

Short Report

RC 部材の構造実験に用いる小型応力センサーの検証実験

櫻井真人¹¹ 秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科

本研究では、鉄筋コンクリート（RC）構造部材における力学的抵抗機構の解明を目標として、構造部材の静的載荷実験において部材内部に埋設することにより部材内部のコンクリートに生じる応力を直接計測可能な小型センサーの開発を進めている。このセンサーの要求仕様としては、一般的な荷重計とおよそ同じ精度で圧縮力が検出できること、目安として縮尺 1/3 程度の RC 造耐震壁試験体の壁厚 80mm のあいだに直接埋設が可能なサイズであるとともに、センサー自体が耐震壁試験体の構造性能に影響を及ぼさないことなどが挙げられる。本論文では、センサーの基本設計および市販センサーとの比較検証試験を行い、センサーの基本的性状を把握した後、RC 造梁試験体を対象に当該センサーを埋設した上で、4 点曲げ試験を実施した。その結果、提案したセンサーは改善すべき事項が残るものの、概ね梁の設計破壊モードに基づいた応力性状を示す結果が得られた。

キーワード：鉄筋コンクリート部材，構造実験，小型応力センサー，有効強度係数，圧縮ストラット

鉄筋コンクリート（以下、RC）建物部材の終局強度設計における部材のせん断強度の算定法には、部材内部に形成されるアーチ抵抗機構およびトラス抵抗機構より算定される耐力の総和より耐力を求めるトラス・アーチ理論式がある。本理論は日本建築学会・鉄筋コンクリート造建物の靱性保証指針（2008）に示されているが、強度算定時には部材に用いるコンクリートの実強度ではなく、実強度に有効強度係数 α を乗じて低減させた有効圧縮強度を採用している。これは、コンクリートの材料特性は非線形であり、完全弾塑性からはほど遠いものであると同時に、せん断作用によって部材にひび割れが生じた中を圧縮応力が伝達されるために圧縮強度自体が実質的に低下することを総合的に考慮したものである。しかしながら、今井、是永および瀧口（2005）は RC 柱端部においては、帯筋による強拘束の影響により当該部位の作用圧縮応力がコンクリートの 1 軸圧縮強度を最大 2 倍程度まで上回ることから、終局曲げ強度が上昇することを報告している。また、筆者が実施した開口を有する RC 造耐震壁の静的載荷実験で

は壁板面積に対して開口面積がごく小さい場合には開口の影響によるせん断耐力の低下がほとんどみられず、開口間の壁板もしくは開口周辺のどこかで高い応力を負担していることを示した。このように、部材内部の圧縮応力がコンクリートの 1 軸圧縮強度を上回っても強度低下に至らない場合があるにも関わらず、現行指針（2008）では有効強度係数を用いる限り、実強度は 1 軸圧縮強度以下という形でしか評価できないことになる。これは、有効強度係数の算定式が部材に用いるコンクリートの 1 軸圧縮強度と部材の終局強度の関係から統計的・逆算的に定められたものであり、これまでに部材内部で生じる圧縮応力を実測し検証した例がないためである。

以上の背景から本研究では、RC 構造部材における力学的抵抗機構の解明を目標として、部材の静的載荷実験を検討している。そのためには部材内部のコンクリートに生じる応力を直接計測可能な小型埋設センサーの開発が必要となる。本論文では、センサーの基本設計および市販センサーとの比較検証試験を行い、センサーの基本的性状を把握した後、RC

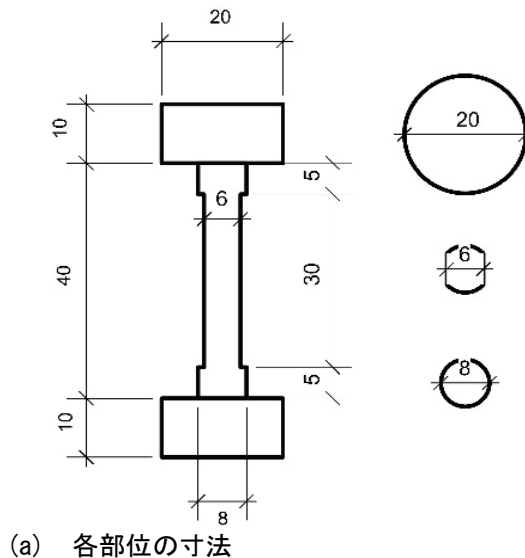


図1 応力センサー

造梁試験体を対象に当該センサーを埋設した上で、4点曲げ試験を実施した。

応力センサーの概要

応力センサーの形状を図1に示す。RC部材の構造実験に用いる縮尺試験体に対して内部応力が直接計測可能なセンサーの設計を行う。このセンサーの要求仕様としては、一般的な荷重計とおよそ同じ精度で圧縮力が検出できること、目安として縮尺1/3程度のRC造耐震壁試験体の壁厚80mmのあいだに直接埋設が可能なサイズであるとともに、センサー自体が耐震壁試験体の構造性能に影響を及ぼさないこと、コンクリート打設時にセンサー自体を埋設することになるが貼付ひずみゲージに対して防水処理が問題なく施せることが挙げられる。このためにま

ず、計測周辺のコンクリートのヤング係数と圧縮応力を検出するセンサー材の見かけのヤング係数を同等にすることを目標とした。ヤング係数が同等であれば、圧縮力が作用した際に生じるひずみがセンサー材自体と周辺コンクリートとで同等となり、センサー材の材質によらずに周辺コンクリートと同じ挙動を計測できる。コンクリートのヤング係数 E_c を 30kN/mm^2 、センサー材を鋼材と仮定しヤング係数 E_s を 210kN/mm^2 と想定する。センサーの概形は端部に対して中央部の断面積が小さいダンベル型とし、応力を受けた際のひずみがコンクリートの一致するような断面を算定した。その結果、図1(a)のようにセンサー中央部の面積を端部の0.1倍とすることでセンサーの全体ひずみとコンクリートひずみが一致し、センサー材が周辺コンクリートと同等の見かけのヤング係数となることがわかる。

これらを踏まえて、図1(a)のような直径20mmの断面と、直径8mmの断面を持つ応力センサーを作製した。なお、応力センサー中央部断面寸法はひずみゲージの貼付箇所の平面区間を考慮して決定した。センサー材に使用する材料は、S50C（機械構造用炭素鋼）とし、ヤング係数を 210kN/mm^2 とした。

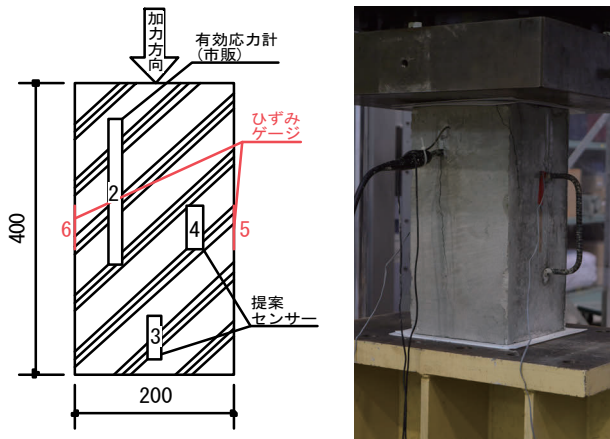
応力センサーに作用する応力の計測については、応力センサーの中央部にひずみゲージを取付け出力されたひずみへ校正係数を乗じることで応力を算定する。校正係数については、別途校正試験をおこない作用応力と出力ひずみの関係からセンサーごとに変換係数を決定する。

センサー中央部は、ひずみゲージ貼り付け部分を防水加工により保護するとともに、周囲のコンクリートによる横方向への力に対して抵抗し、センサー中央部のゲージ貼付部に周辺拘束を作用させないために当該部位が中空形状となるよう設計し、アクリル板による縁切りを行った。

応力センサーの検証実験

市販センサーとの比較検証実験

前章で示したセンサー（以下、提案センサー）を $200\times 200\times 400\text{mm}$ のコンクリート角柱内部に埋め込み、コンクリート内部に伝達される応力を直接計



(a) センサーの配置 (b) 加力状況

図2 1軸圧縮試験

測できるか検証する。各センサーの位置は図2 (a) のとおりである。また、本実験では提案センサーの他に市販の有効応力計 (20×20×200mm) も同時に埋め込むとともに角柱試験体側面2箇所にひずみゲージを貼付し、出力値を比較した。実験は5000kNアムスラー試験機を使用した1軸圧縮試験を実施した。なお、使用したコンクリートはJIS規格品ではないものであるが、直前のφ100×200mm供試体の1軸圧縮試験により、40N/mm²の強度を有していることを確認している。

図3は各センサーの出力ひずみとアムスラー試験機のストロークの関係を示す。図4に各センサーの応力およびアムスラー試験機のロードセル出力値とストロークの関係を示す。なお、図3においてはセンサー4の出力ひずみは4ゲージ法によって算出されているため、実ひずみは出力ひずみの半分の値となるため、補正した結果も併せて示す。なお、センサー3および6については計測不調のためデータを記載しないこととした。

載荷開始より荷重の上昇がみられたが、ロードセル換算応力で12N/mm²付近で試験体の最大耐力516kNを記録し、その後耐力低下がみられた。それと同時に市販の有効応力計の埋設位置に沿ってコンクリート表面に縦方向のひび割れがみられ、損傷が集中する結果となった。このことから、本試験では、市販の有効応力計の存在によって当該部位の損傷が集中する形となった結果、いわゆる偏心載荷の状態となったため1軸圧縮強度40N/mm²よりも相当低い

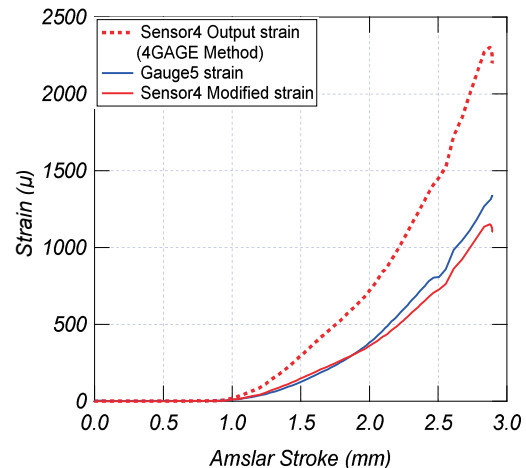


図3 出力ひずみ-アムスラーストローク関係

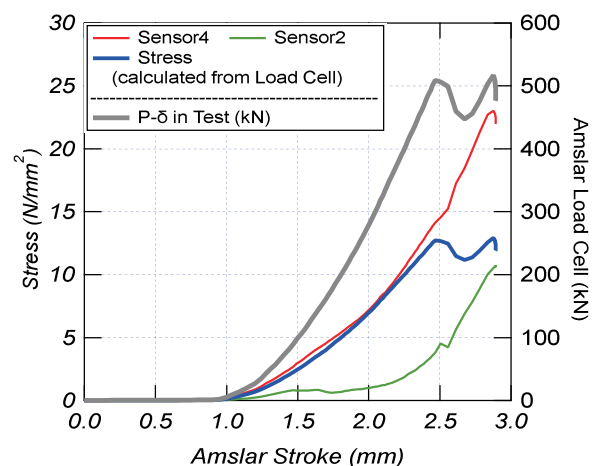


図4 応力-アムスラーストローク関係

応力状態にて最大耐力に達したものと推察される。

図3をみると、センサー4の補正出力ひずみは同部位のコンクリート表面ひずみと良い対応を示していることがわかる。このことから、提案センサーは計測対象部位のひずみを良好に捉えることができるといえる。図4をみると、試験体が最大耐力に至る直前まで提案センサーが示す応力はロードセル換算応力と良い対応を示している。これに対して市販の有効応力計は先述のとおり、載荷中に当該応力計の位置に損傷が集中した影響によりロードセルの換算応力との対応がほとんどみられない結果となった。以上をふまえると、提案センサーは、載荷時における試験体の構造性能に影響を及ぼすことなく、コンクリート内部の応力を良好に計測できるといえる。

RC梁の載荷実験

本節ではRC梁の力学的抵抗機構に基づいて主要

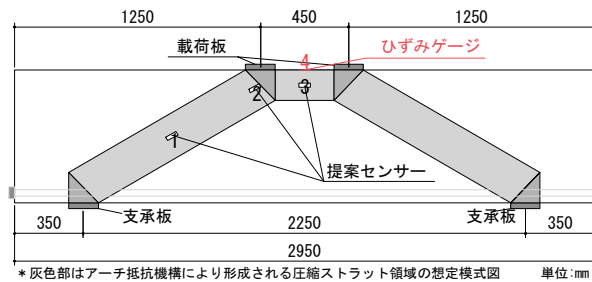


図5 梁試験体とセンサー位置

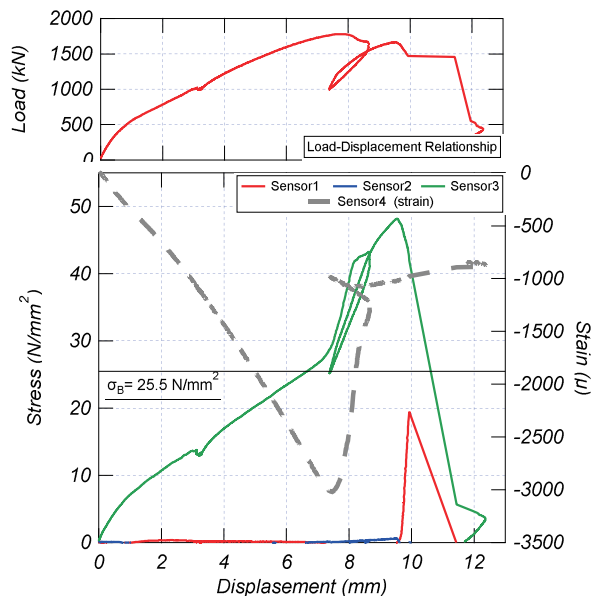


図6 梁の4点曲げ試験結果とセンサーの挙動

位置に提案センサーを埋設し、実測値と理論の対応について検討を行う。

図5に試験体形状およびセンサー位置を示す。梁試験体は小林、運上およびSALAMY (2005) が実施したディープビーム試験体のうち、試験体 B10D および B10.3D の形状を再現した。なお、本論文では B10.3D の結果について報告する。試験体 B10.3D は断面が $360 \times 675 \text{ mm}$ であり、せん断破壊を先行させることを目的として、主筋降伏が生じないよう引張鉄筋比を 2.0% とするとともにせん断補強筋を全く入れないことにした。センサーは図5に示すとおり、せん断力作用時にアーチ抵抗機構によりコンクリート内部に形成される圧縮ストラットに沿って配置した。実験では 5000kN アムスラー試験機を使用し 4 点曲げ試験を実施した。なお、梁試験体に使用したコンクリートの 1 軸圧縮強度は 25.5 N/mm^2 であった。

図6に4点曲げ試験における各センサーによる応力変形関係を示す。なお、図6上部には4点曲げ

試験の荷重変形関係を併記する。

図6をみると、曲げによる圧縮応力を受ける部位であるセンサー3は荷重の上昇に応じて応力が上昇する傾向を示した一方、圧縮ストラットに沿って設置したセンサー1および2は最大耐力までほとんど圧縮応力を計測できなかった。この傾向はもう一方の試験体 B10D でも同様であった。この理由としては、仮定した圧縮ストラットはコンクリート内で梁主筋のみが存在する理想的な場合を想定しているものに対し、本試験体ではせん断力が作用しない区間に主筋位置固定のための帯状鉄筋をわずかながら配置していることから実際の応力伝達機構が変化している可能性が考えられる。

また、最大耐力到達以前にセンサー3はコンクリートの 1 軸圧縮強度である 25.5 N/mm^2 を超え、最大耐力後、なだらかに耐力を保持した 8~11mm の変形区間では最大で 48 N/mm^2 もの応力を記録した。このようにコンクリート内部では 1 軸圧縮強度を上回る応力を示す場合があることがわかった。

まとめ

本論文では、RC 部材試験体への小型埋設センサーと市販センサーとの比較検証試験および当該センサーを埋設した RC 造梁試験体の 4 点曲げ試験を実施し、センサーの基本的性状を把握した。その結果、提案したセンサーは改善すべき事項が残るものの、概ね梁の設計破壊モードに基づいた応力性状を示す結果が得られた。今後はセンサー自体のさらなる検出精度向上を目指すとともに、FEMなどを援用した上で適切なストラット性状を仮定し、センサー埋設位置を決定するなどの検討も必要である。

文献

- 日本建築学会 (2008). 『鉄筋コンクリート造建物の
 靱性保証指針』. 日本建築学会
 今井和正, 是永健好, 瀧口克己 (2005). 「RC 部材
 端部におけるコンクリートの圧縮特性と曲げ耐
 力」『日本建築学会構造系論文集』(587),
 189-196.

小林寛, 運上茂樹, Mohammad Reza SALAMY (2005).

「大型ディープビーム部材のせん断耐力に関する実験的検討」『コンクリート工学年次論文集』
27 (2), 829-834.

〔 平成 29 年 6 月 30 日受付
平成 29 年 7 月 11 日受理 〕

Verification Test of Small Stress Sensors for Seismic Loading Tests with RC Members

Masato Sakurai¹

¹ *Department of Architecture & Environment Systems, Faculty of Systems Science & Technology, Akita Prefectural University*

In this study, a buriable small sensor is developed that can measure for internal concrete stress and to investigate stress-transferring mechanisms for RC members such as beams, columns, beam—column joints, and shear walls. The requirement specifications of the sensor are described below: the sensor has good detectability compared with normally load-cells, the sensor is compatible size for embedding in 1/3 scale RC shear wall specimens, and the sensor dose not directly influence seismic performance for RC members. In this paper, the details of the proposed sensor are described, as are the results of a comparative verification test between the proposed sensor and effective stress sensors commercially supplied and a 4-point bending test for RC beam specimens containing the proposed sensors. From the result, though the proposed sensor needs improvement, the output stress on proposed sensors shows good agreement with failure mode of the RC beam specimen.

Keywords: RC member, seismic loading test, small stress sensor, effective strength coefficient, compressive strut