

APAT工法で耐震補強した柱の断面寸法が 変形性能に与える影響

Deformation Affects the Performance of the Section Size of the Retrofitted Column

中村敏晴* 三澤孝史* 川口昌平* 石井敏之*

要 旨

鉄道鉄筋コンクリートラーメン高架橋柱の耐震補強工法として APAT 工法を開発し、実用化してきた。この APAT 工法で耐震補強した柱の変形性能を算定する手法は、縮小試験体の交番載荷試験結果を使用して提案した。しかし、曲げ破壊が生じる柱には寸法効果があり、柱の変形性能は試験体が大きくなると低下するとの指摘がある。そこで、APAT 工法で補強した柱の実大試験体を作成して交番載荷試験を行い、断面寸法が変形性能に与える影響について検討した。

キーワード：鉄筋コンクリートラーメン高架橋、交番載荷試験、耐震補強、変形性能、寸法効果

1. まえがき

著者らは、これまで既設の鉄道鉄筋コンクリート（以下「RC」と記す）ラーメン高架橋柱の耐震補強工法として、「APAT 工法」（Aseismic reinforcements by Precastblocks and Additional Tendons、以下「APAT 工法」と記す）¹⁾を開発してきた。これは、矩形断面の柱の側面に、ポリマーセメントモルタルを介し、楕形のプレキャストコンクリートブロック（以下「セグメント」と記す）を張り付け、その外周にスパイラル状に加工した亜鉛めっき鋼より線（以下「鋼より線」と記す）を巻立て補強する工法である。（図-1 参照）

APAT 工法の利点としては、

- i. 柱の損傷状況を柱四隅のセグメントの無い部分から直接目視確認でき、セグメント表面に生じるひび割れを介しても柱の損傷状況を推定できる¹⁾²⁾ことから、復旧時の臨時点検を迅速かつ容易に行える
- ii. 鋼板巻立て工法と同等以上の変形性能を有し、人力で容易に施工できる
- iii. セグメントと鋼より線が柱コンクリートを効果的に拘束することにより、せん断耐力の向上と優れた変形性能を発揮する

などが挙げられる。

APAT 工法の変形性能評価式として、耐震設計標準³⁾を準用して鋼より線とセグメントの拘束効果を見込んだ式を 5/8 の縮小試験体の交番載荷試験に基づき提案している¹⁾。曲げ破壊する柱の寸法効果に関する研究は少ないが、奥らの研究⁴⁾によれば、曲げ破壊する T 形梁に対

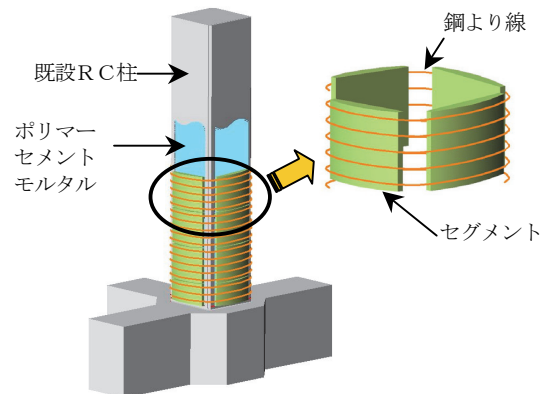


図-1 APAT 工法概念図

する寸法の影響は、耐力に関しては見られないが、変形性能は試験体が大きくなると劣るとの結果が示されている。また、星隈らの研究⁵⁾によれば、曲げ破壊する柱の荷重-変位曲線は試験体の大小にかかわらず比較的よく一致したとある。さらに、文献 6) によると、鉄道 RC ラーメン高架橋の柱を鋼板巻立て工法で耐震補強した場合の塑性ヒンジ回転角は 600/柱幅 (mm) に比例するとしている。そこで、APAT 工法で耐震補強した実大試験体の交番載荷試験を行い、断面寸法が変形性能に与える影響について検討した。

2. 試験体の諸元

補強対象とする既設 RC 柱は、昭和 54 年制定の「耐

*技術研究所

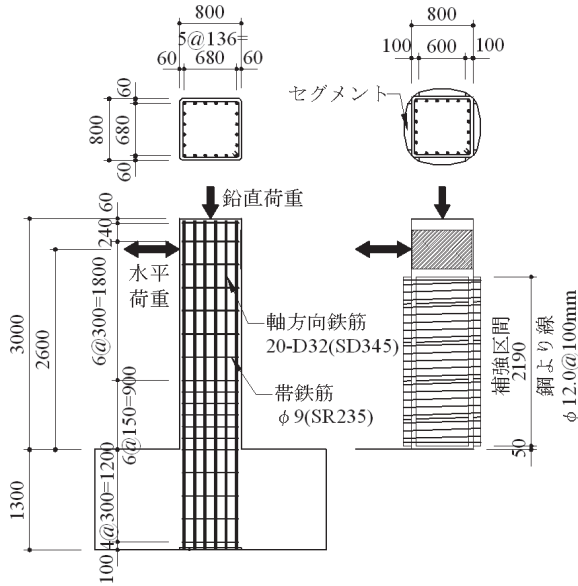


図-2 試験体の配筋と補強詳細図 (単位 mm)

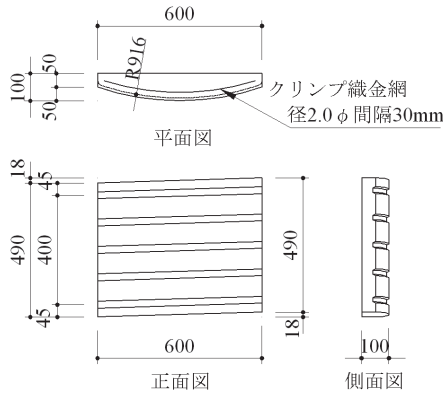


図-3 セグメント標準図 (mm)

震設計指針 (案) 解説⁷⁾ 以前の基準に基づいて設計された RC ラーメン高架橋柱 (断面寸法 80×80cm) とした。この試験体は、せん断補強がなされない場合、設計に用いる材料強度で安全係数を考慮し、コンクリート設計標準⁸⁾ に準拠して算定したせん断耐力比が 0.4 となり、せん断破壊するものである。表-1 に試験体の諸元、図-2 に試験体の配筋と補強詳細図、図-3 にセグメント標準図を示す。

補強は、表-1 に示すように、設計に用いる材料強度で安全係数を考慮し、コンクリート設計標準⁸⁾ に準拠して算定したせん断耐力比が 1.0 となる量の鋼より線 φ12.0mm @100mm でセグメントを巻き立てるものである。

3. 載荷方法

載荷は、写真-1 に示す載荷装置を用い、試験体頭部に一定の軸力 (上部工の死荷重と活荷重に相当する圧縮応力度 3.7N/mm²) を加えた状態で正負交番の水平力を加えるものである。

荷重ステップは、軸方向鉄筋が降伏する時点 (1δ_y)

表-1 試験体の諸元

補強方法		APAT 工法で補強
柱形状		断面寸法 80×80cm 有効高さ d=74cm せん断スパン a=260cm せん断スパン比 a/d=3.51
鉄筋	軸方向鉄筋	D32 (SD345) 20 本 引張鉄筋比 0.8%
	帯鉄筋	φ9 (SR235) @150mm 帯鉄筋比 0.106%
コンクリート	柱	目標強度 24 N/mm ² 粗骨材の最大寸法 20mm
	ベース	目標強度 30 N/mm ² 粗骨材の最大寸法 20mm
補強部材	鋼より線	亜鉛めっき鋼より線 2号(a)1種A級 φ12.0mm @100mm 補強筋比 0.22%
	セグメント	幅 60cm、標準高さ 50cm 中心部厚さ 10cm 設計基準強度 40 N/mm ² 最大粗骨材寸法 20mm
柱下端無補強区間		50mm
軸方向圧縮応力度		3.7 N/mm ²

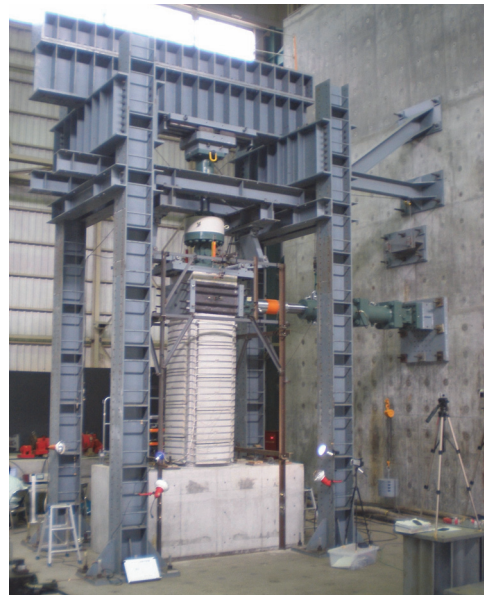


写真-1 載荷装置

までは荷重制御で載荷、以降の載荷は変位制御とし、降伏変位の偶数倍の変位を各 3 サイクルずつ載荷した。以下、水平ジャッキを押し出す方向の水平荷重・水平変位を「+」で、水平ジャッキを引き戻す方向の水平荷重・水平変位を「-」として記す。また、「荷重」および「変位」は水平荷重載荷点の水平荷重、水平変位を意味するものとする。

4. 交番載荷試験結果

4.1 荷重と変位の関係

交番載荷試験結果一覧表を表-2、荷重-変位曲線を図-4 に示す。なお、荷重は軸力による偏心曲げモーメ

表-2 試験結果一覧表

	荷重 (kN)	変位 (mm)
降伏時	930	20.5
最大荷重時	1130	117.7
終局時	930	178.0

荷重が正の値で算定
 降伏時：軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時点
 最大荷重時：繰返し荷重により耐力低下が顕著にならない最大の変位時⁹⁾
 終局時：荷重-変位曲線の包絡線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位時

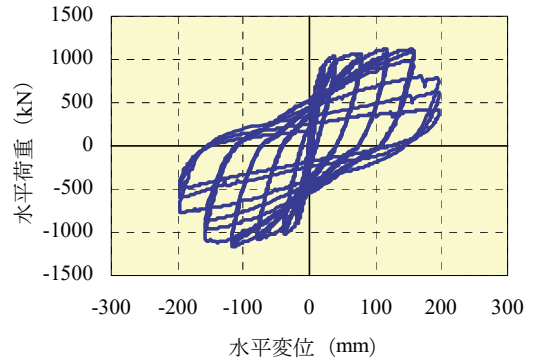
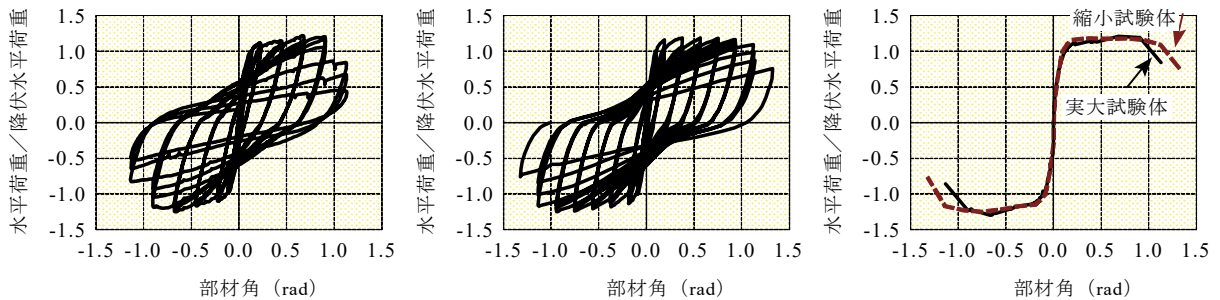


図-4 荷重-変位曲線

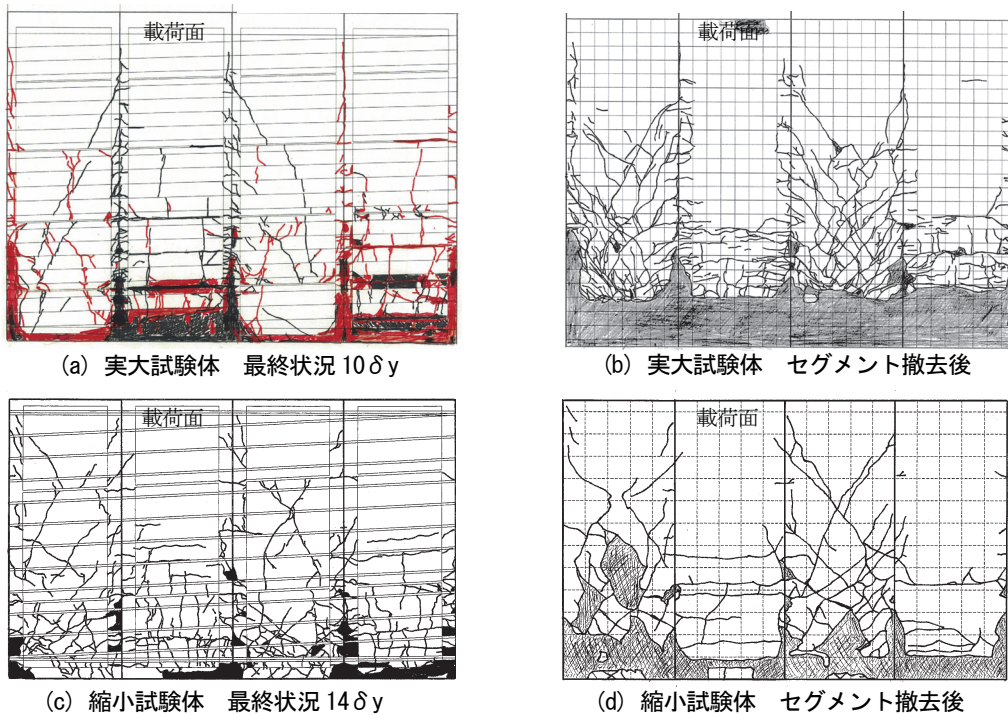


(a) 実大試験体

(b) 縮小試験体

(c) 実大試験体と縮小試験体の比較 (包絡線)

図-5 荷重-変位曲線の比較



(a) 実大試験体 最終状況 10δ_y

(b) 実大試験体 セグメント撤去後

(c) 縮小試験体 最終状況 14δ_y

(d) 縮小試験体 セグメント撤去後

図-6 損傷状況の比較

ントの影響を荷重に換算し補正した。試験体は、最大荷重時変位 117.7mm、終局変位 178.0mm の変形性能を示し、その荷重-変位性状は、降伏後水平荷重がほぼ一定のまま変形が増大し、履歴形状は吸収エネルギーの大きい安定した形を示した。繰返し荷重により耐力低下が顕著にならない最大の変位時⁹⁾で定義される最大荷重時⁹⁾の 6δ_y以降は、柱下端から 0.5D (400mm、D: 柱断面高

さ) 区間の軸方向鉄筋の座屈、かぶりコンクリートのはらみ出しに伴う最下段のセグメントのはらみ出しがあり、柱下端から約 0.5D (400mm) 区間のコンクリートが剥落して曲げ破壊した。10δ_yでは耐力の低下が顕著になり、7本の軸方向鉄筋が破断した。

4.2 5/8 縮小試験体との比較

APAT 工法の変形性能算定式を検討した文献 1) に示

される 5/8 縮小試験体は、本報告の実大試験体を縮小した試験体ではない。したがって、引張鉄筋比等が異なるため縮小試験体と実大試験体を比較すべきではないが、相違点があることを認識した上で、文献 1) に示される断面寸法 500×500mm の縮小試験体 AP-3 と比較した。

図一 5 に、実大試験体と縮小試験体の荷重－変位曲線の比較を示す。両試験体は大きさが異なるので、荷重は降伏荷重で正規化し、変位は部材角で示した。両試験体の履歴性状には大きな違いは認められなかった。変形性能は、縮小試験体に比べ実大試験体の方が僅かではあるが低下した。

図一 6 に、実大試験体と縮小試験体の損傷状況の比較を示す。両試験体のせん断ひび割れ状況や曲げひび割れ状況には大きな違いは認められなかった。しかし、縮小試験体の軸方向鉄筋は破断しなかったが、実大試験体の軸方向鉄筋は破断した。軸方向鉄筋の破断伸びは、実大試験体が 20.6%、縮小試験体が 19.5% とほぼ同等の値であった。実大試験体の方が縮小試験体に比べ交番載荷試験終了後に測定した座屈変位/座屈長の値が大きいために軸方向鉄筋の破断が生じたとも考えられるが、縮小試験体の座屈変位/座屈長の値は測定しなかったため断定はできない。ちなみに、実大試験体の座屈変位/座屈長の値は 0.16～0.2 であり、縮小試験体 AP-3 より薄型のセグメントを用いた別の 5/8 縮小試験体の座屈変位/座屈長の値は、0.05～0.06 であった。

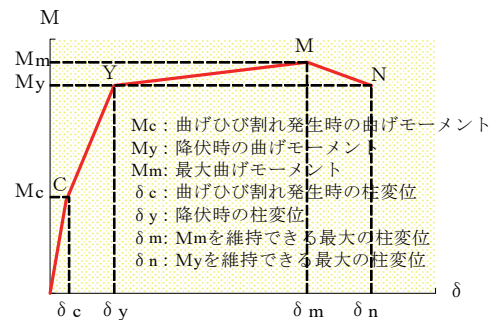
また、セグメントに表れるひび割れは、せん断ひび割れ、曲げひび割れ、ともに実大試験体より縮小試験体の方が多いが、これは、セグメントの厚さが一因と考えることができる。

5. 変形性能

前章に示したように、実大試験体は縮小試験体より変形性能が僅かではあるが低下する結果となった。実大試験体と縮小試験体で大きく異なる点は、断面寸法、引張鉄筋比、軸方向圧縮応力度である。

軸方向圧縮応力度に関しては、縮小試験体で同一試験体、同一補強方法で軸方向圧縮応力度のみを 1.0 N/mm² と 7.0N/mm² と異なるものにして交番載荷試験を実施した結果によると、終局変位はそれぞれ 119.9mm、117.2mm とほぼ同一の変形性能が得られた。また、APAT 工法と補強工法が異なるが、同一の試験体で軸方向圧縮応力度を 1.0N/mm² と 4.0N/mm² とした交番載荷試験結果でも、終局変位はそれぞれ 72mm、70mm とほぼ同一の変形性能が得られた¹⁰⁾。これにより、1.0～7.0N/mm² 程度の軸方向圧縮応力度の範囲では軸方向圧縮応力度が変形性能に与える影響は小さいことがわかる。

鉄道 RC ラーメン高架橋柱を対象とした APAT 工法の変形性能評価式として、耐震設計標準³⁾ を準用して鋼よ



図一 7 部材端部の曲げモーメントと柱変位の関係

り線とセグメントの拘束効果を見込んだ式を縮小試験体の載荷試験に基づき提案している¹⁾。APAT 工法の変形性能評価式は、図一 7 に示す、Y 点荷重、M 点荷重、Y 点変位、N 点変位には、耐震設計標準³⁾ を準用し、M 点変位の算定には、帯鉄筋と鋼より線からなる横拘束筋の関数で示される塑性ヒンジの回転角に、セグメントと鋼より線による拘束効果を見込んだ式を用いるものである。

以下に、Y 点、M 点、N 点の評価法について示す。以下の評価法において、セグメントは考慮しないものとする。

Y 点は、軸方向鉄筋が引張降伏するときの曲げモーメント M_y と変位 δ_y で与えられる点である。曲げモーメント M_y は、鉄筋コンクリート断面として、平面保持を仮定してコンクリートと鉄筋の応力ひずみ関係にコンクリート設計標準⁹⁾ に示されるものを用いて算定する。 δ_y は式(1)で算定する³⁾。

$$\delta_y = \delta_{y0} + \delta_{y1} \tag{1}$$

ここに、 δ_{y0} : 軸方向鉄筋降伏時におけるく体変形による変位 (以下「く体曲げ変位」と記す)

δ_{y1} : 軸方向鉄筋降伏時におけるベース内からの軸方向鉄筋の拔出しによる回転変位 (以下「拔出し変位」と記す)

M 点は、コンクリートの最外縁に生じる圧縮ひずみが $\epsilon_c = 0.0035$ となるときの曲げモーメント M_m と変位 δ_m で与えられる点である。曲げモーメント M_m は、鉄筋コンクリート断面として M_y と同様の方法で算定する。 δ_m は、式(2)で算定する¹⁾。

$$\delta_m = \delta_{mb} + \delta_{mp} + \delta_{m1} \tag{2}$$

ここに、 δ_{mb} : M 点におけるく体変形のうち塑性ヒンジ部以外のく体曲げ変位

δ_{mp} : M 点におけるく体変形のうち塑性ヒンジ部の曲げ変形による変位で、セグメントや亜鉛めっき鋼より線による拘束効果を考慮したもの (以下「塑性ヒンジ変位」と記す)

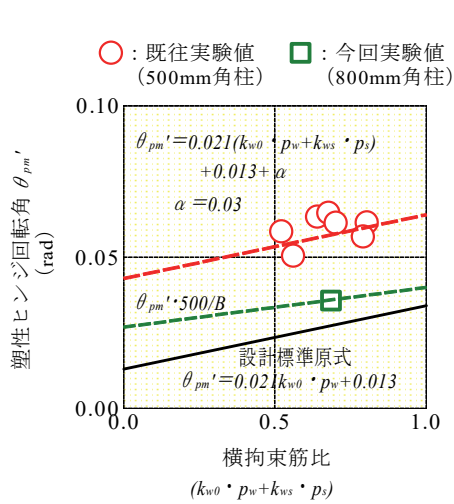


図-8 横拘束筋比と塑性ヒンジ回転角

$$\delta_{mp} = \theta_{pm} \cdot (L_a - L_p / 2) \quad (3)$$

ここに、 L_a : せん断スパン
 L_p : 等価塑性ヒンジ長
 $L_p = 0.5d + 0.05L_a$
 d : 断面の有効高さ
 θ_{pm} : 塑性ヒンジの回転角

$$\theta_{pm} = \frac{\theta_{pm}'}{0.79 \cdot p_t + 0.153} \quad (4)$$

$$\theta_{pm}' = 0.021(k_{w0} \cdot p_w + k_{ws} \cdot p_s) + 0.013 + \alpha \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \theta_{pm}' \leq 0.07 \quad (6)$$

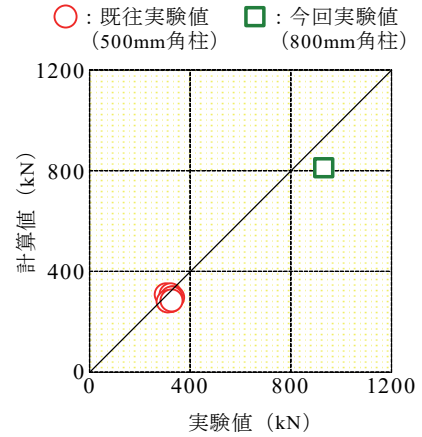
$$0.79 \cdot p_t + 0.153 \geq 0.78 \quad (7)$$

k_{w0} : 帯鉄筋強度を考慮する係数
 $k_{w0} = f_{wy} / 390$
 f_{wy} : 帯鉄筋の引張降伏強度 (N/mm²)
 p_w : 帯鉄筋比 (%)
 p_t : 引張鉄筋比 (%)
 k_{ws} : 鋼より線強度を考慮する係数
 $k_{ws} = f_{sy} / 390$
 f_{sy} : 鋼より線の引張降伏強度 (N/mm²)
 p_s : 鋼より線比 (せん断補強筋比)
 α : セグメントと鋼より線による拘束効果を補正する係数
 δ_{m1} : M 点におけるベース内からの軸方向鉄筋の拔出しによる回転変位

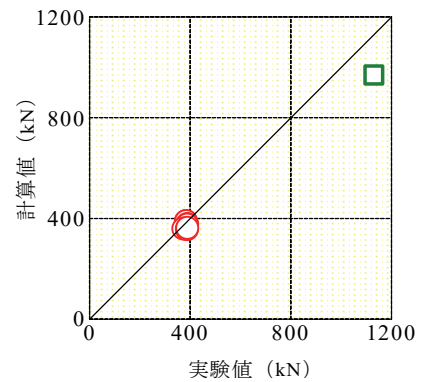
N 点は、降伏荷重を維持できる最大変位と定義される。曲げモーメント M_n は M_y で評価する。 δ_n は、式(8)で算定する。

$$\delta_n = \delta_{nb} + \delta_{np} + \delta_{n1} \quad (8)$$

ここに、 δ_{nb} : N 点におけるく体変形のうち塑性ヒンジ部以外のく体曲げ変位



(a) Y点荷重の比較



(b) M点荷重の比較

図-9 計算値と実験値の比較 (荷重)

δ_{np} : N 点における塑性ヒンジ変位

δ_{n1} : N 点におけるベース内からの軸方向鉄筋拔出しによる回転変位、 δ_{m1} で評価

なお、Y 点は交番載荷試験結果の降伏時、M 点は最大荷重時、N 点は終局時に相当する。

ここでは、この変形性能評価式を用いて、断面寸法が変形性能に与える影響について検討した。

M 点塑性ヒンジ回転角の実験値は、図-8に示すように、既往実験値 (500mm 角柱) で示す縮小試験体と異なり、実大試験体は式(5)との対応がよくないことがわかる。なお、図-8の M 点塑性ヒンジ回転角の実験値は、M 点変位の実験値から M 点の軸方向鉄筋の拔出し変位の計算値と塑性ヒンジ部以外のく体曲げ変位の計算値を差し引き、式(4)の引張鉄筋比の影響の項 $0.79 \cdot p_t + 0.153$ を考慮して算定したものである。

図-9に、APAT 工法の変形性能評価式による計算値と実験値の比較 (荷重) を示し、図-10 に計算値と実験値の比較 (変位) を示す。Y 点荷重、Y 点変位、M 点荷重は、いずれも計算値と実験値がほぼ対応している。一方、M 点変位、N 点変位は、上述したように、変形の 90%程度を占める M 点塑性ヒンジ回転角の評価式が対応しないため、計算値の方が実験値より大きくなったと考えられる。

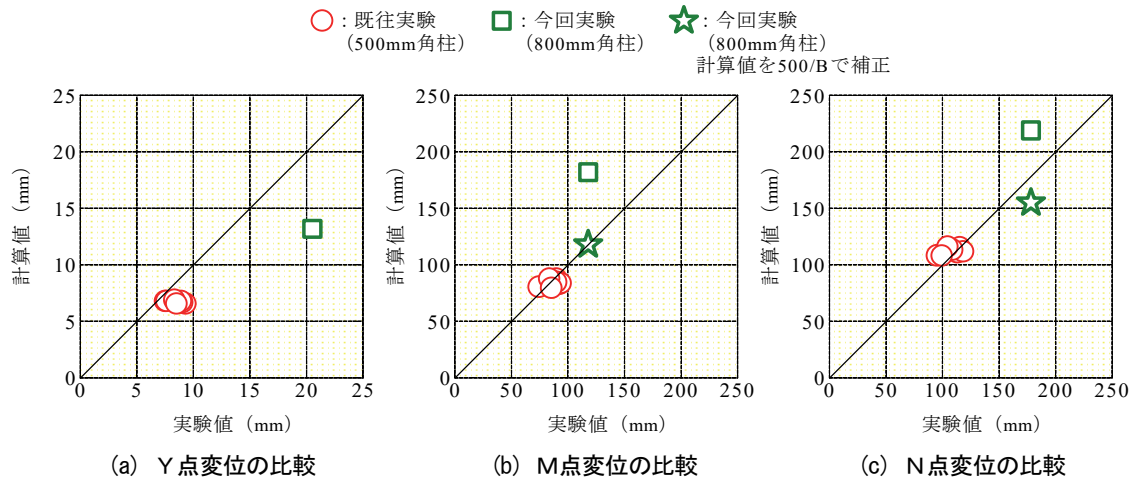


図-10 計算値と実験値の比較 (変位)

M 点塑性ヒンジ回転角の評価式が実大試験体で実験値と対応しなくなるのは、断面寸法の影響と考えられる。文献 6) では、鋼板巻立て補強工法の柱の変形性能について、M 点の塑性ヒンジの回転角は $600/B$ (B : 柱幅、単位 mm) に比例するとしている。APAT 工法の場合 500mm の試験体で塑性ヒンジ回転角の評価式を検討したので、これを考慮すると $(500/600) \cdot 600/B$ より $500/B$ となる。図-8 には M 点塑性ヒンジ回転角に $500/B$ を乗じて $B=800$ として算定したラインも示した。これより、M 点塑性ヒンジ回転角の評価式に $500/B$ を乗じて断面寸法の影響を考慮すると、M 点の塑性ヒンジ回転角を評価できることがわかる。

図-10 には、M 点塑性ヒンジ回転角に $500/B$ を乗じて計算値を補正した値も示した。これより、M 点塑性ヒンジ回転角の評価式に $500/B$ を乗じて断面寸法の影響を考慮すると、M 点変位および N 点変位も実験値と対応することがわかる。

6. まとめ

断面寸法が変形性能に与える影響について確認することを目的に行った実大試験体の交番載荷試験結果より以下のことが明らかになった。

- i. 本工法で補強された実大試験体は、優れた変形性能を示し、曲げ破壊した
- ii. 実大試験体と縮小試験体を比較すると、荷重-変位曲線において履歴性状に大きな違いは認められず、実大試験体の変形性能は、縮小試験体に比べ僅かではあるが低下する
- iii. 実大試験体の変形性能は、本工法の変形性能評価式に、寸法効果の影響を考慮することで適切に評価できることを確認した
- iv. 実大試験体における本工法の損傷状況は、縮小試験体と同様であることを確認した

なお、本研究は (財) 鉄道総合技術研究所の御指導の下で実施したものである。

【参考文献】

- 1) 松田好史、中村敏晴、宮川豊章、「コンクリートセグメントと鋼より線を用いた既設 RC 柱の耐震補強」、土木学会論文集、No.763/VI-63、pp.185-203、2004
- 2) 松田好史、中村敏晴、北後征雄、樺田正人、宮川豊章、「改良型セグメントと鋼より線を用いた既設 RC 柱の耐震補強効果」、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第 5 巻、pp.85-92、2005
- 3) 運輸省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」、丸善、1999
- 4) 奥 勝幸、藤井 栄、森田司郎、「鉄筋コンクリート T 形梁の寸法効果」、コンクリート工学年次論文報告集、pp. 675-680、1988
- 5) 星限順一、運上茂樹、長屋和宏、「鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究」、土木学会論文集、No.669/V-50、pp.215-232、2001
- 6) 鉄道総合技術研究所、「既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 鋼製パネル組立補強編」、2006
- 7) 日本国有鉄道編、「耐震設計指針 (案) 解説」、1979.
- 8) 国土交通省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」、丸善、2004
- 9) 渡邊忠朋、谷村幸裕、瀧口将志、佐藤 勉、「鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法」、土木学会論文集、No.683/V-52、pp.31-45、2001
- 10) 鉄道総合技術研究所、「既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針スパイラル筋巻立工法編」、1996