

論文 高靱性型セメント系複合材料を用いた応答制御要素の復元力特性に関する基礎研究

諏訪田 晴彦*1・福山 洋*2

要旨：本研究では，回転変形に伴う浮き上がり変形が拘束される方立て壁タイプのセメント系応答制御要素を対象として，比較的高い入力せん断応力レベルにおける構造性能を確認することを目的とした実験を行った。実験の結果，高靱性型セメント系複合材料を使用することにより比較的大きな変形まで安定した復元力特性が得られることが確認され，復元力モデルに関しては鉄筋コンクリート部材に対する既往の評価式が適用できる可能性を示した。

キーワード：高靱性型セメント系複合材料，応答制御要素，復元力特性

1. はじめに

著者らは，高靱性型セメント系複合材料（以下，HPFRCC：High Performance Fiber Reinforced Cement Composite）を応答制御要素として利用するために，構造性能に関する基礎的データの収集ならびに分析を継続的に行っている^{1)・2)}。想定している応答制御要素は，柱に対しせん断スパン比の小さい方立て壁あるいは間柱的なもので，地震時の水平力に対し，層全体の変形が小さい段階より効果を発揮するように意図している。しかしこのような要素は，せん断変形成分に比べ回転変形成分が卓越し，最も厳しい条件として鉄筋コンクリート造ピロティ架構のように梁が剛とみなされる架構への適用を想定した場合，回転変形を架構がほぼ完全に拘束するため，要素に変動軸力が作用することになる。著者らは昨年度，この影響を考慮した要素実験

を行い，HPFRCCを用いることにより，小さなせん断スパン比で変動軸力が作用する条件下においてもひびわれの拡幅等の損傷を抑制し，大変形まで安定した履歴特性が得られることを確認した²⁾。本年度は，さらに入力せん断応力レベルを上げた実験を行い，構造性能を確認するとともに，復元力特性のモデル化に関する基礎的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元を表－1に，配筋図を図－1にそれぞれ示す。実験因子は主筋の配筋方法およびセメント系材料の種類である。配筋方法は2タイプとし，タイプ1は主筋全てを平行配筋としたもので，タイプ2は主筋の中段筋をX型配筋としたものである。なお，主筋にはねじ節鉄筋

表－1 試験体諸元

試験体名	セメント系材料	断面	高さ	主筋の配筋タイプ	主筋	せん断補強筋	
RC-P	コンクリート	150×200 (mm)	400 (mm)	全て平行配筋	6-D13(ネジ節) SD295	□-D6@50 SD295	
PVA-P	PVA-HPFRCC						
PE-P	PE-HPFRCC						
PS-P	PS-HPFRCC						
RC-X	コンクリート			中段筋のみX型配筋	6-D13(ネジ節) SD295		
PVA-X	PVA-HPFRCC						
PE-X	PE-HPFRCC						
PS-X	PS-HPFRCC						

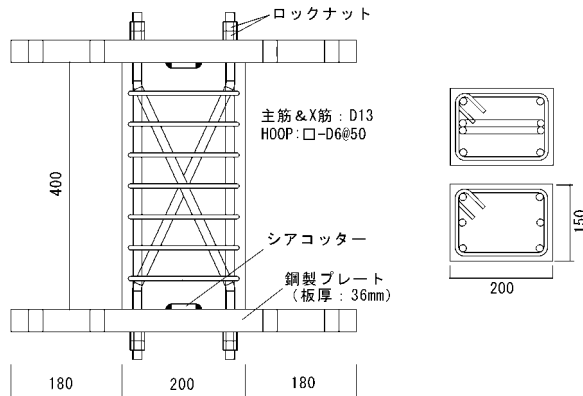
*1 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室研究官（正会員）

*2 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ上席研究員 工博（正会員）

表－2 セメント系材料の諸元

HPFRCCの名称	使用繊維	繊維長 mm	繊維径 μmm	破断強度 N/mm ²	繊維混入率 vol. %	セメント種類	細骨材	粗骨材	呼び強度 N/mm ²
コンクリート	—	—	—	—	—	早強ポルトランドセメント	陸砂、砕砂	豆砂利	45
PVA-HPFRCC	ビニロン繊維	12	38	1600	1.7		珪砂	—	
PE-HPFRCC	ポリエチレン繊維	15	12	2600	1.0				
PS-HPFRCC	ポリエチレン繊維	15	12	2600	1.0				
	スチールコード ^{*1}	32	405	2700	1.0				

*1：鋼製の単線を5本撚り合わせたもの



図－1 試験体配筋図

を用い、シアコッターを溶接したプレートにロックナットにより直接接合した。シアコッターは、幅 40mm、長さ 150mm、厚さ 9mm の鋼板である。使用したセメント系材料はコンクリート、PVA-HPFRCC、PE-HPFRCC および PS-HPFRCC の 4 種類である。セメント系材料の諸元を表－2 に、鉄筋およびセメント系材料の材料特性一覧を表－3 および表－4 に、セメント系材料の応力－ひずみ関係を図－2 にそれぞれ示す。なお、HPFRCC の引張試験は、文献 3) の方法（φ100mm 円柱供試体の両端固定型直接引張試験）で行った。

2.2 実験方法

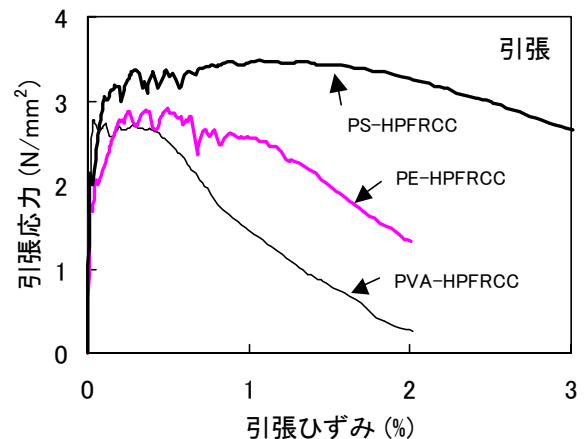
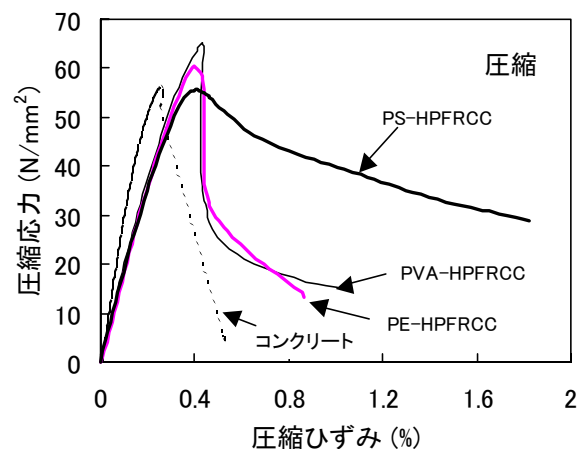
加力には建研式加力装置を用いた。水平力は逆対称モーメント加力方式による正負交番繰り返し载荷とし、変位制御により加力した。また、初期軸力は導入せず（加力梁の重量はカウンターウエイトによりキャンセルした）、水平変形に伴う試験体の回転に起因する浮き上がり変形を拘束するように軸力ジャッキを制御した。なお、浮き上がり変形は、試験体上部の加力梁中央部に取り付けた変位計により測定した。

表－3 鉄筋の材料特性

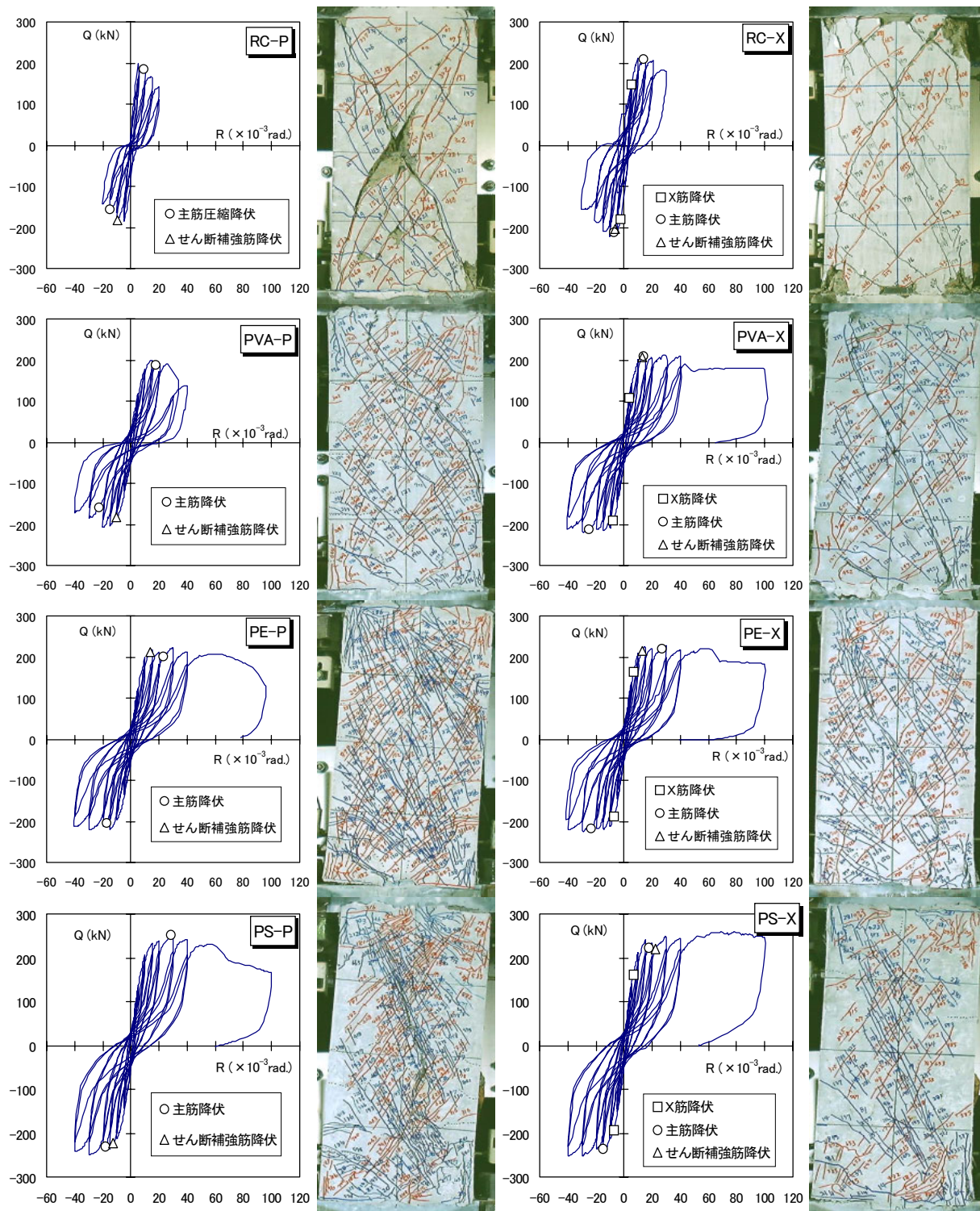
種類	ヤング係数 N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	降伏時ひずみ %
D13	1.85×10^5	361	0.195
D6	1.77×10^5	444	0.251

表－4 セメント系材料の材料特性

セメント系材料	ヤング係数 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	強度時ひずみ %
コンクリート	3.10×10^4	55.8	0.267
PVA-HPFRCC	1.96×10^4	63.7	0.419
PE-HPFRCC	1.91×10^4	59.9	0.394
PS-HPFRCC	1.87×10^4	56.9	0.410



図－2 セメント系材料の応力－ひずみ関係



図－３ セン断力(Q)－部材角(R)関係および最終破壊状況

実験結果および考察

3.1 破壊性状および履歴性状

各試験体のせん断力－部材角関係（以下、 Q － R 関係）と最終破壊状況を図－３に示す。各試験体の破壊経過は、RC-P でせん断破壊した以外、全ての試験体で曲げ降伏が確認され、その後 RC-X, PVA-P, PE-P および PS-P ではせん断

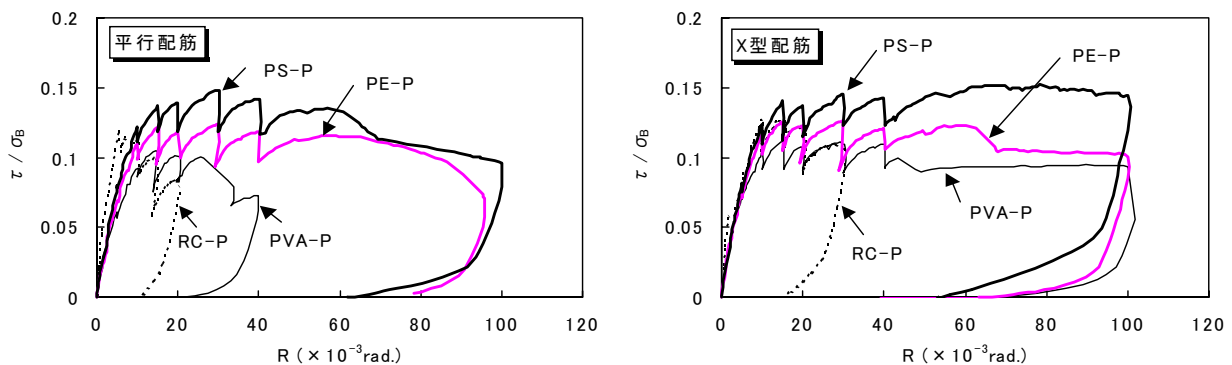
破壊により強度が低下した。PVA-X および PE-X では最終サイクルで変形角 $1/25(\text{rad.})$ を過ぎてから一度強度が低下したが、その後は一定の強度を維持したまま最終目標変形角 $1/10(\text{rad.})$ まで到達した。PS-X は最終目標変形角 $1/10(\text{rad.})$ まで顕著な強度低下は見られなかった。なお、HPFRCC を用いた試験体のうち PS-X 以外の試

表－5 最大強度一覧

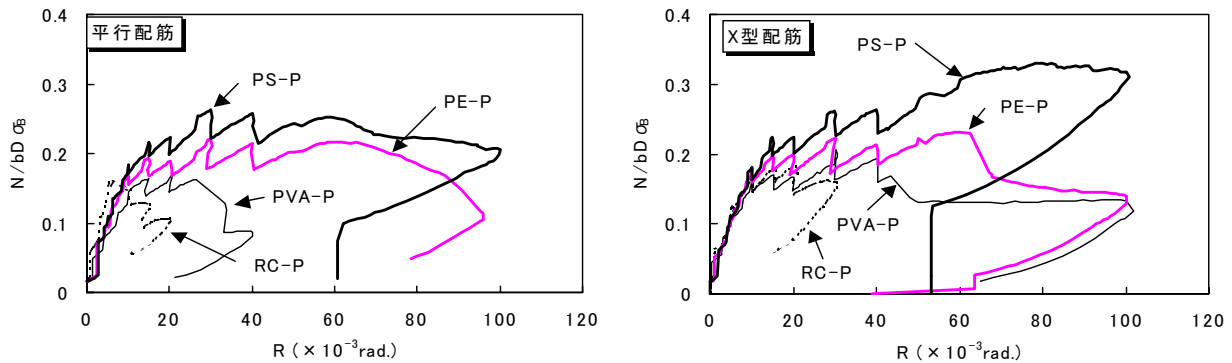
試験体名	最大強度					終局強度計算値	
	せん断力 (kN)	せん断応力 (N/mm ²)	部材角 ($\times 10^{-3}$ rad.)	軸力 (kN)	軸力比	曲げ ^{*1} (kN)	せん断 ^{*2} (kN)
RC-P	198	6.59	5.2	265	0.16	221	209
PVA-P	200	6.66	14.6	312	0.16	240	228
PE-P	222	7.40	29.6	395	0.22	264	227
PS-P	253	8.43	29.5	446	0.26	275	224
RC-X	212	7.05	13.8	290	0.17	230	237
PVA-X	213	7.12	14.8	322	0.17	244	270
PE-X	227	7.56	29.9	400	0.22	266	267
PS-X	259	8.64	69.2	548	0.32	296	272

*1: 文献4における曲げ終局強度略算式により計算(軸力は実験で得られた最大値を使用)

*2: 文献5におけるせん断終局強度式により計算, ただしHPFRCCの効果は考慮していない



図－4 せん断応力レベル(τ/σ_B)－部材角(R)関係包絡線



図－5 軸力比($N/bD\sigma_B$)－部材角(R)関係包絡線

験体では, 曲げ降伏に先行しせん断補強筋が降伏している。また, HPFRCC を用いた試験体では, 何れも微細なひびわれが分散発生している。各試験体の履歴性状の比較では, 配筋方法の違いおよびセメント系材料の違いによる効果は, 主に変形能の違いに現れており, 特にセメント系材料の違いによる効果は顕著である。一方, 両因子とも履歴ループ形状への効果はあまり認められないが, これはロックナットにより主筋を鋼板に定着する試験体ディテールとも密接に

関連していると考えられる。

3.2 最大強度

実験より得られた最大強度および終局強度計算値一覧を表－5に示す。先に述べたようにRC-P以外の試験体では, 主筋の降伏が確認されており, 曲げ降伏により最大強度が決定していると考えられる。実験より得られた最大せん断力を曲げ終局強度計算値⁴⁾(3.4節に示す式5))と比較すると全ての試験体において計算値が実験値を上回っており, 危険側の評価となる。こ

れについては文献 7)で、略算式は部材せい D が 500mm 以下の場合には曲げ終局強度を過大評価することが指摘されており、曲げ終局強度の評価には今後検討の余地がある。また、終局強度計算値に用いる変形拘束による付加軸力についても現時点では評価手法が確立されておらず、今後検討が必要である。

3.3 せん断応力レベルおよび変形拘束による付加軸力

せん断応力(τ)を各セメント系材料の圧縮強度(σ_B)で除したせん断応力レベルと部材角関係の包絡線を図-4に、変形拘束による付加軸力(N)を $bD\sigma_B$ で除した軸力比と部材角関係の包絡線を図-5にそれぞれ示す。図-4より本実験のせん断応力レベルは 0.1~0.15 の範囲にあり、従来の RC に対し、HPFRCC を用いることにより変形能を大幅に向上させることができることがわかる。図-5より高いレベルのせん断応力を負担させ、大変形まで安定した復元力が得られている場合、これに伴い軸力のレベルも高くなることがわかるが、これは実際に架構に組み込んだ場合には、周辺フレームに作用する力でもあり、適切に評価することが重要であると考えられる。

3.4 復元力特性のモデル化に関する検討

復元力特性(骨格曲線)のモデル化に関する検討の一例を図-6に示す。ここでの検討の主な目的は、RC 部材を対象として提案されている既往のモデルにより、本研究で対象としている応答制御要素の復元力特性をどの程度評価可能であるかを見極めることである。初期剛性は、以下に示す弾性剛性式により計算した。

$$k_e = \left(\frac{h_0^3}{12EI} + \frac{\kappa h_0}{GA} \right)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 h_0 : 部材長、 E : セメント系材料のヤング係数、 I : 断面 2 次モーメント、 κ : 形状係数、 G : セメント系材料のせん断弾性係数、 A : 断面積である。曲げひびわれ強度は、菅野の提案による下式⁸⁾により計算した。

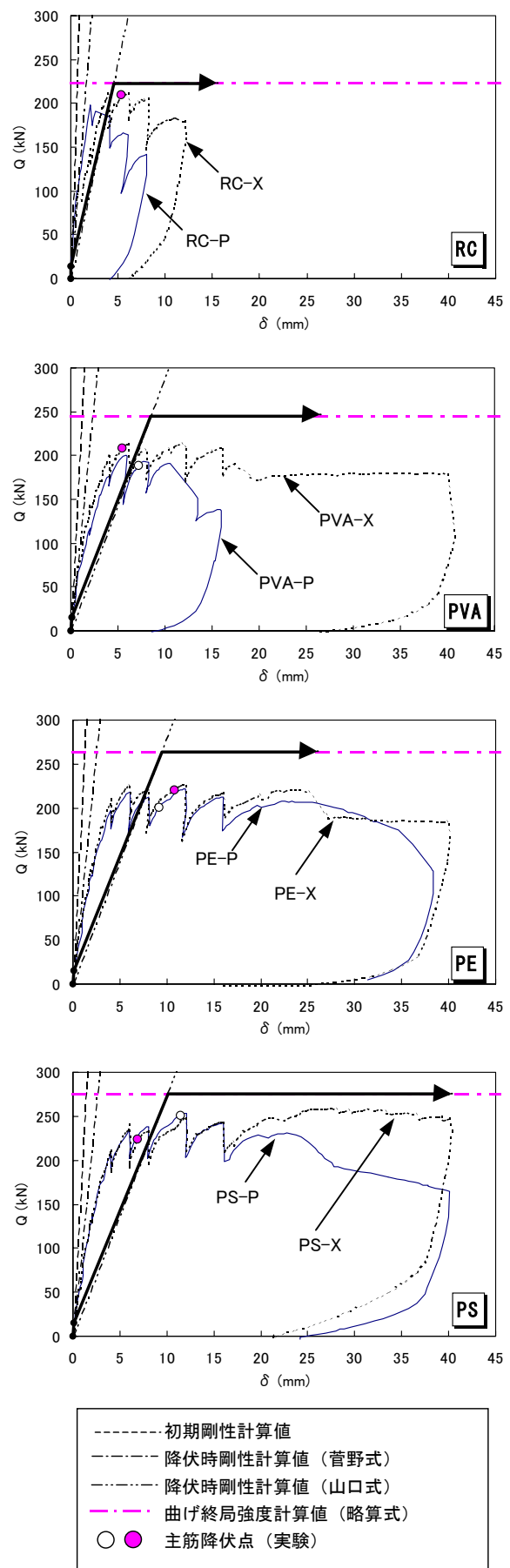


図-6 骨格曲線のモデル化の検討

$$M_{BC} = 0.56\sqrt{F_c}Z_e + \frac{ND}{6} \quad (2)$$

ここで、 F_c :セメント系材料の圧縮強度(N/mm²)、 Z_e :鉄筋を考慮した断面係数、 N :軸力、 D :部材せいである。降伏時の剛性低下率に関しては、(3)式に示す長柱($M/QD \geq 2.0$)に関する菅野の提案式⁸⁾と(4)式に示す短柱($M/QD \leq 2.0$)に関する山口らの提案式⁹⁾により計算した。

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.64np_t + 0.043\frac{a}{D} + 0.33\eta_0 \right) \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 n :ヤング係数比、 p_t :引張鉄筋比、 a/D :シアスパン比、 η_0 :軸力比、 d :有効せい、 D :部材せいである。

$$\alpha_y = \left(B_0 + B_1\frac{a}{D} + B_2np_t + B_3\eta_0 \right) \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (4)$$

なお、ここで $B_0 \sim B_3$ の係数に関しては文献 9) を参照されたい。図中で実験値と比較した骨格曲線のモデルは、(4)式に基づくものであり、(3)式によるものは降伏時剛性のみを示している。降伏強度については、(5)式に示す曲げ略算式によったが、軸力には平行配筋試験体の実験結果(最大値)を用いた。

$$M_y = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDF_c} \right) \quad (5)$$

ここで、 a_t :引張鉄筋断面積、 σ_y :鉄筋の降伏強度、 D :部材せい、 N :軸力である。本実験で取り扱った試験体は、一般的な RC 試験体のように加力スタブを用いず、鋼製プレートにネジ鉄筋により接合されているため、境界部で縁が切れている。したがって、初期状態より危険断面にひびわれを生じているものと見なすことができ、こうした条件からも既往のモデルによる評価は必ずしも適当ではないと思われるが、(4)式による降伏時の剛性低下率は、実験値と概ね一致しており、適用の可能性を示唆している。また、降伏強度については、先にも述べたように変形拘束による付加軸力の評価と併せ今後の検討が必要である。

4. まとめ

高靱性型セメント系複合材料を用いたセメント系応答制御要素の構造性能を実験的に確認するとともに、復元力特性のモデル化に関する基礎的検討を行った結果、以下のような知見を得た。

- (1) 配筋方法の違いおよびセメント系材料の違いによる効果は、主に変形能の違いに現れており、特にセメント系材料の違いによる効果は顕著である。
- (2) 曲げ終局強度の評価に関しては、変形拘束による付加軸力の評価と併せ、今後検討が必要である。
- (3) 復元力特性のモデル化に既往の提案式を用いた場合、降伏時の剛性低下率に関し、山口らの提案した(4)式による計算値は、実験値と概ね一致し、評価法としての適用可能性を示唆した。

謝辞

鉄筋をご提供いただいた東京鐵鋼株式会社ならびに繊維をご提供いただいた(株)クラレ、東洋紡(株)、東京製鋼株式会社に深く感謝の意を表します。また、材料実験を行うにあたりご協力を頂いた独立行政法人建築研究所交流研究員岩渕一徳氏((株)熊谷組)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 諏訪田晴彦、福山 洋、磯 雅人：構造物の高性能化に向けた高靱性繊維補強セメント系複合材料の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.3, pp.133-138, 2001
- 2) 諏訪田晴彦、福山 洋、梁 一承：セメント系部材の履歴特性コントロールに関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24, No.2, pp.1597-1602, 2002
- 3) 佐藤幸博、福山 洋、諏訪田晴彦：高靱性型セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰返し試験方法の提案、日本建築学会構造系論文集、No.539, pp.7~12, 2001.1
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課、日本建築主事会議、財団法人日本建築センター編集：2001年版建築物の構造関係技術基準解説書、工学図書株式会社、平成13年3月
- 6) 社団法人日本建築士事務所協会連合会編集：鉄筋コンクリート部材設計における新しい考え方「X型配筋部材の設計と施工」
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料
- 8) 菅野俊介：鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する実験、コンクリートジャーナル、Vol.11, No.2, 1973.2
- 9) 山口育雄、東端泰夫：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究(その48)初ひびわれ時および降伏時の剛性、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp.1507~1508, 昭和52年10月