

論文 せん断余裕度を変化させた大型 PRC 桁の静載荷実験

今野久志*1・池田憲二*2・岸 徳光*3・竹本伸一*4

要旨: 高耐力およびエネルギー吸収性能に優れた落石覆工用 PC 部材を開発することを目的として、耐衝撃性検討の前段階として、せん断余裕度、PC 鋼材の有効緊張率や下端筋鋼材の種類を変数に取った大型 PRC 桁に関する静載荷実験を実施した。その結果、せん断余裕度を現行設計と同程度とし PC 鋼材の有効緊張率を現行の 1/2 程度とすることによって靱性能を大きく向上させることが可能であること、下端異形鉄筋を高強度 PC 鋼棒に代えることによって最大荷重およびエネルギー吸収量を 50 % 以上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, せん断余裕度

1. はじめに

落石防護工の一つである落石覆工には、主に RC 製と PC 製が採用されている。著者らは、これまでに高性能の緩衝材の開発を含め、これらの各構造物に関する合理的な耐衝撃設計法を確立するための研究を継続的に実施しており、RC 覆工に関しては耐衝撃挙動を考慮した設計手法を提案している¹⁾。PC 覆工に関しても、単桁や多主桁に関する衝撃荷重載荷実験²⁾、さらに実規模覆工模型を用いた各種衝撃荷重載荷実験³⁾を行い、桁の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、PC 覆工は RC 覆工に比較して施工性には優れているものの、プレストレス力の導入により靱性能の劣ることが指摘されている。しかしながら、今後の労働者不足への対応や工期短縮の観点から、益々需要が伸びる構造形式であることより、残存耐力や終局までのエネルギー吸収能を向上させる技術を確立することが緊急の課題となっている。

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。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 % であることを考慮すると、理論的には PC 鋼材の緊張率を低減することや、PC 鋼材量を低減して異形鉄筋量を増加させ、残存耐力やエネルギー吸収量を増加させることも考えられる⁴⁾。また、覆工用 PC 桁は、現場への運搬上の制約から断面寸法がある程度制限される。限られた断面寸法で耐荷力を向上させるためには、異形鉄筋の代わりに高強度の鋼材を使用することも有効な一つの方法であるものと推察される。

このような観点から、本研究では鋼材配置を同一とし PC 鋼材の緊張率のみ低減した場合や、せん断余裕度を現行設計と同程度とし、PC 鋼材の緊張率を低減した場合、および緊張率を低減せずにせん断余裕度のみを向上させた場合、さらには下端異形鉄筋の代わりに総ネジ PC 鋼棒を使用した場合の各種大型 PRC 桁を製作して、耐衝撃性検討の前段階としての静載荷実験を行い、静的な耐荷性状やエネルギー吸収量について比較検討を行った。

*1 北海道開発土木研究所 主任研究員 構造研究室 工修 (正会員)

*2 北海道開発土木研究所 室長 構造研究室 (正会員)

*3 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)

*4 ドーピー建設工業 (株) 北海道本店 副部長 設計部 (正会員)

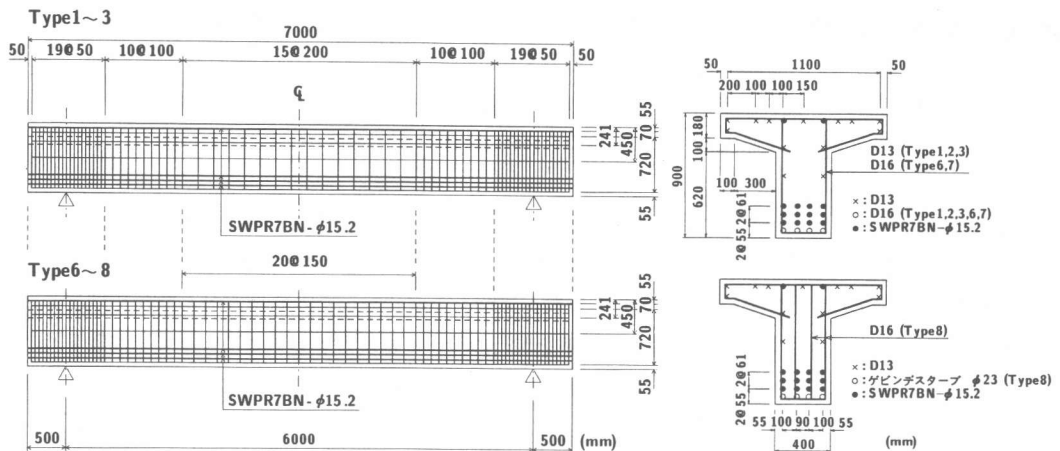


図-1 供試体の形状寸法および配筋図

表-1 供試体一覧

供試体名	PC 鋼材 緊張率	PC 鋼材 本数	下端筋鋼材 種類・径*1	下端筋鋼材 本数	有効緊張力 (kN/本)	総緊張力 (MN)	せん断 余裕度*2
Type1 P1.0-D16-S1.22	1.0	14	D16	4	133.3	1.87	1.22
Type2 P0.5-D16-S0.90	0.5	14	D16	4	67.2	0.94	0.90
Type3 P0.25-D16-S0.74	0.25	14	D16	4	33.4	0.47	0.74
Type6 P1.0-D16-S1.51	1.0	14	D16	4	133.3	1.87	1.51
Type7 P0.5-D16-S1.22	0.5	14	D16	4	67.2	0.94	1.22
Type8 P0.5-G23-S1.22	0.5	14	G23	4	67.2	0.94	1.22

注) *1 D: 異形鉄筋, G: 総ネジ PC 鋼棒 *2 せん断耐力 / 曲げ耐力 (表-2 参照)

2. 実験概要

2.1 供試体

図-1には、本実験に使用した供試体の形状寸法および配筋状況を示している。供試体は、いずれも桁長 700 cm、ウェブ幅 40 cm、上フランジ幅 120 cm、桁高 90 cm のプレテンション方式で製作された単純 T 型断面の PRC 桁である。使用した PC 鋼材は、SWPR7BN - φ 15.2 (公称断面積 138.7 mm²) 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 154 kN である。また、下端に配筋されている軸方向異形鉄筋および総ネジ PC 鋼棒は、それぞれ SD345 - D16 (降伏強度 400 MPa) およびゲビンデスタープ φ 23 (母材部断面積 415.5 mm²、

降伏強度 1090 MPa) であり、圧縮側鉄筋には SD295A - D13 (降伏強度 361 MPa) を使用している。せん断補強筋に関しては Type 1 ~ 3 は全て SD295A - D13 であるが、Type 6 ~ 8 に関してはせん断余裕度を増加あるいは同程度に確保するためにスパン中央部 3 m の区間に対してせん断補強筋量を増加させている。

表-1には供試体の一覧を示している。供試体は、PC 鋼材 1 本当たりの有効緊張率 (以下、単に緊張率と呼ぶ)、下端筋鋼材の種類と径、せん断余裕度をパラメータにとった全 6 体である。ここで、緊張率は PC 鋼材 1 本当たりの有効緊張力 (クリープ、リラクゼーションを考慮して評価した緊張力) が 133.3 kN の場合を 1.0 として整理している。なお、表中の Type 1 ~ 3 供試

表-2 断面分割法による解析結果一覧

Type	Type1	Type2	Type3	Type6	Type7	Type8
総緊張力 (MN)	1.87	0.941	0.467	1.87	0.941	0.941
初期上縁ひずみ (μ)	21	10	5	21	10	10
初期下縁ひずみ (μ)	-188	-93	-46	-192	-93	-99
下縁コンクリート ひび割れ発生荷重 (kN)	730.6	459.0	260.9	734.0	474.6	464.2
下端筋鋼材降伏荷重 (MN)	1.15	0.824	0.615	1.16	0.811	1.65
曲げ耐力 (MN)	1.63	1.63	1.63	1.62	1.63	2.40
せん断耐力 (MN)	1.99	1.47	1.20	2.45	1.99	2.92
せん断余裕度	1.22	0.90	0.74	1.51	1.22	1.22

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_{max} (MN)	δ_u (cm)	E (kJ)	$P_{max,a}$ (MN)	δ_{ua} (cm)	E_a (kJ)
Type1	1.76 (1.08)	12.38 (3.35)	174.6 (3.28)	1.63	3.7	53.1
Type2	1.70 (1.04)	9.02 (1.92)	110.5 (1.79)	1.63	4.7	61.8
Type3	1.64 (1.01)	6.20 (1.17)	53.6 (0.81)	1.63	5.3	65.9
Type6	1.87 (1.15)	13.68 (3.80)	234.8 (4.61)	1.62	3.6	50.9
Type7	1.76 (1.08)	19.07 (4.15)	276.5 (4.57)	1.63	4.6	60.5
Type8	2.57 (1.07)	14.79 (3.79)	284.4 (4.24)	2.40	3.9	67.1

(): 解析値に対する実験値の比

体は、過去に実施した実験ケースと同一であり、Type 1 は現行設計法の下に製作した基準供試体である。供試体名は、PC 鋼材の緊張率、下端筋鋼材の種類と径およびせん断余裕度をハイフンで結び記号化している。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は Type 1 ~ 3 が 70.8 MPa、Type 6 ~ 8 が 67.4 MPa であった。

2.2 実験方法および計測項目

写真-1 は静的載荷実験の状況を示している。実験は、静的最大荷重 3 MN の油圧サーボ試験機を用い、幅 20.5 cm、厚さ 15 cm、長さ 146 cm の矩形鋼材を、スパン中央部の軸直角方向に線載荷となるように設置して実施している。また、実験は載荷速度 0.1 mm/sec の変位制御で行い、下端筋が破断し急激に除荷状態になった時点を終局と見なし終了している。なお、供試体は純スパン長 6 m で単純支持としている。計測項目は、ロードセルによる載荷荷重および支点反力、レーザ変位計による供試体各点の変位、ひずみゲージによる鉄筋ひずみである。また、実験終了後に

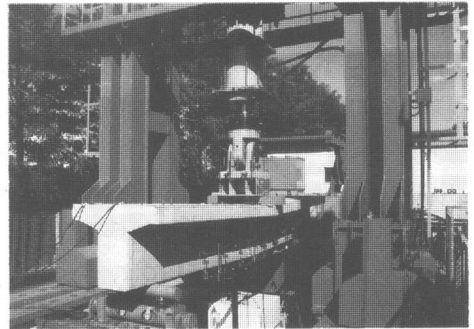


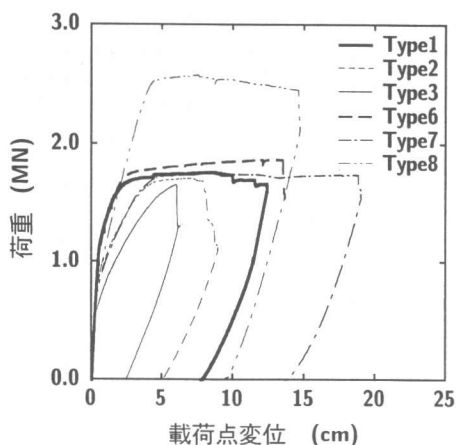
写真-1 実験状況

ひび割れ状況も記録している。

3. 実験結果と考察

3.1 各荷重レベルの実験結果と解析結果の比較

表-2 に断面分割法を用いて算定したプレストレス導入後の上下縁ひずみ、各段階の荷重および曲げ耐力、さらに鉄筋コンクリート部材としての寄与分を平成 8 年制定土木学会コンクリート標準示方書 (以下、単に示方書)、プレストレス力による寄与分を文献 5) に基づいて評価したせん



図一 荷重-載荷点変位曲線の比較

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である。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。

解析結果から,ひび割れ発生荷重は PC 鋼材の総緊張力に対応して変化しており, Type 1, 6 が約 730 kN, Type 2, 7, 8 が約 460 kN, Type 3 が約 260 kN となっている。下端筋鋼材の降伏荷重に関しては,下端筋として高強度 PC 鋼棒を用いた Type 8 が 1.65 MN と最も大きく,その他の供試体については総緊張力の低下とともに低減している。曲げ耐力に関しては, Type 8 が約 2.40 MN と最も大きく,その他の 5 供試体は全て 1.63 MN 程度となっている。せん断余裕度は, Type 1, 7, 8 が 1.22 であり, Type 2, 3 は Type 1 と鋼材配置が同一で PC 鋼材の緊張率のみを低減していることからせん断耐力も低下しており,安全余裕度はそれぞれ 0.90, 0.74 と小さくなっている。なお, Type 6 は Type 1 のせん断余裕度を 1.51 としたものである。表一 3 は,実験結果の最大荷重 P_{max} , 終局変位 δ_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,実験時の終局状態は前述のとおりであるが,解析結果の終局変位 δ_{ua} は圧縮縁ひずみが示方書で規定している 3500μ に達した時点

表一 4 実験結果の比較

Type	P_{max} (MN)	δ_u (cm)	E (kJ)
Type1	1.76 (1.00)	12.38 (1.00)	174.6 (1.00)
Type2	1.70 (0.97)	9.02 (0.73)	110.5 (0.63)
Type3	1.64 (0.93)	6.20 (0.50)	53.6 (0.31)
Type6	1.87 (1.06)	13.68 (1.10)	234.8 (1.34)
Type7	1.76 (1.00)	19.07 (1.54)	276.5 (1.58)
Type8	2.57 (1.46)	14.79 (1.19)	284.4 (1.63)

(): Type1 を基準値とした場合の値

の値とした。実験結果の最大荷重 P_{max} は, 図一 2 から明らかなように必ずしも終局時の値ではないが, 解析結果の最大荷重 $P_{max,a}$ は全て終局時の値となっている。実験結果のエネルギー吸収量 E は図一 2 に示される荷重-変位曲線の囲む面積より算定している。また, 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。

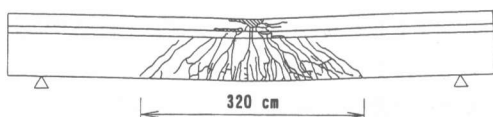
最大荷重に関しては, Type 2, 3 で実験結果と解析結果が類似の値を示している。しかしながら, その他の供試体は 10 ~ 15 % 程度の範囲で, 実験結果が解析結果よりも大きく示されている。また, 終局変位に関しては, Type3 の実験値が解析値に対して 17 % 程度大きい値を示しているが, その他の 5 供試体は実験値が解析値の 1.9~4.2 倍程度大きい。Type 2 および Type3 が他の供試体と異なった傾向を示すのは, 図一 2 の荷重-載荷点変位曲線からも明らかなように, 他の供試体が曲げ圧壊型の傾向を示すのに対して, これらの供試体は最大荷重到達後急激に除荷されるせん断破壊型の性状を示して終局に至るためと推察される。

エネルギー吸収量に関しては, 終局変位と同様の傾向を示していることがわかる。

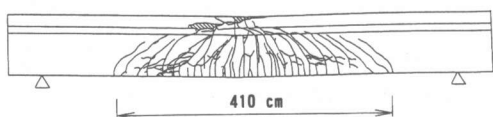
3.2 耐力およびエネルギー吸収量の比較

表一 4 には, 図一 2 あるいは表一 3 から求められる実験結果の最大荷重, 終局変位, エネルギー吸収量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内に示している。

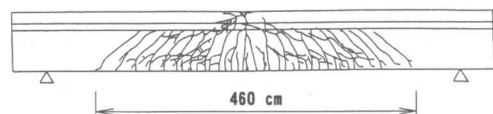
Type 1
P1.0-D16-S1.22



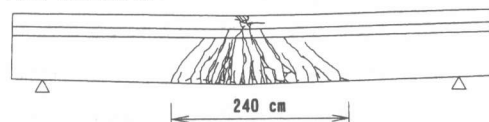
Type 2
PO.5-D16-S0.90



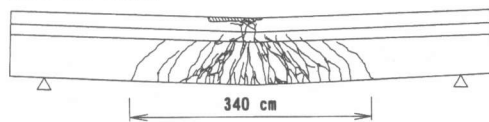
Type 3
PO.25-D16-S0.74



Type 6
P1.0-D16-S1.51



Type 7
PO.5-D16-S1.22



Type 8
PO.5-G23-S1.22

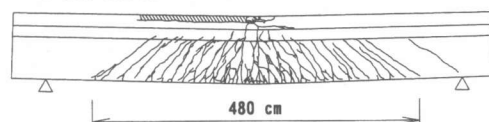


図-3 実験終了後のひび割れ状況

鋼材配置が同一で PC 鋼材の緊張率のみを低減させた Type 1 ~ 3 の荷重-変位曲線を比較すると、最大荷重は緊張率を 0.5, 0.25 と低減することによって緊張率 1.0 の場合に比較しそれぞれ 0.97, 0.93 と多少減少するものの、Type 1 とほぼ同程度の値を示している。終局変位は、緊張率を 0.5, 0.25 と低減することによって、それぞれ 0.73, 0.50 に低下している。これに伴い、エネルギー吸収量も 0.63, 0.31 と大きく低下している。これは、図-2 から明らかなように、緊張率の低減とともにせん断余裕度も 1 以下に低下しせん断破壊が卓越することによるものと考えられる。

一方、Type 2 のせん断余裕度を Type 1 と同一の 1.22 に向上させた Type 7 の場合には、最大荷重が Type 1 と同じであるものの、終局変位およびエネルギー吸収量がそれぞれ 1.54, 1.58 と向上しており、せん断余裕度を現行設計と同程度とし PC 鋼材の緊張率を低減することによって、靱性能を大きく改善できることが分かる。

次に、基準供試体である Type 1 に対して、せん断余裕度を 1.22 から 1.51 に向上させた Type 6 の場合には、最大荷重、終局変位、エネルギー吸収量ともそれぞれ 1.06, 1.10, 1.34 と向上し

ているが、前述の緊張率を低減した Type 7 の場合に比較して終局変位に関する向上効果は小さい。

せん断余裕度を 1.22 とし PC 鋼材の緊張率を 0.5, 下端異形鉄筋を総ネジ PC 鋼棒に代えた Type 8 の場合には、最大荷重が 1.46 と増加しており、下端筋鋼材を高強度材料とすることによる効果が現れている。一方、終局変位は、1.19 となっており、緊張率を同じく 0.5 とした Type 7 の場合の 1.54 に比較して増加割合は小さい。これは下端筋鋼材の応力-ひずみ関係の違いによるものと推察される。しかしながら、エネルギー吸収量は、最大荷重が大きく増加したことにより 1.63 を示し、Type 7 の増加割合よりも大きい。

以上より、せん断余裕度を現行設計と同程度とし PC 鋼材の緊張率を低減することによってエネルギー吸収量を大幅に増加することができ、靱性能を大きく改善可能であること、また下端異形鉄筋を高強度総ネジ PC 鋼棒とすることにより、最大荷重やエネルギー吸収能を大幅に改善できること、等が明らかになった。

3.3 ひび割れ状況

図-3 には実験終了後のひび割れ状況を示している。いずれの供試体も下縁に曲げひび割れが多数発生しているが、せん断余裕度が 1 以下であ

る Type 2 および Type 3 の場合には、荷点部から左側支点部に向かう斜めせん断ひび割れによって終局に至っている。一方、せん断余裕度が 1 以上である Type 1, 6, 7, 8 の場合には、荷点近傍のコンクリートが圧壊により剥離するとともに、最終的には下端筋の破断によって終局に至っている。

供試体下縁のひび割れ分散幅について比較すると、鋼材配置および PC 鋼材の緊張率が同一でせん断余裕度の異なる Type 1 と Type 6 および Type 2 と Type 7 では、いずれの場合もせん断余裕度を向上させることによってひび割れの分散幅が狭くなり角折れの傾向を示している。また、せん断余裕度が 1.22 と同一である Type 1, 7, 8 の分散幅を比較すると、PC 鋼材の緊張率を低減した場合あるいは下端筋鋼材を高強度材料とした場合がひび割れの分散範囲が広がっている。特に下端筋鋼材を高強度材料を用いた Type 8 の場合には、狭いピッチで多数のひび割れが発生しており、分散範囲もほぼ桁全体におよんでいる。また、Type 8 では曲げ耐力の増加と共に終局時の作用せん断力も増加するため、斜めひび割れが顕在化しているが、図-2からも明らかなように未だ曲げ破壊が卓越する荷重-変位分布特性を示している。これより、PC 鋼材の緊張率を 0.5 とし下端筋鋼材として総ネジ PC 鋼棒（ゲビンデスターブ）を用いる場合が、最もひび割れの分散性に優れていることが明らかになった。

4. まとめ

高耐荷力およびエネルギー吸収性能に優れた落石覆工用 PC 部材を開発することを目的として、せん断余裕度、PC 鋼材の緊張率や下端筋鋼材の種類を変数にとった大型 PRC 桁の静載荷実験を実施した。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) 鋼材配置が同一で PC 鋼材の緊張率のみを低減させる場合には、せん断余裕度も低下するため、桁が曲げ破壊型からせん断破壊型に移行し、エネルギー吸収性能の低下とともに桁の靱性能

も低下する。

- 2) せん断余裕度を現行設計による 1.22 から 1.51 に向上させる場合には、最大荷重や終局変位を 10 % 程度増加させることが可能であり、エネルギー吸収能も 30 % 以上向上する。
- 3) せん断余裕度を現行設計と同程度とし、PC 鋼材の緊張率を 0.5 とする場合には、最大荷重はほぼ同程度となるが、終局変位を 50 % 以上、エネルギー吸収能を 60 % 程度向上させることができ、靱性能を大きく向上させることが可能である。
- 4) せん断余裕度を現行設計と同程度とし、PC 鋼材の緊張率を 0.5、下端異形鉄筋を高強度総ネジ PC 鋼棒とする場合には、最大荷重を 50 % 程度増加させるとともに、エネルギー吸収能も 60 % 程度向上させることができる。

今後は、本研究結果を含め衝撃載荷実験による本 PRC 桁の耐衝撃挙動やエネルギー吸収能等について検討を行い、PRC 覆工部材の合理的な耐衝撃設計手法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計，構造工学シリーズ8，1998
- 2) 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
- 3) 佐藤昌志，西 弘明，岸 徳光，松岡健一：実規模 PC 覆工模型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
- 4) 今野久志，佐藤昌志，竹本伸一，松岡健一：各種大型 PRC 桁の静的耐荷性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.925-930，1999.6
- 5) 佐藤 勉，山住克己，渡邊忠明：プレストレストコンクリートはりのせん断強度，鉄道総研報告，Vol.2，No8，1988.8