

## 論文 各種大型 PRC 桁の静的耐荷性状に関する実験的研究

今野久志\*1・佐藤昌志\*2・竹本伸一\*3・松岡健一\*4

要旨:耐衝撃性およびエネルギー吸収能に優れたPC覆工の部材設計法を確立することを目的として、PC鋼材の緊張率やひび割れ制御のための下縁異形鉄筋量を変化させた場合の大型 PRC 桁の静的耐荷性状やエネルギー吸収量に着目して静的載荷実験を行った。その結果、PC 鋼材の緊張率を低減させることによってせん断耐力も低減され、桁が曲げ破壊型からせん断破壊型に移行する可能性があること、下縁異形鉄筋量を約 2 倍に増加させることによって、最大荷重およびエネルギー吸収量を 10 % 程度増加させることができること等が明らかとなった。

キーワード: PRC 桁, PC 覆工, 緊張率, エネルギー吸収量

## 1. はじめに

海岸線や山岳部の道路には崩土・雪崩・落石災害から人命を守るため、また道路交通の安全を確保するために種々の道路防災工が施されている。落石対策工の一つである落石覆工構造物は、落石の発生しやすい急崖斜面が連続してせり出し、道路側方に余裕がない状況下で落石規模が大きく、落石防護柵等、他の落石防護工では効果が得られないと思われる場合に設けられている。落石規模が比較的小さい場合には鋼製覆工が、また落石規模が大きい場合には PC あるいは RC 覆工が用いられることが多い。これらの中で、PC 覆工は工場内で品質管理されて製作されたプレキャスト部材を現地で組み立てることにより施工されることから、今後の労働力不足の解消や工期短縮が可能であり需要が増加するものと予想される。これらのことから、筆者らはこれまでに PC 単桁試験体を用いた実験や、PC 多主桁による衝撃荷重載荷実験<sup>1)</sup>、さらに実規模 PC 覆工模型を用いた各種衝撃荷重載荷実験<sup>2),3),4)</sup>を行い、荷重分担率や動的応答倍率、さらに構造形式の違いによる耐衝撃挙動や終局耐力に関する検討を行ってきた。

一方、現行の PC 覆工部材は、PC 鋼材の降伏応力の 80 % 程度のプレストレスを導入することを前提として設計されているが、PC 覆工の自重による断面力が衝撃荷重を含む全断面力の 20 ~ 30 % であり、かつ落石による衝撃荷重に不確実性があることを考慮すると、部材の残存耐力や終局までのエネルギー吸収量を可能な限り大きくすることが重要である。その一つの方法として PC 鋼材の緊張率をある程度低減することが考えられる。このことから、筆者らは現行の力を基本とする PC 桁の設計思想に、エネルギー論的な考え方を導入した合理的な PC 桁の耐衝撃設計手法を確立することを目的として、PC 鋼材の緊張率や本数、ひび割れ制御用異形鉄筋量を変化させた各種 PRC 桁を用いた実験を行ってきた<sup>5),6)</sup>。

本研究では、上記小型 PRC 桁模型を用いた実験結果を基に、実 PC 覆工への PRC 部材の適用性を検討することを目的とし、その前段階として各種大型 PRC 桁を製作して静的載荷実験を行い、緊張率やひび割れ分散性向上のための異形鉄筋量を変化させた場合のエネルギー吸収能や耐荷性状について検討を行った。

\*1 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室研究員 工修(正会員)

\*2 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長 工博(正会員)

\*3 ドービー建設工業(株) 技術部 (正会員)

\*4 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博(正会員)

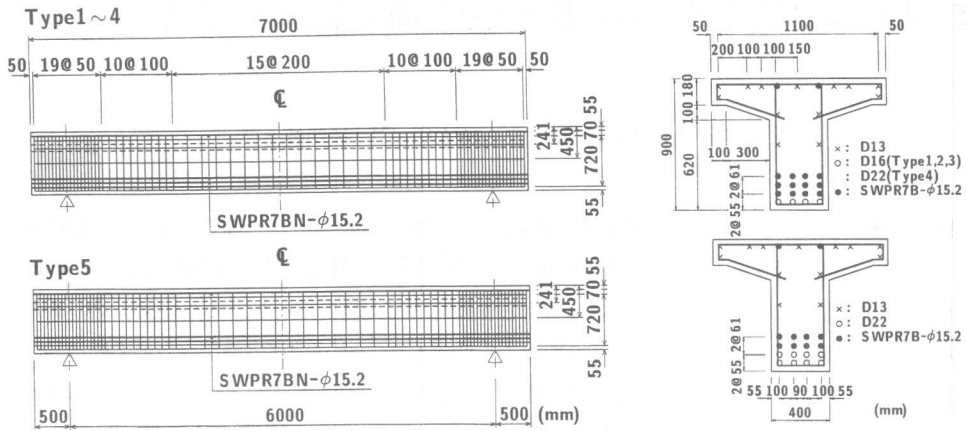


図-1 試験体の形状寸法および配筋図

表-1 試験体の一覧

試験体名	PC鋼材 緊張率(%)	PC 鋼材 本数	異形鉄筋 本数	有効緊張力 (kN/本)	換算 鋼材比
Type1 : P1.0×14-D16×4	100	14	D16×4	133.4	0.0157
Type2 : P0.5×14-D16×4	50	14	D16×4	67.7	0.0157
Type3 : P0.25×14-D16×4	25	14	D16×4	33.3	0.0157
Type4 : P1.0×14-D22×4	100	14	D22×4	133.4	0.0174
Type5 : P1.0×10-D22×8	100	10	D22×8	133.4	0.0156

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体

図-1 に実験に使用した試験体の形状寸法および配筋を示している。試験体は、桁長 700 cm、ウェブ幅 40 cm、フランジ幅 120 cm、桁高 90 cm のプレテンション方式で製作した単純 T 型断面の PRC 桁である。用いた緊張材は、SWPR7BN-φ15.2 (公称断面積 138.7 mm<sup>2</sup>) である。この PC 鋼より線の公称引張荷重、降伏点荷重はそれぞれ 261 kN, 222 kN であり、使用状態における許容緊張力は 155 kN である。また、試験体下縁の軸方向異形鉄筋は SD345-D16 または D22 であり、圧縮側鉄筋およびスターラップには D13 を使用している。

表-1 には試験体の一覧を示している。試験体は PC 鋼材 1 本当当たりの有効緊張率 (以下、単に緊張率と呼ぶ)、PC 鋼材本数、ひび割れ制御用異形鉄筋本数をパラメータにとった全 5 体である。ここで、緊張率は 1 本当当たりの有効緊張力が 133.4 kN の場合を 100% として整理してい

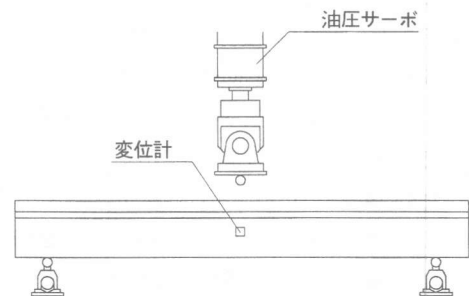


図-2 実験概要図

る。また、換算鋼材比は、コンクリート内の鋼材量を表す指標であり、鋼材過多による脆性破壊の防止に対する指標である。現在実際に施工されている落石覆工用の標準設計 PC 桁の換算鋼材比は 0.0128~0.0256 程度の範囲に分布しており<sup>7)</sup>、本試験体の換算鋼材比は 0.016 程度で上記範囲内の値となっている。表中の試験体名は、PC 鋼材の緊張率、PC 鋼材の本数、異形鉄筋径および本数の順に並べ記号化している。コンクリートは、設計基準強度が 58.8 MPa、実験時の平均圧縮強度が 70.8 MPa、弾性係数が 35.3 GPa である。な

表-2 断面分割法による解析結果

Type	Type1	Type2	Type3	Type4	Type5
総緊張力 (kN)	1867.2	947.3	466.8	1867.2	1333.7
初期上縁ひずみ ( $\mu$ )	20	10	5	19	1
初期下縁ひずみ ( $\mu$ )	-183	-93	-46	-181	-108
ひび割れ発生荷重 (kN)	731.6	459.0	260.9	751.4	529.6
下縁鋼材降伏荷重 (kN)	1155.2	823.8	614.9	1292.5	1222.9
曲げ耐力 (kN)	1630.8	1630.8	1630.8	1786.8	1590.6
せん断耐力 (kN)	1871.1	1353.3	1082.7	1926.0	1555.3
せん断余裕度	1.15	0.83	0.66	1.08	0.98

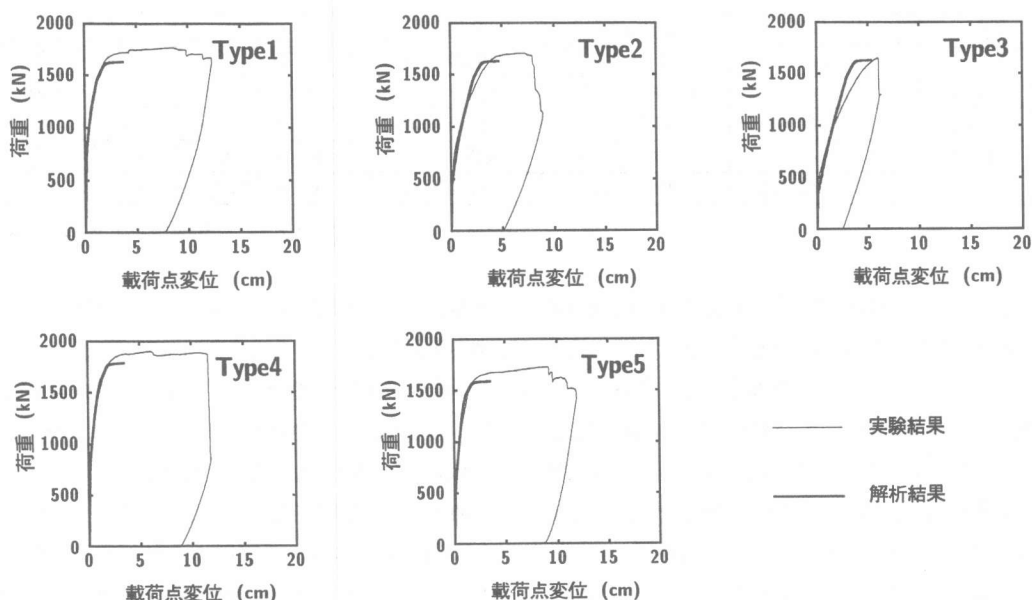


図-3 荷重-載荷点変位曲線

お、実験はコンクリート打設後 107 ~ 115 日経過後に行っている。

## 2.2 実験方法および計測項目

図-2 に静的載荷実験の概要を示している。実験は、静的最大荷重 2,942 kN の油圧サーボ試験機を用いて行った。載荷は 0.1 mm/sec の変位制御で行い、降伏後除荷状態になるか最大変位が純スパンの 1/50 程度に達した状態を終局と見なし、その後除荷し終了させた。試験体は、純スパン 6 m で単純支持し、 $\phi 50$  mm の丸鋼を用いてスパン中央部にて軸直角方向に線載荷している。計測項目は、載荷荷重の他、載荷点位置の桁中央部に設置したレーザ式変位計による試験体変位である。また、実験終了後にひび割れ状態も記録している。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 実験結果と解析結果の比較

表-2 に断面分割法を用いて計算した初期の上下縁ひずみ、各段階の荷重および曲げ耐力、さらに土木学会コンクリート標準示方書に基づいて評価したせん断耐力、せん断余裕度を一覧にして示している。ここで、せん断余裕度は曲げ耐力に対するせん断耐力の比を示している。なお、断面分割法は断面方向の分割数を 177 とし、材料試験結果と土木学会コンクリート標準示方書に準拠して各材料の応力-ひずみ関係および終局状態を設定し解析を行っている。表より Type2, 3 のせん断余裕度は緊張力の低減により、それぞれ 0.83, 0.66 と小さくなっていることが分かる。

表-3 実験結果と解析結果(断面分割法)の比較

Type	実験結果			解析結果		
	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (cm)	$E$ (kJ)	$P_{ua}$ (kN)	$\delta_{ua}$ (cm)	$E_a$ (kJ)
Type1	1761.3 (1.08)	12.38 (3.35)	174.5 (3.28)	1630.8	3.7	53.1
Type2	1700.5 (1.04)	9.02 (1.92)	110.5 (1.79)	1630.8	4.7	61.8
Type3	1642.6 (1.01)	6.20 (1.17)	53.6 (0.81)	1630.8	5.3	65.9
Type4	1896.6 (1.06)	11.96 (3.42)	198.9 (3.68)	1786.8	3.5	54.1
Type5	1719.1 (1.08)	11.98 (3.33)	169.4 (3.44)	1590.6	3.6	49.2

( ): 解析値に対する実験結果の比

表-4 実験結果の比較

Type	$P_{cr}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (cm)	$E$ (kJ)
Type1	1137.6 (1.00)	1549.5 (1.00)	1761.3 (1.00)	12.38 (1.00)	174.5(1.00)
Type2	725.7 (0.64)	1118.0 (0.72)	1700.5 (0.97)	9.02 (0.73)	110.5 (0.63)
Type3	490.3 (0.43)	941.4 (0.61)	1642.6 (0.93)	6.20 (0.50)	53.6 (0.31)
Type4	1176.8 (1.03)	1706.4 (1.10)	1896.6 (1.08)	11.96 (0.97)	198.9 (1.14)
Type5	823.8 (0.72)	1549.5 (1.00)	1719.1 (0.98)	11.98 (0.97)	169.4 (0.97)

( ): Type1 を基準値とした場合の値

図-3は、実験により得られた荷重-変位曲線と断面分割法により求めた解析結果を比較して示している。なお、断面分割法による載荷点変位は、半スパンを10分割し、曲率の線形変化を仮定して算定している。図より、いずれの試験体に関しても、実験結果の最大荷重  $P_u$  は解析結果に近い値を示している。しかしながら、実験結果の最大変位  $\delta_u$  は解析結果よりも大きく示されている。この傾向はせん断余裕度の大きい桁で著しい。Type1~3における  $\delta_u$  を比較すると、せん断余裕度が小さくなるにつれてその値も小さくなる傾向を示している。これは、後述するひび割れ状況からも明らかのように、解析結果の曲げ耐力が三者で相等しいものの、緊張率の低減によってせん断余裕度が1.0より小さい場合にはこの値に対応して曲げ耐力に至る前に脆性的なせん断破壊の傾向を示すことを暗示している。後述の表-3より、詳細に最大荷重を見ると、Type1の場合は断面分割法による解析結果よりも8%程度大きく、Type3の場合はそれとほぼ同程度の値となっている。これより、曲げ耐力、せん断耐力とも解析結果は実験結果に対して過小評価の傾向にあるものと推察される。また、Type3を除いた実験結果および解析結果の荷重-変位曲線は、ひび割れ

発生後の下縁鋼材の降伏点近傍までは両者とも類似の挙動を示していることが分かる。一方、Type3の場合には他の試験体より荷重レベルの低い段階からせん断破壊的な挙動を示しており、解析値との間で差が出たものと考えられる。

表-3は、実験結果の最大荷重  $P_u$ 、最大変位  $\delta_u$  およびエネルギー吸収量  $E$  を解析結果と比較して示している。なお、解析結果のエネルギー吸収量  $E_a$  は、断面分割法によって得られた荷重-変位曲線において最大荷重状態で変位が完全に残留し除荷されるものと仮定して求めたものである。表中の( )は解析値に対する実験値の割合を示している。表より、実験値の  $P_u$  は解析値に比較して約10%程度大きな値を示している。また、最大変位  $\delta_u$  はType3が17%程度解析値よりも大きい値を示しているが、その他4試験体の  $\delta_u$  は解析値の1.9~3.4倍と大きく異なっている。これは、前述のようにType3が緊張率の低減により、せん断耐力も低下しせん断破壊型特有の脆性的な変形性状を示して終局に至ったためと判断される。

### 3.2 耐力およびエネルギー吸収能に関する比較検討

表-4には、実験より得られたひび割れ発生荷重  $P_{cr}$ 、下縁鋼材降伏荷重  $P_y$ 、最大荷重  $P_u$ 、最

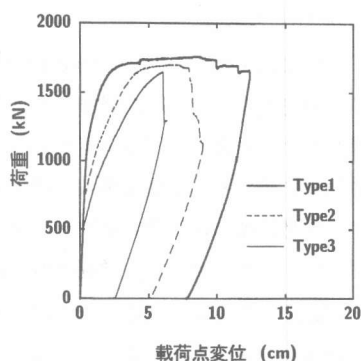


図-4 荷重-変位曲線の比較 (緊張率)

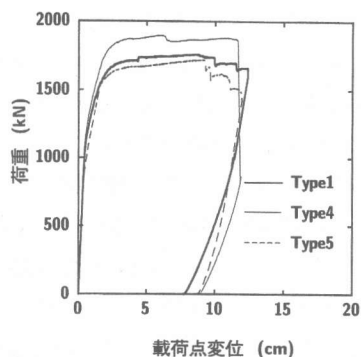


図-5 荷重-変位曲線の比較 (鉄筋量)

大変位  $\delta u$  およびエネルギー吸収量  $E$  を一覧にして示している。比較を容易にするために、各項目に関し Type 1 の値を基準に無次元化した値を括弧で示している。以下、図-4、5 とともに各組み合わせごととに考察を行う。

### (1) 緊張率の違いによる比較

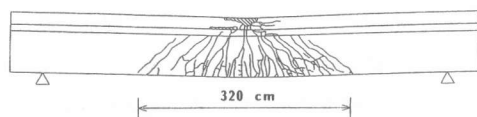
図-4には、鋼材配置が同一でPC鋼材の緊張率のみ異なる Type1~3 試験体の荷重-変位曲線を示している。緊張率を50%、25%と低減することによって、ひび割れ発生荷重  $P_{cr}$  の値は緊張率100%の場合に比較し、それぞれ64%、43%に減少している。また、下縁鋼材降伏荷重  $P_y$  についても緊張率を低減することによって72%、61%に減少する。しかしながら、最大荷重  $P_u$  に関してはそれぞれ97%、93%となっており、緊張率100%の場合とほぼ同程度の大きさとなっている。最大変位  $\delta u$  に関しては緊張率の減少とともに小さな値となっている。特に緊張率25%(Type3)の場合には、せん断破壊が卓越することにより、緊張率100%(Type1)の1/2になっている。

### (2) 鉄筋量の違いによる比較

図-5には、緊張率が100%で、下縁異形鉄筋径を Type1 の D16 から D22 に換えた場合(鉄筋比約2倍, Type4) および最下段のPC鋼材を D22 の異形鉄筋に置き換えた場合 (Type5) の荷重-変位曲線を Type1 の結果と比較して示している。ひび割れ発生荷重  $P_{cr}$  については、Type5 の場合が Type1 に比較して72%と低下しているが、下縁鋼材降伏荷重  $P_y$ 、最大荷重  $P_u$ 、最大変位  $\delta u$ 、

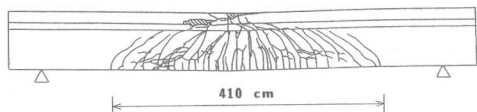
### Type 1

P1.0×14-D16×4



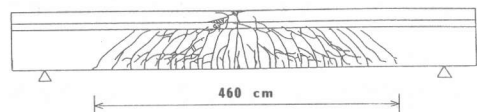
### Type 2

P0.5×14-D16×4



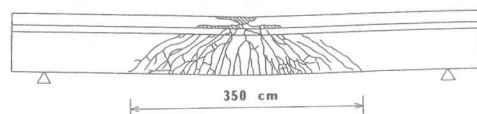
### Type 3

P0.25×14-D16×4



### Type 4

P1.0×14-D22×4



### Type 5

P1.0×10-D22×8

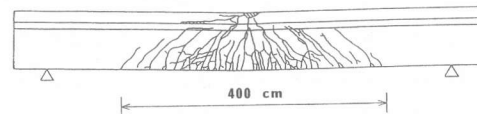


図-6 実験終了後のひび割れ状況

エネルギー吸収量  $E$  は両者ともほぼ同様の値となっている。Type4に関しては、 $P_{cr}$ 、 $\delta u$  は Type 1 と同程度の値であるが、 $P_y$ 、 $P_u$ 、 $E$  については10%程度増加している。

### 3.3 ひび割れ状況

図-6には実験終了後のひび割れ状況を示して

いる。いずれの試験体も下縁に曲げひび割れが多数発生し、載荷点部の圧壊 (Type1, 4, 5) あるいは載荷点部から左側支点部へ向かうせん断ひび割れ (Type2, 3) によって終局に至っていることがわかる。試験体下縁のひび割れ分散幅について比較すると、PC 鋼材量、異形鉄筋量が同一で緊張率のみが異なる Type1, 2, 3 試験体では、緊張率が低くなるほどひび割れの分散幅が大きくなっていることがわかる。しかしながら、Type3 は変位が最も小さい状態で終局に至っていることから、せん断破壊型であることが示されている。また、緊張率が同一で下縁の異形鉄筋量が異なる Type1, 4, 5 の3試験体を比較すると、下縁の異形鉄筋量が多くなるに従ってひび割れ分散幅が大きくなっていることが確認でき、異形鉄筋量の増加によるひび割れ分散効果が確認できる。特に、Type5 は緊張力の低減と下縁異形鉄筋量の増加の両方の影響が現れている。

#### 4. まとめ

耐衝撃性およびエネルギー吸収能に優れた PC 覆工の部材設計法を確立することを目的として、PC 鋼材の緊張率やひび割れ制御のための下縁異形鉄筋量を変化させた場合の大型 PRC 桁の静的耐荷性状やエネルギー吸収量に着目して静的載荷実験を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりとなる。

- 1) 鋼材量が同一の場合には PC 鋼材の緊張率を減少させることによってせん断耐力も低下するため、桁が曲げ破壊型からせん断破壊型に移行し、エネルギー吸収量の減少とともに桁の靱性が小さくなる可能性がある。
- 2) 本実験では、下縁異形鉄筋量を約 2 倍に増加させることにより、最大荷重およびエネルギー吸収量を 10% 程度増加させることができた。
- 3) 緊張率を低減すること、あるいは下縁異形鉄筋量を増加させることによって、ひび割れの分散幅を大きく改善することができる。しかしながら、緊張率の低減によって最終的にせん断破壊を呈する可能性があることも考慮す

ることが必要である。

今後は、さらに本 PRC 桁を用いた衝撃載荷実験を行い、本研究成果も含め耐衝撃挙動やエネルギー吸収量等について検討を行う予定である。

本論文の作成に当たり、室蘭工業大学建設システム工学科岸徳光教授には、その都度適切なご指導を戴きました。また、同大学大学院生の佐藤大君はじめ、建設システム工学科構造力学研究室の学生諸君に多大なご協力を戴きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 菅田紀之, 中野 修, 岸 徳光, 三上 浩 : PC 多主桁上に設置した新素材を用いた RC 版を有する緩衝構造の緩衝特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.941 ~ 946, 1993.6
- 2) 西 弘明, 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一 : 敷砂緩衝材を用いた実規模 PC 落石覆工の衝撃挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.691 ~ 696, 1995.6
- 3) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一 : 三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1347 ~ 1356, 1996.3
- 4) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一 : 実規模 PC 覆工モデルの耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1851 ~ 1860, 1998.3
- 5) 竹本伸一, 岸 徳光, 佐藤昌志, 三上 浩 : 各種 PRC 梁の静的及び衝撃耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No2, pp.1155-1160, 1997.6
- 6) 岸 徳光, 竹本伸一, 三上 浩, 今野久志 : T 型 PRC 梁の静的・衝撃耐荷性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1827-1838, 1998.3
- 7) 建設省土木研究所, (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 : PRC 製ロックシェッドの設計法に関する共同研究報告書, 1996.3