

プレキャストパネルによるRC橋脚の耐震補強工法

前田建設工業技術研究所	正会員	鈴木 顕彰
同 上	正会員	中島 良光
同 上	正会員	三島 徹也
鉄道総合技術研究所	正会員	渡辺 忠朋

1. はじめに

現在、じん性向上を主目的とした橋脚の耐震補強工事が急ピッチで進められている。これまでに適用されている工法は、鋼板巻き立てが中心となっており、比較的断面の大きな柱にはRC巻き立てもみられる。一方、施工の合理化、種々の制約下での施工性の向上、耐久性の向上などを主眼として、在来工法に代わる様々な工法が開発され、試験施工的な適用から徐々に実用化へと移行しつつある。¹⁾

著者らは、現場溶接の排除、施工の合理化、メンテナンスフリーの実現を目指しプレキャストパネルによる補強工法を考案した。本工法では、継手鋼材の使用により現場溶接が不要となり、施工によらない確実な補強効果が期待できるほか、プレキャストパネルの耐久性が高く塗装等も不要で、メンテナンスフリーの実現が可能である。

本報では本工法の概要、補強効果の確認実験、性能評価、施工要領について述べる。

2. 工法の概要

図-1に本工法の概要を示す。本工法は、一般にコ字型に成形された耐震補強用プレキャストパネル（以下、プレキャストパネル、あるいは単にパネルと呼ぶ）を補強する既設柱の外周に設置し、継手鋼材によって閉合した後、パネルと既設柱との空隙を低収縮モルタルによって充填することによって施工される耐震補強工法である。パネルはあらかじめ適切な寸法で工場にて製造されたプレキャスト製品であり、パネル内には補強仕様に応じて所要の帯鉄筋を内包することができる。

写真-1はパネルの一例であり、写真-2はパネルに内包されている継手鋼材とそれにフレア溶接された補強鉄筋である。また、図-2に継手部の構造拡大図を示す。

本工法の特徴は以下のとおり。

①メンテナンスフリー

既設柱の周囲を耐久性に優れたプレキャストパネルで囲むため、塗装、保護工などが不要でメンテナンスフリーを実現できる。なお、プレキャストパネル、水セメント比30%程度のコンクリートまたはモルタルを使用し、工場にて製造することを基本とする。

②確実な補強効果

継手鋼材のかみ合わせによりパネルを接合するため、パネルの設置に特別な技術を要さず、施工の良否に影響されずに確実な補強ができる。また、設計上必要な補強鉄筋を任意にパネル内に配置できる。

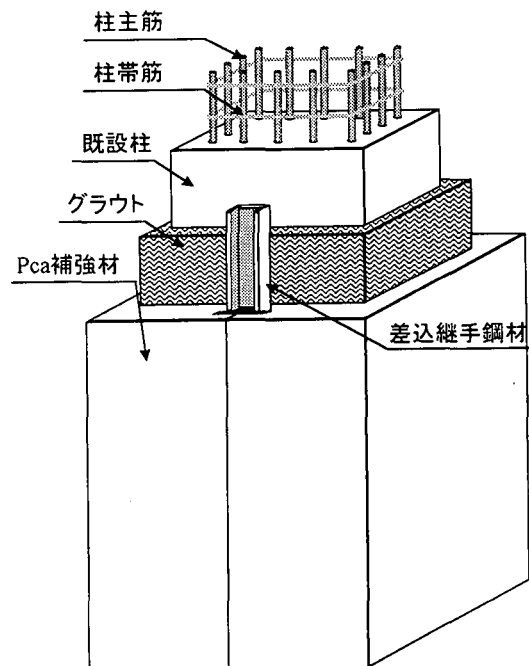


図-1 工法の概要

キーワード：RC橋脚、耐震補強、プレキャストパネル、継手、メンテナンスフリー

連絡先：〒179 練馬区旭町1-39-16 TEL 03-3977-2384 FAX 03-3977-2251

③急速施工

基本的にプレキャストパネルを積み重ねて、既設柱とパネルとの空隙を充填するだけの工法であり、工種が少なく急速施工が可能である。

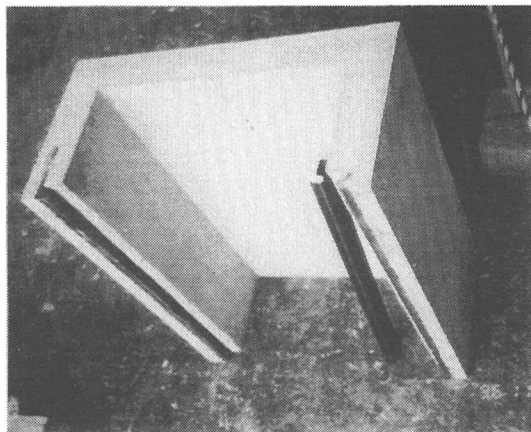


写真-1 プレキャストパネルの一例

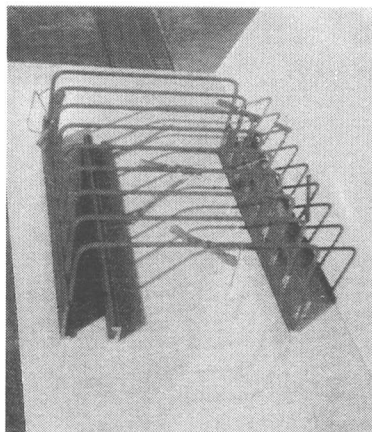


写真-2 継手鋼材と補強筋

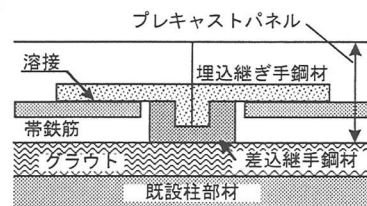


図-2 継ぎ手の構造

3. 補強効果確認実験

本工法による耐震補強効果を確認するため、鉄道高架橋脚をモデル化した1/2スケールの柱試験体、およびフルスケールの試験体により軸力を考慮した水平交番載荷試験（同一変位での繰り返し載荷回数：正負各3回）を実施した。以下に、試験および結果の概要を示す。

(1) 試験概要

試験体の形状寸法を図-3に示す。試験体の仕様は表-1のとおりである。試験体は、後述する標準的施工フローに準じて製作した。なお、プレキャストパネルの1ピースの高さは850mmとし、1/2スケール試験体では、被補強柱の全高に対してパネルを2段、フルスケール試験体では3段積み重ねた。その際、最下段のパネルはフーチング上に敷きモルタルをした上で設置し、それ以外の水平継目には特別な処置を施さなかった。また、パネルの継手は載荷方向に対して側面に配置した。

表-1 試験体一覧

スケール	No.	被補強柱			補強用プレキャスト	作用軸力	
		外形寸法	主筋	帯筋		圧縮応力 kgf/cm ²	荷重 (tf)
1 / 2 スケール	1	500*500	5D22	D10@300	t=80mm, D13@100, pw1=0.37%	35	87.5
	2				80	200.0	
	3	*1700	ps= 0.86%	pw0 =0.095%	t=80mm, D16@75, pw1=0.78%	35	87.5
フル スケール	4	800*800 *2550	7D25 ps= 0.60%	D13@300 pw0 =0.106%	t=80mm, D16@100, pw1=0.40%	35	224.0
軸力 なし	5	500*500	5D22	D10@300	無補強	0	0
	6				t=60mm, D10@75, pw1=0.37%	0	0
	7				*1700	ps= 0.86%	pw0 =0.095%

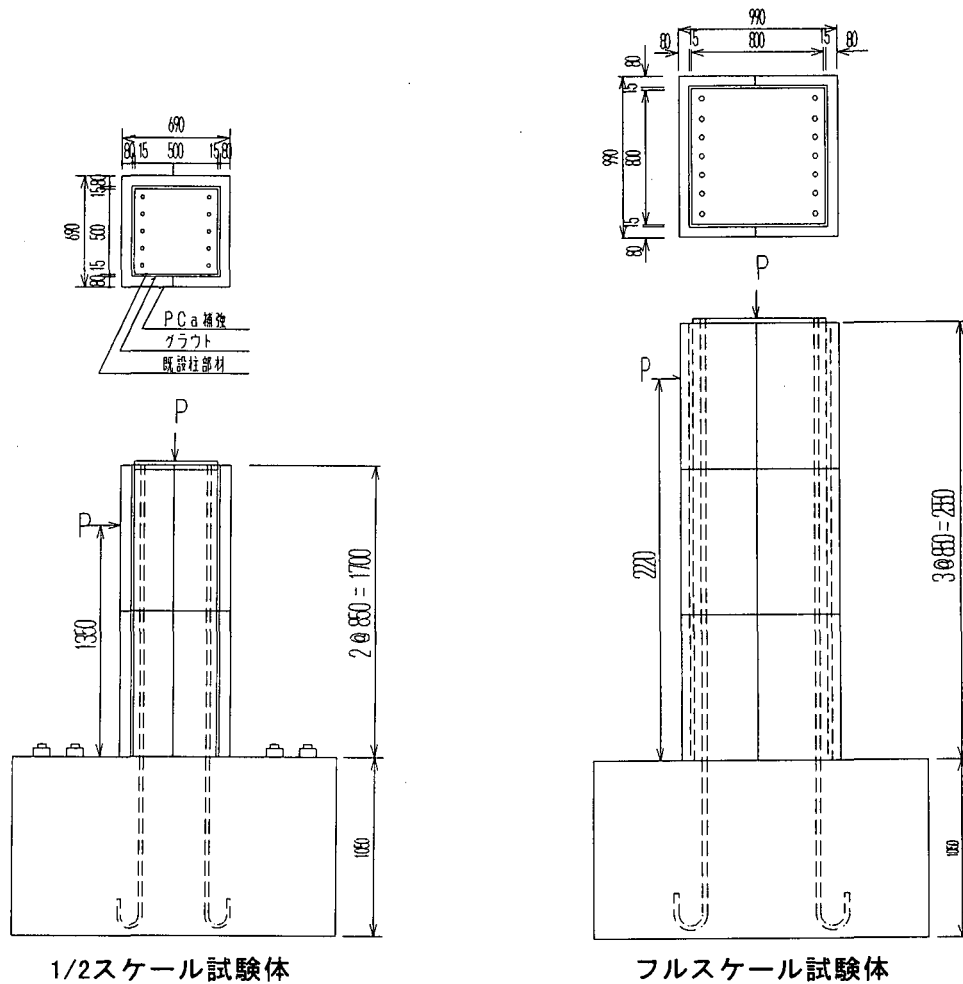


図-3 試験体の形状寸法

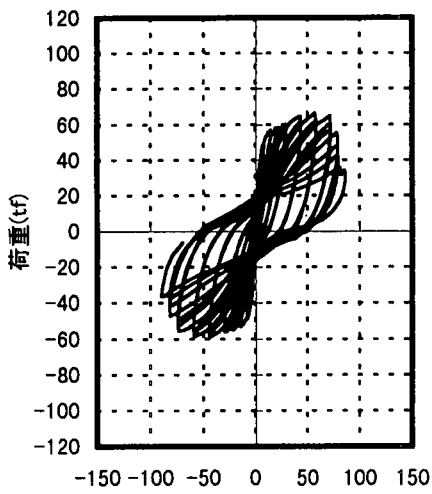
(2) 試験結果

試験結果一覧を表-2に示し、荷重-変位関係を図-4に示す。軸方向鉄筋の降伏時の載荷点での水平変位を δy とすると、無補強の試験体(No.5)は $2\delta y$ への加力途中でせん断破壊したのに対し、補強試験体はいずれも $10\delta y$ 以上の変形性能を有することを確認できた。また、終局時においてもパネルの継手部に変状はみられなかった。ただし、補強試験体はいずれも軸方向鉄筋の低サイクル疲労による破断により荷重が低下し終局となったため、最大でも $12\delta y$ にとどまり、試験パラメータの試験結果への影響は明確にならなかった。

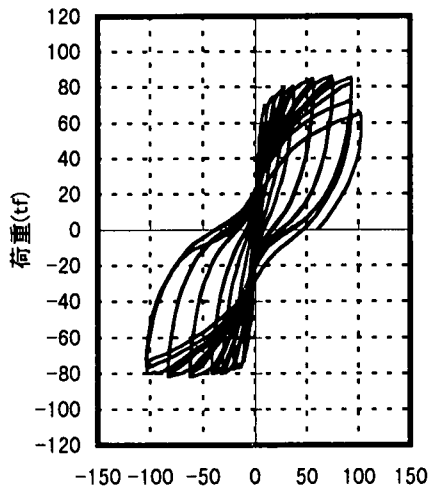
表-2 試験結果一覧

No.	実験値				計算値						μ_{0exp}
	$M_{y exp}$ (tf·m)	$M_{u exp}$ (tf·m)	δy_{exp} (mm)	δu_{exp} (mm)	$M_{y cal}$ (tf·m)	$M_{u cal}$ (tf·m)	δy_{cal} (mm)	δy_{0cal} (mm)	δy_{1cal} (mm)	δu_{1cal} (mm)	
1	65.05	81.19	7.27	80.71	67.04	68.38	5.98	4.18	1.80	2.07	18.81
2	95.65	113.13	9.81	105.90	95.38	92.76	6.22	4.24	1.98	2.34	24.42
3	65.37	85.08	8.47	91.81	66.89	67.41	5.50	3.69	1.81	2.10	24.31
4	192.97	233.70	9.26	115.79	190.26	197.93	7.88	5.92	1.96	2.08	19.21
5	36.05	37.94	8.99	8.99	35.47	36.30	7.04	5.02	2.02	2.13	1.37
6	43.20	45.90	6.45	67.69	41.95	47.88	5.33	3.66	1.67	1.90	17.97
7	37.64	48.95	6.45	70.67	—	—	—	—	—	—	—

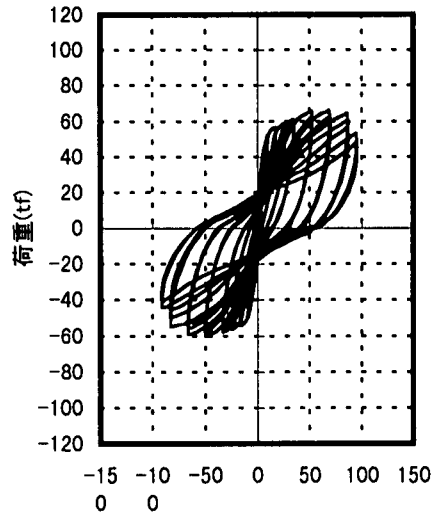
記事 $\mu_{0exp} = (\delta y_{exp} - \delta y_{1cal}) / \delta y_{cal}$



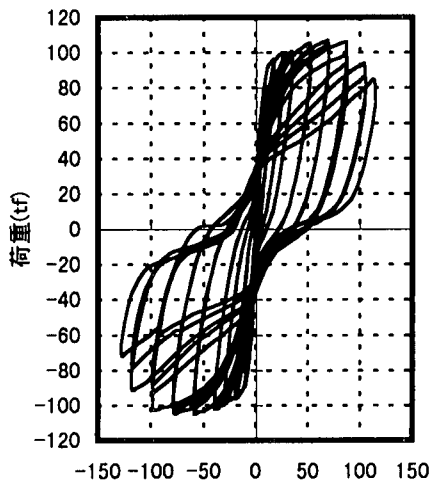
水平変位(mm)
No. 1



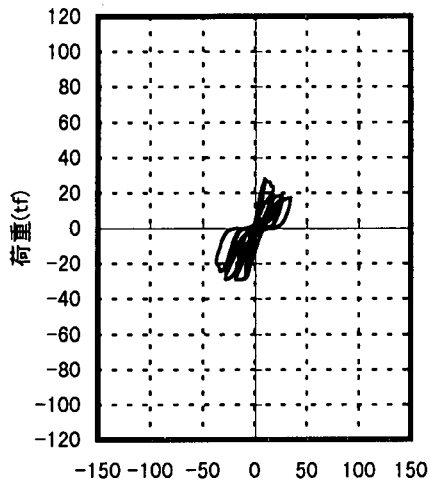
水平変位(mm)
No. 2



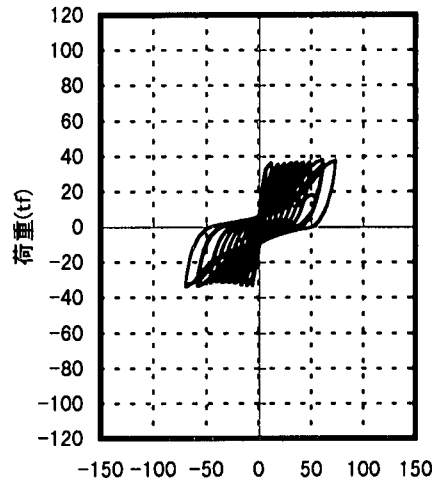
水平変位(mm)
No. 3



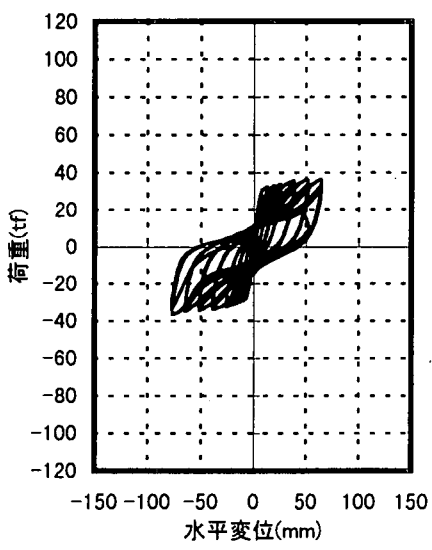
水平変位(mm)
No. 4



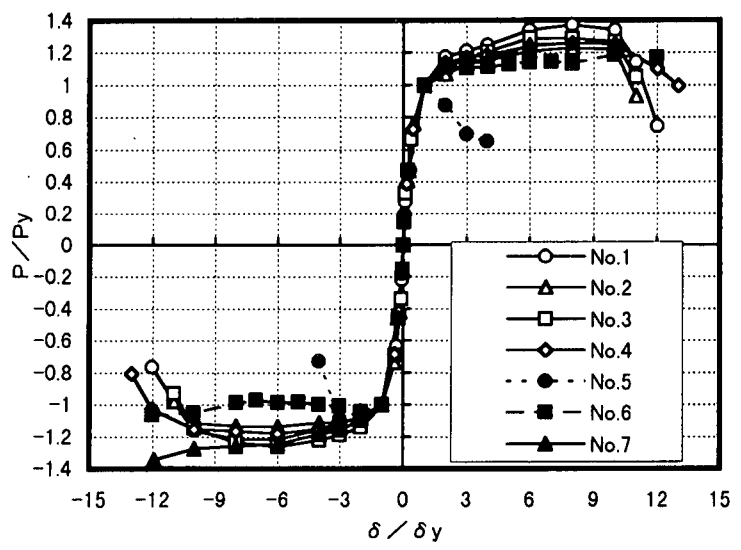
水平変位(mm)
No. 5



水平変位(mm)
No. 6



No. 7



基準化試験体

図-4 荷重-変位関係

4. 性能評価

(1) 曲げ耐力

表-2に示すように軸方向鉄筋降伏モーメント M_y に関して、実験値はプレキャストパネルと既設柱部材の一体性を仮定した計算値とほぼ一致している。(図-5参照)本工法で基本とする閉合型プレキャストパネルは、既設柱部材に対する拘束度合が強く、剥離が生じにくいいため、既設柱部材との一体性は高いと考えられ、補強曲げ耐力の算定においては既設柱部材とパネルは一体として挙動すると考えてよいと思われる。また、耐力算定に際し、パネルのモルタルの一軸圧縮強度は 500kgf/cm^2 以上であり、既設柱部材の圧縮強度を上回るため、計算を簡易にし、安全側の処理であると考え、プレキャストパネルのモルタルの力学的特性を既設柱部材のコンクリートと同等として扱った。

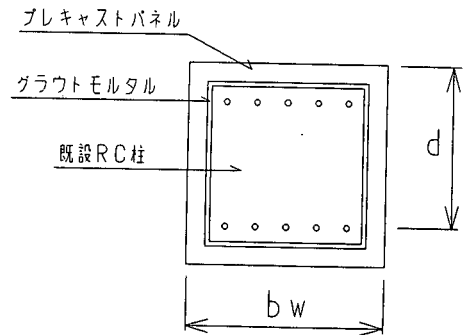


図-5 bwおよびdの取り方

(2) じん性評価

耐震補強設計において、想定地震に対して耐震性能が確保されているかどうかを検討するためには、じん性を定量的に評価する必要がある。プレキャストパネルによって耐震補強されたRC部材は、通常のRC部材に準ずる構造形式を有しており、プレキャストパネルと既設部材の一体性が確保されていれば、その耐震性能も通常のRC部材と同等と考えられる。

試験結果より、柱躯体のじん性率とせん断余裕率の関係を図-6に示す。これは、「鉄道構造物等設計標準・同解説〔コンクリート構造物〕 付属資料10」²⁾に示す部材靱性率の算定方法に準じて整理したものである。

せん断余裕率($V_{py} \cdot a / M_u$)の算定における V_{py} は、コンクリートの分担分 V_{cd} 、既設部材内のせん断補強筋の分担分 V_{sd} とプレキャストパネル内のせん断補強筋の分担分 V_{pd} の和とした。コンクリートの分担分 V_{cd} の算定においては、プレキャストパネル部は有効高さ、有効幅に加えた。曲げ耐力の算定と同様にパネルのモルタル部の力学的特性は既設柱部材のコンクリートと同等として扱った。

高架橋柱の部材じん性率 μ_{pd} は、式(1)により求めるものとし、躯体じん性率 μ_o は実験により得られた最大変位 δ_{uexp} より、式(2)により算定した。

$$\mu_{pd} = \delta_u / \delta_y = (\mu_o \cdot \delta_{y0} + \delta_{u1}) / (\delta_{y0} + \delta_{y1}) \quad (1)$$

$$\mu_o = (\delta_{uexp} - \delta_{u1}) / \delta_{y0} \quad (2)$$

ここに、 μ_{pd} : 部材じん性率 δ_u : 終局変位

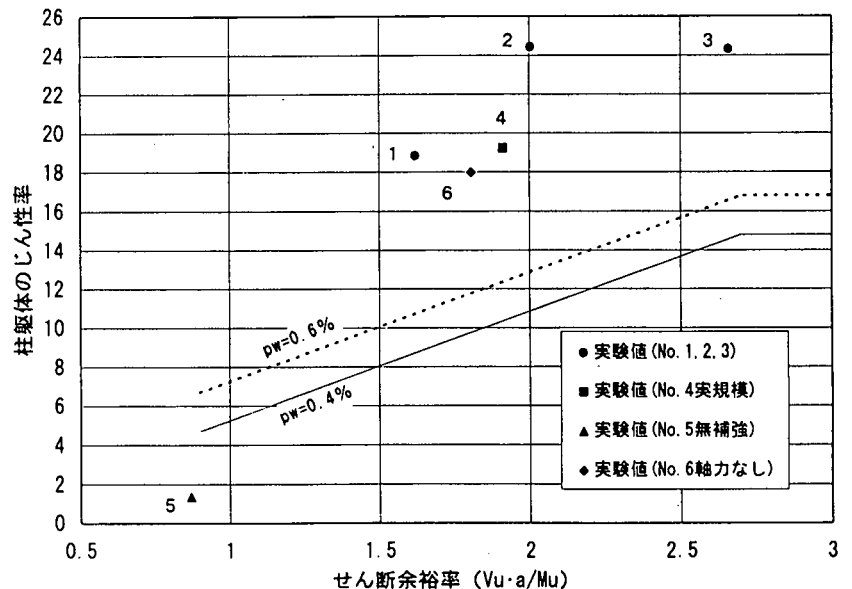
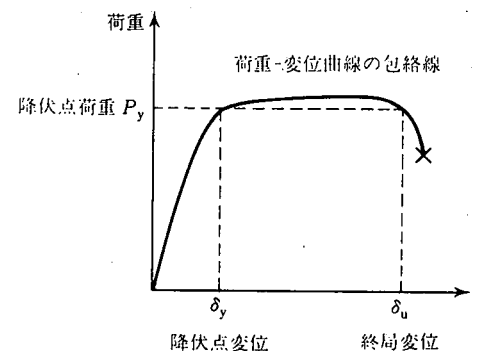


図-6 柱躯体のじん性率とせん断余裕率の関係



降伏点変位: 軸方向鉄筋が引張降伏するときの変位
終局変位: 荷重-変位曲線の包絡線上の、降伏点荷重を下まわらない最大変位
部材靱性率: $\mu = \delta_u / \delta_y$

図-7 終局変位

δy : 降伏点変位 μ_o : 躯体のじん性率
 δy_o : 降伏時の躯体変形による変位 (弾性荷重法による)
 δy_1 : 降伏時の軸方向鉄筋の抜け出しによる回転変位
 δu_1 : 終局時の軸方向鉄筋の抜け出しによる回転変位
 $\delta y_1 = h \cdot \Delta l y / (d - x_{yn})$ $\delta u_1 = h \cdot \Delta l u / (d - x_{un})$ (3)

ここに、 $\Delta l y$: 降伏時の軸方向鉄筋の抜け出し量(cm)
 $\Delta l u$: 終局時の軸方向鉄筋の抜け出し量(cm)
 h : 断面高さ(cm) d : 有効高さ(cm)
 x_{yn}, x_{un} : 降伏時、終局時の圧縮縁から中立軸までの距離

鉄筋の抜け出し量は次式により求めた。

$\Delta l y = 0.070 - 0.0054 D / \phi + 0.00017 (D / \phi)^2$
 $\Delta l u = 0.083 - 0.0054 D / \phi + 0.00015 (D / \phi)^2$ (4)

ここに、 D : 軸方向鉄筋の中心間隔(cm) ϕ : 軸方向鉄筋の直径(cm)

図中に示した折れ線は、式(5)によるものである。

$\mu_{po} = -1.6 + 5.6 V_{pyd} \cdot l_a / M_{pud} + (11.4 p_s - 1.4) \cdot p_s$
 $0.9 \leq V_{pyd} \cdot l_a / M_{pud} \leq 2.7$
 $p_s \leq 0.6 \%$ $11.4 p_s - 1.4 \geq 0$ (5)

ここに、 μ_{po} : 柱部材の設計補強じん性率 V_{pyd} : 柱部材の設計補強せん断耐力
 M_{pud} : 柱部材の設計補強曲げ耐力 l_a : せん断スパン

補強試験体の柱躯体のじん性率は、式(5)による計算値を上回り、通常のRC部材と同様な評価をすれば安全側の設計を行うことができることがわかる。実験値が計算値に比較し安全側となった理由の一つには、パネルのモルタルの力学的特性を既設柱のコンクリートと同一にみなしたことが考えられる。

5. 継手の設計

継手鋼材には図-8に示すように溶接した鉄筋からの引張力によって、曲げモーメント、せん断力、軸力が発生する。継手鋼材に溶接した補強鉄筋の軸降伏よりも継手鋼材の曲げ降伏が先行すると継手の変形が過大となり、かみ合わせが外れる可能性がある。また、継手鋼材のせん断降伏は脆性的な破壊を招くことになる。これらのことより、継手部の破壊は継手鋼材に接合した補強鉄筋の降伏を先行させる仕様とした。設計法の妥当性は、別途継手部の部材実験を実施し確認した。なお、鉄筋の溶接は「鉄筋フレア溶接継手設計施工指針」³⁾に従うこととした。

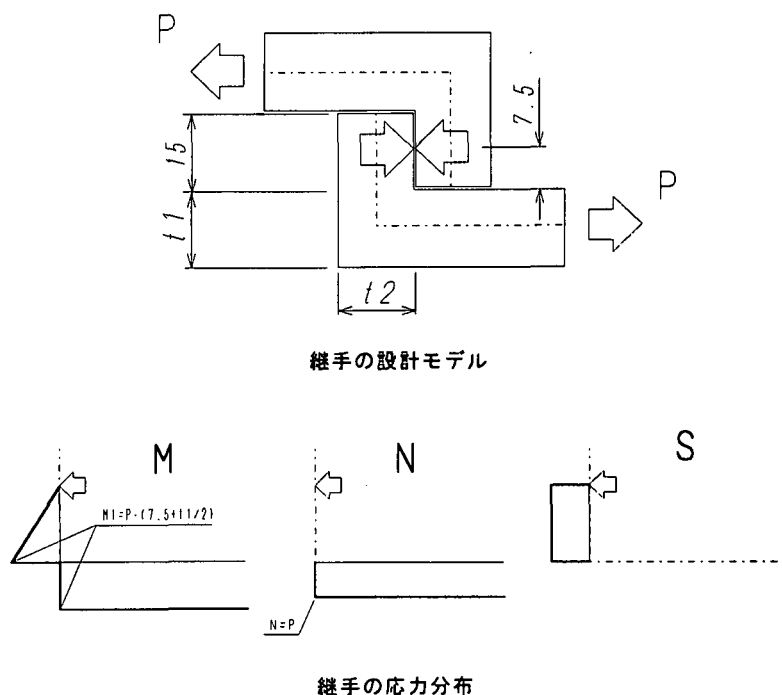


図-8 継手の設計モデル

6. 施工の概要

(1) 標準的な施工フローと施工上のポイント

図-9に標準的な施工フローを示し、施工フローに沿った主な施工上のポイントを以下に述べる。また、図-10に施工（パネルの積み上げ）イメージを示す。施工上の制約により、クレーン車が容易に補強する柱に近づけない場合、図-10に示すように簡易的な吊り上げシステムを用いるのも一方法である。

②準備工

- 柱表面は汚れを取る程度でよく、柱表面の目荒らしなどは必ずしも行う必要はない。

③プレキャストパネル組立工

- プレキャストパネルの設置面は、プレキャストパネルが鉛直に組み上がるようにするため、あらかじめ水平に均しておくか、モルタルや鋼材などを用いてプレキャストパネルを鉛直に設置できるようにしておく必要がある。
- グラウト材の漏洩防止のため、パネルの水平目地にはエポキシ樹脂などを塗布する。
- 本工法により柱の曲げ耐力の向上を期待する場合、特に最下段パネル下面は敷きモルタルより圧縮力が十分にフーチングに伝達される仕様としなければならない。

④グラウト工

- グラウトはあらかじめパネルに設置した注入孔を利用し、流動性を高めた充填性の良いモルタルによって行う。
- グラウトの打上り速度、打上り高さ、およびパネルの平面寸法に応じて、グラウト圧によるパネルのひび割れ防止のための支保工を検討する。

⑤仕上げ工

- 施工後の雨水などの浸入による鋼材の腐食を防ぎ、長期耐久性を保持できるように、プレキャストパネル同士の水平目地、および鉛直目地は、コーキング材、シリコンゴムや膨潤ゴム、またはモルタルなどを用いて確実に止水する必要がある。
- グラウトの天端からの雨水の浸入を防止するため、コーキング材などを用いた止水処理を行う。

(2) 空頭制限のある橋脚での施工

空頭制限のある場合、最上段のパネルの設置時に図-1、図-2に示す差込み継手の挿入が困難となる場合があるが、これに対して以下の2とおりの方策が考えられる。なお、この方策は空頭制限の有無にかかわらず一般部において広く適用できると考えられる。

①差込み継手鋼材の1ピースの長さを細かく分割し、連続して挿入する。

②図-11に示すように差込み継手を使用せず、パネル内に埋設した継手鋼材を直接かみ合わせる。この場合、施工中の継手のかみ合わせがはずれることを防止するため、ボルトなどにより仮止めすることとする。

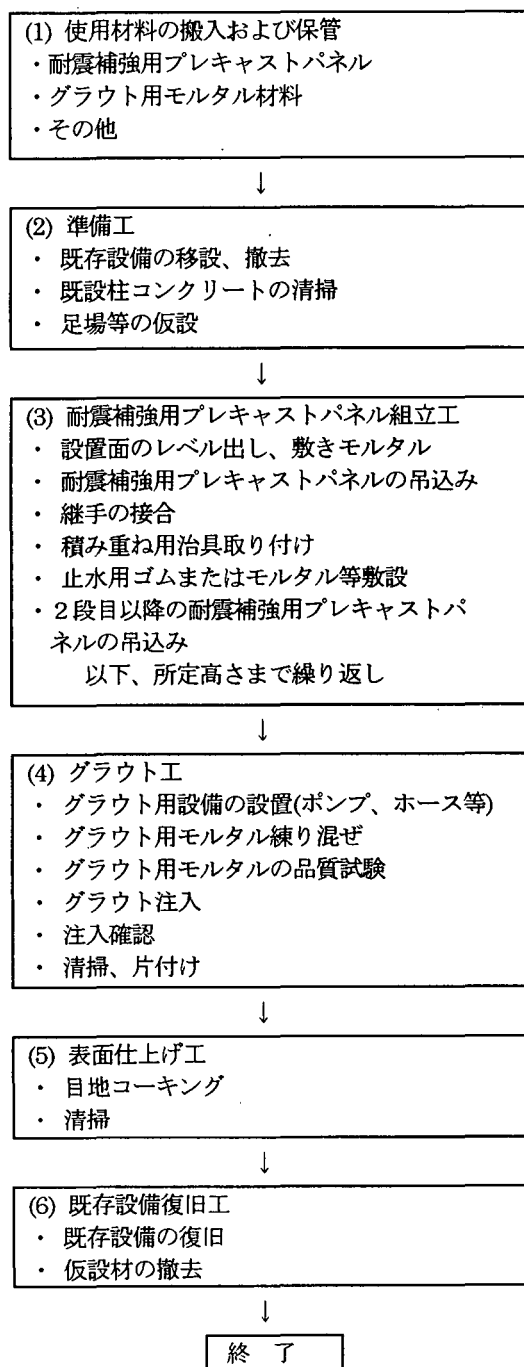


図-9 標準的な施工フロー

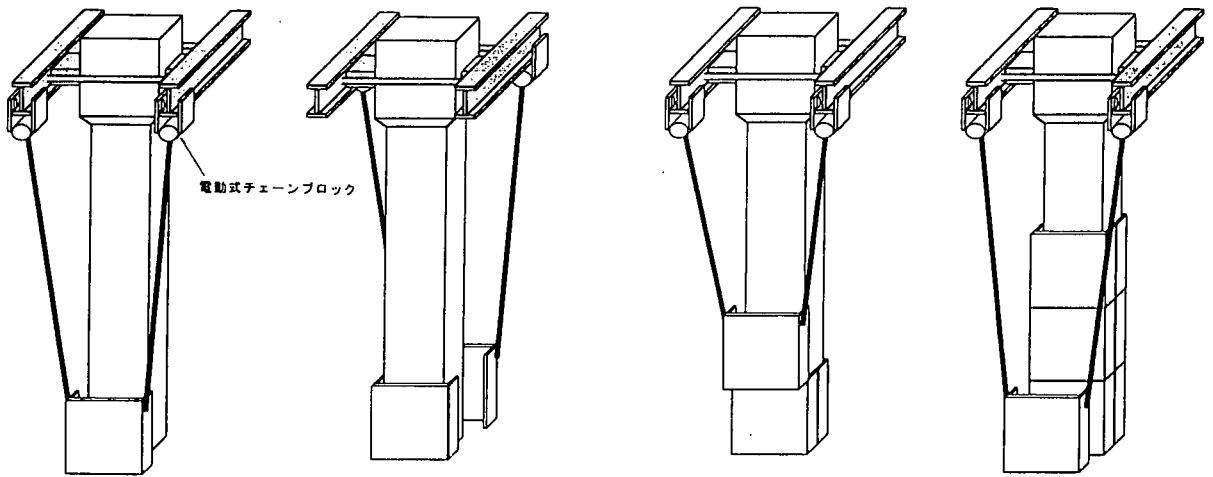


図-10 パネルの組立イメージ

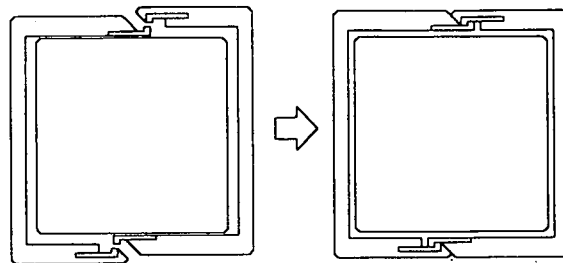


図-11 差込み継手を使用しないパネルの接合

7. まとめ

本報では、プレキャストパネルによる耐震補強工法の概要、補強効果確認実験、施工法の概要について述べた。補強効果確認実験結果をまとめると以下の通り。

①本工法により、せん断破壊先行型の既設RC柱に $10\delta y$ 以上のじん性能を付与できる。

②補強柱のじん性率は、RC柱に関する既往の評価式で安全側に評価できる。

③補強柱の耐力算定に際しては、プレキャストパネルを有効高さ、有効幅に加えてよい。

また、施工法と施工上の留意点を示し、施工精度の確保と高耐久性保持のポイントを示した。

謝 辞

本工法の開発に際しては（財）鉄道総合技術研究所のご指導をいただきました。関係各位に感謝の意を表します。なお、本報は、「既設鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 - RCプレキャスト型枠工法編 -」（鉄道総合技術研究所編）⁴⁾に基づくものです。

参考文献

- 1)兵庫県南部地震に関する耐震技術特別研究委員会報告書 1997.4 (社)日本コンクリート工学協会
- 2)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）1992.10
- 3)鉄道総合技術研究所：鉄筋フレア溶接継手設計施工指針 1987.9
- 4)鉄道総合技術研究所：既設鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 - RCプレキャスト型枠工法編 - 1996.12