

基礎工法（P C ウェル P R C 構造）の 耐震性能試験および施工事例の紹介

中井将博¹・塩井幸武²・長谷川明³・酒井泰史⁴

¹正会員 工修 P C ウェル工法研究会 技術委員（〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-13-17）

²正会員 工博 八戸工業大学教授 構造工学研究所（〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1）

³正会員 工博 八戸工業大学教授 環境建設工学科（〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1）

⁴諏訪市役所 建設課 工事係 主査（〒392-8511 諏訪市高島一丁目22番30号）

P R C（Prestressed Reinforced Concrete）構造は、都市内の高架橋および河川内の橋脚・基礎の施工において、作業空間、仮設も含めた全体工事費、施工期間等の面で非常に有効である。本稿ではその耐震性能を検証した正負交番載荷試験の結果ならびに本構造がはじめて採用された施工事例を紹介する。本構造はプレキャスト部材を接合し構築され、主筋（鉄筋またはP C 鋼より線）が高強度・超遅延性・ノンブリージングモルタルで付着固定されたものである。その結果、従来のR C 部材に比較して①耐力は同等であった。②変形性能はより優れていた。③主筋がP C 鋼より線の場合は復元性能に優れていた。以上より主筋が鉄筋の場合は従来の設計法が適用でき、P C 鋼より線の場合は変位を考慮した新しい設計法の適用が必要であることが確認された。また、実施工によってその優れた施工性が検証された。

キーワード：経済性，P R C 構造，耐震性能

1. はじめに

現在および将来の建設工事を取り巻く社会・経済情勢を鑑みるに、少子高齢化社会への移行は必至であり、ここ数年の傾向として徐々に現場労働者（技能工）の減少が生じている。これは現場でのスキルの空洞化であり、品質低下のリスクを示唆している。一方、現下の厳しい財政事情の下、限られた財源を有効に活用し、より効率的な公共事業の展開を図るために、公共工事コスト縮減対策関係閣僚会議が設置され10%以上のコスト縮減が目標に上げられた。また、大都市でのインフラ整備の遅れが効率的な経済活動や快適な都市生活を妨げており、都市インフラ整備の一層の推進が望まれている。

このような背景の中、これらの隘路を打破する基礎・橋脚の工法としてP C ウェル工法（P R C 構造）が開発された。本工法は、R C 構造に近いものであり、部材高さ2～2.5mのプレキャスト（以下P C a）部材を積み上げる毎に0.5N/mm²程度のプレストレスを導入することによって一体化し、掘削・圧入沈設を繰り返す。構築完了後部材に予め設けられた孔に、高強度・超遅延・ノンブリージングのモルタルを充填し、最後に構造物全長にわたって連続した主筋を一括挿入・付着固定するものである。

本工法の特徴は、下記の通りである。

(1) 目地部をP C a 部材内と同量の鉄筋・P C 鋼材

が貫通しており、コンクリートの引張強度を無視するR C 構造の場合と同様に設計することができ、目地部を別途照査する必要はない。

(2) 各ブロック毎の継手治具および定着体が削減でき、製作の簡便化・製作コストの縮減を達成できる。

(3) 施工時は数本のP C 鋼材の緊張作業のみであり、施工の迅速化により工期が短縮でき、その結果架設資機材の賃料削減および交通規制の短縮が図れ全体工費は安価になる。

(4) 主筋の継手が低減でき、鋼材強度の均一化および一括挿入による作業の円滑化が図れる。

(5) 固定した技能工により品質管理の行き届いた工場で作成されるため、高強度、高品質、高耐久の部材を提供できる。

(6) 振動・騒音が少なく、型枠の転用により天然資源への負荷を低減でき、環境に配慮した工法である。

しかし、本工法が汎用されるためには、主筋がモルタルで付着固定された構造体の耐震性能および現場でのモルタルグラウトの施工性能を検討する必要があり下記試験を行った。また、最後に初の施工事例の紹介を行う。

2. P R C 構造の概要

(1) 構造の概要

P R C 構造の概念図を図-1に、施工フローを図

ー2に示す。目地部にはエポキシ樹脂接着剤が塗布され、完成後は目地の無い一体構造としてみなすことができ、通常の軸力と曲げが作用するRC構造として設計を行うことができる。また、本工法とほぼ同様な工法で構築されたRC橋脚の施工例を写真-1に示す¹⁾。

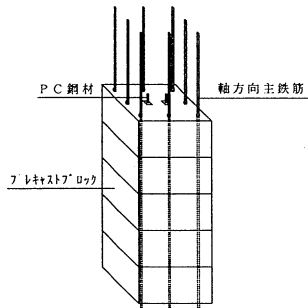


図-1 PPRC 構造の概要

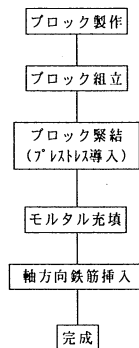


図-2 施工フロー図

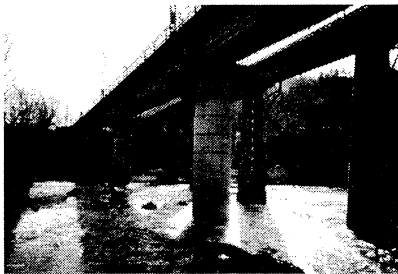


写真-1 PCaRC 橋脚

3. 試験概要

(1) 耐震性能に関する試験²⁾

a) 試験内容

本試験の要素は、主筋の種類（鉄筋，P C 鋼より線），目地の有無，主筋端部の固定状況）および連結用 P C 鋼棒のボンド・アンボンドである。これらの要素に注目して一体施工された供試体と本工法で製作された供試体との耐震性能の比較を行った。

主筋を鉄筋としたものを T シリーズ，P C 鋼より線としたものを Y シリーズとした。供試体の断面図を図-3 に，種類を表-1 に示す。T C はシース無し。

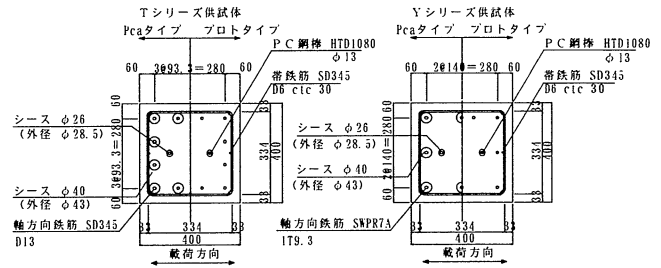


図-3 供試体の断面図

b) 試験方法

載荷は片張出しの供試体を反力床に固定し、頭部を変位制御された油圧ジャッキにより正負交番載荷を行った(図-4 参照)。載荷は回転角によって制御し、載荷ステップは計算上のひび割れ荷重時、主筋降伏荷重時、これ以降は1/200radの整数倍とした。各ステップ正負3サイクルの繰返し載荷を行った。最大荷重の80%を下回った時を終局状態とし載荷を終了した。

計測項目は水平・鉛直荷重，供試体の水平・鉛直変位，フーチングの水平・鉛直変位，主筋・P C 鋼棒・帯鉄筋の歪みである。

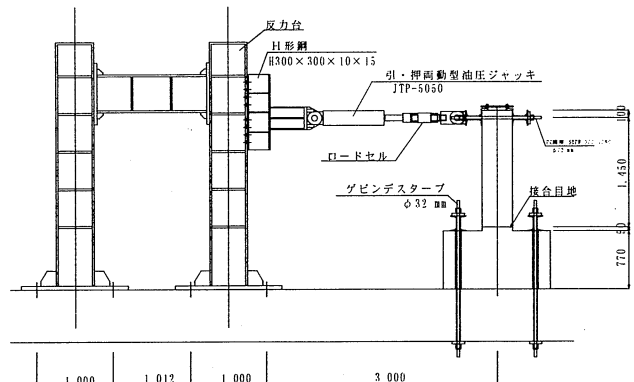


図-4 載荷図

表-1 供試体一覧

供試体名	主筋の種類	主筋の定着	固定方法	PC鋼棒の定着	備考
TC	鉄筋 (SD345, D13)	コンクリート		アンボンド	プロトタイプ
TMKK		モルタル	完全固定 ¹⁾		下端定着体設置
TMFK			付着固定 ²⁾		定着長50D
TMSK			支圧固定 ³⁾		主筋端部ナット設置
TSKK		セメントペースト	完全固定		下端定着体設置
TMKB		モルタル		ボンド	
YC	PC鋼より線	コンクリート		アンボンド	プロトタイプ
YMKK	(SWPR7A, IT9.3)	モルタル	完全固定		下端定着体設置
YSKK		セメントペースト	完全固定		下端定着体設置

- 1) 完全固定 基礎構造物の場合、モーメント0区間で確実に付着固定できることを前提とし、フーチング下端にプレートを設置し主筋端部を外側よりナットで固定したものである。
- 2) 付着固定 鉄筋径の50倍の定着長が確保されているので、この区間で固定されるものとした。
- 3) 支圧固定 付着固定で不十分な場合の改善策で、主筋下端にナットを設置しその支圧によって固定するものである。

c) 試験結果

TシリーズではP C a 供試体 (TMKK, TMFK, TMSK, TSKK, TMKB) は、ほぼ同様な挙動を示したのでそれらの代表としてTMFK (鉄筋-モルタル-付着固定) を、YシリーズではP C 鋼より線が引抜けずT Cと同耐力を示したYMKK (より線-モルタル-完全固定) を抽出し、その荷重-変位曲線、主筋のひずみ分布においてT C (場所打ち) との比較を行った。

①荷重～変位曲線の比較

図-5と図-6から、最大荷重は約100kNであり、最終変位はT Cが67.5mm、TMFKが90mmであった。これより、本構造の耐力・変位に与えるマイナス要因は無く、むしろ変形性能に優位に作用することがわかった。

図-5と図-7から、最大荷重・変形性能ともほぼ同様であった。また、主筋がP C 鋼より線であるYMKKは復元性能に優れており、終局時の残量変位はT Cの50mmに対し20mm程度であった。

②主筋のひずみ分布の比較

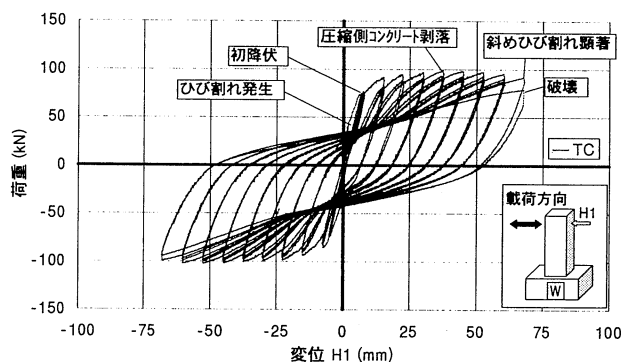


図-5 P-Δ (TC)

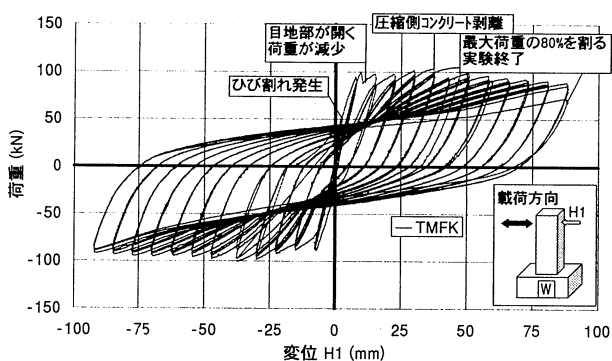


図-6 P-Δ (TMFK)

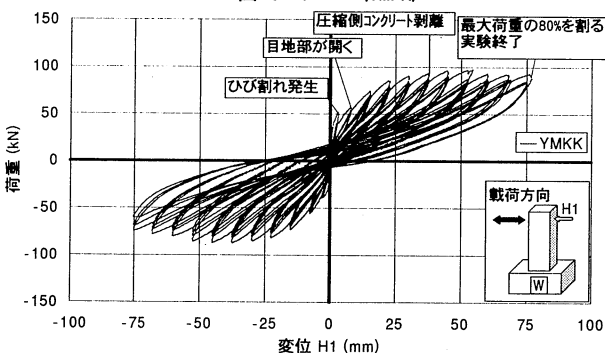


図-7 P-Δ (YMKK)

図-8、図-9とも、フーチング天端より上20～40cm、下0～20cmの範囲で鉄筋の塑性化が見られ、T Cも、TMFKも付着切れの範囲は同じであり、定着長は同様に算定できることがわかる。

図-8と図-10から、YMKKはフーチング天端より上80cmの広い範囲で一様にひずみが分布している。これは、P C 鋼より線の付着強度が鉄筋のそれよりも低く、また鋼材の降伏強度が高いことに起因する。

③主筋からモルタルへの応力伝達状況

TMFKおよびYMKKの主筋からの応力伝達がどのように行われていたか、シース内のモルタルのひび割れを観察し以下に述べる。写真-2は主筋が鉄筋であり、鉄筋の節からクラックが伸びコンクリート場合と同様にくし歯状を形成していることがわかる。これより、鉄筋→モルタル→シース→コンクリートへの伝達経路が推定でき、シース自体が1本の引張および圧縮材となって終局時まで抵抗したことによって、シースの無いT CよりもTMFKの変形性能が大きくなった。

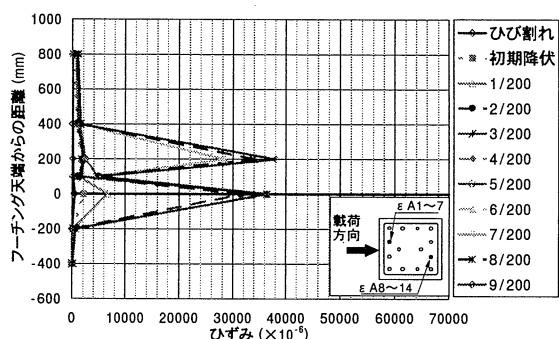


図-8 引張側主鉄筋のひずみ分布 (TC)

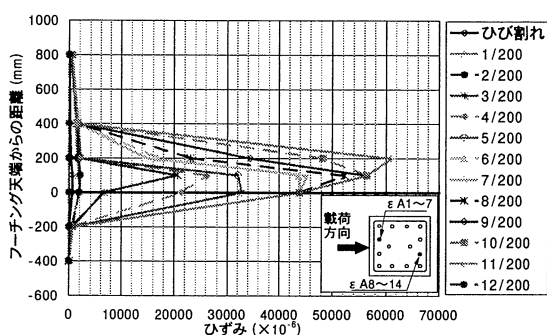


図-9 引張側主鉄筋のひずみ分布 (TMFK)

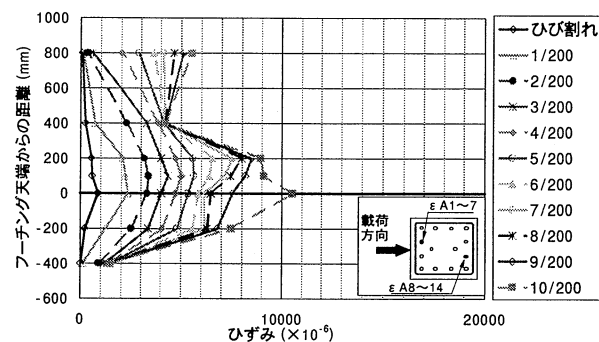


図-10 引張側主鉄筋のひずみ分布 (YMKK)

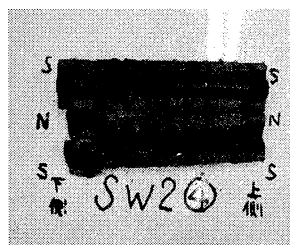
ものと思われる。また、シースが鋼製のスパイラル構造であり内部のモルタルをしっかりとコンファインドしたことにより、鉄筋の座屈が抑制されかぶりコンクリートの剥離・剥落が軽減されとことも大きな要因の一つと思われる。

写真-3は主筋がP C鋼より線であり、内部ひび割れが鉄筋の場合と比較して非常に少なく、鋼材が回転しながら引抜けた様子が伺える。また、圧縮側になった時の鋼材の提灯状の膨れは生じていなかった。これも、シースのコンファインド効果によると思う。P C鋼より線の場合は定着具間がアンボンド状態となるため、同荷重の時の変形およびひび割れ幅が鉄筋の場合よりも大きくなる。今後、アンボンド区間をパラメータとした検討が必要である。

写真-4にT Cの写真-5にT M F Kの破壊状況の差異を示す。

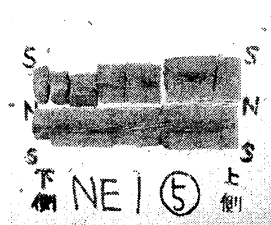


基部より0~20cm

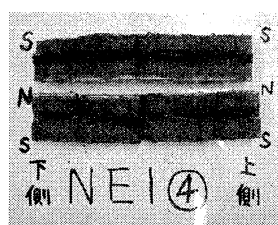


基部より20~40cm

写真-2



基部より0~20cm



基部より20~40cm

写真-3



写真-4 T C基部破壊状況

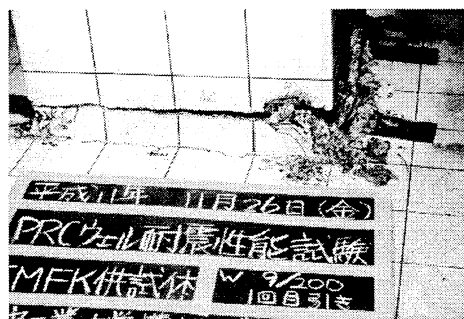


写真-5 T M F K基部破壊状況

(2) シースのコンファインド効果に関する試験³⁾

a) 試験内容および方法

寸法φ5cm×10cmの供試体でシースを周辺に設置したものおよびしないものの圧縮荷重試験を行うことによって、シースが内部のモルタルの圧縮強度に及ぼす影響（コンファインド効果）の検討を行った（写真-6）。荷重は両供試体とも最大荷重まで行い、シースを設置したものはその後除荷し3回繰り返し荷重を行い圧縮強度の変化を測定した。

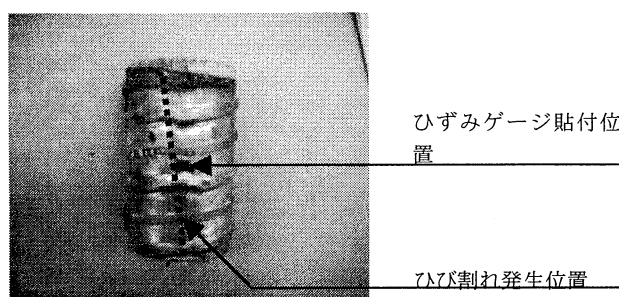
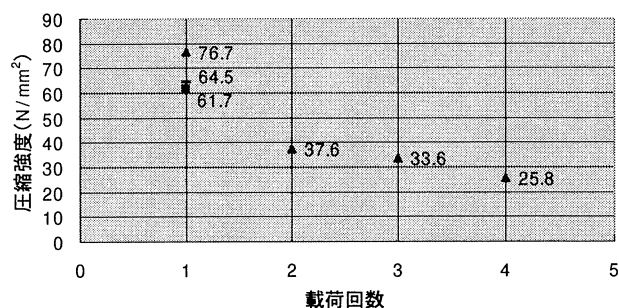


写真-6 圧縮試験供試体

b) 試験の結果

図-11に見られるように、まずシースが有ることによって圧縮強度が10N/mm²増加した。また、シース内部のモルタルにひび割れが生じ破壊後も、シースのコンファインド効果によって強度をある程度(1/2~1/3)保持していた。



— シース無し φ5*10cm ■ シース無し φ5*9cm ▲ シース有り φ5*9cm

図-11 供試体圧縮強度履歴

(3) 高強度鉄筋およびP C鋼より線の引抜き試験³⁾

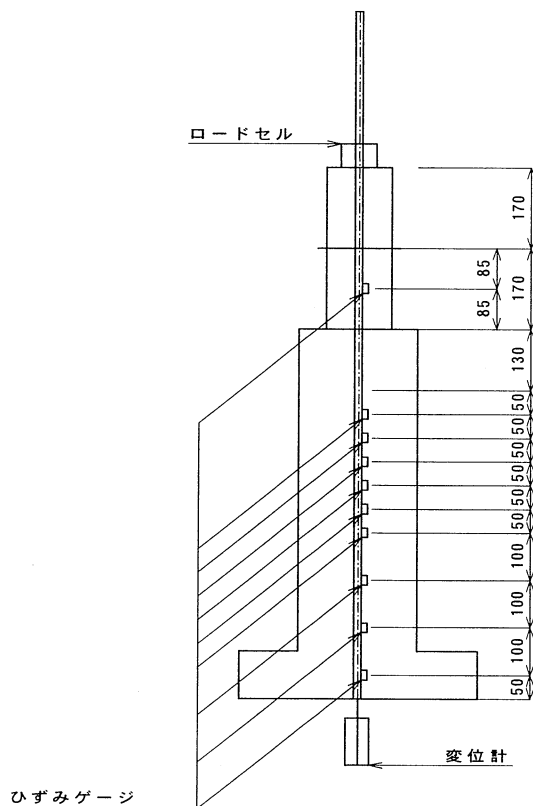
a) 試験内容

(1) の耐震性能試験において、主筋とモルタルもしくはコンクリートとの付着の阻害を最小限にするためひずみゲージピッチは20cmと大きくした。本試験ではより正確に付着切れの範囲（定着長）を求めるために、5cmピッチにゲージを設置した。鋼材は実際に使用される高強度鉄筋（D13：SD490相当）および埋込み下端に圧着グリップを設置したP C鋼より線（IT19.3）である。モルタルの設計基準強度は他試験と同様に40～50N/mm²である。

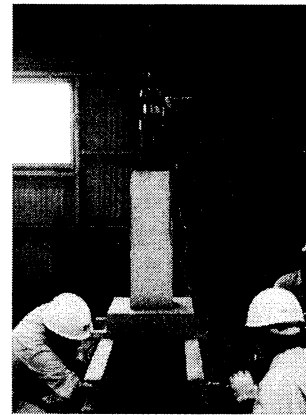
b) 試験方法

載荷状況を図－1 2、写真－7に示す。センターホールジャッキで鋼材の降伏荷重まで3回繰返し載荷を行いその後引張荷重まで載荷した。その時に発生した鋼材の歪み分布を測定した。

供試体上面より13cm非定着域を設けた。その下5cmピッチにひずみゲージを設置した。また、変位計を鋼材下端に設置し、その引抜け量の測定を行った。



図－12 ゲージ設置位置図

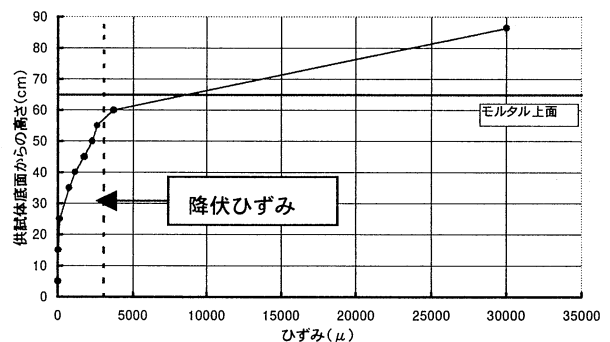


写真－7 載荷状況

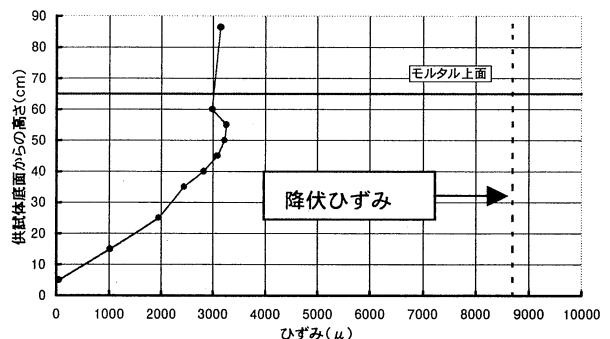
c) 試験結果

鉄筋およびP C鋼より線のひずみ分布を図－1 3および図－1 4に示す。これより、定着長としては、鉄筋径の35倍程度であった。端部の変形の値はゼロであり引抜けは生じなかった。

引張強度までより線端部の引抜けは生じておらず圧着グリップの機械的な支圧作用によって定着されていたことがわかる。また、載荷後供試体をカッターで切断しコンクリート内部のひび割れ発生状況の確認を行った。その結果、ひび割れがシースの節より発生しており、応力の伝達が圧着グリップ→モルタル→シース→コンクリートの順番になっていることがわかった。これは、(1)の試験結果同様、シース自体が1本の抵抗材となっていたためであると思う。



図－13 鉄筋のひずみ分布図



図－14 P C鋼より線のひずみ分布図

(4) 充填モルタルに関する試験

a) 試験内容および方法

材料特性試験として、①圧縮試験、②流下時間の経時変化、③付着強度試験を行い、耐震性能試験および実施工での参考資料とした。設計基準強度はP C a 部材と同じ $40 \sim 50 \text{ N/mm}^2$ とし、遅延時間は6時間とし配合を決定した。また、実施工での施工方法および施工順序を決定するために、高さ10mのシースを立て、モルタルの注入・鉄筋の挿入の順番で行い、圧送性・注入時間、遅延性、ブリージング、空隙等の確認を行った。写真-8に試験状況を示す。

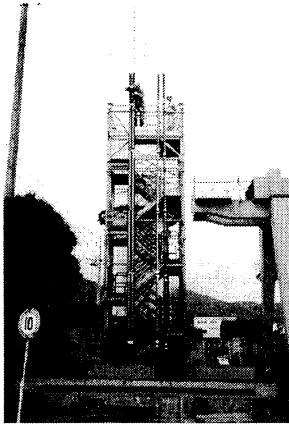


写真-8 モルタル施工試験

b) 試験結果

①付着試験

付着強度は、鉄筋で 11.5 N/mm^2 、P C 鋼より線で 9.14 N/mm^2 であった。より線は荷重の増加と伴に緩やかにねじれながら引抜けが生じた。

②実証試験

遅延性の確認は外気温 35°C のもと実施され、練混ぜ6時間後も流下時間は増加せず規定値6秒を十分満足した。その後、シース内への充填および鉄筋の挿入作業を行い、その圧送・注入および鉄筋の挿入に支障がないことがわかった。また、モルタル硬化後シースを1mピッチで切断し空隙を観察したが、全く見られなかった。ブリージングも見られなかった。

4. 実施工の紹介

(1) 施工概要

本橋梁は長野県諏訪市諏訪湖の上川下流に施工された3径間の歩道橋であり、その中央橋脚2基に本工法が採用された。下部工の形式は基礎と橋脚が一体構造となったパイルシャフト方式であり、基礎部の長さが約35mであり、橋脚部が7.5mである。使用鋼材は、主鉄筋に高強度鉄筋（SD490-D41：ネジ節鉄筋）を採用した。部材断面図を図-15に、側面図を図-16に、全体図を図-17に示す。現場全景を写真-9に、沈設状況を写真-10に示す。プレキャストブロックの製作は今回水密性を重視して、実績のあるマッチキャスト工法（既設ブロックの端面を型枠として使用する）にて行った。今後はより安価な単体製作工法の検討を行う。

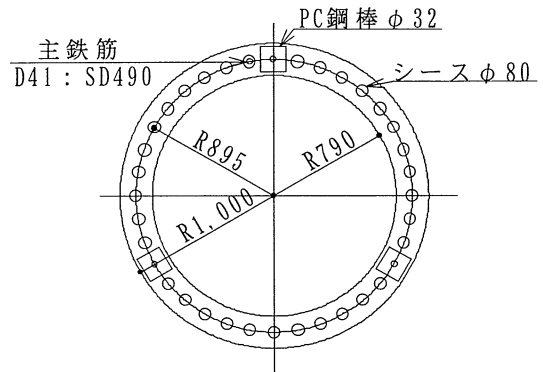


図-15 断面図

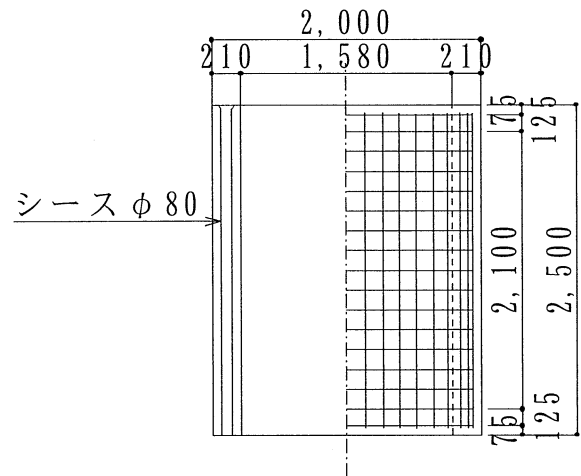


図-16 側面図

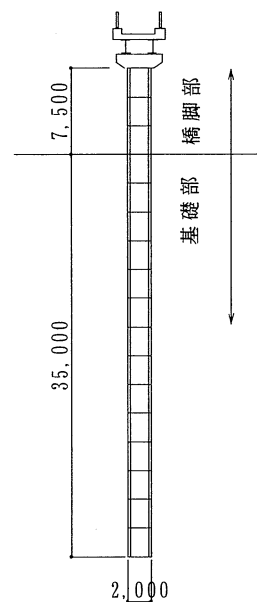
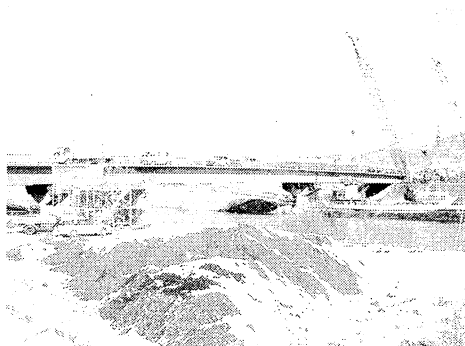
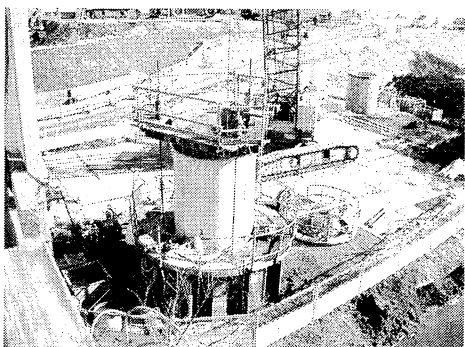


図-17 全体図

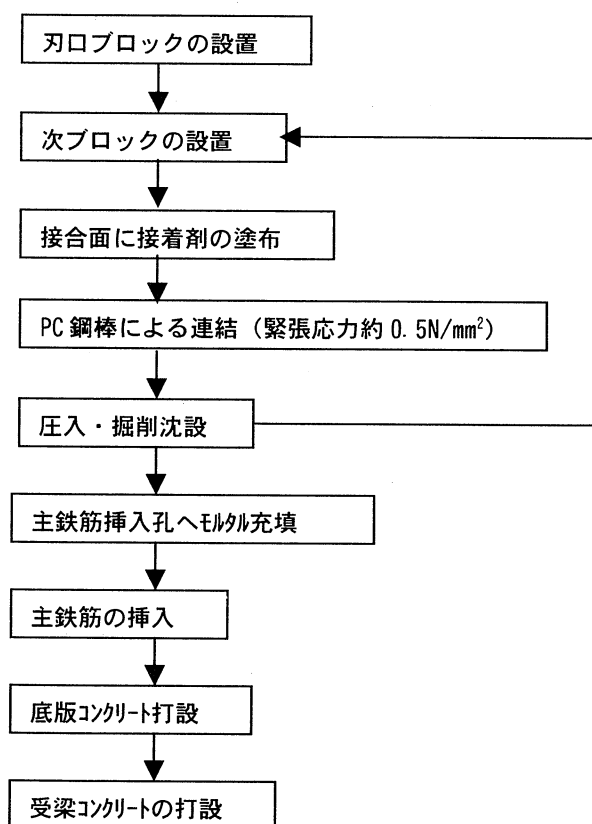


写真－９ 施工現場全景



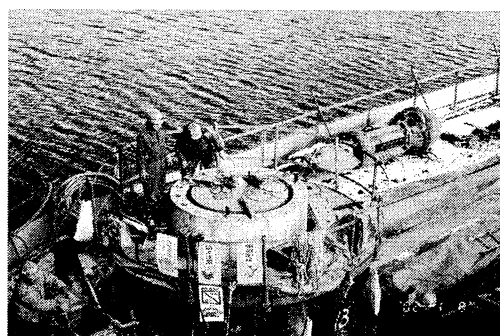
写真－１０ 圧入状況

図－１８に施工手順をフロー図を示す。

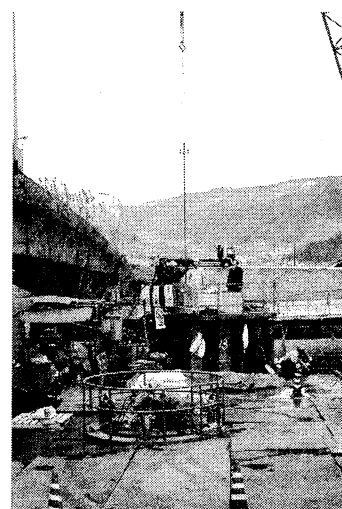


図－１８ 施工フロー図

また、写真－１１にモルタルの注入を写真－１２に長尺の鉄筋挿入状況を示す。また、施工時期は冬場であり気温がマイナス５℃以下に低下するため、予めシース内の温度を熱伝対で測定し、５℃以下の場合は温水によるモルタルの練混ぜおよび養生を行った。また、鉄筋挿入後も夜間の低温に備え十分な養生を行い、初期凍結が起こらないよう対処した。



写真－１１ モルタル注入状況



写真－１２ 鉄筋挿入

(2) 設計の概要

設計フローを図－１９に示す。図－１７に示す通り、地盤面を基礎と橋脚の境界とし、各々道路橋示方書に従って設計を行った。また、前記一連の試験よりコンクリートに鉄筋が定着された場合とモルタルに定着された場合と同じ付着性状を示し、通常のＲＣ構造と同様な挙動を示すことが確認でき、以下曲げと軸力の作用するＲＣ部材として設計を行った。

橋脚部と基礎部の境界の設定
破壊位置を設計上の地盤面とする。

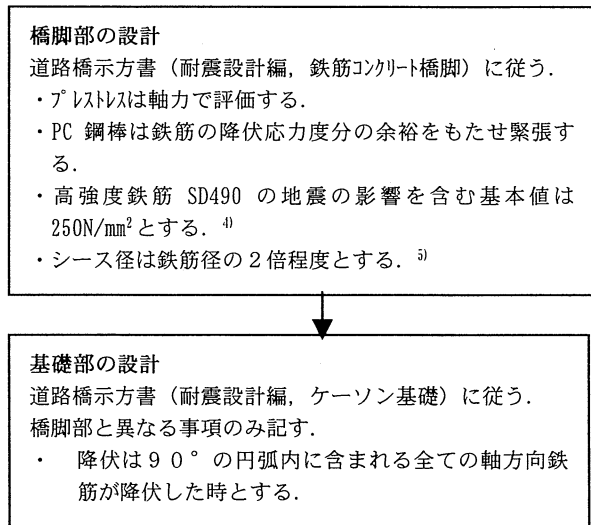


図-19 設計フロー図

(3) 組立て試験および水密性試験

施工に先立ち，実際に使用されるプレキャストブロックを使用し，組立て精度試験および接合部の水密性試験を行った。

① 組立て試験

プレキャストブロックを2段積層し，その鉛直性および目地部の隙間の計測を行った。試験要領図を図-20に，試験結果を表-2に示す。

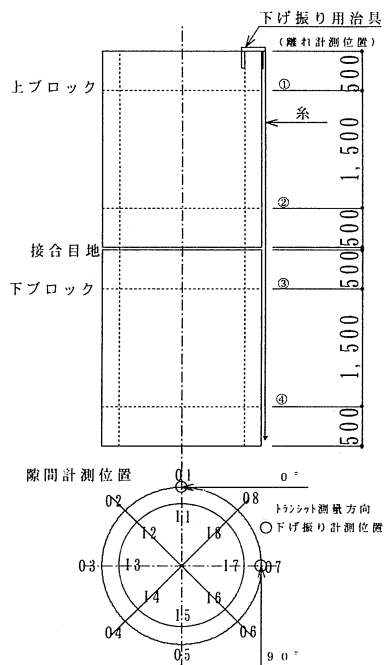


図-20 試験要領図

② 水密性試験

ブロック内部に貫通するシースの上下端を閉じ，上端より水を圧入し，接合部からの水漏れを観察した。接合部には接着剤（一液）を塗布し，水深40mを想定し0.4MPaまでの水圧を載荷した。

その結果，接合部からの漏水は見られず，実工事において40m沈設時においても外部からの水の浸

表-2 試験結果

隙間 (mm)				下げ振りの離れ (mm)	
位置	外側	位置	内側	位置	
○1	0.8	Ⅰ1	0	0°	① 0
○2	0	Ⅰ2	0		② -2
○3	0	Ⅰ3	0		③ -1
○4	0.3	Ⅰ4	0		④ -2
○5	0.5	Ⅰ5	0.2	90°	①' 0
○6	0.4	Ⅰ6	0		②' 2
○7	0.3	Ⅰ7	0		③' 1
○8	0	Ⅰ8	0		④' 2

入ならびに注入モルタルも漏出は無いことが確認された。

5. おわりに

平成4年より検討の始まったPCウェル工法PRC構造は，「主筋のモルタル定着に係る研究」，「PRCウェルの耐震性能試験」，「太径高強度鉄筋の定着試験」，「モルタルの材料および施工試験」等多数の実験を実施し，その力学的挙動を検証することによって確立された。平成13年には実工事を実施することによって，さらに施工面での裏付けを行うことができた。本工事によって，当初より目的としていた，「コスト縮減」・「工期短縮」をほぼ達成できたものと思われる。実際に，コストで約10%の縮減，工期で約5%の短縮が行えた。今後，さらにプレキャスト部材の製作・施工において改善を行い，技術の研鑽に努めたい。

最後に，終始ご指導頂いた八戸工業大学の塩井教授ならびに長谷川教授，高知工科大学の島教授に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上 温，熊谷治郎：RCプレキャストブロック式橋脚の施工，土木施工8巻8号，pp27-34.
- 2) 中井将博，塩井幸武，長谷川明，津田和義：PRCプレキャスト部材の一接合法に関する耐震性能試験，コンクリート工学，Vol.38,No.8,2000.8,pp33-39.
- 3) 中井将博，奥山和俊，梅田順治，津田和義：PcaPRC構造の変形性能向上に係る要因の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23,No.3,2001,pp1159-1164.
- 4) 仲谷邦博，木村祐司，上田喜史，山脇正史：高強度鉄筋SD490を使用した七色高架橋の計画と設計（上），橋梁と基礎，99-11，pp11-17.
- 5) 多田孔充，島弘，久野公德：プレキャスト部材のシース孔にグラウトで定着した鉄筋の付着性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18,No.2,1996,pp54-59.