

論文 小部材を集成した構造部材の曲げ耐荷性状に関する基礎的研究

大屋戸理明*1・池田 学*2・斉藤 雅充*2・坂井 公俊*3

要旨: 本論では、地震時に繰り返し曲げ・せん断力を受けるコンクリート部材について、鋼材やコンクリートを集成して1つの部材を形成する新しい構造を実現させることを目標とし、曲げ耐荷性状に関する基礎的な試験を行って考察を加えた。試作と載荷試験の結果、提案する構造は、個々の材料特性の単純な足し合わせ以上の耐力を有し、補強鋼材の量を増すことで部材の力学性能を向上させることが可能であること、通常の鉄筋コンクリートのような一体構造に比べて損傷が小さく抑えられる可能性があることなどが示唆された。

キーワード: 集成, 曲げ耐力, 変形性能, 横拘束力, 修復性, 解体・再利用

1. はじめに

高架橋などに耐震構造部材として用いられるコンクリート柱等の部材は、一般に、地震によって著大な繰り返し曲げ・せん断力を受け、部材接合部近傍などモーメントの大きい部位で曲げ破壊を生じさせるかわりに地震のエネルギーを吸収し、構造体の安全性を確保するよう設計される。その代償として部材の大規模な損傷を伴うので、その修復に多大な時間と労力を要し、かつ修復後は完全に元に戻らず性能が過小または過大となることから、より合理的な修復方法を採用できる構造が望まれていた。

これに対し、強烈な地震動に対しても変形を部材の弾性範囲内に留めることのできる柱部材の実現を目指す、弾性耐震柱の概念が検討されている¹⁾。曲げ変形に対して平面保持の仮定が成り立つ限り、断面を小さくすれば断面内の歪も小さくなり、弾性限度内の許容変形量が大きくなる。そこで図-1に示すように、柱を鉛直方向に分割することで個々の小部材（以下、単材と称す）の断面を小さくし、それらを束ねるような強度の大きな横拘束部材（以下、拘束材と称す）を設け、予めプレストレスを導入する。これにより分割面での摩擦を発生させ、地震時のエネルギーを吸収させる。

本論で検討する構造部材は、実部材への適用を目指し、この考え方を変形したものである。まず、柱が水平2方向からの力に抵抗でき、かつ横拘束力を効率よく機能させるため、断面を円形とする。次に、横拘束力によって断面内に平面保持の仮定がある程度成立する時点において、断面の中心近くに配置される単材は曲げモーメントに対する抵抗力が十分に発揮されないと考え、軸力と断面形状を保持する機能に特化させ、施工性と経済性の向上を図るために1つにまとめる（以下、芯材と称す）。単材と芯材は、図-2のように集成して部材断面を構成する。断面外縁の単材は降伏を許容するが、単材の束は摩

擦を伴いながら相互に滑動し、降伏範囲を広く分散させるようにする。地震後には単材に歪が残留し部材が変形しているのを、横拘束を緩開し必要に応じて材料を曲げ戻しまたは交換することで、元とほぼ同じ性能の部材を再構築できるようにする。この方法により、部材に破壊や切断を強いられる大規模な損傷を生じにくくし、修復性に優れ解体・再利用が可能な部材を実現することを目指す。なお、図-2は、曲げ耐力確保のための軸方向鉄筋量の増加を目的として、単材は角型鋼管内部に鉄筋を挿入し、間にモルタルを充填した構造としたイメージを示している。

本論では、この提案する構造の基本性能を確認するため、試験体の試作と曲げ載荷試験を実施し検討を行った。以下、この構造をRC集成構造と称し、この構造を有する構造部材をRC集成材と称す。

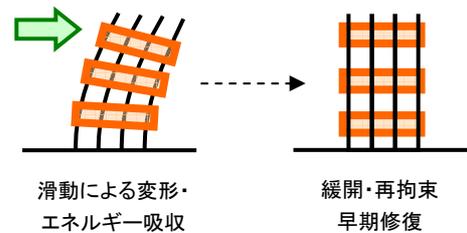


図-1 弾性耐震柱の概念

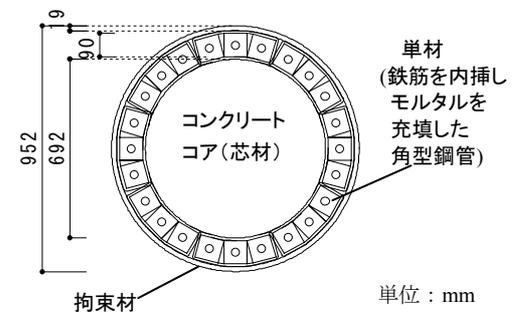


図-2 提案するRC集成材の断面 (イメージ)

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博 (工) (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 修 (工)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造 修 (工)

2. 試験体

2.1 試験体設定の考え方

図-2に示した RC 集成材の基本構造イメージに対して、機能確認用縮小模型試験体の断面構造を考案し、実験により検討を行った。試験体断面を図-3に、一般図を図-4に、試験体断面外観を図-5に示す。

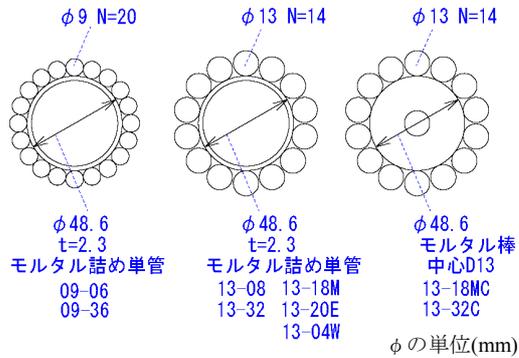


図-3 試験体断面

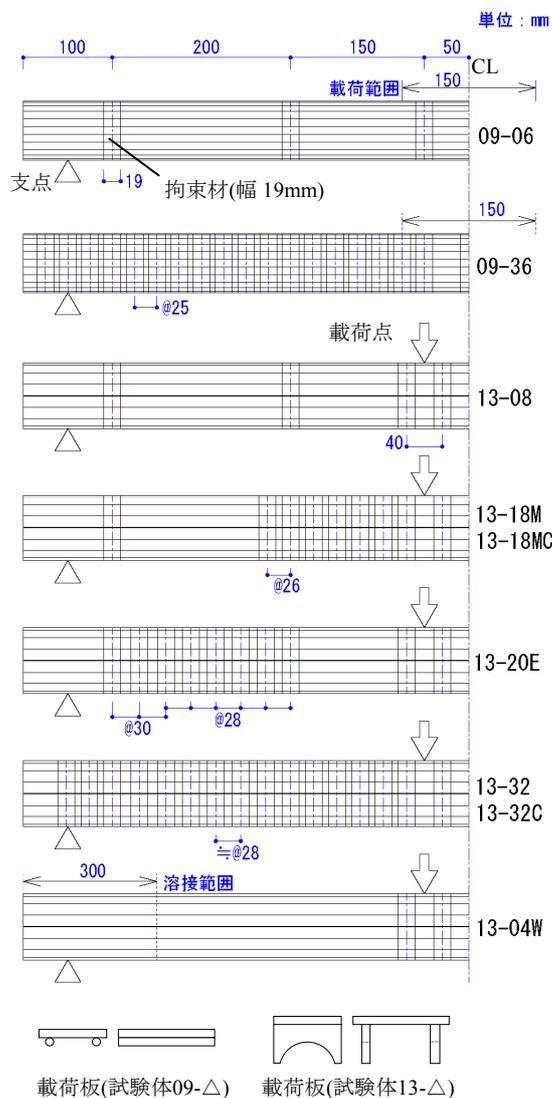


図-4 試験体一般図

試験体では、単材として普通丸鋼を、芯材として一般的な建築資材用の鋼製単管（以下、単管と称す）にモルタルを詰めたものを用いることとした。これは、単材と芯材の摩擦面を鋼材とするためである。単材や芯材の表面がコンクリートなどである場合、表面が逐次損傷して構造特性に変化が生じると予想し、少なくとも機能確認試験の段階ではそのような特性変化を排除するのがよいと考えた。なお、より実部材への適用状態に近いケースを想定して、一部の芯材にモルタル棒（施工上の配慮から内部に異型鉄筋を1本有する）を用いている。

一方、横拘束の方法については、空圧式拘束機（図-6参照、公称引締力 360kgf）を用いて帯鉄により拘束を



図-5 試験体断面外観（破線部は拘束材締結部）



図-6 空圧式拘束機

表-1 試験体一覧

試験体名	単材	芯材	拘束材本数 / 特記	
09-06	φ9 20本 (断面積 1280mm ²)	モルタル詰め 単管	6 (最粗相当)	
09-36			36 (最密相当)	
13-08	φ13 14本 (断面積 1862mm ²)	モルタル詰め 単管	8 (最粗相当)	
13-18M			18 (中央部細密相当)	
13-20E			20 (端部細密相当)	
13-32			32 (最密相当)	
13-04W			4 (載荷点断面のみ) / 端部 300mm 溶接	
13-18MC			モルタル棒*	18 (中央部細密相当)
13-32C				32 (最密相当)

*施工上の配慮として中心に D13 鉄筋を内蔵

試験体名称 ○○-△△□□

○○: 単材径, △△: 拘束材本数, □□: 特記 (M=中央部細密相当, E=端部細密相当, W=端部溶接, C=芯材モルタル棒)

加える方法を採用した。これは、拘束力が大きいほど単材同士の摩擦力が大きくなり、部材の強度やエネルギー吸収量が大きくなると考えられること、拘束材の歪挙動を把握するために拘束材を鋼製とすることが望ましいこと、試験体の寸法や施工性・経済性などを考慮し、極力締めつけ力の大きい市販の製品を選定した結果である。

2.2 試験体諸元

試験体の一覧を表-1に示す。試験パラメータは、単材の量（径と本数）、芯材の種類（モルタル詰め単管およびモルタル棒）、拘束材の量と位置（最粗または最密とする範囲）とし、比較対象として単材にずれが生じないように端部（300mm 範囲）で溶接した試験体を設定した。

2.3 使用材料

使用した材料の力学特性試験の結果を表-2に示す。普通丸鋼と帯鉄の引張試験およびモルタルの圧縮試験のほか、芯材と単材の曲げ試験を実施した。試験方法は試験体の曲げ試験方法（後述）と同一とし、単材の曲げ試験方法は複数本の単材を一行に並べせん断スパンを短縮して一方向単調載荷により行う方法とした。曲げ降伏歪は、芯材・単材それぞれの引張・圧縮縁に歪ゲージを添付し、荷重変形曲線を参照して、図-7の定義により曲げ降伏点を算出して検討に用いた。

2.4 載荷・計測方法

載荷は、図-4に示す位置を載荷点・支点位置とした単純梁形式の載荷方法を採用した。なお、試験体 09-06 と 09-36 の2体は、載荷治具の都合上、図示した範囲に

表-2 材料の力学特性試験結果

モルタル	材齢 (日)	圧縮 強度*	静弾性 係数*	終局歪 (μ)
載荷試験日	12	59.4	20300	6500
鋼材	降伏 強度*	静弾性 係数*	降伏歪 (μ)	引張 強度*
単材	332	208400	1590	469
拘束材	900	232000	3880	901
曲げ降伏歪(μ)				
単材	引張側 2150 / 圧縮側-2170			
芯材	引張側 3190 / 圧縮側-2410			

単材 SR235- ϕ 13 (ϕ 9 の単材の材料試験は実施していないため、 ϕ 13 と同じ降伏歪を考察に用いる)
拘束材は帯鉄 0.6x19mm *単位(N/mm²)

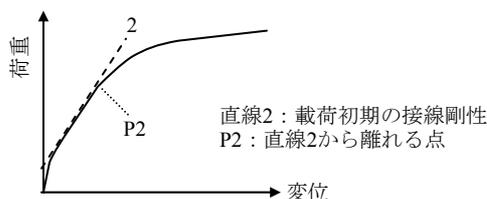


図-7 芯材および単材の曲げ降伏点の定義

線状に荷重が分配される載荷板（図-4）を使用したため、曲げモーメントの算出においてはせん断スパンを25mm 減じて考慮する。これら2体以外の試験体については、載荷点で試験体断面の上半分だけ接する載荷治具（図-4）を使用し、2点載荷の状態となるようにした。載荷は一方向の単純載荷とし、試験装置の最大変位（200mm）に到達するまで実施した。計測項目は、荷重、鉛直変位、単材・芯材および拘束材の歪とした。

3. 試験結果と考察

3.1 単材と拘束材の量による影響

各試験体の載荷試験の結果、いずれも試験装置の最大変位に至るまで破壊に至らなかった。

せん断スパンにおける拘束材の量が2水準で等しく、単材の量が異なる4体の曲げモーメント-部材角($M-\theta$)曲線を図-8に示す。ここで部材角は、鉛直変位をせん断スパンで除した値である。4体とも同一部材角における曲げモーメントは芯材単独のそれを上回り、いずれも初期剛性は同じだが部材降伏荷重は増加し、かつその後の荷重の伸びも大きい。単材が同じで拘束材の量が異なる試験体同士、すなわち試験体 09-06 と 09-36 の比較、および試験体 13-08 と 13-32 の比較によれば、いずれの $M-\theta$ 曲線も拘束材が密な後者が粗な前者を上回っていることから、拘束材の量を増すと耐力が増加することが確認できる。また、拘束材の量が同じで単材の量が異なる試験体同士、すなわち試験体 09-06 と 13-08 の比較、および試験体 09-36 と 13-32 の比較によれば、いずれの $M-\theta$ 曲線も単材が少ない前者を多い後者が上回っており、単材の量を増すと耐力が増加することが分かる。

図-8には、芯材、単材および拘束材の降伏時点にそれぞれ○・△・□の記号を記している。これらを観察すると、芯材→単材→拘束材の順で降伏が発生していることがわかる。特に、断面の外縁に配置されている単材よ

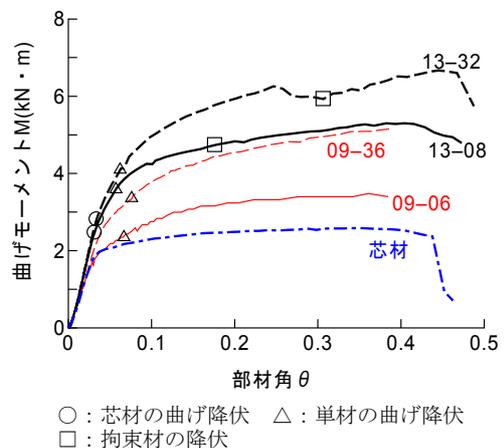


図-8 $M-\theta$ 曲線（単材と拘束材の量による影響）

りも芯材のほうが早期に降伏に達していることから、単材は芯材と一体化せず滑動し、これにより歪を長手方向に分散させていることが推察される。

単材の圧縮降伏は、図-8では省略するが、いずれの試験体も単材の引張降伏とほぼ同時かやや遅れて発生していた。単材には大きな軸力は作用していないと推察され、すなわち芯材とは一体化せずに滑動している（微小な軋み音が载荷の初期から発生していた）と考えられる。

芯材の曲げ降伏変位は、芯材単独の曲げ降伏変位 ($M-\theta$ 曲線の折点) とほぼ一致している。また、芯材が降伏した後に $M-\theta$ 曲線の勾配は急激には低下せず、その後も勾配を緩やかにしながら引き続き耐力が増加し続けている。このことから、本構造とすることにより、芯材の降伏を遅らせる効果は小さいものの、その後に耐力の増加を生じさせる効果があることが確認できる。

なお、図-8の試験体 13-32 と、後述の図-10の試験体 13-32C・13-18MC については、 $\theta=0.25\sim 0.35$ 付近で一時的なモーメントの低下を生じているが、今回の測定結果からはその原因を見出すことはできず、今後の試験で計測項目を増やすなどして検討する必要がある。

3.2 拘束材位置による影響

単材の径が等しく、せん断スパンにおける拘束材の配置が異なる4試験体の $M-\theta$ 曲線を図-9に示す。同図には、芯材単独、および芯材と単材 (14本分に換算) の曲げ载荷試験結果を足し合わせた $M-\theta$ 曲線も記している。試験体 13-18M では载荷点近傍に、試験体 13-20E では支点近傍にそれぞれ拘束材を多く配置している。試験体 13-18M, 13-08, 13-32 の3体の $M-\theta$ 曲線は、芯材と単材の曲げ载荷試験結果の加算 (芯材+単材) より上方にあり、集成構造とすることで芯材と単材の単純な足し合わせ以上に耐力が増すことが分かる。また、試験体 13-18M の $M-\theta$ 曲線は試験体 13-08 と 13-32 の中間にあり、拘束材の量を増すことで耐力が増す傾向が確認できる。

試験体 13-20E は、試験体 13-18M と同等以上の拘束材

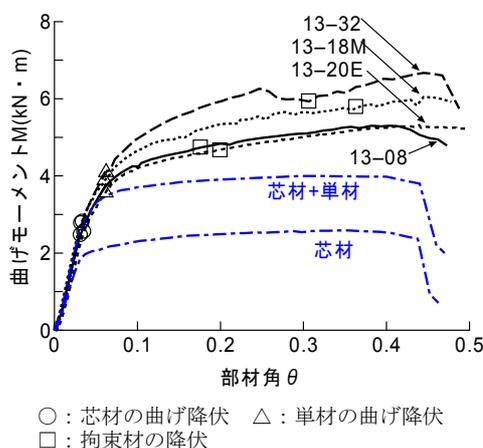


図-9 $M-\theta$ 曲線 (拘束材位置による影響)

を配置したにもかかわらず、拘束材がより少ない試験体 13-08 と同程度の耐力しか発現されていない。単材の滑動を抑制することで、重ね梁の構造状態から一体構造の状態へ近づき、剛性を増す効果があるとも考えられるが、このためには試験体 13-20E のように部材端部で横拘束力を加えることが効果的と考えられる。しかし今回の試験体諸元 (単材, 拘束材の材質および締結方法) では、単材同士の滑動を抑制することが難しく、剛性および耐力を向上させる効果が小さかったものと推察される。

3.3 芯材の種類による影響

単材の径およびせん断スパンにおける拘束材の量が2水準で等しく、芯材の種類が異なる4試験体の $M-\theta$ 曲線を図-10に示す。本図において、芯材にモルタル棒を用いた試験体 13-18MC および 13-32C の○点として、モルタル棒の圧壊時点 (試験体 13-32C は圧縮縁が終局歪 6500μ に達した時点、試験体 13-18MC は終局歪に近い 5960μ に達した直後の急激に圧縮歪が低下した時点) を示している。図-10によれば、 $M-\theta$ 曲線は芯材の違いの影響を受け、モルタル棒を用いた試験体 13-18MC および 13-32C の $M-\theta$ 曲線は、モルタル詰め単管を用いた試験体 13-18M および 13-32 よりも小さい耐力および剛性を示している。また、モルタル棒の外縁が圧壊歪に達した以降も引き続き耐力および変形の増大が観察されており、本構造とすることで耐力および変形性能はモルタル棒単体よりも向上していることが推察できる。さらに、 $M-\theta$ 曲線の第2勾配 (概ね部材角 $0.1\sim 0.4$ の範囲の勾配) を観察すると、同じ拘束材の量とした試験体毎 (13-18M と 13-18MC, 13-32 と 13-32C) に同様な勾配となっており、本構造とすることによる効果が芯材の種類に関わらず同様に発揮されることが推察される。これらのことから、単材がほぼ自由に滑動できる今回の構造では、1. で述べたように芯材の機能として断面を保持する機能と軸力を負担する機能に特化させるのではなく、単体で相応の曲げ性能を有する芯材を選定し、それを補助する目

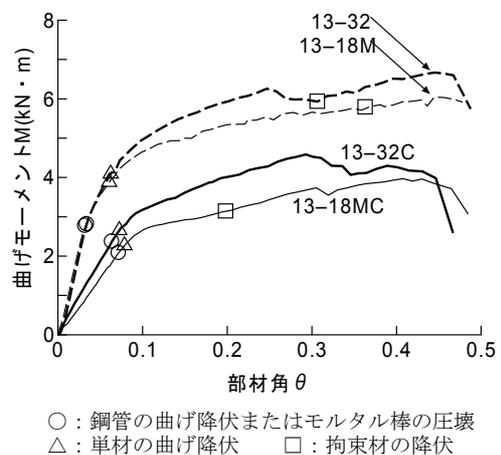


図-10 $M-\theta$ 曲線 (芯材の種類による影響)

的で本構造を利用するのがよいことがわかる。なお、試験体 13-32C の拘束材の歪は小さく、いずれも降伏に達していない。単材の摩擦や拘束材を見直すことで、単材を滑動しにくく拘束材に生じる歪が大きくなるように諸元を変更できれば、部材性能を向上できる可能性がある。

3.4 単材の滑動による影響

単材が滑動しないよう溶接によって強制的に固定した試験体 13-04W について、他の試験体の代表例（試験体 13-08 と 13-32）と $M-\theta$ 曲線を比較して図-11に示す。本図では、初期剛性および材料の降伏時点に着目し、部材角 0.2 までの範囲を描画している。また、単材の圧縮降伏時点を▽で示した。

図-11によると、試験体 13-04W では単材が滑動しないために単材の引張歪が緩和されず、他の試験体に比べて単材の降伏時点が芯材の降伏時点に近づいている。単材の圧縮降伏に着目すると、他の試験体の場合は引張降伏とほぼ同時に降伏に達しているのに対し、単材を固定した試験体 13-04W は引張降伏時点からかなり遅れて降伏に達している。これは、芯材（鋼管）内部のモルタルが引張側で抵抗力として寄与していないことが理由と考えられる。試験体 13-04W では単材が圧縮降伏に達した時点で部材最大耐力となっており、特定の材料の降伏によって部材耐力が頭打ちとなっている。図-9等で前述したように、集成材試験体では単材や芯材が降伏した後も引き続き耐力が向上している。本構造は、小部材の集合体として部材を構成し、特定の材料の挙動に部材全体が支配されにくい構造となっている。

3.5 破壊性状

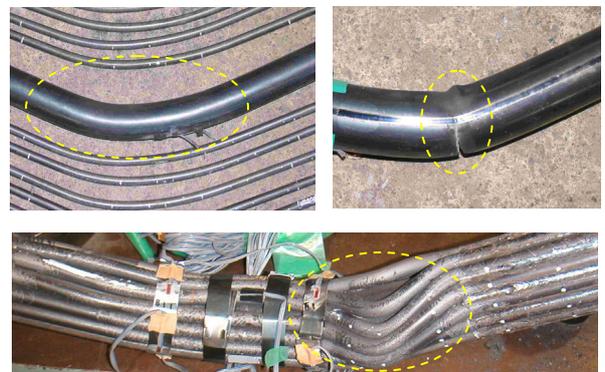
載荷試験後に拘束材を切断し解体した試験体（13-08）の状況を図-12に示す。載荷試験での各試験体の最大変位は、試験体 13-08 は 192mm、試験体 13-04W は 197mm、芯材は 170mm である（せん断スパンはいずれも 400mm）。

芯材単独の破壊状況は、引張側に幅 2~3mm 程度に達する亀裂が生じ、圧縮側も顕著な膨みだしを伴う局部座

屈が生じている。また、単材の端部を溶接し固定した試験体 13-04W は、単材が大規模に座屈し破壊している。一方、試験体 13-08 の場合は、滑動し歪が緩和されたと推測される単材のみならず、芯材にも座屈や亀裂は見られず、滑らかな曲線を描いて変形している。他の試験体（芯材をモルタル詰め単管としたもの）についても、単材と拘束材の量の少ない試験体 09-06 で触覚でのみ確認される微小な膨みだしが確認された以外に、損傷は確認できなかった。本構造とすることにより、構成材料の著しい損傷を抑えることが可能となると考えられる。

3.6 拘束材の歪

拘束材の歪の遷移状況として試験体 12-18M の例を図-13に示す。ここで拘束材の歪は、各断面の拘束材全周に 90 度刻みで周方向に配置した 4 測点（両スパン 2 断面分）における平均値である。拘束材の歪は、3 つの断面とも芯材や単材が降伏し部材の剛性が低下し始める $M=4.0\text{kNm}$ 付近より進展を開始している。他の試験体については、部材角が 0.2~0.4 程度に進展した時点で拘束材が降伏に達している（図-9 参照）。概ねすべての試験体において、載荷点近傍の断面 1 の歪の進展が断面 2、3 よりもやや大きい傾向があった。特に芯材にモルタル棒



上左：本構造の試験体（13-08） 上右：芯材単独
下：単材端部溶接試験体（13-04W）

図-12 載荷試験後の試験体の外観

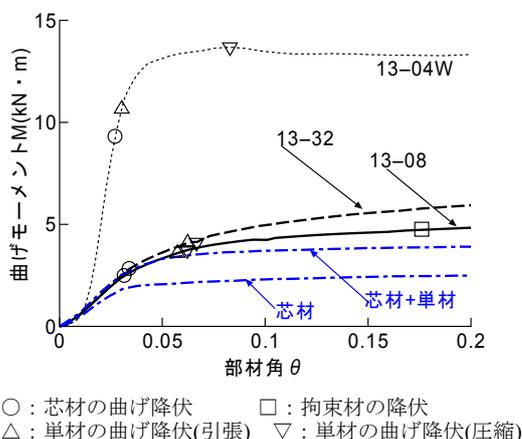


図-111 M- θ 曲線（単材の滑動による影響）

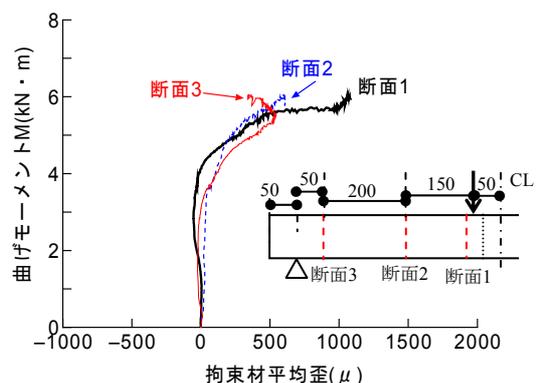


図-113 拘束材の歪（試験体12-18M）

を用いた試験体 13-18 MC と 13-32C では、荷重点近くの拘束材が破断した。ただし、同一試験体における測定箇所毎のばらつきや、試験体毎のばらつきも大きく、一箇所も降伏しない試験体も確認された。

4. M-θ関係の評価方法

拘束材は荷重点近傍に多く配置した場合に効果が大きく(図-9)、これは荷重点近傍に配置した拘束材の歪が大きい(図-13)ことでも裏付けられる。これより、部材の変形(曲率)の大きい箇所で拘束材の効果が発揮されるとし、M-θ関係の評価方法を検討する。

RC 集成構造では、単材は曲率の大きい箇所で滑動の方向が変化させられることで抵抗力を受けると考える(図-14参照)。曲率の大きい断面に拘束材が配置されるとき、この効果は大きくなる。拘束材は反作用として引張力を受け、円環の径が拡大するため、荷重が進展すなわち部材角が大きくなるに従って拘束効果が低減する。以上の仮定に基づき、評価式を式(1)の通りに表す。

$$M_{S,\theta} = M_{core,\theta} + \sum M_{per,\theta} + K_{per} \cdot \theta \cdot (1-\theta) \quad (1)$$

ここに、 $M_{s,\theta}$: 部材の曲げモーメント、 $M_{core,\theta}$: 芯材の曲げモーメント、 $\sum M_{per,\theta}$: 単材の曲げモーメントの総和で、いずれも部材角 θ における値、 K_{per} : 単材の M-θ 関係における初期の曲げ剛性である。

式(1)の第1項+第2項は、図-9における芯材+単材の M-θ 関係に相当する。第3項は拘束材の効果を表し、部材角と単材の初期曲げ剛性ととの積により求められるモーメント ($K_{per} \cdot \theta$) に対して、部材角に比例して効果を低減する ($(1-\theta)$ を乗ずる)。以上の仮定で算出した解析値を、試験体 13-32 の実験値と比較して図-15に示す。なお、式(1)の第1項+第2項および K_{per} は実験値を使用している。解析値は実験値を概略捉えている。耐力(最大モーメント)については、解析値のグラフを参照すると、式(1)の第1項・第2項が最大となる $\theta=0.4$ で決定されてい

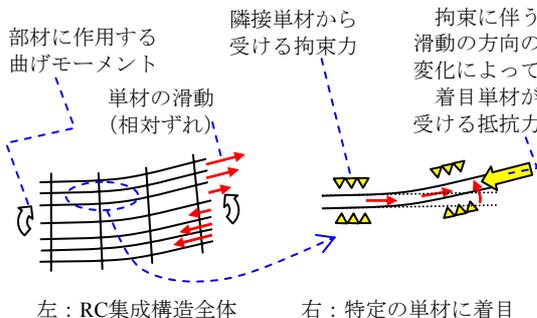


図-14 単材が受ける力

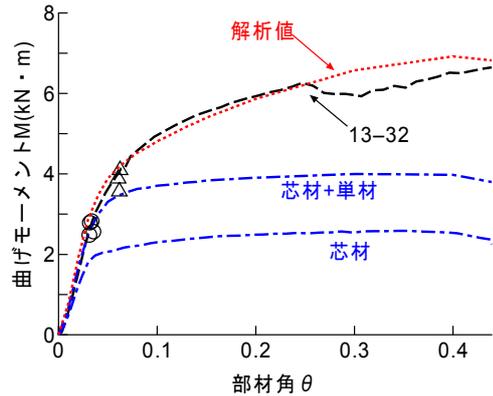


図-15 M-θ 関係の解析値と実験値の比較

るが、第1項・第2項の最大値を全塑性モーメントで算出し、第3項の最大値 ($\theta=0.5$) を代入することで、耐力の算定が可能となる。一方、式(1)には拘束材の場所や量に関するパラメータを含んでおらず、試験体 13-32 以外の試験体の M-θ 関係について表現できないので、今後評価方法の深度化を図る必要がある。

5. 結論

本論では、地震時に繰り返し曲げ・せん断力を受けるコンクリート部材について、鋼材やコンクリートを集成して1部材を形成するRC集成材を実現することを目標とし、その曲げ耐荷性状を把握するための基礎的な試験を実施した。その結果以下を確認することができた。

- (1) 本構造は、芯材と単材の単純な足し合わせ以上の耐力を有し、かつ拘束材および単材の量を増すことで部材の M-θ 関係が向上する。
- (2) 今回の試験体では、単材は芯材と一体化することなく滑動した。歪は軸方向に分散されたと推測される。
- (3) 芯材が降伏した後に M-θ 曲線の勾配は急激には低下せず、その後も緩やかな勾配で耐力が増加する。
- (4) 曲げモーメントの大きい断面に拘束材を多く配置した場合に耐力増加の効果が大きい。
- (5) 芯材にモルタル棒を用いた場合、芯材の外縁が圧壊歪に達した後も耐力および変形が増大する。集成構造の効果は芯材の種類に関わらず同様に発揮される。
- (6) 破壊後の試験体の外観を観察した結果、単材・芯材を一体化した場合や芯材単体の破壊状況と比べ、単材および芯材の損傷は小さい。

参考文献

- 1) 澤田純男, 高橋良和, 西郡一雅: 摩擦減衰機構を持つ弾性耐震柱の実験的研究, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, 1-351, 2007.9