

(154) 超高強度コンクリートの種類がPRCはりの曲げ耐荷特性に与える影響について

徳島大学 建設工学科 正会員 ○橋本 親典  
 群馬大学 建設工学科 正会員 辻 幸和  
 ドービー建設工業(株) 正会員 金井 昌義

1. はじめに

近年、コンクリート材料の技術は著しく発展し、シリカフューム、高粉末度高炉スラグ微粉末等の粉体材料、高性能減水剤、高性能 AE 減水剤などの混和剤の開発により、従来の高性能減水剤を用いた高強度コンクリートの配合とは大きく異なる、100N/mm<sup>2</sup>程度の超高強度コンクリートの製造が可能になってきた。

一方、田澤・宮澤らの研究において、セメントの水和の進行に起因した自己収縮の値が水セメント比が小さい範囲で大きくなり、これがひび割れ発生の主要原因となり得ること、この傾向が使用するセメントや混和材の種類によって大きく相違することが示されている<sup>1)</sup>。また、自己収縮は部材寸法や養生温度の影響を受けることも報告されているが、データが極めて少ないのが現状である<sup>2)</sup>。

したがって、最近の高性能 AE 減水剤を用い単位粉体量が多い高流動系の超高強度コンクリートは、従来の高性能減水剤を用い単位粗骨材量が多い高強度系の超高強度コンクリートと比較して、単にフレッシュ性が大きく異なるだけでなく、自己収縮量の増大に伴うひび割れ抵抗性や伸び能力が大きく異なるものと思われる。部材レベルでは、ひび割れ発生荷重やひび割れ幅や分散性状等に影響を及ぼすものと予想される。

著者らはこれまでに高性能 AE 減水剤とシリカフュームを用いて単位粉体量を増加させ、スランプフロー55cm 程度の高流動系の超高強度コンクリートを用いて、100N/mm<sup>2</sup> 程度の超高強度 PRC はりの曲げ耐荷特性に関する実験的研究を行ってきた<sup>3)</sup>。

本研究では、100N/mm<sup>2</sup> 程度の超高強度コンクリートの種類に着目し、高流動系と高強度系の超高強度コンクリートの配合が PRC はりの曲げ耐荷特性に与える影響について実験的に検討した。すなわち、高性能減水剤のみを用い単位水量を減らし、スランプ 10cm 程度の高強度系の超高強度コンクリートを用いて PRC はりを作製し曲げ載荷実験を行い曲げ耐荷特性を求め、高流動系の超高強度コンクリートを用いた PRC はりの曲げ耐荷特性と比較した。なお、PRC はりのプレストレスは、ポストテンション方式により導入し、高強度 PC グラウトを充て込んで PC 鋼より線とコンクリートとの付着力を期待した。

2. 実験概要

2.1 供試体および使用材料

実験に用いたポストテンション方式の PRC はり供試体の形状寸法を図-1 に示す。供試体は、400×250mm の矩形断面で、桁長さ 3600mm とし、引張鉄筋ならびに圧縮鉄筋として SD345 D13 鉄筋（公称断面積 126.7mm<sup>2</sup> ,降伏点 385N/mm<sup>2</sup> ,引張強さ 538N/mm<sup>2</sup> ,ヤング率 2.0×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>）を、PC 鋼材として SWPR7B

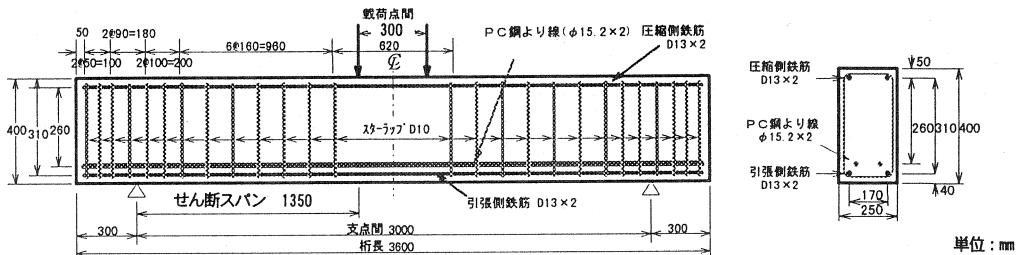


図-1 供試体の形状および寸法

7本より 15.2mm の PC 鋼より線 (公称断面積 138.7mm<sup>2</sup>, 引張荷重 273.6kN, 0.2% 永久伸びに対する荷重 241.2kN) を使用した。PC 鋼材によるプレストレスの導入方法がポストテンション方式のため, PC 鋼材の位置には薄板鋼板製φ42mm のシースを配置している。曲げ破壊に至る前にせん断破壊しないように, SD295A D10 鉄筋 (公称断面積 71.33mm<sup>2</sup>, 降伏点 383N/mm<sup>2</sup>, 引張強さ 535N/mm<sup>2</sup>, ヤング率 2.0×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>) をせん断スパン内に 160mm 間隔で配置した。また, はり端部の定着部付近には PC 鋼材の定着破壊を防止するために, D295A D10 鉄筋を支点外側 300mm の定着端部内に 4 本および支点内側 300mm のせん断スパン内に 3 本配置した。なお, 等曲げモーメント区間には, せん断補強鉄筋は配置していない。

研究に用いた供試体は全部で 4 体であり, うち高強度系の PRC はり 2 体を今回作製した。表-1 に供試体種別の詳細を示す。また, 供試体に用いたコンクリートの配合を表-2 に, グラウトの配合を表-3 に示す。構造体コンクリートの圧縮強度は, すべて 100N/mm<sup>2</sup> 以上である。

PRC 構造は, 通常の PC 構造物と異なり曲げひび割れの発生を許容し, ひび割れの挙動を使用限界状態までの範囲内として設計される。したがって, PRC 構造では, ひび割れ挙動は曲げ耐荷特性の重要な要因の一つである。このひび割れ挙動は緊張材の付着状態に大

表-1 供試体種別

番号	供試体名	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	グラウト強度 (N/mm <sup>2</sup> )	有効プレストレス量 (N/mm <sup>2</sup> )
1	高流動 80	111.2	48.3	898.5
2	高強度 80	107.8	42.2	898.5
3	高流動 50	106.6	48.3	562.8
4	高強度 50	105.4	33.7	562.8

きく影響を受け, 緊張材の付着状態に影響を及ぼす要因としては, 緊張材の引張ひずみの増分がある。当然のことながら, 導入されるプレストレス量が小さい場合は, 曲げひび割れ発生荷重が小さくなり, 同一曲げモーメントに対する緊張材の引張ひずみの増分は大きくなり, 有効プレストレス量が大きい場合と比較して, 小さな荷重レベルにおいて緊張材に発生する付着応力度が増大する。すなわち, 有効プレストレス量を減少させることにより, 小さな荷重レベルで緊張材の付着状態が曲げひび割れ性状に与える影響を顕著にさせることが可能となる。

本研究では, 有効プレストレス量を 898.5N/mm<sup>2</sup> と 562.8N/mm<sup>2</sup> の 2 種類に変化させ, コンクリートの配合による PRC はりの曲げひび割れ性状に与える影響を検討した。この 898.5N/mm<sup>2</sup> は, PC 鋼より線 1 本あたりの初期緊張力を, 0.2% 永久伸びに対する荷重の規格値である 222kN の約 80% である 171.6kN (171.6kN ÷ 222kN = 0.773) とし, 導入時直後ならびに実験載荷時までのプレストレスの減少を考慮して PRC はり中央断面位置で算出した有効プレストレス量である。導入時直後のプレストレスの減少は, 摩擦によるもの, コンクリートの弾性変形によるものとセット量によるものである。導入後から載荷時までのプレストレスの減少は, PC 鋼材のリラクゼーションによるものとコンクリートのクリープと乾燥収縮によるものである。PC 鋼より線のリラクゼーションによる減少, 弾性変形による減少, コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による減少や残留リラクゼーションによる減少等をすなわち, 171.6kN / 138.7mm<sup>2</sup> = 1242.8N/mm<sup>2</sup> と 898.5N/mm<sup>2</sup> の差が, 前述した各要因による減少プレストレス量である。同様に, 有効プレストレス量が 562.8N/mm<sup>2</sup> は, 初期緊張力を 0.2% 永久伸びに対する荷重の規格値である 222kN の約 50% である 115.8kN / 本 (115.8kN ÷ 222kN = 0.522) とし, 各要因による初期導入プレストレスの減少量を考慮して, PRC はり中央断面位置で有効に作用するプレストレス量である。以後, 有効プレストレス量が 898.5N/mm<sup>2</sup> および 562.8N/mm<sup>2</sup> を導入した PRC はり供試体を, それぞれ「プレストレス導入率 80% の供試体」および「プレストレス導入率 50% の供試体」と称する。

コンクリートの配合は, 高流動系と高強度系の 2 種類である。高流動系は, 水結合材比を 23%, シリカフューム(SF)置換率を 10%, 高性能 AE 減水剤の添加率を 2.2% (×C) とし, 目標スランプフローが 50±5cm の高流動コンクリートの配合である。高強度系は, 水セメント比を 25%, 単位水量を 138kg/m<sup>3</sup>, 高性能減

表-2 超高強度コンクリートの示方配合

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	Slump Flow / Slump (cm)	空気量 (%)	水結材比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (×C) (%)
						水 W	セメント C	混和材 S F	細骨材 S	粗骨材 G	
高流動	20	50±5	2±1	23	39	160	626	70	605	980	2.2
高強度	20	10±2	2±1	25	41	138	550		728	1096	1.75

水剤の添加率を 1.75% (×C) とし、目標スランプが 10±2cm の従来の高強度系のコンクリートの配合である。セメントは、早強ポルトランドセメント (比重 3.14, 比表面積 4500cm<sup>2</sup>/g) を使用し、細骨材および粗骨材は群馬県川場村産の砕砂 (表乾比重 2.63, 粗粒率 2.67) および砕石 (表乾比重 2.74, 粗粒率 6.61) を使用した。高流動系に用いたシリカフュームは、輸入代理店: エルケムジャパン(株), 商品名: ミックスタイプのものである。混和剤としては、高流動系はポリカルボン酸塩と変性リグニンを主成分とするポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤の標準形を用いた。また、高強度系は、アルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤を用いた。練混ぜ水は、上水道水を用いた。

グラウト強度は、土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] の [27.2.6 PC グラウト<sup>4)</sup>] では、圧縮強度が 20N/mm<sup>2</sup> 以上と規定されている。しかしながら、本実験では、PRC はりの構造体コンクリートの圧縮強度が 100N/mm<sup>2</sup> 以上で通常のコンクリートと比較して相当高

表-3 高強度 PC グラウトの配合および諸性状

水セメント比 (%)	減水剤添加率 (%)	膨張材添加率 (%)	J A 漏斗流下時間 (秒)	膨張率 (%)	ブリーディング率 (%)
30	2.5	3.0	26	2.70	0.00

いたために、グラウト強度が 20N/mm<sup>2</sup> 程度では良好な付着性状が得られないものと考えられ、これまで著者らの研究成果に基づき<sup>5)</sup>、50N/mm<sup>2</sup> 程度とした。高強度 PC グラウトに用いたセメントは、シリカフューム混入セメント (比重 3.16, 粉末度約 6000cm<sup>2</sup>/g) であり、混和剤として水溶性ビニル共重合体を主成分とする高性能 AE 減水剤と遊離した酸化カルシウムを主成分とする高性能膨張材を用いた。練混ぜ水は、コンクリートと同様に上水道水を用いた。なお、高強度 PC グラウトの諸性状は、すべて土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] の [27.2.6 PC グラウト<sup>4)</sup>] で定められた品質基準を満たすものであった。

## 2.2 載荷および測定方法

載荷試験方法は、スパン 3000mm, 等曲げモーメント区間 300mm の 2点集中載荷とし、曲げひび割れが発生し引張鉄筋が降伏ひずみに達するまで静的単調増加で載荷した。その後一度荷重を除荷し、再びコンクリート圧縮縁が圧壊し、それ以上荷重が増加しなくなるまで載荷した。

載荷試験での各種測定はすべて荷重ステップ毎に行うこととし、等曲げモーメント区間のコンクリート圧縮上面 (5箇所), 引張下面 (5箇所) および引張鉄筋 (6箇所) に貼付したワイヤーストレインゲージにより、コンクリートの圧縮縁ひずみ, 引張縁ひずみおよび引張鉄筋のひずみを測定した。また、10cm ピッチで引張下縁から 5cm 上方の供試体側面位置に貼付したパイゲージ (7箇所) によって、等曲げモーメント区間のひび割れ幅を測定した。たわみは、スパン中央と両支点位置に変位計を設置し、相対変位として測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 曲げひび割れ発生荷重と最大荷重

供試体はすべて、曲げひび割れが発生し、引張鉄筋が降伏した後に、コンクリートの圧縮部の破壊によっ

て最大荷重に達し終局状態に至るといふ破壊性状を示した。各供試体の曲げひび割れ発生荷重と最大荷重を、実験値と解析値を合わせて表-4に示す。

表-4 各荷重レベルの実験値と解析値の比較

番号	供試体名	曲げひび割れ発生荷重の実験値 (kN)	曲げひび割れ発生荷重の解析値 (kN)	最大荷重の実験値 (kN)	最大荷重の解析値 (kN)
1	高流動 80	86.1	162.7	306	279.3
2	高強度 80	94.7	159.0	314	278.3
3	高流動 50	88.4	130.5	294	278.0
4	高強度 50	85.2	129.4	248	277.7

解析値は、PC 鋼材と周辺の構造体コンクリートの付着が完全であるという仮定のプレテンション方式のはりと同様に、完全付着状態として解析したものである。すなわち、通常のファイバーモデルを用いてコンクリートの最大圧縮縁ひずみを入力データとして各荷重レベルでのひずみ分布を平面保持の仮定から決定し、そのひずみ分布におけるコンクリート、鉄筋、PC 鋼材の力の釣合条件から抵抗モーメントを算出した。

解析に用いたコンクリート、鉄筋および PC 鋼より線の応力-ひずみ関係のモデルは、すべて土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕で提案されているモデルである。また、本解析ではコンクリートの引張応力を考慮し、最大引張応力を  $f_t = 0.58 f'_c{}^{2/3}$  (重力単位の式) とし、最大引張ひずみ  $\epsilon_t = 150 \mu$  と一義的に決定し、コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線の放物線形状と相似形の応力-ひずみのモデルを用いた。

解析に用いた材料特性値としては、コンクリートの圧縮強度と引張鉄筋の材料特性は実験値をそのまま用いた。PC 鋼より線の材料特性値である引張強度は、材料特性である引張荷重を PC 鋼より線の公称断面積で除した値、すなわち  $273.6 \text{ kN} / 138.7 \text{ mm}^2 = 1972.6 \text{ N/mm}^2$  を用いた。ただし、実際の PC 鋼より線の引張破壊時は、PC 鋼より線の断面積が公称断面積よりも相当減少するものと考えられ、引張強度はこの値よりも増加するものと思われるが、安全側の値としてこの値を用いた。

表-4 から、同一プレストレス導入率での各荷重レベルの実験値は、高流動系と高強度系で大きな差がなく、曲げひび割れ発生荷重や最大荷重に対して超高強度コンクリートの配合の種類は影響を及ぼさないことがわかる。

曲げひび割れ発生荷重の実験値が解析値よりもすべて小さいのは、実験値が等モーメント区間のはり下面に貼付したひずみゲージの急変点から決定するのに対して、最大引張ひずみ  $\epsilon_t = 150 \mu$  に達するまではひび割れは全く入らないとしコンクリート全断面が完全弾性体として取り扱っており、潜在的な欠陥を考慮していないためと思われる。

最大荷重の実験値が解析値よりも大きくなるのは、PC より線の引張強度の材料特性値を安全側に設定したためと思われる。ただし、高強度 50 の供試体の最大荷重の実験値が解析値を下回った理由は、PC 鋼より線とグラウトの付着状態が良好でなく完全付着状態ではなくなっていたためと思われる。

### 3.2 曲げひび割れ発生状況

本載荷実験で得られた最終ひび割れ状況を図-2 に示す。プレストレス導入率が 80%の方が、50%よりもひび割れ分散状況が良好である。これは、PC 鋼材のひずみの増分の違いによるものであり、50%の方が PC 鋼材とコンクリート、その間の PC グラウトに発生する付着応力が大きく、PC グラウトと PC 鋼材のずれであるひび割れが集中したものと考えられる。

一方、高流動系と高強度系のコンクリートの配合による差はほとんど見受けられない。したがって、最終ひび割れ発生状況に与える超高強度コンクリートの配合の影響はないと思われる。

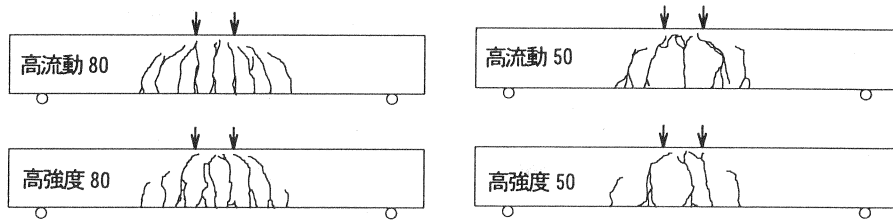


図-2 最終ひび割れ状況図

### 3.3 曲げひび割れ発生以前の曲げ挙動

図-3 は、載荷開始から曲げひび割れが発生する直前のコンクリートの最大引張縁ひずみと荷重の関係を示す。いずれのプレストレス導入率においても、高流動系と高強度系の配合による差異は見られなく、ほぼ一致する。一方、解析値は全体に引張剛性が高い。解析値に用いたコンクリートの引張特性のモデルが実際と異なるためと思われる。

高流動系は粉体量が増加しているために、伸び能力が小さいと考えられ、曲げひび割れ発生以前の引張剛性が高強度系と比較して大きいと思われるが、本実験の範囲では、その差はほとんどなく、曲げひび割れ発生以前の曲げ挙動に与える超高強度コンクリートの配合の影響はないと判断される。

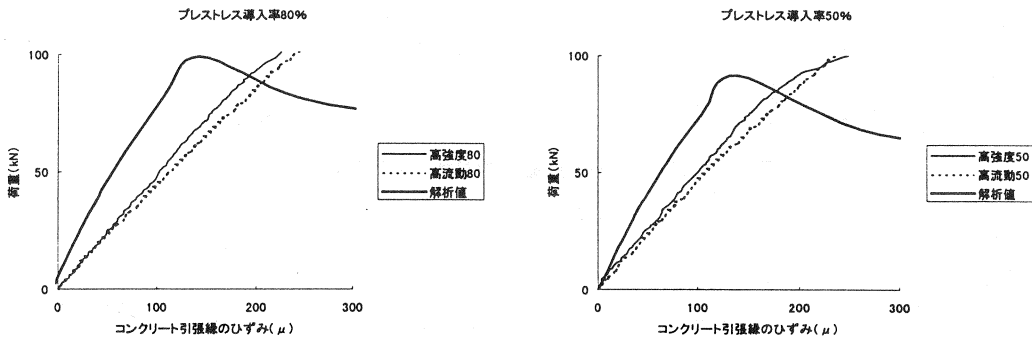


図-3 コンクリート引張縁のひずみと荷重の関係

### 3.4 曲げひび割れ発生以後の曲げ挙動

プレストレス導入率別に、7箇所のパイゲージのうち最大3カ所の平均曲げひび割れ幅と荷重の関係を図-4に示す。なお、ひび割れ発生前の100kN以下の曲げひび割れ幅の値は、等モーメント区間のパイゲージの測定間隔の弾性変形を意味し、ひび割れ幅ではない。プレストレス導入率80%、50%ともに、高流動系と高強度系でほとんど差がなく、ひび割れ幅が0.5mm以上では両者の曲線はほぼ一致する。ひび割れ幅が0.5mm以下の範囲においても、多少の差はあるものの有為な差と判断されるほどではない。当然の事ながら、ひび割れが発生した後は、配合による影響はないと判断される。

コンクリートの圧縮縁ひずみ5箇所の平均ひずみと荷重の関係を解析値と合わせて、プレストレス導入率別に図-5に示す。圧縮縁ひずみは、データの信頼性を考慮して3000 $\mu$ までとした。

プレストレス導入率50%の高強度系の場合を除いて、実験値はほぼ解析値と一致する。高流動50の実験値が大きく下回った理由は、PC鋼材の引張ひずみの増分が大きく、すべりが発生しPC鋼材の引張応力が完全付着状態の場合ほど増加しなかったためと思われる。したがって、曲げひび割れ発生以前と同様に、曲げひび割れ発生以後の曲げ挙動状況に与える超高強度コンクリートの配合の影響はないと思われる。

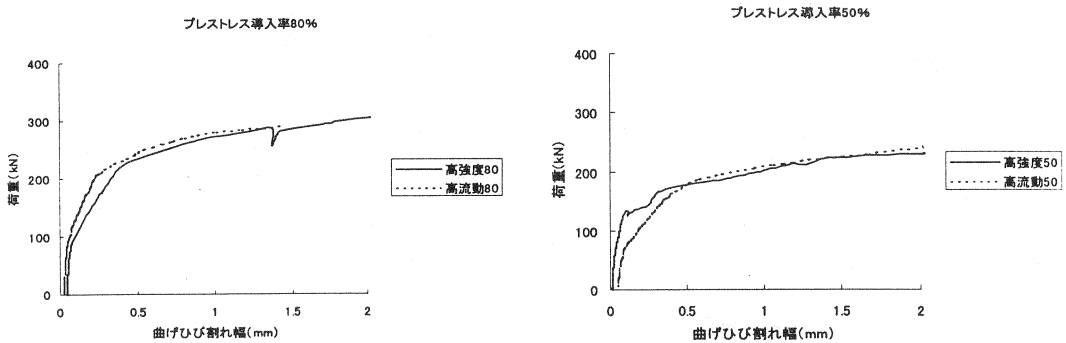


図-4 曲げひび割れ幅と荷重の関係

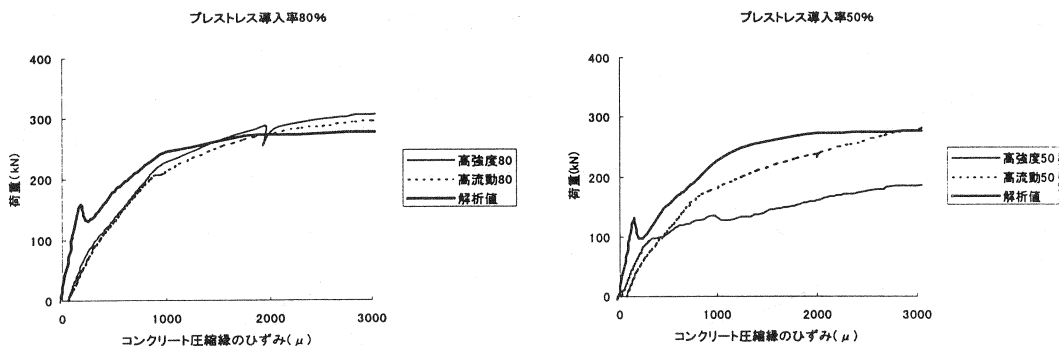


図-5 コンクリート圧縮縁のひずみと荷重の関係

#### 4. おわりに

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

高強度 PC グラウトを充てん材として用いたポストテンション方式の PRC はりの曲げ耐荷特性に対して、高性能減水剤のみを用い単位水量を減らし、スランプ 10cm 程度の単位粗骨材量が大きい高強度系の超高強度コンクリートと、高性能 AE 減水剤とシリカフェームを用い単位粉体量が大きく、単位粗骨材量が少ない高流動系の超高強度コンクリートの配合による影響はほとんどなく、同様な力学的挙動を示す。

謝辞 本研究の一部は、平成8年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)08650525, 研究代表者:辻幸和)を受けて行いました。また、実験の実施やデータのとりまとめを行うにあたり、群馬大学大学院修士2年横田隆雄氏、修士1年飯田尚志氏、ドービー建設工業(株)金井昭義氏(当時群馬大学工学部4年)および徳島大学大学院修士1年川口史浩氏のご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕「2.7 ひび割れ抵抗性」,pp.21～22,1996.3
- 2)土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕「3.2.7 収縮」,pp.26～28,1996.3
- 3)橋本親典・辻幸和・杉山隆文・金井昌義：100N/mm<sup>2</sup>級の超高強度 PRC はり部材の曲げひび割れ性状に関する実験的研究,プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,Vol.6, pp.103～108, 1996
- 4)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕「27.2.6 PC グラウト」,pp.293～296,1996.3
- 5)橋本親典・辻幸和・杉山隆文・金井昌義：高強度 PC グラウトを用いた PC 鋼より線の付着性状と PRC はりの曲げ性状,プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,Vol.5, pp.85～90, 1995