数に着目すると、袖部で 13.3%~23.1%、放水路部で 10.1%~15.3%となり、ピロディン値と同様、袖部のばらつきが大きい。

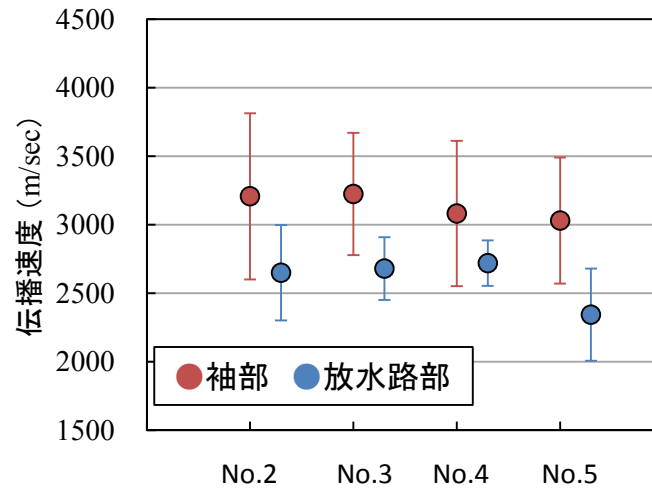


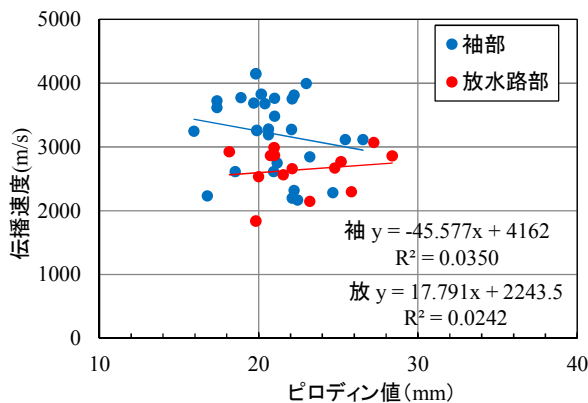
図 3.12 部位別の伝播速度

○、●：平均値、エラーバー：標準偏差の幅

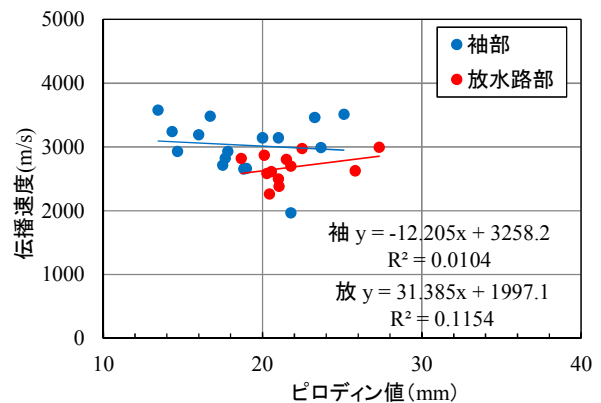
伝播速度とピロディン値の関係を図 3.13 に示す。いずれの施設においてもピロディン値と伝播速度値の相関は袖部で $R^2 = 0.012 \sim 0.120$ 、放水路部で $R^2 = 0.006 \sim 0.115$ と低く、相関は得られなかった。この結果は、秋田県内の施設を対象に行った結果よりも低い値となった。

今回の調査は施工後 2 年程度と間もない時期だったため、木材の劣化はほとんど見られなかった。今後も継続してデータの収集を行い、木部材の劣化特性を把握していく必要がある。

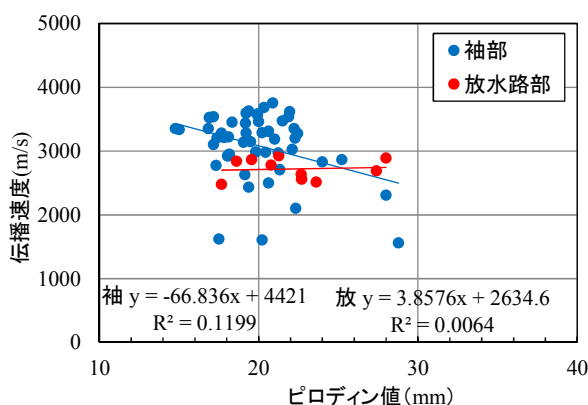
No.2 経過年数:2.2年



No.3 経過年数:2.2年



No.4 経過年数:2.2年



No.5 経過年数:2.2年

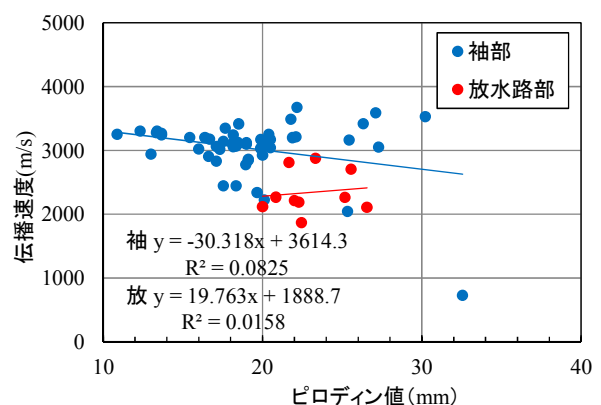


図 3.13 ピロディン値と伝播速度

3.5 まとめ

秋田県内 8 基、熊本県内 4 基のオールウッド型木製治山ダムを対象に、腐朽実態を把握するため、現地調査を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 腐朽は袖部や地際部、水際部で進行していることが認められる。これらの部位に共通していることは、乾湿を繰り返しやすい部位であることが挙げられる。
- 2) 袖部では経年に伴いピロディン値が大きくなる傾向が伺えるが、相関は低い ($R^2=0.18$)。それに対し、放水路部では経年とともにピロディン値はやや低くなる傾向が伺える ($R^2=0.56$)。これは、放水路部では常水状態にあるため、部材の含水率が高く、部材表面が軟らかくなっていくためにピンの打ち込みに対する抵抗力が減少しているためと考えられる。
- 3) 放水路部の伝播速度値は概ね一定の値を示しているのに対し、袖部では伝播速度値のばらつきが大きい。この理由として、放水路部では常水状態にあるため、酸素の供給が遮られ、腐朽が進行しにくく健全な状態を保っているためと考えられる。
- 4) いずれの施設においてもピロディン値と伝播速度値の間に相関はみられなかった。
- 5) 熊本県内の 4 基については施工後 2 年あまりと間もない時期だったため、木材の劣化はほとんど見られなかった。今後も継続してデータの収集を行い、木部材の劣化特性を把握していく必要がある。

3.6 摘要

本章では、オールウッド型木製治山ダムを対象に、腐朽実態を把握し、維持管理手法を検討するための基礎データを得ることを目的として、これまでに秋田県および熊本県で建設されたオールウッド型木製治山ダムを対象に腐朽調査を行った。結果は以下のとおりであった。

- 1) 腐朽は乾湿を繰り返しやすい部位である袖部や地際部、水際部で進行しやすいことが分かった。
- 2) ピロディンを用いた調査結果では、袖部において相関は低いものの、経年に伴いピロディン値が大きくなる傾向が伺えた。放水路部では経年とともにピロディン値はやや低くなる傾向がみられた。これは、放水路部では常水状態にあるため、部材の含水率が高く、部材表面が軟らかくなっていくためにピンの打ち込みに対する抵抗力が減少しているためと考えられる。
- 3) ファコップを用いた調査結果では、放水路部の伝播速度値が概ね一定の値を示しているのに対し、袖部では伝播速度値のばらつきが大きい。この理由として、放水路部では常水状態にあるため、酸素の供給が遮られ、腐朽が進行しにくく健全な状態を保っているためと考えられる。
- 4) いずれの施設においてもピロディン値と伝播速度値の間に相関はみられなかった。
- 5) 熊本県内の4基については施工後2年あまりと間もない時期だったため、木材の劣化はほとんど見られなかった。今後も継続してデータの収集を行い、木部材の劣化特性を把握していく必要がある。

4.1 はじめに

近年、地球温暖化問題への対応や、我が国で戦後に植栽した樹木が成長し、利用適齢期を迎え、木材の有効利用が求められていることから、森林土木事業においても木材の有効利用が急務となっている。特に溪流の荒廃や侵食防止を目的として設置される治山ダムは、ダム1基あたりの体積が数百 m³に達することから、治山ダムの建設に際し木製ダムを採用することができれば、大量の木材利用が期待できる。木材は鉄鋼やセメント、アルミニウムといった他の建設材料と比べて製造時のエネルギー消費量および CO₂ 排出量が小さい¹⁵⁴⁾ことから、木材利用による地球温暖化緩和に貢献できる。また、利用適齢期の樹木を適度に有効に利用することで、適切な森林整備が施され、森林を良好な生育状態で維持することができ、近年多発する豪雨災害等への備えの一助となることも期待できる。このような背景のもと、秋田県では木材と接合具のみを用いたオールウッド型木製治山ダム（写真 4.1）と鋼製枠の中に中詰材として森林整備により発生する間伐材を用いたハイブリッド型木製治山ダム（写真 4.2）の研究、開発が行われている。

他材料から木材へ代替することによる地球温暖化緩和効果を検討する場合、資源の採取から、製品が製造され、利用後に廃棄されるまでのライフサイクル全体に関わる環境負荷を考慮するライフサイクルアセスメント(LCA)の考え方が必要である。LCAの研究手法を用いた木材利用によるライフサイクルでの CO₂ 排出削減効果について、これまでさまざまな研究が進められている。治山ダムに限らず構造物を対象とした先行研究としては、例えば、Jönsson ら¹⁵⁵⁾はリノリウム製、ビニール製、木製の3種類の床材を対象として、ライフサイクルにおける CO₂ 排出量等の環境影響を評価した。Börjesson と Gustavsson¹⁵⁶⁾は木造建築とコンクリート造建築を対象として、ライフサイクルにおけるエネルギー消費量や温室効果ガス (GHG) 排出量を比較した。Petersen と Solberg¹⁵⁷⁾はオスロ空港の建設に使われる集成材と鉄鋼を対象として、そのライフサイクルでのエネルギー消費量、GHG 排出量、コストを比較した。加用ら¹⁵⁸⁾は地盤の液状化対策に用いられるサンドコンパクションパイル工法、セメント混合工法、木杭工法を対象として、ライフサイクルにおける GHG 排出量を比較した。これらの先行研究の全てで木材の他材料代替による CO₂ 排出削減効果が確認されている。一方、治山ダムの LCA については、これまで学術論文としての先行研究はなく、治山ダムへの木材利用によってどの程度の CO₂ 排出削減効果が見込まれるのかはまだ十分検討されていない。学会発表事例としては、高奥ら^{159), 160)}、野田ら¹⁶¹⁾、細川ら¹⁶²⁾によって行われているが、木製とコンクリート製との比較だけが行われており、木製において複数の工法が存在することは考慮されておらず、さらに、鋼製のようなコンクリート製以外の治山ダムとの比較を行うまでには至っていない。また、LCA において異なる工法を比較する際に統一しなければいけない機能単位が明確でなく、適切な評価が行われていない可能性がある。

このような先行研究の課題を踏まえて本研究では、まず治山ダムとして施工実績

の多いコンクリート製および鋼製のダムと秋田県で開発された 2 種類の木製ダム（オールウッド型、ハイブリッド型）を対象として、機能単位を統一させるために同一箇所において同量の土砂流出を抑止する条件のもとで各治山ダムの設計を行う。次に、ライフサイクルにおける CO₂ 排出量を比較評価し、非木製と比較した木製治山ダムの CO₂ 排出削減効果を検討する。さらに、環境面だけでなく経済性の側面も考慮した総合的な評価を行うために、各治山ダムの経済性を分析し、木製治山ダムの利点と課題について考察する。



写真 4.1 オールウッド型木製治山ダム



写真 4.2 ハイブリッド型木製治山ダム

4.2 ライフサイクルアセスメント(LCA)の考え方

ライフサイクルアセスメント(図4.1)とは、対象とする製品を生み出す資源の採取・採掘から素材製造、加工、輸送、使用、廃棄までのライフサイクル全体を考慮し、資源消費量や環境負荷量を計量することで、環境への影響を評価する手法である¹⁶³⁾。

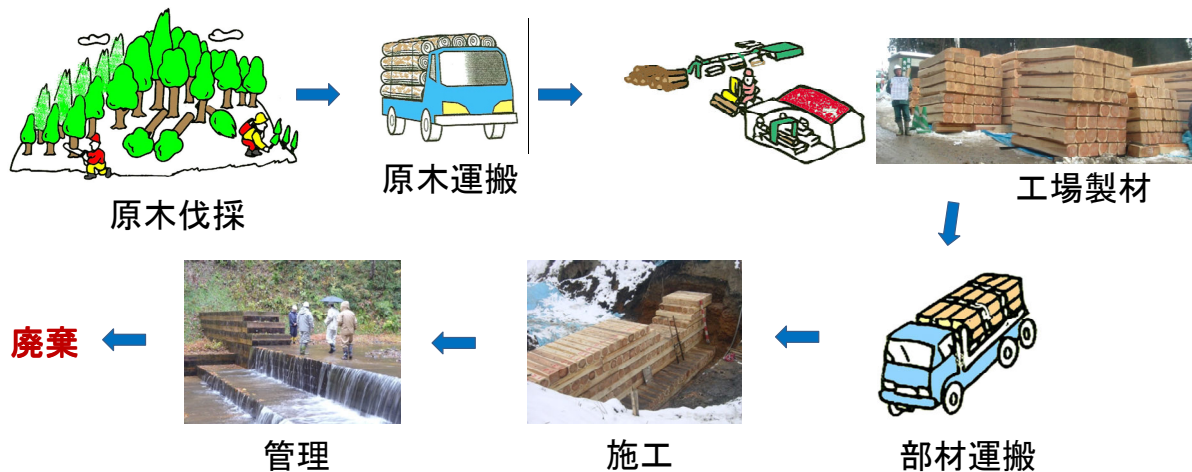


図 4.1 ライフサイクルの概念図

ライフサイクルには以下の4つの段階があるが、本研究で対象としたのは、このうちの(1)から(2)までである。

(1) 目的と調査範囲の設定

LCA 実施目的の明確化、調査対象範囲の設定

(2) ライフサイクルインベントリ分析(LCI)

対象プロセス全ての環境負荷量(たとえばCO₂)の計量

(3) ライフサイクル影響評価

環境負荷によって発生する各環境問題(例えば地球温暖化)への影響評価、様々な環境影響の統合化・単一指標化

(4) ライフサイクル解釈

分析・評価結果の考察、データの信頼性の検証等

4.3 対象とした治山ダムの概要

対象とした治山ダムは、オールウッド型木製、ハイブリッド型木製のほか、1.2で述べたコンクリート製（写真 4.3(a)）、鋼製（写真 1.9、再掲）である。

コンクリート製治山ダムを建設する際、一般的に鋼製の型枠を用いてコンクリートの打設、養生を行った後、型枠を撤去してコンクリートの打設は完了としていた。しかし、2010年10月に施行された公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律（2010年法律第36号）¹⁶⁴⁾以降、秋田県では、すべてのコンクリート製治山ダムの型枠は残存式木製型枠を用いることになった（写真 4.3(a)）。そこで、本研究では、コンクリート製治山ダムの設計は、型枠撤去タイプ（写真 4.3(b)、以下、コンクリート製（型枠なし）と呼ぶ）と型枠残存タイプ（写真 4.3(a)、以下、コンクリート製（型枠あり）と呼ぶ）の2種類を対象とすることとした。



(a) 型枠残存タイプ（型枠あり）



(b) 型枠撤去タイプ（型枠なし）

写真 4.3 コンクリート製治山ダム



写真 1.9 鋼製治山ダム（再掲）

4.4 評価方法

4.4.1 CO₂排出量の評価方法

4.4.1.1 対象治山ダム設計

前章で述べた検討対象の5種類の治山ダム（オールウッド型木製、ハイブリッド型木製、コンクリート製（型枠あり、型枠なし）、鋼製）において、機能単位を揃えるために、同一場所で同量の土砂抑止量を想定した設計を行い、使用する材料や施工に係る諸数量を算出した。なお、設計の際に選定した場所は、これまで建設されてきたオールウッド型木製治山ダムのうち、平均的な規模で建設された場所とした。

各治山ダムの規模と使用材料および施工現場での使用燃料を表4.1に示す。コンクリート製治山ダム（型枠あり、型枠なし）は治山ダム建設後、型枠を撤去するか残置するかの違いのため、構造物の規模は同じである。オールウッド型木製治山ダムでは水叩き工が必ず併設されるため、数量の算出は堤体と水叩き工を合わせたものとした。各治山ダムによって設置する際に定められた条件が異なるため、規模が異なるが、機能単位の土砂抑止量は統一している。

使用する主な材料は、オールウッド型木製が木材と接合具（ラグスクリューおよび異形棒鋼）、ハイブリッド型木製が木材と石材（砕石）および鋼材、コンクリート製（型枠あり）がコンクリートと木材（残存型枠）、コンクリート製（型枠なし）がコンクリート、鋼製が鋼材と石材（割栗石）である。

表 4.1 各治山ダムの規模と使用材料、燃料

	単位	木製		コンクリート製		鋼製	
		オールウッド型	ハイブリッド型	型枠なし	型枠あり		
構造緒元	延長	m	21.00	20.00	20.50	20.50	20.00
	高さ	m	3.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	体積	m ³	186.90	156.00	129.40	129.40	132.90
	土砂抑止量	m ³	850.00	850.00	850.00	850.00	850.00
主材料	角材(4面落とし)	m ³	186.90	-	-	-	-
	木材(残存型枠)	m ³	-	-	-	6.06	-
	皮付き丸太	m ³	-	68.80	-	-	-
	角材(3面落とし)	m ³	-	32.61	-	-	-
	コンクリート	m ³	-	-	145.78	145.78	-
	張芝	m ²	75.66	71.09	46.58	46.58	70.11
	割栗石	t	-	-	-	-	255.60
	砕石	t	-	98.28	-	-	-
	鋼材	t	-	10.05	-	-	12.27
	ラグスクリュー	t	1.02	-	-	-	-
	異形棒鋼	t	1.26	-	-	-	-
	塩ビ管	t	0.23	0.11	0.16	0.16	0.11
燃料 (軽油)	バックホウ	L	355.46	450.83	282.66	282.66	1,209.77
	トラッククレーン	L	939.79	27.72	-	-	-
	振動ローラ	L	1.16	1.25	0.81	0.81	0.80
	コンクリートポンプ車	L	-	-	22.66	22.66	-
	振動ローラ	L	172.94	43.47	71.21	71.21	40.69
	Total	L	1,469.35	523.27	377.34	377.34	1,251.26
燃料 (ガソリン)	タンパ	L	1.81	1.88	1.23	1.23	1.23
	Total	L	1.81	1.88	1.23	1.23	1.23

4.4.1.2 評価範囲の設定とインベントリ分析

本研究で評価の対象としたライフサイクルプロセスを図 4.2 に示す。対象範囲は材料や燃料の生産から建設、維持管理までの各過程とし、各過程における化石燃料消費由来の CO₂ 排出量を算出した。なお、廃棄過程においては、一般的にどの治山ダムも解体・撤去することはないため、本研究の対象外とした。評価対象期間は、後述の維持管理過程 (4.4.1.2 (3)) における治山ダムの耐用年数から 50 年と設定した。また、木材に固定されている炭素は最終的に腐朽劣化し、生物分解によって大気中に排出されることとし、ここでは炭素固定量は評価対象としなかった。

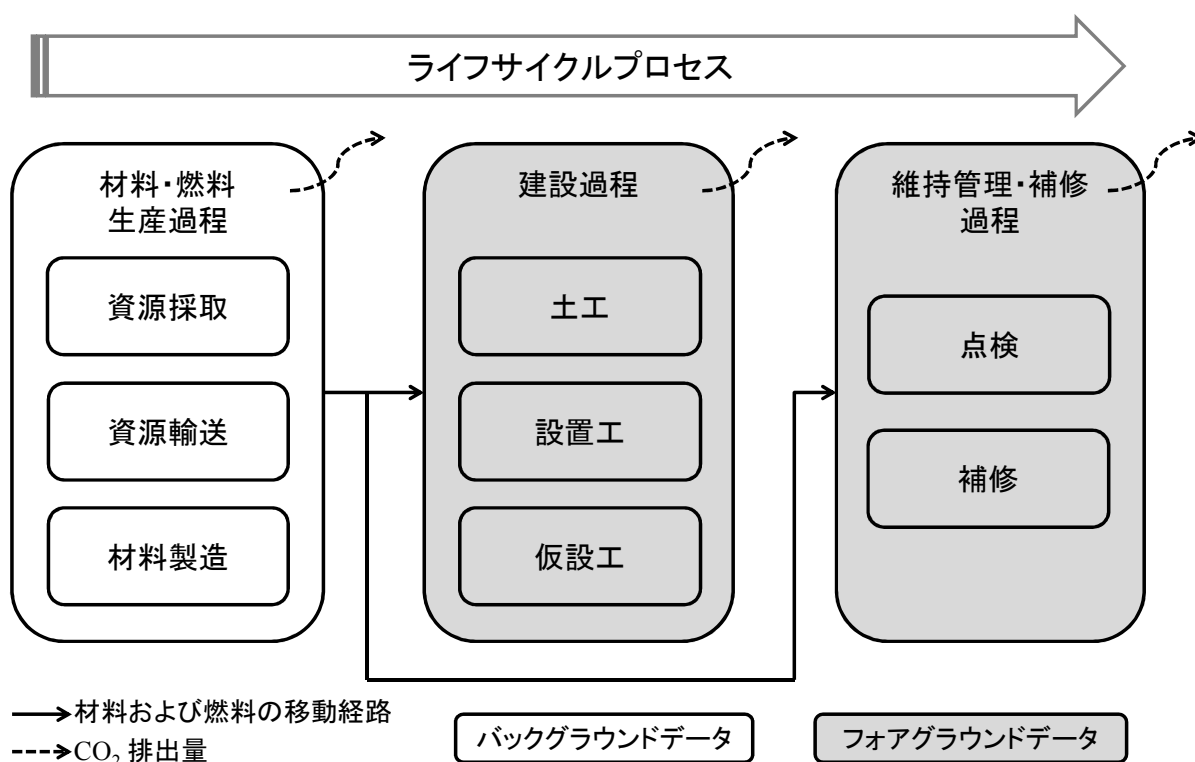


図 4.2 ライフサイクルプロセス

(1) 材料・燃料生産過程

材料・燃料生産過程は、使用する材料や燃料の資源採取から資源輸送および製造加工までを考慮した。資源採取、資源輸送、製造加工の各段階における CO₂ 排出量は、各材料および燃料の使用量 (表 4.1) に各材料・燃料の CO₂ 排出量原単位¹⁶⁵⁾、¹⁶⁶⁾

(表 4.2) を乗じることにより算出した。この原単位において、材料の張芝は社会資本 LCA データベース¹⁶⁵⁾を、その他の材料と燃料は MiLCA データベース¹⁶⁶⁾を利用した。各治山ダムで使用した材料を現場まで運搬する際に発生する CO₂ 排出量は考慮しなかった。また、コンクリート製 (型枠なし) の建設時に使用される鋼製型枠は複数回転用して使用されるため、CO₂ 排出量には考慮しなかった。ただし、転用回数に制限があることに留意する必要がある。

表 4.2 各治山ダムで使用した材料・燃料の生産過程における
CO₂ 排出量原単位^{165), 166)}

	単位	木製		コンクリート製		鋼製
		オールウッド型	ハイブリッド型	型枠なし	型枠あり	
角材(4面落とし)	kg-CO ₂ /m ³	54.09	-	-	-	-
木材(残存型枠)	kg-CO ₂ /m ³	-	-	-	238.60	-
皮付き丸太	kg-CO ₂ /m ³	-	9.89	-	-	-
角材(3面落とし)	kg-CO ₂ /m ³	-	54.09	-	-	-
コンクリート	kg-CO ₂ /m ³	-	-	289.50	289.50	-
張芝	kg-CO ₂ /m ²	18.08	18.08	18.08	18.08	18.08
割栗石	kg-CO ₂ /t	-	-	-	-	11.78
碎石	kg-CO ₂ /t	-	7.08	-	-	-
鋼材	kg-CO ₂ /t	-	1,824.00	-	-	1,824.00
ラグスクリュー	kg-CO ₂ /t	2,321.00	-	-	-	-
異形棒鋼	kg-CO ₂ /t	860.40	-	-	-	-
塩ビ管	kg-CO ₂ /t	3,352.00	3,352.00	3,352.00	3,352.00	3,352.00
軽油	kg-CO ₂ /L	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
ガソリン	kg-CO ₂ /L	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

注：使用材料において、木材（4面落とし）と木材（3面落とし）はMiLCAの「製材品」、木材（残存型枠）は「普通合板」、割栗石と碎石は「碎石」、鋼材は「普通鋼熱延鋼板」、ラグスクリューは「ボルト・ナット」、異形棒鋼は「普通鋼棒鋼」の項目の数値をそれぞれ引用した。その他の材料は、名称と同じ項目がMiLCAに存在するため、その数値を参照した。

(2) 建設過程

建設過程は治山ダムを設置するための工程で、地山掘削、埋戻し等の土工と治山ダムの組み立て等の設置工、渓流水の廻排水等の仮設工の3つの作業段階に区分される。施工手順を図4.3に示す。この過程では、それぞれの作業段階で使用するバックホウやトラッククレーン、コンクリートポンプ車、発動発電機等の燃料（軽油、ガソリン）の燃焼に伴うCO₂排出量を対象とした。治山林道必携 積算・施工編¹⁶⁷⁾を用いて各機械の使用時間から各燃料使用量（表4.1）を求め、各燃料の燃焼に伴うCO₂排出量原単位¹⁶⁸⁾を乗じることによってCO₂排出量を算出した。用いた原単位¹⁶⁸⁾は、軽油が2.59 kg-CO₂/L、ガソリンが2.32 kg-CO₂/Lである。建設現場までの作業道敷設作業は考慮しなかった。

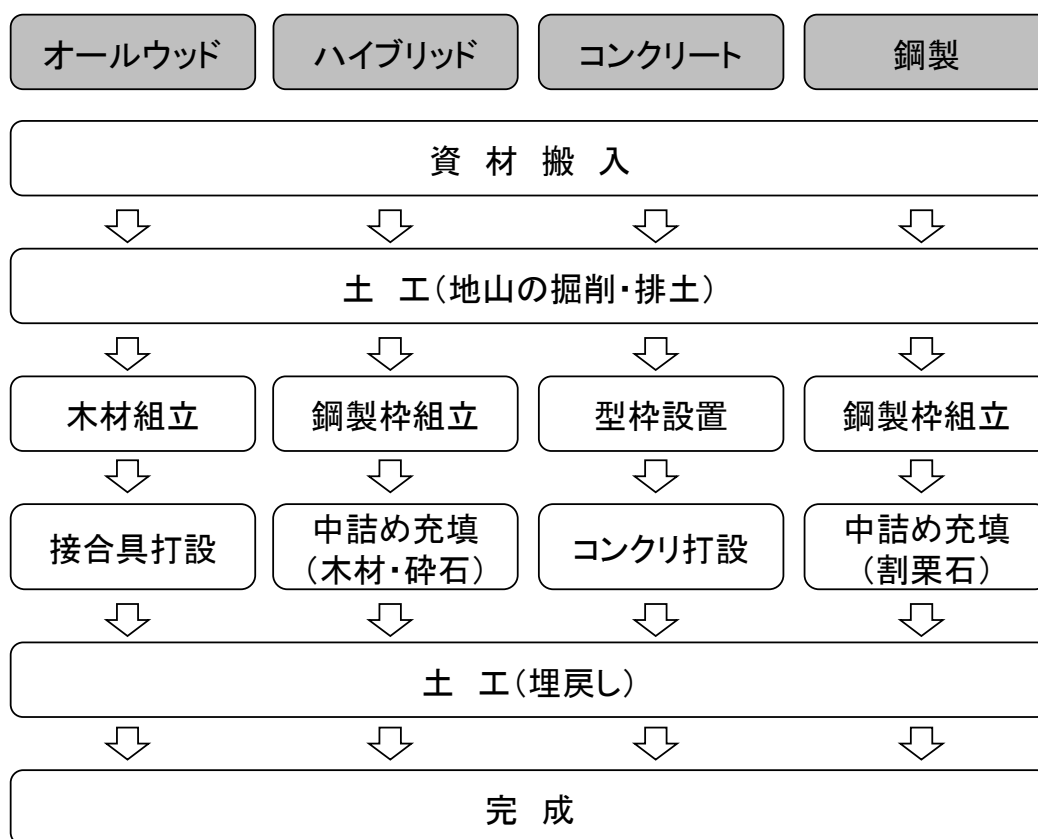


図 4.3 施工手順

(3) 維持管理過程

各治山ダムの維持管理計画を決める前に、治山ダムを建設後、維持管理期間をどの程度の長さとするか設定する必要がある。治山ダムの耐用年数を考えた場合、木製はコンクリート製や鋼製に比べ耐用年数は短くなることが予想されるが、青森県では1916年に建設された木製ダムが80年以上にわたり機能している例もある⁵⁶⁾。また、秋田県では、秋田県産スギ材で建設された木製治山ダムが40年以上に亘って治山ダムとしての機能を維持している例がある⁶³⁾。なお、鉄筋コンクリート造の構造物のうち、用水用ダムの設計耐用年数が50年となっている¹⁶⁹⁾。これらを参考に、本研究では各治山ダムの耐用年数を50年と想定し、50年間の維持管理期間を設定することとした。

維持管理過程は点検段階と補修段階に区分する。点検は治山ダムの状態を適宜把握するためのもので、補修は点検によって明らかとなった部材の劣化や脱落等に対して、部材を撤去・交換する段階とした。維持管理期間における点検について、木製治山ダムでは5年おきに計10回、コンクリート製および鋼製治山ダムでは10年おきに計5回行うこととした。点検段階のCO₂排出量は、秋田県管理事務所職員による点検時のライトバン（1500cc）使用に伴うガソリン消費を対象とした。職員への聞き取りより、管理事務所から現場までの片道距離を15km、所要時間を30分と設定して、治山林道必携 積算・施工編¹⁶⁷⁾を用いてガソリン消費量を求め、上述の燃料生産過程と建設過程と同様の方法によりガソリンの生産と燃焼に伴うCO₂排出量を算定した。補修については、木製治山ダムでは木材の交換を20年おきに計2回行うこととした。補修期間を20年に1度としたのは、これまでに建設されたオールウッド型木製治山ダムが設置後約13年を経過した現在でも補修を要するほどの機能低下がみられないため（写真4.4）、20年程度は補修の必要はないと判断したためである。オールウッド型木製ではこれまでの現地調査^{129), 146), 148)}より、乾湿を繰り返す袖部（写真4.4）で腐朽が進行することが確認されている。そこで、交換する部材は袖部の上1段目の木材とラグスクリーとした（図4.4）。ハイブリッド型木製については腐朽調査に関する先行研究がないため、オールウッド型木製と同様の部材交換頻度とした。交換する部材は図4.5に示すように下流面の壁材のうち、地上部に露出する部分として下流面壁材の使用材積の40%分を新たに壁材として取り付けることと仮定した。一方、コンクリート製および鋼製治山ダムでは、鋼製において鋼材の腐食等により補修された事例はあるが、一般的にメンテナンスフリーとして施工されることから、補修は行わないものとした。そのため、補修段階のCO₂排出量は、木製治山ダムにおいて交換する木材およびラグスクリーの材料生産過程における排出量を前述と同様の方法を用いて算出した。補修の際に取り換えた木材は、これまでの実例に倣い、廃棄せず、林内に残置するものとした。

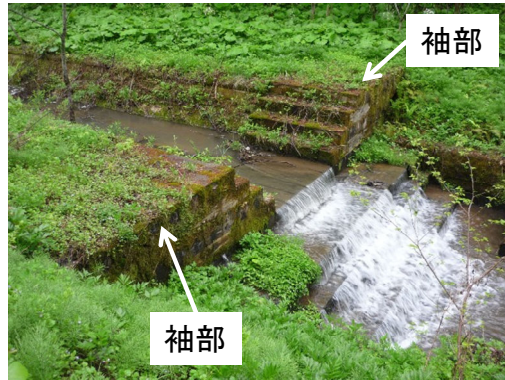


写真 4.4 施工後約 13 年が経過したオールウッド型木製治山ダム

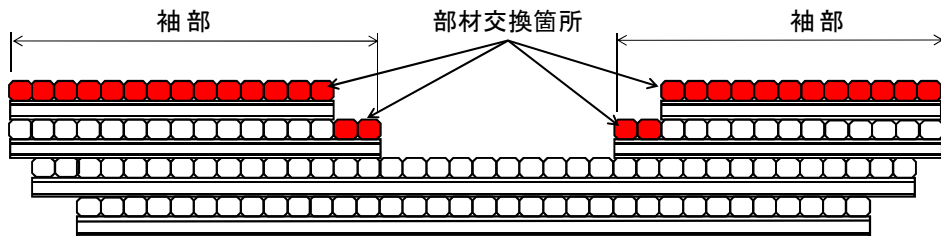


図 4.4 オールウッド型木製治山ダムの部材交換箇所（正面図）

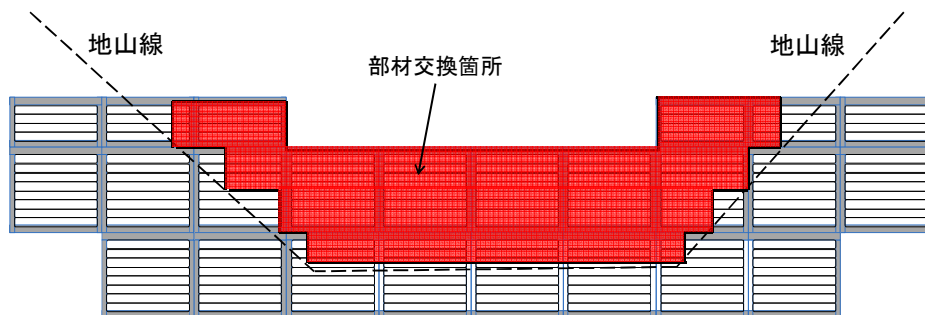


図 4.5 ハイブリッド型木製治山ダムの部材交換箇所（正面図）

4.4.2 経済性の評価方法

一般に、公共工事として設置される治山ダムの場合、環境負荷を評価するだけでなく、経済性の側面を評価することは重要であり、発注者や市民の関心も高い。そこで、治山ダムを建設するために必要なコストについて試算を行い、LCA 評価と同様に比較検討を行った。コスト評価は、材料費と建設費を合わせた直接工事費を対象とした。材料費は治山ダムを建設するために使用する資材の調達価格のことで、木材や石材、コンクリート、鋼材等の価格が含まれる。なお、材料費には維持管理過程の補修段階で使用した材料の費用も計上した。建設費は治山ダムを建設するための機械使用料と人件費のことで、バックホウやトラッククレーン、コンクリートポンプ車等の使用料と作業に従事した労働者の賃金が含まれる。機械の種別や使用日数、労働者の区分や労働日数は秋田県が制定している施工歩掛から算出した。使用材料、機械および燃料の単価を表 4.3 に示す。

表 4.3 使用材料、機械および燃料の単価

区 分	単 位	単 価	
主材料	角材(4面落とし)	円/m ³	36,800
	木材(残存型枠)	円/m ³	122,375
	皮付き丸太	円/m ³	3,343
	角材(3面落とし)	円/m ³	30,482
	コンクリート	円/m ³	10,300
	張芝	円/m ³	3,300
	割栗石	円/m ³	2,500
	砕石	円/m ²	160
	鋼材	円/t	346,000
	ラグスクリー	円/t	1,155,000
	異形棒鋼	円/t	63,500
	塩ビ管	円/t	245,000
建設機械	バックホウ	円/時	4,570
	トラッククレーン	円/日	24,000
	コンクリートポンプ車	円/時	8,330
	振動ローラ	円/日	1,560
	タンパ	円/日	520
	発動発電機	円/日	1,105
燃料	軽油	円/L	121
	ガソリン	円/L	142

注1：単価は秋田県が設定した2011年11月時点の値。

注2：木材（残存型枠）の単価は1 m²当たりの金額より換算して算出。

注3：ラグスクリーの単価は1本当たりの金額と重量(662.6g/本)より換算して算出。

4.5 評価結果

4.5.1 CO₂排出量の評価結果

治山ダムの各過程における化石燃料消費に伴うCO₂排出量を表4.4、図4.6に示す。まず、ダムの種類ごとにみると、CO₂排出量はオールウッド型木製が最も少なく、ハイブリッド型木製、鋼製、コンクリート製（型枠なし）、コンクリート製（型枠あり）の順に多くなった。コンクリート製（型枠なし）、コンクリート製（型枠あり）に対するオールウッド型木製およびハイブリッド型木製のCO₂排出量の割合は、それぞれ48%、46%および59%、57%となり、コンクリート製を木製に変更することで、CO₂排出削減効果が得られることが明らかになった。木製とコンクリート製を評価した先行事例¹⁵⁹⁾、¹⁶²⁾では、コンクリート製に対する木製のCO₂排出量は47%～60%と報告されている。対象とした治山ダムの工法や規模、耐用年数、機能単位等が本研究とは異なり単純に比較はできないが、どちらの結果も概ね同様の傾向があると考えられる。

鋼製に対するオールウッド型木製およびハイブリッド型木製のCO₂排出量の割合はそれぞれ75%、93%であった。オールウッド型木製については鋼製から変更することでCO₂排出削減効果が得られることが分かったが、鋼製とハイブリッド型木製の差はわずかであった。2種類の木製で比較すると、ハイブリッド型木製に対するオールウッド型木製の木材使用量とCO₂排出量の割合は、木材使用量で184%、CO₂排出量で81%となり、構造形式は異なるが木材を多用する工法において、より大きいCO₂排出削減効果が期待できることが明らかになった。また、ハイブリッド型木製では材料・燃料生産過程におけるCO₂排出量が多い鋼材を利用することも、オールウッド型木製に比べてCO₂排出量が大きくなる要因である。コンクリート製の型枠の有無で比較すると、複数現場で鋼製型枠を利用する型枠なしよりも、現場ごとに木製型枠を製造・使用する型枠ありの方がCO₂排出量は大きくなった。しかし、鋼製型枠のCO₂排出量を考慮すれば、結果は逆転するかもしれない。また、型枠には合板を用いた型枠など種類があるため、それによっては結果が異なることも考えられる。

ライフサイクルの各過程ごとにみると、いずれの治山ダムも材料・燃料生産過程でのCO₂排出量が最も大きく、オールウッド型木製では全体の75%、その他の治山ダムでは全体の90%以上を占めている。この材料・燃料生産過程の排出量における、使用材料・燃料別のCO₂排出量の内訳を図4.7に示す。オールウッド型木製では使用量の多い木材が60%以上を占めており、接合具も20%以上となっている。ハイブリッド型木製および鋼製では、鋼材が全体の80%以上を占めている。コンクリート製では木製型枠の有無にかかわらず、コンクリートの割合が90%以上と大部分を占めている。つまり、鋼製およびコンクリート製（型枠あり、型枠なし）では、治山

ダムを建設するために排出される CO₂ 排出量のほぼすべてが治山ダムの主材料（コンクリート製ではコンクリート、鋼製では鋼材）を生産する過程で排出されているということが明らかとなった。

表 4.4 治山ダムのタイプ別 CO₂ 排出量

区 分	(kg-CO ₂ /基)				
	木製		コンクリート製		鋼製
	オールウッド型	ハイブリッド型	型枠なし	型枠あり	
角材(4面落とし)	10,108.8	-	-	-	-
木材(残存型枠)	-	-	-	1,446.8	-
皮付き丸太	-	690.1	-	-	-
角材(3面落とし)	-	1,763.5	-	-	-
コンクリート	-	-	42,202.4	42,202.4	-
張芝	1,368.0	1,285.3	842.1	842.1	1,267.6
割栗石	-	-	-	-	3,011.0
砕石	-	696.0	-	-	-
鋼材	-	19,152.0	-	-	22,378.1
ラグスクリュー	2,373.6	-	-	-	-
異形棒鋼	1,084.1	-	-	-	-
塩ビ管	780.7	367.4	551.1	551.1	367.4
軽油	285.3	168.7	79.6	79.6	263.9
ガソリン	0.6	0.7	0.4	0.4	0.4
Total	16,001.1	24,123.7	43,675.6	45,122.4	27,288.4
土工					
- 軽油消費量	920.5	1,126.8	731.4	731.4	746.9
- ガソリン消費量	3.7	3.8	2.5	2.5	2.5
設置・組立て					
- 軽油消費量	2,657.1	88.9	58.6	58.6	1,519.8
仮設工					
- 軽油消費量	448.6	113.8	185.6	185.6	106.7
Total	4,029.9	1,333.3	978.1	978.1	2,375.9
管理					
- ガソリン消費量	30.6	30.6	15.3	15.3	15.3
補修					
- 木材, 接合具	1,230.8	705.4	-	-	-
Total	1,261.4	736.0	15.3	15.3	15.3
Total	21,292.4	26,193.0	44,669.0	46,115.8	29,679.6

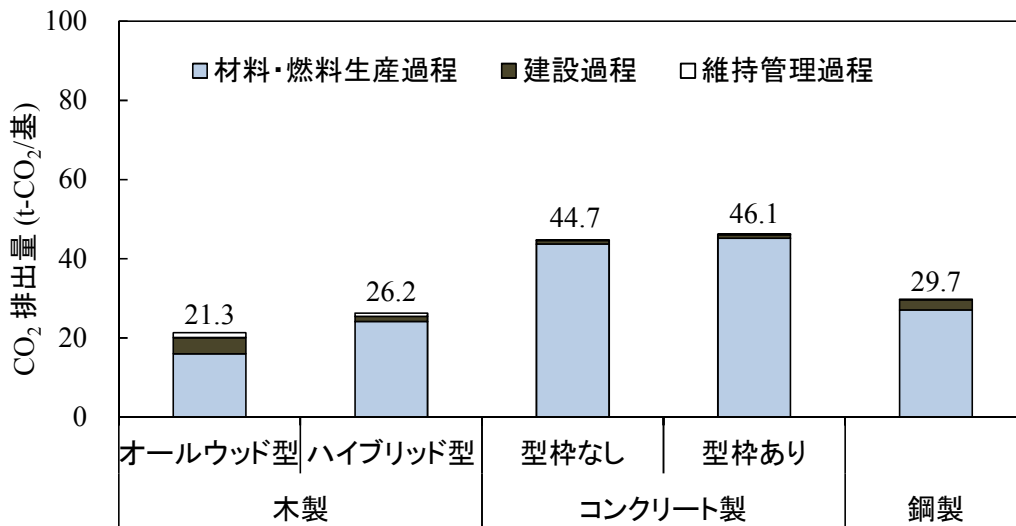


図 4.6 各治山ダムの CO₂ 排出量

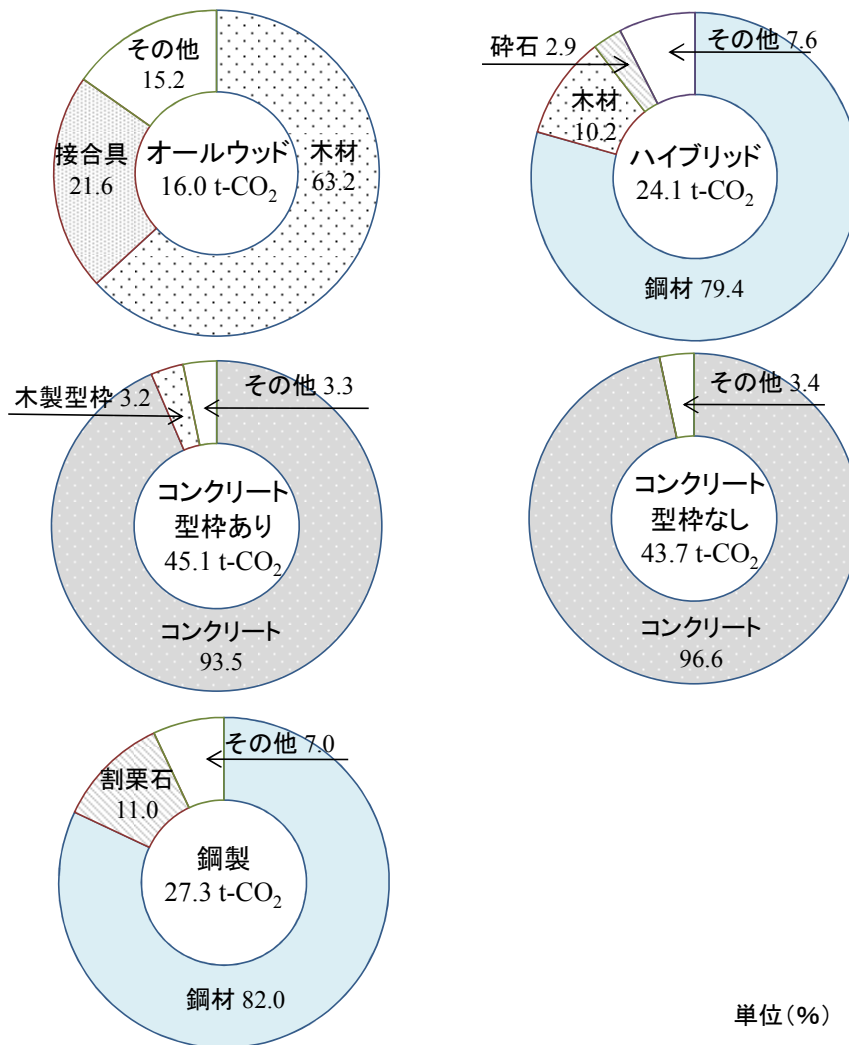


図 4.7 各治山ダムの使用材料・燃料の内訳

前述したように、ハイブリッド型木製と鋼製のように CO₂ 排出量の差が僅かなケースが確認されたため、最も排出量の大きい材料・燃料生産過程の CO₂ 排出量原単位（表 4.2）を変化させて感度分析を行い、非木製に対する木製の優位性を考察した。数値を変化させた原単位は、各工法において CO₂ 排出量が多い 2 材料とした。すなわち、オールウッド型木製は木材（4 面落とし）とラグスクリー、ハイブリッド型木製は鋼材と木材（3 面落とし）、コンクリート製はコンクリートと木製型枠（型枠ありのみ）、鋼製は鋼材と詰石である。木製（オールウッド型、ハイブリッド型）は上記材料の原単位を 5%あるいは 10%増加させ、非木製（コンクリート製、鋼製）は原単位を 5%あるいは 10%減少させることとした。

結果を図 4.8 に示す。鋼製に対するハイブリッド型木製の CO₂ 排出量の割合は、現状が 93%、原単位 5%変動時が 101%、原単位 10%変動時が 110%となり、原単位が 5%以上変動すると、両者の CO₂ 排出量の大小関係は逆転するようである。しかし、オールウッド型木製は原単位が変化しても排出量が最も小さくコンクリート製は最も大きいという結果に変化はなく、オールウッド型木製の優位性を確認することができた。

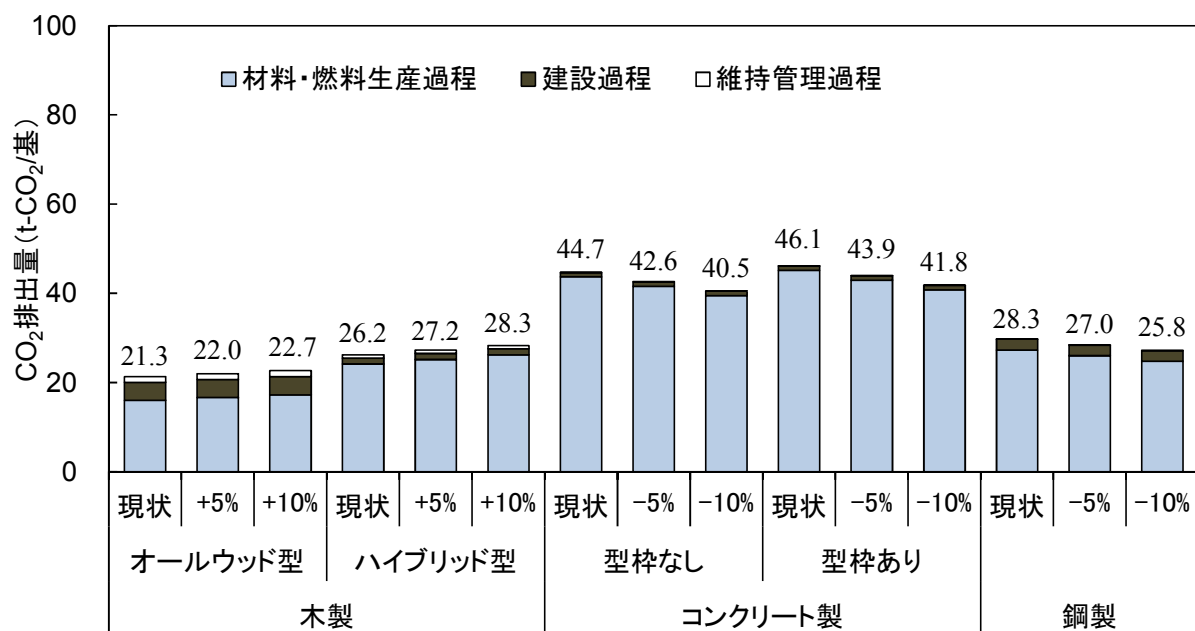


図 4.8 感度分析—各治山ダムの CO₂ 排出量

4.5.2 経済性の評価結果

各治山ダムの直接工事費を図4.9に示す。直接工事費はコンクリート製（型枠なし）が最も安価となり、次いでコンクリート製（型枠あり）、ハイブリッド型木製、鋼製、オールウッド型木製の順に高くなった。コンクリート製（型枠なし、型枠あり）に対するオールウッド型木製の割合は271%、241%となり、高コストである。ハイブリッド型木製の割合は同様に149%、132%となり、コンクリート製と競合できる可能性がある。構造形式は異なるが、過去に行われた木製とコンクリート製の経済性比較によると、木製はコンクリート製に比べ、おおむね1.5倍～2.2倍となっており¹⁷⁰⁾⁻¹⁷²⁾、オールウッド型は木製のなかでも高価な構造となっている。この要因は後述するように、オールウッド型では水叩き工、側壁、垂直壁をすべて木製で併設することを義務付けており、その費用が上積みされるためである。鋼製に対するオールウッド型木製、ハイブリッド型木製の割合はそれぞれ179%、98%となり、ハイブリッド型木製と鋼製の直接工事費は同程度であった。

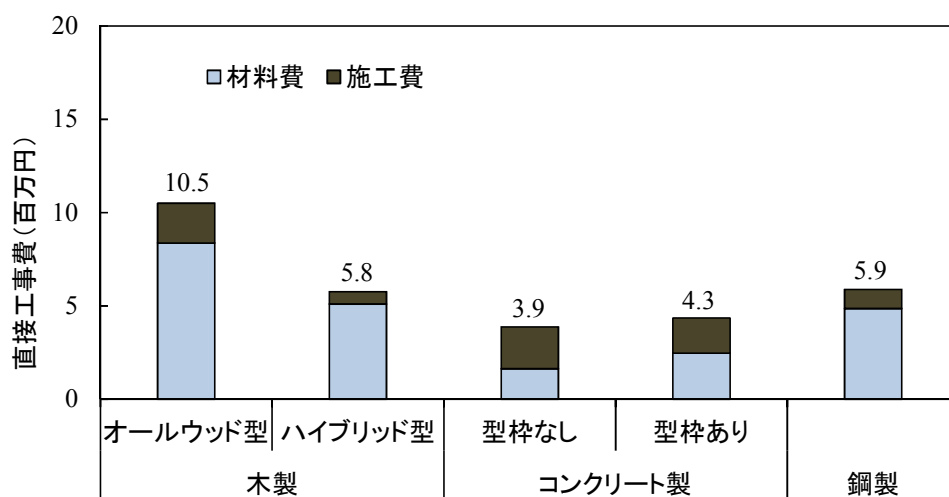


図 4.9 各治山ダムの直接工事費

各治山ダム の材料費と施工費の割合を図 4.10 に示す。

コンクリート製（型枠なし）では材料費 41.9%、施工費 58.1%、コンクリート製（型枠あり）では同じく 56.5%、43.5%となり、直接工事費に占める材料費の割合は 6 割に満たない。それに対し、オールウッド型木製では同様に 79.7%、20.3%、ハイブリッド型木製では 88.5%、11.5%、鋼製では 82.7%、17.3%であった。コンクリート製以外の 3 種類では直接工事費に占める材料費の割合が高く、資材の調達に伴う費用が直接工事費を押し上げる要因となっている。よって、直接工事費を抑制するためには施工能率を上げることよりも材料費の縮減を図る方がコスト縮減効果が大きいと言える。各治山ダム の材料費の内訳を図 4.11 に示す。オールウッド型木製では木材に係る費用が材料費全体の 80%以上を占めている。また、接合具の材料費は全体の約 17%を占めている。ハイブリッド型木製、鋼製では鋼材の占める割合が高く、それぞれ 71.3%、87.3%に達する。また、ハイブリッド型木製で使用している角材（3 面落とし）およびコンクリート製（型枠あり）で使用している木製パネルの割合がそれぞれ 24.0%、33.9%を占めており、比較的高価な材料費となっている。

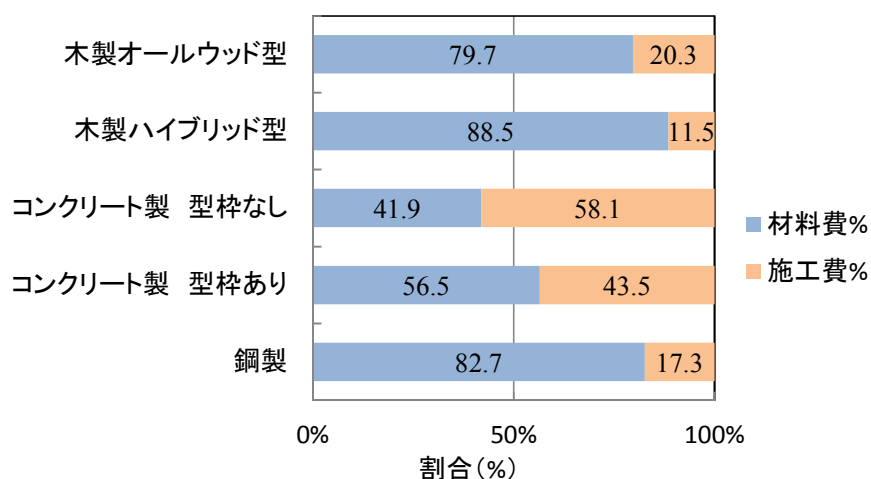


図 4.10 各治山ダム の材料費と施工費の割合

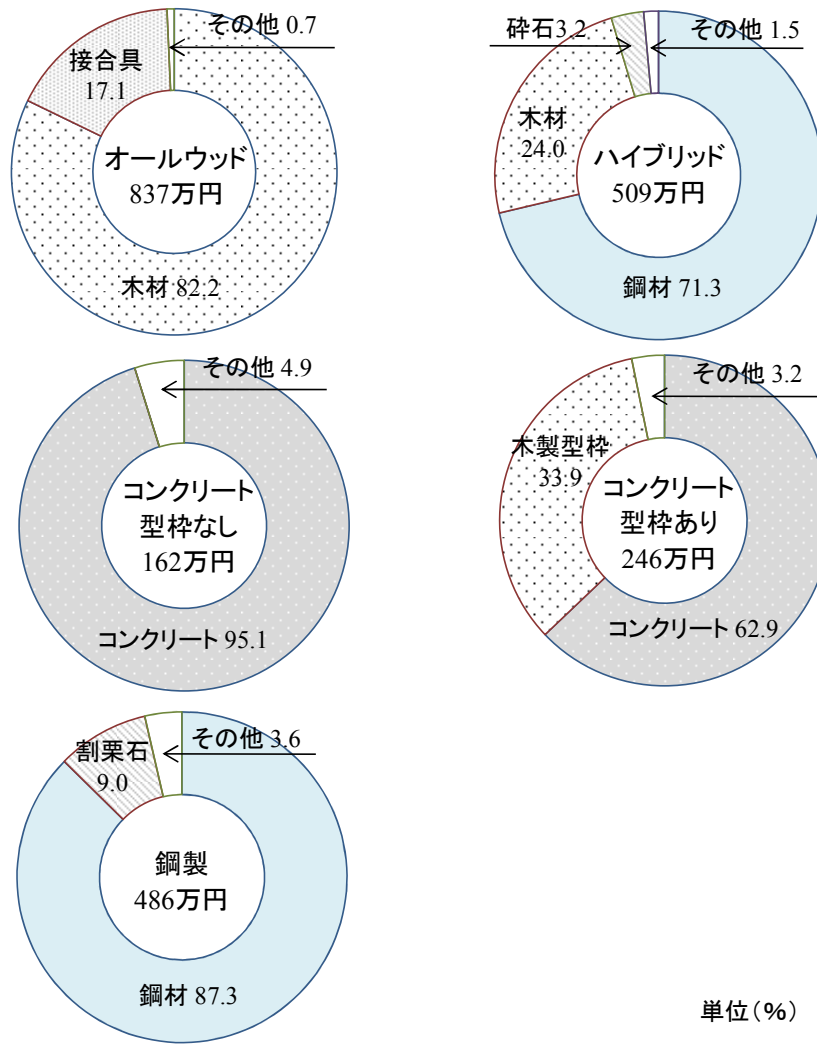


図 4.11 各治山ダムの材料費の内訳

検討対象とした5つの治山ダムのうち、特に高価な治山ダムとなっているオールウッド型木製について、コスト削減の可能性を検討する。オールウッド型木製においてコストを抑制する方策を考える場合、木材利用の観点からいえば木材量を減らすことは好ましくなく、木材以外の部分でコスト削減の可能性について検討を行いたい。そこで、以下に示す2つのケースについて直接工事費の算出を試みた。

Case1：接合具をすべて異形棒鋼とした場合

Case2：接合具をすべて異形棒鋼とし、かつオンサイト生産システムを用いて木材を製材した場合

Case 1～2 で接合具をすべて異形棒鋼とした場合を想定したのは、第2章でも述べたように、現在、ラグスクリーンの代わりに材料調達価格ではラグスクリーンの1/10以下である異形棒鋼に代替する取り組み^{78), 79), 91)}が進められているからである。Case2 に示したオンサイト生産システム(図4.12)¹⁷³⁾⁻¹⁷⁷⁾とは、建設現場周辺の林地で伐採した原木をその場で製材、加工し、木製治山ダムの部材に活用するシステムのことである。このシステムは、災害防止を目的に設置される治山ダム等の木製土木施設が一般に林地に近い箇所に設置されることに着目したシステムである。このシステムを用いて現場で製材、加工ができれば、製材工場を経由した加工、運搬手間を省くことが可能となる。過去に行った歩掛調査¹⁷³⁾時の木材価格は、製材品(4面落とし材)が40,700円/m³のとき、オンサイト生産システムでは27,220円/m³であった。ここでは、製材品の価格が36,800円/m³(表4.3)のため、製材品の価格比(40,700/36,800=1.106)よりオンサイト生産システムによる木材価格は25,000円/m³(≒27,200/1.106)としてコストの算出を行った。



図 4.12 木製土木施設オンサイト生産システム

オールウッド型木製の木材使用量のうち、標準で敷設する水叩き工が占める割合は約 32.9%（木材使用量 61.5m³）に上る。初期コストを抑えるには、その他の治山ダム同様に水叩き工を敷設せず、根入れを深くする考え方もある。しかし、コンクリート製、鋼製、ハイブリッド型木製と同等の根入れとした場合の設計（全高 4.0m）を行ったところ、施設の安定性を満足できないことが明らかとなった。そのため、オールウッド型木製はこれまでと同様、水叩き工を併設することで全高を 3.0m 程度に抑えることが望ましい。

結果を図 4.13 に示す。2 ケースの直接工事費は、現状のそれに比べて Case1 で 88%、Case2 で 67%となり、接合具を安価な異形棒鋼に変え、オンサイト製材システムを導入すれば、大幅なコストダウンが図れることが明らかとなった。しかし、各ケースのコストをコンクリート製（型枠なし、型枠あり）と比べると、Case 1 では 239%、213%、Case 2 では 182%、162%であり、コンクリート製と競合するには更なるコスト削減が必要と考えられる。現在の構造形式でコンクリート製とのコスト差を縮めるためには、材料費の大部分を占めている木材の使用量を減らしたり、木材価格を抑えることが必要かもしれない。例えば、木材価格に着目すると、直接工事費をコンクリート製（型枠あり）の 1.5 倍程度に抑えるためには、現状の場合、木材(4 面落とし)価格を現在の 42%にしなければならない。同様に Case 1 の場合では 60%、Case 2 の場合では 88%である。また、節を有する木材や多少の曲がり材等、低質な木材を使うことで木材価格を抑えることも可能である。木製治山ダムは公共事業として建設されるため、材料の寸法には誤差が少ないことが求められるが、オールウッド型木製治山ダムのような構造体では、材料寸法にはそれほど精度の高さは求められない。材料寸法の許容誤差範囲を示した上で、低質材利用の可能性を検討する必要がある。

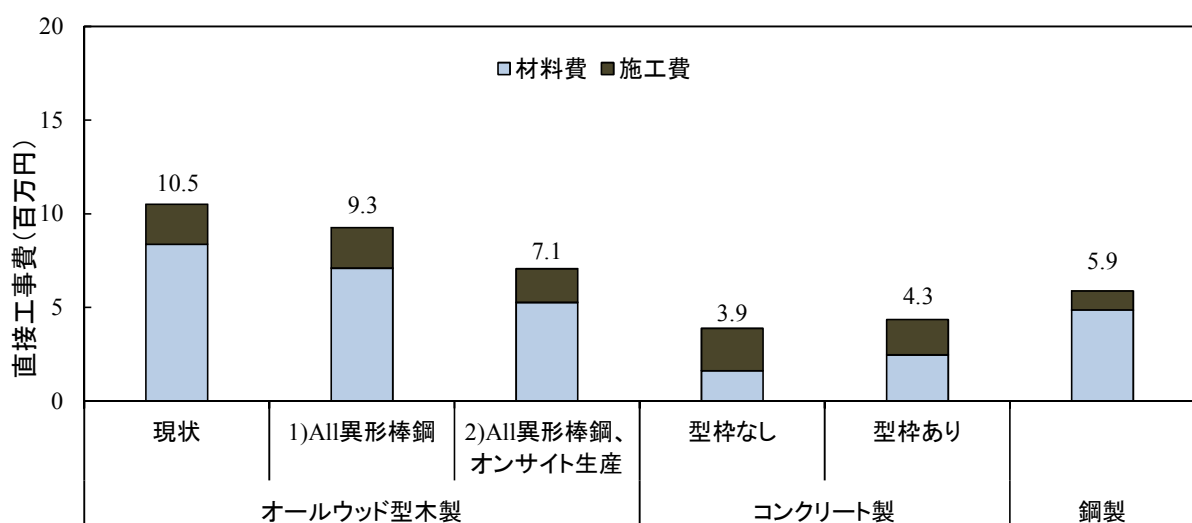


図 4.13 ケース別オールウッド型木製治山ダムの直接工事費

次に、2 ケースの直接工事費を鋼製と比較すると、それぞれ Case 1 : 158%、Case 2 : 120%である。どちらのケースについても鋼製との価格競争力が出てくると言える。なお、オールウッド型木製における CO₂ 排出量は、Case 1 で 19.93 t-CO₂ となり、コンクリート製（型枠なし、型枠あり）の排出量のそれぞれ 45%、43%、鋼製の排出量の 70%であり、コスト削減を図ることで同時に CO₂ 排出量も削減できることが分かった。

現在の構造形式でコストを抑える方策の一つとして、使用木材の断面サイズに着目した。現行の断面サイズは幅 300mm×高さ 250mm の長方形であるが、製材加工上、幅 300mm×高さ 300mm は可能である。また、近年山側より供給される木材が大径化していることを考慮すると、現行よりも大断面の木材を使用することは資源の有効活用につながる。さらには断面を大きくすることで部材数が減少し、ひいては接合具の数が少なくなるため、接合具の数量減、施工手間の軽減といったメリットも生まれてくる。そこで、木材断面サイズを幅 300mm×高さ 300mm とした場合の数量、コストの算出を試みた。使用材料、機械および燃料の単価は表 4.3 と同じ数値を用いたが、木材価格（4 面落とし材）については幅 300mm×高さ 300mm の当時の単価が不明であったため、2013 年 5 月時点の木材価格（4 面落とし材）として、幅 300mm×高さ 250mm、幅 300mm×高さ 300mm の単価を秋田県として設定してもらい、その金額を採用した。単価はそれぞれ、幅 300mm×高さ 250mm で 42,856 円/m³、幅 300mm×高さ 300mm で 52,317 円/m³ であった。オンサイト生産システムによる木材価格は、25,000 円/m³ に製材品の単価アップ分 ($42,856 / 36,800 = 1.165$) を乗じた金額 (29,114 円/m³) として算定した。

結果を図 4.14 に示す。木材本数、接合具数が少なくなるため、それに伴う現場作業量が減少し、施工費はいずれのケースでも安くなった。しかし、木材価格が m³ あたり 122%と上昇したため、いずれのケースも材料費が高くなり、その上昇分を接合具の材料費と施工費の抑制分で補うことが出来ず、直接工事費では現行タイプに比べ、111%～117%に増加する結果となった。いずれのケースでも直接工事費に占める材料費の割合は 80%以上となっており、中でも木材が占める割合が高い。オールウッド型木製治山ダムをより汎用性の高い木製構造物にするには、節を有する木材や多少の曲がり材等、低質材利用の可能性を検討し、価格を抑える方策を講じる必要がある。

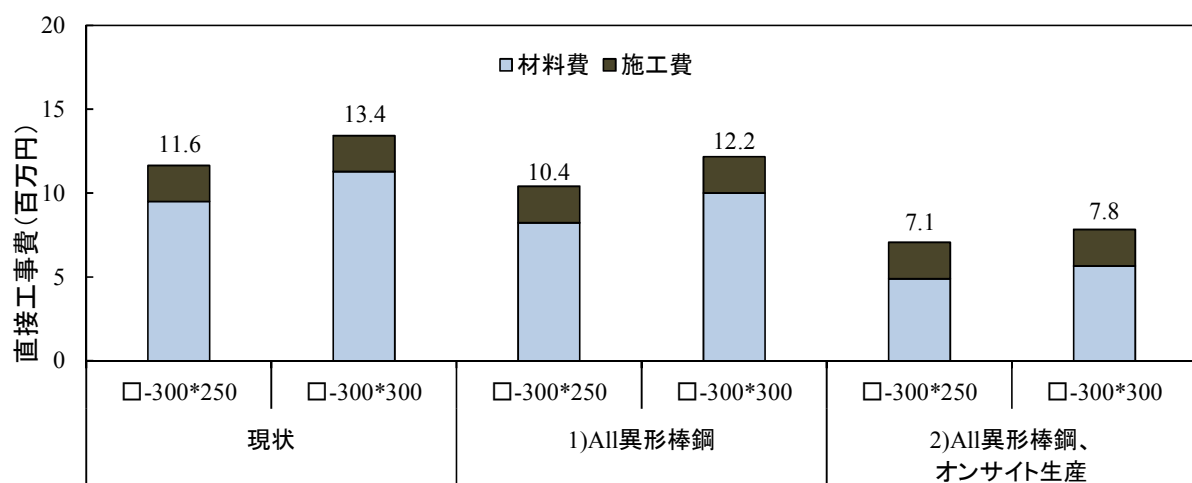


図 4.14 木材サイズを変更したときの直接工事費

4.6 まとめ

治山ダムとして施工実績の多いコンクリート製、鋼製ダムと秋田県で開発された2種類の木製ダム（オールウッド型、ハイブリッド型）を対象として、ライフサイクルにおけるCO₂排出量と建設費用を比較評価し、非木製と比較した木製治山ダムのCO₂排出削減効果および経済性の検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) コンクリート製をオールウッド型木製に変更することで54%、ハイブリッド型木製に変更することで43%のCO₂排出削減効果が得られる。オールウッド型木製では鋼製に対しても25%のCO₂排出削減効果が得られるが、ハイブリッド型木製と鋼製では主要材料の生産過程におけるCO₂排出量原単位が5%以上変動すると、両者のCO₂排出量の大小関係は逆転する。
- 2) ライフサイクルの各過程では、いずれの治山ダムも材料・燃料生産過程からのCO₂排出量が最も大きく、オールウッド型木製は対象としたライフサイクル過程の75%、ハイブリッド型木製、コンクリート製、鋼製は90%以上がこの過程からの排出である。治山ダムのライフサイクルCO₂排出量の大部分が各治山ダムの主材料を生産する過程で排出されている。
- 3) 経済性では、コンクリート製が最も安価で、オールウッド型木製はコンクリート製の241%と高コストである。ハイブリッド型木製はコンクリート製の132%と競合の可能性がある。オールウッド型木製は、接合具を安価な異形棒鋼に変え、かつ建設現場周辺の林地で伐採した原木をその場で製材、加工し、木製治山ダムの部材に活用するオンサイト生産システムを導入すれば、現状の67%程度までコスト削減が可能である。また、ハイブリッド型木製は鋼製と同程度であり、価格競争力がある。
- 4) オールウッド型木製に使用される木材断面サイズを幅300mm×高さ250mmから幅300mm×高さ300mmに変えた場合の経済性を検討したところ、部材数の減少により接合具の材料費と施工費は減少したが、木材価格の上昇分まで補うことができず、結果、直接工事費で111%~117%の増加となった。

4.7 摘要

本章では、秋田県で実績のあるオールウッド型木製治山ダムやハイブリッド型木製治山ダムと、治山ダム（床固工）として実績の多いコンクリート製と鋼製のダムを対象に、ライフサイクルにおけるCO₂排出量を比較評価し、非木製と比較した木製治山ダムのCO₂排出削減効果の検討を行った。さらに、環境面だけでなく経済面も考慮した総合的な評価を行うために、各治山ダムの経済性を分析し、木製治山ダムの利点と課題について考察を行った。結果は以下のとおりであった。

- 1) 環境面では、コンクリート製をオールウッド型木製に変更することで54%、ハイブリッド型木製に変更することで43%のCO₂排出削減効果が得られる。オールウッド型木製では鋼製に対しても25%のCO₂排出削減効果が得られるが、ハイブリッド型木製と鋼製では主要材料の生産過程におけるCO₂排出量原単位が5%以上変動すると、両者のCO₂排出量の大小関係は逆転する。
- 2) ライフサイクルの各過程では、いずれの治山ダムも材料・燃料生産過程からのCO₂排出量が最も大きく、オールウッド型木製は対象としたライフサイクル過程の75%、ハイブリッド型木製、コンクリート製、鋼製は90%以上がこの過程からの排出である。治山ダムのライフサイクルCO₂排出量の大部分が各治山ダムの主材料を生産する過程で排出されている。
- 3) 経済面では、コンクリート製が最も安価で、オールウッド型木製はコンクリート製の241%と高コストである。ハイブリッド型木製はコンクリート製の132%と競合の可能性がある。オールウッド型木製は、接合具を安価な異形棒鋼に変え、かつ建設現場周辺の林地で伐採した原木をその場で製材、加工し、木製治山ダムの部材に活用するオンサイト生産システムを導入すれば、現状の67%程度までコスト削減が可能である。また、ハイブリッド型木製は鋼製と同程度であり、価格競争力がある。
- 4) オールウッド型木製に使用される木材断面サイズを幅300mm×高さ250mmから幅300mm×高さ300mmに変えた場合、部材数の減少により接合具の材料費と施工費は減少したが、木材価格の上昇分まで補うことができず、結果、直接工事費で111%~117%の増加となった。

第5章 結論

本論文は、治山ダムに木材を用いた木製治山ダムについて、構造物の安定性や維持管理手法、環境影響評価および経済性について定量的な評価を行うことを目的として、研究を行った。以下に本論文で得られた結論をまとめる。

5.1 オールウッド型木製治山ダムの強度性能

オールウッド型木製治山ダムの課題であったコスト縮減や材料品質の確保、施工性の向上を目的として、接合部に異形棒鋼を用いたときのせん断性能および引き抜き性能を明らかにするため、異形棒鋼とラグスクリューを用いた1面せん断試験、引き抜き試験および面圧試験を行った。そのうえで、異形棒鋼を用いた時の堤体の耐荷力を評価するため、実大の堤体載荷試験を行った。得られた結果は以下の通りであった。

- 1) 異形棒鋼とラグスクリューを用いて1面せん断試験、引き抜き試験、面圧試験を行った結果、オールウッド型木製治山ダムの接合具としての異形棒鋼の性能はラグスクリューに比べ、せん断性能は同等以上、引き抜き性能はやや劣るものの、代替は可能であることが示された。また、ラグスクリューによる現状の施工条件（接合具径 16mm、先孔径 15mm、打ち込み深さ 200mm）と同程度の引き抜き性能を期待する場合、先孔径を $\phi 14\text{mm}$ 、打ち込み深さは 200mm とする必要があることが分かった。
- 2) 接合具に異形棒鋼を用いたときの堤体としての耐荷性能を明らかにすることを目的として、実大寸法の堤体載荷試験を行った。過去にラグスクリューを用いて行った同様の試験結果とも比較することで、異形棒鋼の有用性について検証を行った。その結果、ラグスクリュー試験体の破壊時の最大荷重 106kN を上回る耐荷性能が確認された。また、異形棒鋼を用いた構造物は、ラグスクリューを用いた構造物よりも剛性の低下が早い段階で生じるが、その後も荷重に抵抗し続けることが確認された。異形棒鋼に作用する引張力とせん断力について、引張力では荷重が上がるにつれて、上流側1列の異形棒鋼だけでなく、その下流側に位置する異形棒鋼と併せて、複数の異形棒鋼で荷重に抵抗することが示された。せん断力については、ラグスクリュー試験体の挙動と大きな差は見られなかった。

5.2 オールウッド型木製治山ダムの腐朽実態

オールウッド型木製治山ダムを対象に、腐朽実態を把握し、維持管理手法を明らかにするための基礎データを得ることを目的として、これまでに秋田県および熊本県で建設されたオールウッド型木製治山ダムを対象に腐朽調査を行った。結果は以下のとおりであった。

- 1) 腐朽は乾湿を繰り返しやすい部位である袖部や地際部、水際部で進行しやすいことが分かった。
- 2) ピロディンを用いた調査結果では、袖部において相関は低いものの、経年に伴いピロディン値が大きくなる傾向が伺えた。放水路部では経年とともにピロディン値はやや低くなる傾向がみられた。これは、放水路部では常水状態にあるため、部材の含水率が高く、部材表面が軟らかくなっていくためにピンの打ち込みに対する抵抗力が減少しているためと考えられる。
- 3) ファコップを用いた調査結果では、放水路部の伝播速度値が概ね一定の値を示しているのに対し、袖部では伝播速度値のばらつきが大きい。この理由として、放水路部では常水状態にあるため、酸素の供給が遮られ、腐朽が進行しにくく健全な状態を保っているためと考えられる。
- 4) いずれの施設においてもピロディン値と伝播速度値の間に相関はみられなかった。
- 5) 熊本県内の4基については施工後2年あまりと間もない時期だったため、木材の劣化はほとんど見られなかった。今後も継続してデータの収集を行い、木部材の劣化特性を把握していく必要がある。

5.3 木製治山ダムの環境影響と経済性の評価

オールウッド型木製治山ダム、ハイブリッド型木製治山ダムおよび治山ダム（床固工）として実績の多いコンクリート製と鋼製を対象に、ライフサイクルにおけるCO₂排出量を比較評価し、非木製と比較した木製治山ダムのCO₂排出削減効果の検討を行った。さらに、環境面だけでなく経済面も考慮した総合的な評価を行うために、各治山ダムの経済性を分析し、木製治山ダムの利点と課題について考察を行った。結果は以下のとおりであった。

- 1) 環境面では、コンクリート製をオールウッド型木製に変更することで54%、ハイブリッド型木製に変更することで43%のCO₂排出削減効果が得られる。オールウッド型木製では鋼製に対しても25%のCO₂排出削減効果が得られるが、ハイブリッド型木製と鋼製では主要材料の生産過程におけるCO₂排出量原単位が5%以上変動すると、両者のCO₂排出量の大小関係は逆転する。
- 2) ライフサイクルの各過程では、いずれの治山ダムも材料・燃料生産過程からのCO₂排出量が最も大きく、オールウッド型木製は対象としたライフサイクル過程の75%、ハイブリッド型木製、コンクリート製、鋼製は90%以上がこの過程からの排出である。治山ダムのライフサイクルCO₂排出量の大部分が各治山ダムの主材料を生産する過程で排出されている。
- 3) 経済面では、コンクリート製が最も安価で、オールウッド型木製はコンクリー

ト製の241%と高コストである。ハイブリッド型木製はコンクリート製の132%と競合の可能性がある。オールウッド型木製は、接合具を安価な異形棒鋼に変え、かつ建設現場周辺の林地で伐採した原木をその場で製材、加工し、木製治山ダムの部材に活用するオンサイト生産システムを導入すれば、現状の67%程度までコスト削減が可能である。また、ハイブリッド型木製は鋼製と同程度であり、価格競争力がある。

- 4) オールウッド型木製に使用される木材断面サイズを幅300mm×高さ250mmから幅300mm×高さ300mmに変えた場合、部材数の減少により接合具の材料費と施工費は減少したが、木材価格の上昇分まで補うことができず、結果、直接工事費で111%～117%の増加となった。

5.4 総括

秋田県内における木製治山ダムの施工数の推移を図 5.1 に示す。秋田県では、2001年度に木製治山ダムの施工が始まって以降、その数は2013年度末時点で80基を超える。その中で、2006年度以降は秋田県で開発されたオールウッド型およびハイブリッド型のみの施工実績となっている。これは、産学官の関係各位による熱意と努力によって技術的な知見が蓄えられ、上記2種類（特にオールウッド型木製治山ダム）が治山ダムとして利用可能であるという評価に至った点が大きい。2006年度以降もさまざまな技術的知見が蓄えられ、それらの知見を踏まえて、2010年度には秋田県森林土木木製構造物等設計指針¹⁷⁸⁾が改訂された。その指針の中で、秋田県の木製治山ダムはオールウッド型木製治山ダムが標準形であると明記された。これ以降、秋田県における木製治山ダムの施工実績はオールウッド型木製治山ダムのみとなっている。このような状況を鑑み、本研究では主にオールウッド型木製治山ダムに焦点を絞って研究を進めた。

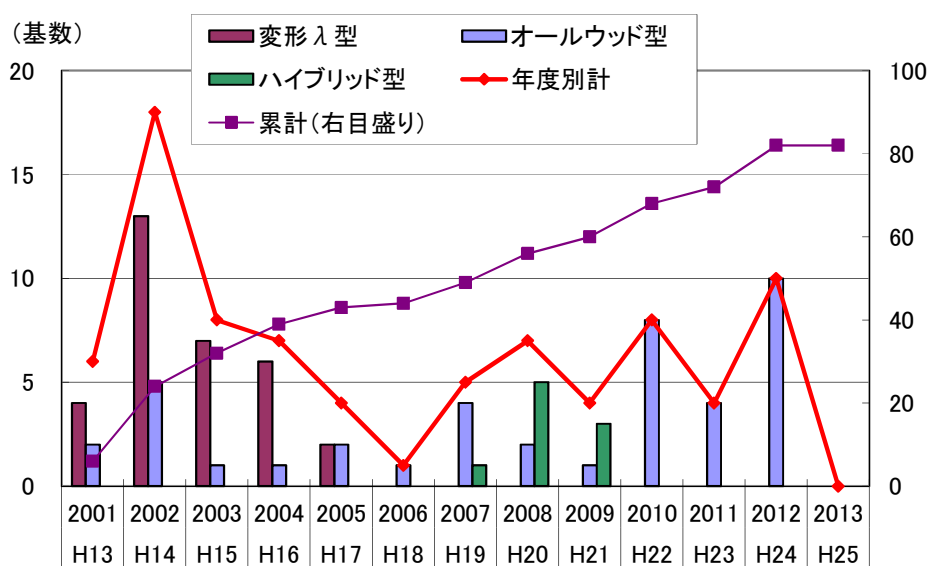


図 5.1 秋田県内における木製治山ダムの施工実績 (2013 年度末時点)

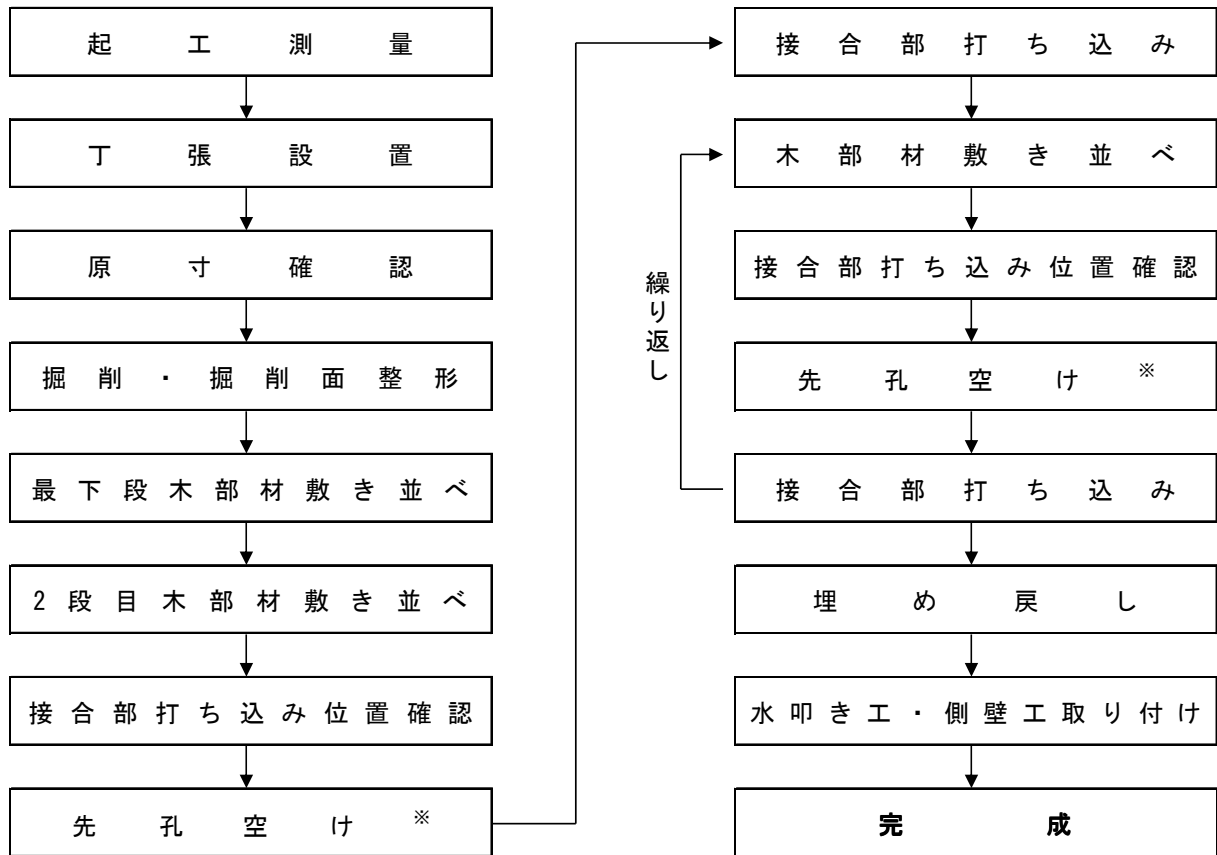
その結果、オールウッド型木製治山ダムの課題の一つであったコスト削減対策では、接合具を高価なラグスクリューから市場に流通し安価な異形棒鋼に代替が可能であることを明らかにした。また、これに伴い、約 12%のコスト削減効果が得られることを示した。さらに、建設現場周辺の林地で伐採した原木をその場で製材、加工し、木製治山ダムの部材に活用するオンサイト生産システムを導入すれば、現状の 67%程度までコスト削減が可能であることが示唆された。接合具をラグスクリューから異形棒鋼に代替することで、コンクリート製よりも少ない CO₂ 排出量がさらに減少することが明らかとなった。なお、ハイブリッド型木製治山ダムについては上記指針の中で、「周囲で本数調整伐を実施しており、伐採木の有効利用する場合」に選択できるようになっている。

これまで得られた知見をもとに提案する、オールウッド型木製治山ダムとハイブリッド型木製治山ダムの施工手順および施工上の注意点を参考資料として示す。

第1章 オールウッド型木製治山ダムの施工手順

1-1 施工手順

オールウッド型木製治山ダムの施工手順は図1のとおりである。



※先孔径は接合具の種別によって異なる。

図1 施工手順

1-2 使用材料

オールウッド型木製治山ダムに使用する材料は表1のとおりである。

表1 使用材料

名称	材質	規格
スギ材(4面落とし材)		幅300mm×高250mm、長600mm～3600mm
ラグスクリュー	SWRCH10	φ16mm(胴部・ネジ部)、長450mm(ネジ部長170mm)
異形棒鋼	SD295A	D16、長460mm(頭部10mm込み)

注1：スギ材は下流への通水を促すため、4隅を落とした角材を用意すること。

注2：ラグスクリューは製品によって胴部・ネジ部の径が異なる場合があることに注意すること。

1-3 施工上の注意点

オールウッド型木製治山ダムを施工するに際し、注意すべき点を以下に列挙する。

- 1) 接合部の下側木材への打ち込み深さは、ラグスクリューは全長で、異形棒鋼では頭部を除いて200mm確保すること。
- 2) 先孔(下穴)径は、下記のとおり接合具の種類によって異なる点に注意すること。なお、先孔径を所定の径で打ち込めない場合は、監督員と相談すること。
 - ラグスクリュー 先孔(下穴)径：φ15mm
 - 異形棒鋼 先孔(下穴)径：φ14mm
- 3) 接合具を打ち込む際は、下記の機械を用いることを推奨する。
 - ラグスクリュー インパクトレンチ
 - ※ハンマーなどで打ち込んではいけません。
 - 異形棒鋼 ハンマードリル

1-4 特記事項

- 1) 堤体および袖部の接合具はすべて異形棒鋼にしてもかまわない。ただし、一度打ち込んだ異形棒鋼を引き抜くのは困難なので、将来的な補修等引き抜くことを考慮する場合は頭部にナット等を取り付け、引き抜けるようにしておくことよい。

第2章 ハイブリッド型木製治山ダムの施工手順

2-1 施工手順

ハイブリッド型木製治山ダムの施工手順は図2のとおりである。

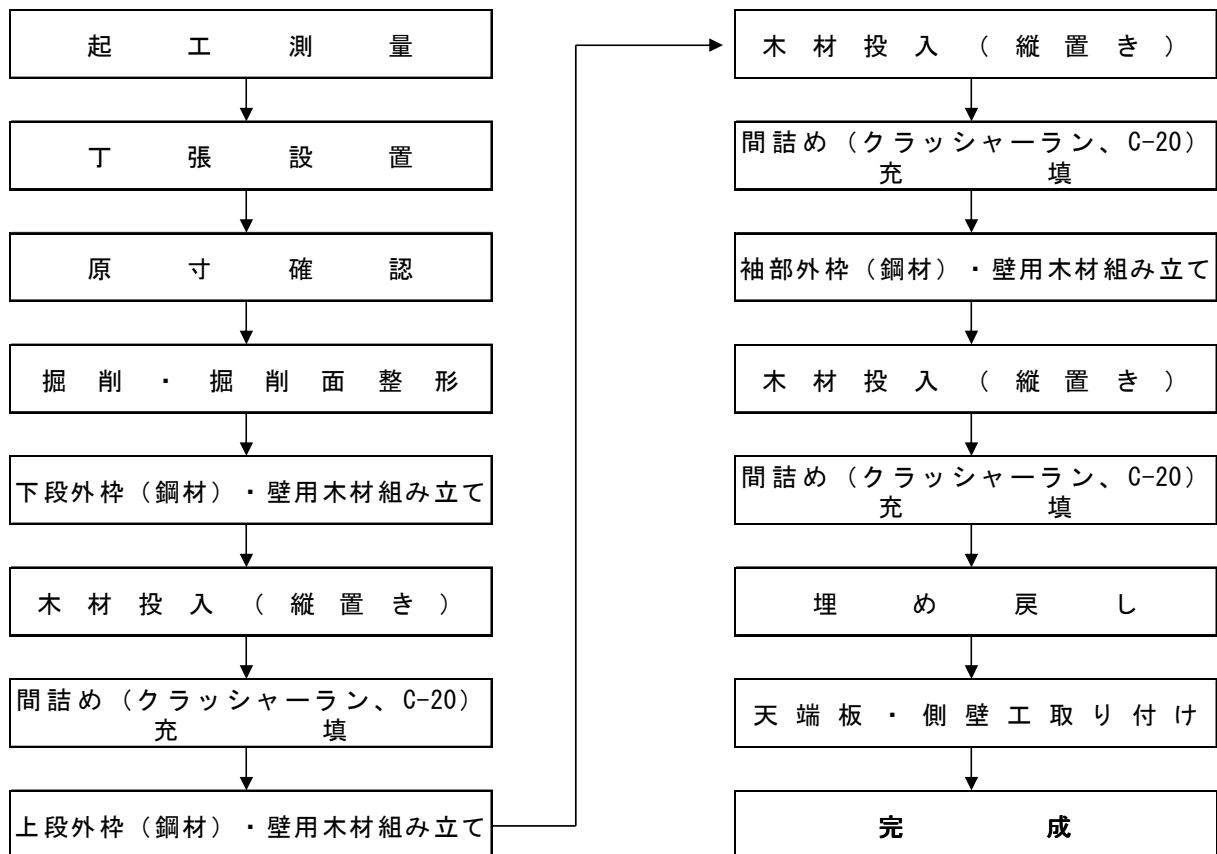


図2 施工フロー

2-2 使用材料

ハイブリッド型木製治山ダムに使用する材料は表2のとおりである。

表2 使用材料

名称	材質	規格
鋼材	SS400	フレーム、ボルト一式
スギ材(間伐材)		長1000mm~2000mm
スギ材(3面落とし材)		幅100mm×高100mm、長1000mm~2000mm
碎石		路盤材、C-20mmまたはC-40mm
吸出し防止材		t=10mm

2-3 施工上の注意点

ハイブリッド型木製治山ダムを施工するに際し、注意すべき点を以下に列挙する。

- 1) 中詰材が流出しないよう、壁材のスギ材(3面落とし材)は隙間なく設置すること。

2-4 特記事項

謝 辞

本研究の遂行と本論文の作成にあたり、研究全般にわたり終始親切丁寧なご指導・激励を賜りました秋田県立大学木材高度加工研究所 佐々木貴信教授に深く感謝申し上げます。佐々木教授には秋田県での木製治山ダムの開発当初から 10 年以上にわたり、ご指導を賜りました。重ねて御礼申し上げます。

学位論文審査におきまして、副査をお受けいただきました、東京農工大学大学院農学研究院 石川芳治教授、秋田県立大学木材高度加工研究所 林知行教授、秋田県立大学生物資源科学専攻 永吉武志准教授に深く感謝申し上げます。

多忙の中、多大なるご支援、ご指導をいただいた、元秋田県立大学木材高度加工研究所 飯島泰男名誉教授に深く感謝いたします。

オールウッド型木製治山ダムの性能評価をまとめるにあたり、ご指導、ご協力をいただいた、福岡大学 千田知弘助教、秋田県立大学木材高度加工研究所 清水光弘氏に深く感謝いたします。

オールウッド型木製治山ダムの腐朽調査をまとめるにあたり、ご指導、ご協力をいただいた、秋田県工業高等専門学校 堀江保教授、米谷裕氏、当時 5 年生の伊藤遼太氏、佐藤裕太氏、熊本県林業研究指導所 遠山昌之氏、平田晃久氏、福岡大学 千田知弘助教、当時福岡大学 4 年生の篠原己観郎氏、中町裕哉氏に深く感謝いたします。

木製治山ダムの環境影響評価をまとめるにあたり、ご指導、ご協力をいただいた、東京農工大学 加用千裕助教、秋田県農林水産部 小笠原正太氏、武石守氏、一般社団法人秋田県林業コンサルタント 三浦靖浩氏、京都府 高奥信也氏に深く感謝いたします。

秋田県立大学木材高度加工研究所職員の方々には、中間発表、予備審査、本審査の際に貴重なご意見・ご指導をいただきました。また、九州大学大学院農学研究院 藤本登留准教授にはたくさんの便宜を図っていただきました。藤本准教授のご配慮がなければ、本論文は完成しませんでした。心より感謝申し上げます。また、秋田県農林水産部 原田利正氏、村川晋氏をはじめ、多くの方々のご協力を賜り、本論文が作成できましたことをここに記し、心より感謝申し上げます。

また、秋田県の木製治山ダムの開発当初から中心的役割を担い、木製治山ダムの設計の考え方や技術開発に尽力され、かつ、筆者の良き理解者として常に叱咤激励を賜りました、元財団法人林業土木施設研究所の恩師 井上孝人氏（故人）に深く感謝申し上げるとともに、ここにご冥福をお祈りします。

最後に、3 年間の研究生活において、さまざまな面で支えてくれた、多くの同僚、友人、そして家族に感謝します。

参考文献

- 1) 農林水産省：森林・林業再生プラン, 7pp., 2009
- 2) 林野庁：平成 25 年度森林・林業白書, p.148, 2014
- 3) (社) 土木学会木材工学特別委員会：2009 年度土木における木材の利用拡大に関する横断的研究報告書, 158pp., 2010
- 4) 荒木昇吾：プレストレスト木・コンクリート合成桁橋における新橋梁形式の提案, 構造工学論文集, Vol.57A, 890-899, 2011
- 5) 三上卓, 笹田修司, 三上市蔵：橋梁建設で生じる CO₂ 排出量の算定と小規模木製歩道橋架設の有効性, 構造工学論文集, Vol.57A, 900-907, 2011
- 6) 千田知弘, 佐々木貴信, 薄木征三, 後藤文彦：支間中央に継手を持つハイブリッド木桁の性能試験及び FEM 解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No.1, 108-120, 2011
- 7) 中田雄太, 本田秀行, 植野芳彦：縦桁を有する木製中路式アーチ車道橋の構造特性, 構造工学論文集, Vol.55A, 915-924, 2009
- 8) 渡辺浩, 小松幸平：スギ素材を活用した積層桁車道橋の提案, 構造工学論文集, Vol.53A, 888-895, 2007
- 9) 渡辺浩：木橋のコスト評価に関する取り組み, 木材保存, Vol.30, No.3, 117-120, 2004
- 10) 船越和幸, 山本義弘, 赤城敦：溜池の水辺空間を活用した「鶴の舞橋」の計画と施工, 農業土木学会誌, Vol.70, No.3, 237-240, 2002
- 11) 林野庁：平成 25 年度森林・林業白書, p.188, 2014
- 12) 林野庁：平成 24 年度森林・林業白書, p.202, 2013
- 13) 北海道渡島総合振興局産業振興部林務課治山係：溪間工における木製工作物の実施例について, 治山, Vol.56, No.6, 129-131, 2011
- 14) 佐々木貴信：土木における木材の利用拡大と木製堰堤の開発, 水利科学, No.315, 1-12, 2010
- 15) 下菌悟, 尾上敏夫：資源循環型工法による治山ダムの維持管理に関する一考察, 第 50 回治山研究発表会論文集, 197-200, 2010
- 16) 近藤太一：現地発生材を使用した治山施設の検証について, 第 50 回治山研究発表会論文集, 255-260, 2010
- 17) 菅沼好一, 坂本寛子：木製治山構造物の利用促進の取り組み, 第 46 回治山研究発表会論文集, 171-175, 2006
- 18) 岡本貴史：資源循環型工法による治山ダムの取り組み, 第 45 回治山研究発表会論文集, 120-125, 2005
- 19) 中岡輝男：小規模溪流における間伐材利用の治山ダム施工事例, 第 44 回治山研究発表会論文集, 172-174, 2004
- 20) 間島達哉：森林整備と連携した治山施設の施工 ―現地で製材・加工した間伐材利用事例の報告―, 第 44 回治山研究発表会論文集, 160-164, 2004
- 21) 久米田英雄, 間宮学：ユニット式による木製ダムの施工事例, 第 43 回治山研

- 究発表会論文集, 289-291, 2003
- 22) 平尾明一：木製ダム工について, 第 41 回治山研究発表会論文集, 294-295, 2001
 - 23) 佐藤健之, 永嶋龍一：雪害区域内における木製床固工等の一事例, 第 41 回治山研究発表会論文集, 322-330, 2001
 - 24) 牧村光晃：間伐材を使用した床固工の施工, 第 40 回治山研究発表会論文集, 144-149, 2000
 - 25) 山田茂樹, 中嶋章：間伐材を利用した溪間工, 第 40 回治山研究発表会論文集, 150-153, 2000
 - 26) 小柳正彦：木製品を使った溪流工事, 第 40 回治山研究発表会論文集, 162-167, 2000
 - 27) 熊谷操, 千葉和夫：カラマツ間伐材による治山ダム, 第 28 回治山研究発表会論文集, 183-185, 1988
 - 28) 森林総合研究所：地盤改良杭としての間伐材の利用－間伐材の土木利用拡大を目指して－, *Rinya*, No.67, 6-7, 2012
 - 29) 手塚大介：地盤改良用木製基礎杭等の高耐久化に関する技術開発, *木材保存*, Vol.38, No.1, 21-30, 2012
 - 30) 富松義晴, 沼田淳紀, 濱田政則, 三輪滋：持続可能社会へ向けた土木事業における木材利用の提案, *土木学会論文集 F4*, Vol.68, No.2, 80-91, 2012
 - 31) 本山寛, 沼田淳紀, 吉田雅穂, 久保光：スギ丸太打設による軟弱地盤対策実験, *地盤工学ジャーナル*, *地盤工学会*, Vol.7, No.2, 409-420, 2012
 - 32) 久保光, 吉田雅穂, 沼田淳紀, 平山竜朗, 正田大輔：福井県における小規模構造物の軟弱地盤対策に杭丸太を用いた施工事例, *木材利用研究論文報告集 11*, 67-74, 2012
 - 33) 沼田淳紀, 濱田政則, 吉田雅穂, 外崎真理雄, 中村裕昭, 久保光：Effect of carbon storage due to ground improvement by log piling, *Ground Improvement Technologies and Case Histories*, Geotechnical Society of Singapore, 783-789, 2009
 - 34) 中澤 英世, 古谷 光男：パイルネット工法による築堤基礎の軟弱地盤処理, *農業土木学会誌*, Vol.66, No.5, 483-486, 1998
 - 35) 三浦哲彦, 呉文経, 中村六史, 一瀬智郎：軟弱粘土中杭の周面支持機構に関する実験的考察, *土木学会論文集*, No.517, III-31, 63-72, 1995
 - 36) 野田龍, 藤本登留, 渡辺浩, 千田知弘, 占部達也, 片桐幸彦, 廣田篤彦：断面形状を変えた木杭の曲げ強度性能, 第 32 回木材加工技術協会, 18-19, 2014
 - 37) 野田龍, 藤本登留, 渡辺浩, 大内毅, 内倉清隆, 平田文, 阿南和文, 占部達也, 片桐幸彦：地域材を活用したクリーク木杭柵工法の開発, 第 64 回日本木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM), 2014
 - 38) 宮副一之, 鶴田道雄, 山口修, 江口晃二：クリーク整備への木材活用の提案, *木材利用研究論文報告集 10*, 69-74, 2011
 - 39) 佐々木貴信, 清水光弘, 永吉武志, 萩野俊寛, 後藤文彦, 原田紀文, 鈴木博：木杭基礎と自然石を用いた用水路護岸工の試験施工, *木材利用研究論文報告集 13*, 22-27, 2014

- 40) 佐々木貴信, 清水光弘, 野田龍, 原田紀文, 鈴木博, 萩野俊寛, 後藤文彦 : 木杭基礎を用いた多自然型護岸工の実証試験, 第 64 回日本木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM), 2014
- 41) 佐々木貴信, 萩野俊寛, 後藤文彦, 原田紀文, 野田龍, 清水光弘 : 木杭基礎と自然石の空積みによる多自然型護岸, 第 68 回土木学会年次学術講演会(CD-ROM), 2013
- 42) 金丸和生, 張日紅, 飯村豊 : 木製ガードレールの普及拡大に関する調査, 木材利用研究論文報告集 12, 31-34, 2013
- 43) 町田初男, 小黒正次, 佐藤博, 松井春喜, 金子文男, 佐藤順一, 福島守, 齊藤孝信 : ぐんま型木製ガードレールの開発と使用初期の劣化状況, 木材利用研究論文報告集 12, 117-124, 2013
- 44) 松井春喜, 町田初男 : ぐんま型木製車両用防護柵の開発, 木材保存, Vol.37, No.2, 89-94, 2011
- 45) 柴田直明 : 信州型木製ガードレールの開発, 木材保存, Vol.30, No.4, 168-173, 2004
- 46) 末吉修三, 宇京斉一郎, 森川岳, 町田初男, 小黒正次 : 促進劣化試験による木製遮音壁の防音性能の寿命推定, 木材学会誌, Vol.60, No.2, 107-112, 2014
- 47) 柴田直明 : 長野県における木製遮音壁の開発と施工 - 1985 年度試験施工 200m と 2012 年度新設 48m -, 木材保存, Vol.39, No.5, 256-260, 2013
- 48) 柴田直明, 山内仁人, 山本洋敬 : 長野県内における木製遮音壁の新設, 木材利用研究論文報告集 12, 23-30, 2013
- 49) 加藤英雄, 石田修, 刈茅孝一, 田口雅彦, 柴田直明, 張日紅, 町田初男, 池田穰 : 木製道路施設における現状と課題, 木材利用研究論文報告集 12, 35-40, 2013
- 50) 町田初男, 小黒正次, 工藤康夫, 長尾博文, 加藤英雄, 井道裕史 : 木製遮音壁の経年劣化と劣化外力の影響, 木材保存, Vol.36, No.2, 59-64, 2010
- 51) 清水悟 : 間伐材を活用した木製遮音壁の開発について, 木材保存, Vol.29, No.6, 273-275, 2003
- 52) 三山敬 : 種々の材料を用いた遮音壁の実施例, 騒音制御, Vol.23, No.3, 160-164, 1999
- 53) 石川芳治 : 木製床固工の特徴と設計, 砂防学会誌 (新砂防), Vol.50, No.6, 33-39, 1998
- 54) 石川芳治, 岩館知哉, 水原邦夫 : 小型木製枠構造堰堤の水平載荷試験の安定性の検討, 砂防学会誌 (新砂防), Vol.52, No.5, 16-23, 2000
- 55) 林野庁監修 : 森林土木木製構造物施工マニュアル, 411pp., 2010
- 56) 唐牛孝司 : 既設木製えん堤の現況について, 砂防学会誌 (新砂防), Vol.51, No.6, 46-50, 1999
- 57) 田中俊成, 山本幸一, 北原曜 : 大正から昭和にかけて施工された木製ダムの耐久性調査, 第 15 回木材保存協会年次大会論文集, 1-9, 1999
- 58) 林野庁プレスリリース : 「後世に伝えるべき治山 ～よみがえる緑～」の選

- 定について (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/suigen/131003.html>) ,平成 25 年 10 月 3 日
- 59) 長野県土木部砂防課：長野県西部地震，新砂防, Vol.48, No.4, 66-68, 1995
 - 60) 三輪照光：流況の木堰堤調査報告，砂防学会誌（新砂防）, Vol.52, No.5, 52-56, 2000
 - 61) 中村大地：木製治山ダムの修繕方法の確立に向けて，第 50 回治山研究発表会論文集, 201-203, 2010
 - 62) (社)日本建築学会：木質構造設計基準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－, 395-396, 2006
 - 63) 野田龍，佐々木貴信，千田知弘，井上孝人，原田利正，三浦靖浩：木製治山ダムの開発に関する取り組み，砂防学会誌, Vol.65, No.1, 39-46, 2012
 - 64) 野田龍，千田知弘，佐々木貴信，井上孝人，原田利正，三浦靖浩，水原崇之：秋田県における木製治山ダムの開発，木材利用研究論文報告集 10, 102-107, 2011
 - 65) 林野庁森林整備部計画課：都道府県別森林率・人口林率，平成 24 年 3 月 31 日現在, <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h24/1.html>
 - 66) 秋田県立大学木材高度加工研究所：コンサイス木材百科, 54, 2011
 - 67) (社)日本建築学会：木質構造設計基準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－, 262, 2006
 - 68) 佐々木貴信：木製複断面床固工の構造特性に関する研究，林業土木施設研究所報【12】, 54-73, 2009
 - 69) (財)砂防・地すべり技術センター：鋼製砂防構造物設計便覧, 254pp. , 2009
 - 70) 藤原隆一：「本数調整伐材」を用いたハイブリットダム（木材・鋼製融合型）の施工事例，第 48 回治山研究発表会論文集, 134-141, 2008
 - 71) (社)日本建築学会：木質構造設計基準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－, 日本建築学会編, 229-230, 2006
 - 72) 滝内浩，澤田圭，佐々木貴信，岡崎泰男，土居修一，飯島泰男：腐朽条件下に置いた木材の面圧強度の変化，木材学会誌, Vol.53, No.1, 46-51, 2007
 - 73) 澤田圭，滝内浩，佐々木貴信，土居修一，飯島泰男：腐朽条件下に置いた木材の面圧強度の変化，第 4 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, 79-83, 2005
 - 74) 佐々木貴信，金高悟，原田利正，小笠原正太，三浦靖浩，井上孝人，野田龍：木製治山ダムの耐荷力および部材接合部強度に関する研究，第 58 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 120, 2008
 - 75) 野田龍，佐々木貴信，千田知弘，井上孝人：オールウッド型木製治山ダムの耐荷力について，第 65 回土木学会年次学術講演会(CD-ROM), 2010
 - 76) 小笠原正太：複断面木製治山ダム（オールウッド）の土圧・水圧モニタリング実施状況，第 44 回治山研究発表会論文集, 182-189, 2004
 - 77) 佐々木貴信，金高悟，原田利正，小笠原正太：木製治山ダムの施工と実験，第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 606, 2003

- 78) 千田知弘, 佐々木貴信, 野田龍, 三浦靖浩: 木質土木構造物の接合具としてのラグスクリューと異形棒鋼の引抜性能, 構造工学論文集, 58A, 785-792, 2012
- 79) 野田龍, 井上孝人, 佐々木貴信, 千田知弘, 三浦靖浩, 原田利正: 経済性を考慮したオールウッド型木製治山ダムに関する研究, 第66回土木学会年次学術講演会(CD-ROM), 2011
- 80) 野田龍, 佐々木貴信, 千田知弘: 大断面木質土木構造物に異形棒鋼を用いた場合のせん断性能および引き抜き性能の推定 - $\phi 16\text{mm}$ の長尺ラグスクリューと異形棒鋼を用いた試験体の性能比較 -, 木材学会誌, Vol.60, No.5, 249-260, 2014
- 81) "Annual Book of ASTM Standards", ASTM, West Conshohocken, USA, 571-575, 2011
- 82) 平井卓郎: 北海道大学農学部演習林研究報告 46, 967-988, 1989
- 83) Sawata, K. Yasumura, M.: Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners, J Wood Sci. 48, 138-146, 2002
- 84) 川元紀雄, 小松幸平, 原田真樹: ドリフトピン接合部の繊維に直交する方向のせん断耐力(第3報)ヨーロッパ型剛塑性降伏理論による降伏荷重の推定, 木材学会誌, Vol.39, No.12, 1386-1392, 1993
- 85) 野田龍, 佐々木貴信, 千田知弘: 木質土木構造接合部に異形棒鋼を用いたときのせん断耐力の推定, 木材利用研究論文報告集 12, 59-64, 2013
- 86) "木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-", 日本建築学会編, 222-225, 2006
- 87) "木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-", 日本建築学会編, 31, 2006
- 88) "木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-", 日本建築学会編, 260-263, 2006
- 89) "木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-", 日本建築学会編, 374, 2006
- 90) "木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-", 日本建築学会編, 157-159, 2006
- 91) 千田知弘, 佐々木貴信, 野田龍, 渡辺浩, 原田利正, 三浦靖浩: 接合具に異形棒鋼を用いた木製治山ダムの耐荷力, 構造工学論文集, 60A, CD-ROM, 2014
- 92) 千田知弘, 佐々木貴信, 野田龍, 井上孝人, 三浦靖浩: 木製治山ダムの FEM 解析を用いた最適設計と開発-第1報 オールウッドタイプ木製治山ダムの最適設計-, 砂防学会誌(新砂防), Vol.64, No.5, 14-23, 2012
- 93) 千田知弘, 佐々木貴信, 野田龍, 井上孝人, 三浦靖浩: 木製治山ダムのラグスクリューの最適設計に関する基礎的研究, 木材利用研究論文報告集 9, 土木学会木材工学特別委員会, 41-50, 2010
- 94) 北島君三: 本邦産木材耐久比較試験, 林試報告, 38, 53-62, 1942
- 95) 北村義重: 野幌国有林産材の耐久性に就て, 北林試木材利用試験彙報 2, 1944
- 96) 小田島輝一: トドマツ・エゾマツ類の耐久性, 林産試験場月報 155 号, 1964

- 97) 雨宮昭二：浅川実験林苗畑の杭試験(1) 杭の被害程度を評価する方法，林業試験場研究報告，Vol.150, 143-156, 1963
- 98) 雨宮昭二，松岡昭四郎，庄司要作，井上衛，阿部寛，内藤三夫：浅川実験林苗畑の杭試験(2) 防腐処理杭の 10 年間の被害経過，林業試験場研究報告，Vol.230, 105-142, 1970
- 99) 松岡昭四郎，雨宮昭二，庄司要作，井上衛，阿部寛，内藤三夫：浅川実験林苗畑の杭試験(3) 各樹種の野外試験による耐久性調査結果，林業試験場研究報告，Vol.232, 109-135, 1970
- 100) 雨宮昭二，松岡昭四郎，庄司要作，井上衛，鈴木憲太郎：浅川実験林苗畑の杭試験(6) 防腐処理杭の 18 年間の被害度と耐用年数，林業試験場研究報告，Vol.297, 135-155, 1977
- 101) 松岡昭四郎，井上衛，庄司要作，鈴木憲太郎，山本幸一：浅川実験林苗畑の杭試験(7) 日本産，および南洋産材の野外に設置した杭の腐朽経過と耐用年数，林業試験場研究報告，Vol.329, 73-106, 1984
- 102) 井上衛，雨宮昭二，松岡昭四郎，鈴木憲太郎，山本幸一：浅川実験林苗畑の杭試験(8) 28 年経過後の浅川実験林の防腐処理杭およびその他の試験地の被害経過，林業試験場研究報告，Vol.347, 1-33, 1987
- 103) 中村嘉明：油性防腐剤注入処理杭の野外における経過年数と劣化の相関，材料，Vol.32, No.359, 929-934, 1983
- 104) 長谷川益夫：富山県における木材野外杭試験（予報） 材質と防腐薬液注入量の関係における統計分析の適用例，木材と技術，No.68, 8-13, 1987
- 105) 中村嘉明：明日香実験林，野外杭試験報告(V) 乳剤加圧式注入処理杭の野外耐朽性，奈良県林業試験場研究報告，No.23, 15-22, 1993
- 106) Meyer, P., Sampson, G., Gasbarro, A., Allen, L. : Service life of posts from Alaska tree species treated by non-pressure methods, Forest Prod. J., 45(11/12), 53-56, 1995
- 107) 奥村真由巳，森満範，菊地伸一，土居修一：防腐剤塗布丸太の野外耐久性，林産試験場報，Vol.11, No.1, 1-6, 1997
- 108) 中村嘉明，藤平真紀子：明日香実験林，野外杭試験報告（第 5 報） 2×4 工法構造用製材と青森産ヒバ材，能登産アテ材等 18 樹種の素材の野外耐久性，奈良県林業試験場木材加工資料，No.27, 12-15, 1998
- 109) 酒井温子，岩本頼子，中村嘉明：日本農林規格認定の木材保存薬剤を加圧注入した杭の被害経過，木材工業，Vol.56, No.1, 17-22, 2001
- 110) 酒井温子：明日香実験林，野外杭試験報告（第 7 報） 試験地，樹種および防腐処理による被害状況の違い，奈良県森林技術センター研究報告，No.30, 27-38, 2000
- 111) 酒井温子，岩本頼子，中村嘉明：銅あるいは亜鉛を含有する木材保存薬剤を加圧注入した杭の被害経過，木材保存，Vol.27, No.3, 114-120, 2001
- 112) 酒井温子，岩本頼子，中村嘉明：樹種による防腐処理杭の被害経過の違い，木材保存，Vol.27, No.5, 216-224, 2001
- 113) 岩本頼子，酒井温子，中村嘉明：明日香実験林，野外杭試験報告（第 11 報）

- 乾式注入法で処理されたラミナを接着した杭の被害経過，奈良県森林技術センター，No.32, 93-96, 2003
- 114) 長谷川益夫，北田正司：防腐処理カラマツ小丸太の野外杭試験－31年間の被害度変化－，木材保存，Vol.38, No.6, 259-266, 2012
- 115) 長谷川益夫：富山県における木材の野外杭試験（第1報）19年間の被害度変化，富山県林業試験場技術研究報告，Vol.13, 97-106, 2000
- 116) 長谷川益夫，中谷浩，飯島泰男，安田洋，嘉戸昭夫，長谷川幹夫，相浦英春，石田仁，上林徳久：富山県における治山木杭の耐久性（第一報）柵工におけるスギ及びカラマツ木杭の耐用年数について，木材保存，Vol.19, No.1, 13-22, 1993
- 117) 長谷川益夫，飯島泰男，嘉戸昭夫，長谷川幹夫，安田洋，相浦英春：富山県における治山用小径木杭の耐久性，第27回治山研究発表会論文集，313-317, 1987
- 118) 飯島泰男：土木用構造物の耐用年数評価について，木材保存，Vol.25, No.5, 209-218, 1999
- 119) 津島俊治：県産材の土木資材等への利用を図るための耐久性向上に関する研究－木杭等野外耐朽性能試験の予備現地施工事例調査－，大分県林業試験場年報，No.43, 72-74, 2001
- 120) 津島俊治：県産材の土木用資材の開発に関する研究－木杭等野外耐朽性能試験の予備現地施工事例調査－，大分県林業試験場年報，No.44, 49-52, 2002
- 121) 津島俊治：県産材の土木用資材の開発に関する研究－木杭等野外耐朽性能試験の予備現地施工事例調査－，大分県林業試験場年報，No.45, 49-50, 2003
- 122) 津島俊治：県産材の土木用資材の開発に関する研究－木杭等野外耐朽性能試験の予備現地施工事例調査－，大分県林業試験場年報，No.46, 40-41, 2004
- 123) 津島俊治，栗崎宏，長谷川益夫：大分県における土木用木製構造物の劣化原因と耐用年数，木材保存，Vol.31, No.5, 199-206, 2005
- 124) 倉岡由紀子，前田貴昭，遠山昌之：土木用木質資材の耐久性に関する調査及びその特性を考慮した利用方法の開発，熊本県林業研究指導所研究報告，No.43, 53-71, 2005
- 125) 町田初男，茂木のり恵，伊藤英敏：落石防護柵の緩衝材に使用されている針葉樹間伐材丸太の劣化調査，木材保存，Vol.29, No.6, 25-258, 2003
- 126) 上野俊弘：木製土木施設利用推進のための維持管理手法，第41回治山研究発表会論文集，316-321, 2001
- 127) 井戸聖富，糸川隆康：木製構造物の劣化調査，木材保存 30(1), 27-29, 2004
- 128) 大橋一雄，多田野修：ピロディンおよび目視被害度を用いたカラマツ杭材の耐用年数評価，岩手県林業技術センター研究報告 13, 35-40, 2005
- 129) 石川芳治，内藤洋司，落合博貴，上原勇：各種試験に基づく木製施設の耐久性，腐朽度および曲げ強度評価法，砂防学会誌，Vol.56, No.4, 21-31, 2003
- 130) 石川芳治，小川真梨恵：木製えん堤における部位による腐朽速度の差の検討，木材利用研究論文報告集 10, 116-123, 2011

- 131) 大堂啓幸:木製構造物における腐朽調査,第41回治山研究発表論文集,309-315,2001
- 132) 菊池謙作:木製治山施設の腐朽と維持管理,第41回治山研究発表会論文集,300-304,2001
- 133) 森川義明,源衛:木製治山施設の経年変化,第41回治山研究発表会論文集,305-308,2001
- 134) 生田哲也,前原哲也:木製土留工の耐久性,第48回治山研究発表会論文集,93-98,2008
- 135) Akita H., Kitahara H., Ono H. : Effect of climate and structure on the progression of wooden check dam decay, *Journal of Forest Reserches*19, 450-460, 2014
- 136) 秋田寛己,北原曜,小野裕:長野県内における木製治山堰堤の腐朽の進行課程と経年変化,森林学会誌,Vol.93, No.6, 253-261, 2011
- 137) 秋田寛己:木製治山堰堤の腐朽の進行過程と経年変化,第50回治山研究発表会論文集,204-210,2010
- 138) 秋田寛己,北原曜,小野裕:長野県内の山地溪流における木製治山堰堤の腐朽,第47回治山研究発表会論文集,172-175,2007
- 139) 秋田寛己,北原曜,小野裕:治山木製構造物の木材腐朽について,治山,Vol.51, No.7, 172-175, 2006
- 140) 海老原伸子,北原曜,小野裕:カラマツ間伐材を用いた山腹工の腐朽過程,第52回砂防学会研究発表会概要集,130-131,2003
- 141) 山内仁人,今井信:設置後28年経過した木製治山構造物の劣化,2014年度日本木材学会中部支部大会,54-55,2014
- 142) 山内仁人,今井信:カラマツ製治山施設の劣化,木材利用研究論文報告集12,73-76,2013
- 143) 土屋幸敏,高奥信也,阿部良平,澤井俊秀,菊池謙作,朝田瑞樹:京都府における木製治山ダムについて,第52回砂防学会研究発表会概要集,12-13,2003
- 144) 阿部良平,高奥信也,朝田瑞樹,土屋幸敏:木製治山ダムの部材破壊試験と追跡調査ー維持管理の簡素化をめざしてー,第43回治山研究発表会論文集,257-261,2003
- 145) 安田淳一,須貝与志明,北田正司,有馬孝禮,荒武志朗,岩崎新二,上杉基:保存処理した木柵の野外暴露試験ーメンテナンスによる耐久性向上効果の検証ー,木材保存,Vol.38, No.1, 14-20, 2012
- 146) 佐々木貴信,金高悟,花田健介:スギ素材を用いた木製治山ダムの耐久性調査,木材学会 第56回木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM), 2006
- 147) 伊藤遼太,堀江保,佐々木貴信,野田龍,中島学夫:木製構造物の維持管理手法に関する研究,木材利用研究論文報告集12,土木学会木材工学委員会,147-150,2013
- 148) 野田龍,佐々木貴信,堀江保,伊藤遼太,米谷裕,佐藤裕太:オールウッド型木製治山ダムの耐久性調査,第68回土木学会年次学術講演会(CD-ROM), 2013

- 149) 野田龍, 藤本登留, 遠山昌之, 平田晃久, 千田知弘, 篠原己観郎, 渡辺浩, 佐々木貴信: 熊本県に施工されたオールウッド型木製治山ダムの劣化状況, 木材利用研究論文報告集 13, 32-33, 2014
- 150) 社団法人日本治山治水協会: 平成 21 年版治山技術基準解説 総則・山地治山編, 56, 2009
- 151) 前川峰志: 各種試験に基づく木製防風工の劣化調査, 第 46 回治山研究発表会論文集, 161-165, 2006
- 152) Ryu Noda, Chihiro Kayo, Takanobu Sasaki, Shinya Takaoku : Evaluation of CO₂ emissions reductions by timber check dams and their economic effectiveness, Journal of Wood Science, Vol.60, No.6, 461-472, 2014
- 153) Chihiro Kayo, Ryu Noda, Takanobu Sasaki, Shinya Takaoku : Carbon balance on life cycle of wood : targeting a timber check dam, Journal of Wood Science, Vol.61, No.1, 70-80, 2015
- 154) IPCC. : IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4), 2007
- 155) Jönsson A, Tillman AM, Svensson T : Life cycle assessment of flooring materials: case study. Build Environ, Vol.32, No.3, 245–255, 1997
- 156) Börjesson P, Gustavsson L : Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspective. Energy Policy 28, 575–588, 2000
- 157) Petersen AK, Solberg B : Greenhouse gas emissions, lifecycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction. Case: beams at Gardermoen airport. Environ Sci Policy 5, 169–182, 2002
- 158) Kayo C., Hashimoto S., Numata A., Hamada M. : Reductions in greenhouse gas emissions by using wood to protect against soil liquefaction. Journal of Wood Science 57, 234-240, 2011
- 159) 高奥信也: 京都府における木製治山ダム, 砂防学会誌, Vol.62, No.6, 59-62, 2010
- 160) 高奥信也, 内田恵: LCA を用いた治山構造物の環境影響評価, 第 44 回治山研究発表会論文集, 218-225, 2004
- 161) 野田龍, 加用千裕, 佐々木貴信, 小笠原正太: 木製治山ダムの温室効果ガス排出削減効果木材利用研究論文報告集 11, 103-108, 2012
- 162) 細川大地, 高奥信也, 橋本征二: 木製治山ダムのライフサイクル評価, 第 8 回日本 L C A 学会研究発表会講演要旨集, 376-377, 2013
- 163) LCA シリーズ 「第一分冊」LCA 概論, 社団法人 産業環境管理協会,1, 2010
- 164) 林野庁ホームページ: 公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律, <http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/koukyou/>
- 165) National Institute for Land and Infrastructure Management Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan : 社会資本のライフサイクルアセスメント, 工事工種体系ツリーの細別(レベル 4)に対応した環境負荷原単位, 2010 年暫定版, 2012
- 166) 産業環境管理協会: MiLCA, 2010

- 167) 平成 23 年版 治山林道必携 積算・施工編：(社)日本治山治水協会，日本林道協会,2016p. , 2011
- 168) 環境省，経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル (Ver.3.2) ，算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, 2012
- 169) 総務省法令データ提供システム：減価償却資産の耐用年数等に関する省令，<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S40/S40F03401000015.html>
- 170) 後藤勝彦：間伐材を利用した木製治山ダム，第 43 回治山研究発表会論文集，262-263, 2003
- 171) 常松美帆：治山事業における地元材活用の状況と課題，第 43 回治山研究発表会論文集，264-267, 2003
- 172) 森政幸：木材を利用した溪間工，第 39 回治山研究発表会論文集，328-332, 1999
- 173) 佐々木貴信，野田龍，千田知弘，森川光彦，戸田守：オンサイト生産システムによる木製治山ダムの施工，木材利用研究論文報告集 11, 39-42, 2012
- 174) 佐々木貴信，千田知弘，野田龍，井上孝人，三浦靖浩，水原崇之：オンサイト製材を用いた木製治山ダムの開発と FEM 解析，第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM) , 2011
- 175) 佐々木貴信，山内秀文，五月女博，千田知弘，小笠原正太：木製土木施設オンサイト生産システムの構築(1) オンサイト製材及び木製治山施設施工の検討，第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM) , 2010
- 176) 五月女博，山内秀文，佐々木貴信，千田知弘：木製土木施設オンサイト生産システムの構築(2) 移動式簡易製材機の開発とその性能評価，第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM) , 2010
- 177) 五月女博，山内秀文，佐々木貴信，千田知弘，岡崎泰男，栗本康司：木製土木施設オンサイト生産システムの構築(3) 移動式製材機の改良と性能評価，第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集(CD-ROM) , 2011
- 178) 秋田県農林水産部森林整備課：秋田県森林土木木製構造物設計指針，28, 2010