

高強度鋼材を使用した落石覆工用 PRC 桁の重錘落下衝撃実験

FALLING-WEIGHT IMPACT TEST OF PROTOTYPE PRC BEAMS WITH HIGH STRENGTH REBAR FOR ROCK-SHEDS

岸 徳光*, 池田憲二**, 今野久志***, 竹本伸一****

Norimitsu KISHI, Kenji IKEDA, Hisashi KONNO and Shin-ichi TAKEMOTO

*工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**北海道開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

***工博 北海道開発土木研究所主任研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

****ドーピー建設工業(株) 北海道本店部長 設計部 (〒060-0001 札幌市中央区北 1 条西 6 丁目)

キーワード：PRC 桁，PC 覆工，高強度鋼材，重錘落下衝撃実験
(PRC girder, PC rock shed, high strength rebar, falling-weight impact test)

1. はじめに

著者らは、これまで小型矩形および T 型断面 PRC 桁模型を用いた実験^{1,2)}を行うとともに、それらの研究成果を基に、PRC 部材の実 PC 覆工への適用性を検討することを目的として、全長が 7 m、桁高 90 cm、上フランジ幅 120 cm で PC 鋼材の緊張比や PC 鋼材量、異形鉄筋量を変化させた実規模 PRC 桁を製作し、静載荷実験および衝撃荷重載荷実験を実施している^{3~9)}。その結果、1) 衝撃荷重載荷実験結果より、PC 鋼材の緊張率を従来からの値を 1.0 として 0.5 程度に低減することにより、最も効率的に耐衝撃性を向上させることができること、2) 下端筋を高強度鋼材とすることによって耐衝撃性を向上できること、3) 静載荷実験結果より、PC 鋼材の緊張比を減少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ためエネルギー吸収量が減少し、靱性が乏しくなること、等の知見が得られている。これより、PRC 桁の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには、まず静的なせん断余裕度（静的せん断耐力／静的曲げ耐力）を現行設計による PC 桁と同程度に確保しなければならないことが明らかとなっている。

このように、PRC 部材の耐衝撃性向上法も実規模レベルで大略把握されている。しかしながら、

これまでの単一載荷実験ではいずれの場合も終局に至っていないため、終局時近傍の耐衝撃性状については明らかとなっていない。耐衝撃性に優れた落石覆工用 PRC 桁を開発するためには、単一載荷実験により終局までの耐衝撃挙動を把握することが重要と考えられる。

このような背景より、本研究ではせん断余裕度を同程度とし 1) 従来からの設計法に従う場合を基準として、2) PC 鋼材の緊張比を 0.5 とする場合、3) PC 道路防災構造物マニュアル¹⁰⁾に基づき、ひび割れ分散のため下端筋を二段配置とする場合や、4) 下端筋鋼材として高強度鋼材を適用する場合、等の実規模 PRC 桁を取り上げ、いずれの考え方に基づいた PRC 桁が最も耐衝撃性に優れているかを検討することを目的として、3,000 kg の重錘を用いた単一重錘落下衝撃実験を試みた。

2. 実験概要

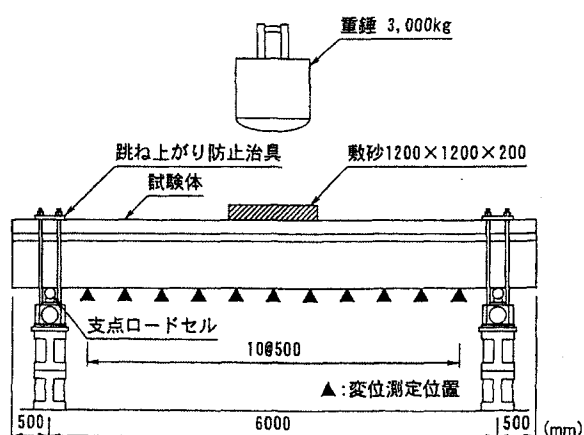
2.1 実験方法

図—1には実験状況の概略図を示している。試験体の純スパン長は 6 m である。また、両支点は試験体の跳ね上がりを防止しかつ回転を拘束しないように、鋼製の治具を用いてピン支持に近い構造としている。衝撃荷重は、直径が 1 m、質量 3,000 kg の重錘を所定の高さから桁のスパン中央部に

表－1 試験体一覧

試験体名	PC 鋼材 緊張比	PC 鋼材 本数	下端筋鋼材 種類・径×本数 ^{*1}	有効緊張力 (kN/本)	桁高 (cm)	曲げ耐力 (MN)	せん断耐力 (MN)	せん断 余裕度 ^{*2}
Type1	1.0	14	D16×4	133.3	90	1.53	1.99	1.30
Type7	0.5	14	D16×4	67.2	90	1.53	1.99	1.30
Type9	0.8	14	D16×8	106.6	90	1.55	2.01	1.30
Type10	0.5	14	G23×4	67.2	65	1.53	2.00	1.31

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



図－1 実験概要図

自由落下させることにより与えている。また、桁の載荷点部には局部破壊を防止するために 120×120 cm、厚さ 20 cm の敷砂緩衝材を設置している。

実験は、過去に実施した実験結果に基づき、残留変位が純スパン長（6 m）の 100 分の 1（6 cm）に達した時点を終局の目安として実施している。載荷方法は単一載荷とし、各試験体の耐衝撃性を直接比較するために落下高さを 22.5 m と固定している。

測定項目は、重錘加速度、両支点反力（以下、単に支点反力）、50 cm 間隔毎に設置したレーザ式変位計から得られる変位である。

2.2 試験体

表－1には本研究に用いた試験体の一覧を示している。試験体は、PC 鋼材の有効緊張力および緊張比、下端筋鋼材の種類と本数、せん断補強筋量を変化させた全 4 種類である。また、静的せん

断余裕度（静的せん断耐力/静的曲げ耐力）は各試験体間で同一としている。なお、せん断余裕度評価のための静的曲げ耐力は、後述の材料特性値を考慮し断面分割法を用いて算出している。また、静的せん断耐力はプレストレス力による効果を考慮し 11 示方書に準拠して評価している。各試験体は過去の実験ケースの連番としており、Type1 は本シリーズの基準となる試験体である。

Type7 は緊張比の影響を検討するための試験体であり、Type1 を基本とし、緊張比を 0.5 に低減したものである。

Type9 は PC 道路防災構造物マニュアルによる設計断面であり、緊張比を 0.8 とし、さらに下端筋鋼材を 2 段配置として鉄筋の依存度を高めたものである。

Type10 は下端筋鋼材を高強度材料とした場合の影響を検討するための試験体であり、緊張比を 0.5、下端筋を総ネジ PC 鋼棒とし、桁高を 65 cm としている。このため、本試験体は他 Type に対して約 20% の容積減となっている。

図－2には、試験体の形状寸法および配筋図を示している。いずれの試験体もプレテンション方式により製作された単純 T 型断面 PRC 桁である。また、桁長 700 cm、ウェブ幅 40 cm、上フランジ幅 120 cm であり、桁高は Type1, 7, 9 が 90 cm、Type10 が 65 cm である。使用した PC 鋼材は全て SWPR7BN-φ15.2（公称断面積 138.7mm²）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 およびゲビンデスターブ φ23（母材部断面積

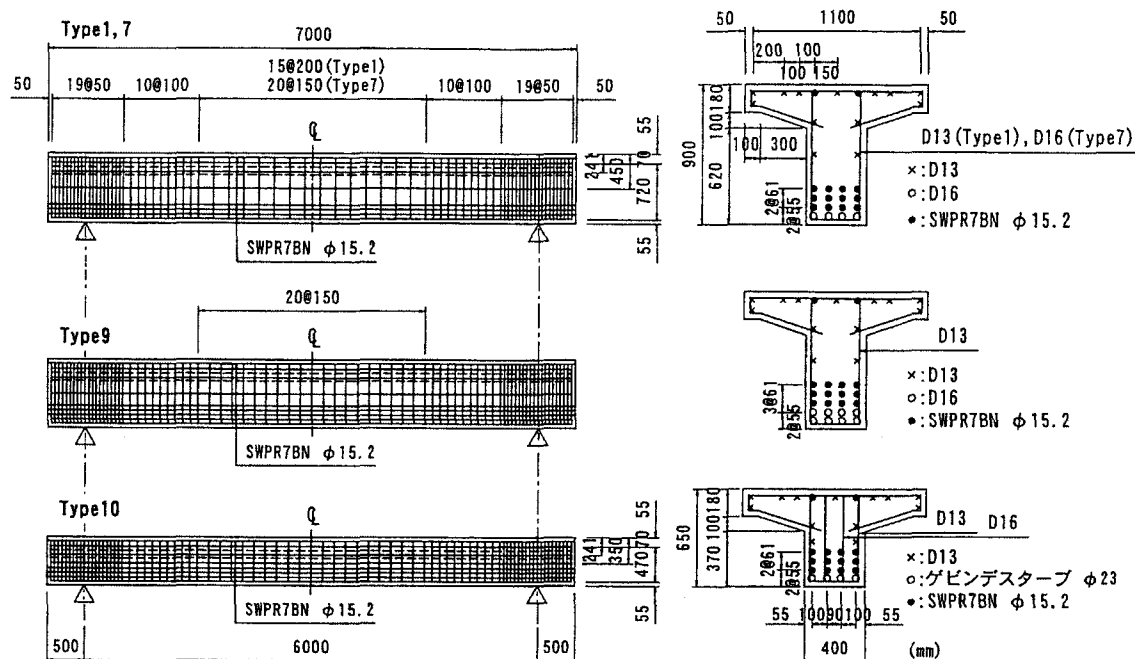


図-2 試験体の形状寸法および配筋図

415.5 mm²) であり、圧縮側鉄筋には SD295-D13 を使用している。せん断補強筋は全て SD295-D13 であるが、せん断余裕度を同程度に確保するため、各試験体で補強筋量は異なっている。コンクリートは設計基準強度が 58.8 MPa、実験時の材令は 22~30 日で平均圧縮強度が 68.4 MPa、弾性係数が 34.7 GPa、ポアソン比が 0.203 である。また、使用した鋼材の特性値一覧を表-2に示している。

3. 実験結果および考察

3.1 応答波形

図-3には、各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および載荷点変位 δ の応答波形を示している。なお、重錘衝撃力波形は重錘に設置した加速度計により得られた加速度波形に重錘質量を乗じて求めたものである。また、支点反力波形は両支点反力波形の時間軸を一致させて単純に加え合わせたものである。

図より、重錘衝撃力 P は、いずれの試験体も継続時間が 10ms 程度の振幅の大きい独立した2つの正弦半波が連なった分布性状を示している。また、Type7, 9, 10 に関しては、2波目の直後に振幅の小さい第3波目の波形が形成されている。これらの波形は、後述の載荷点変位波形の波形形状からも明らかなように、試験体の応答と重錘の相互作用によって発生するものと推察される。つ

表-2 鋼材の特性値一覧

鋼材名	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)
SD295A(D13)	372.8	520.8	206.0
SD345(D16)	394.0	573.0	206.0
SBPD930/1080 (ゲビンデスターブ φ23)	1069.0	1165.0	203.4
SWPR7BN	1769.7	1954.5	192.3

まり、3波形は、まず重錘が敷砂に衝突した際に振幅の最も大きい1波目の衝撃力が発生し、この衝撃力の作用によって桁が断面方向に応答して変形を始めるために一旦除荷状態となり、その後未だ落下中である重錘と桁が再度衝突して2波目あるいは3波目の衝撃力波形が形成されるものと推察される。

支点反力波形 R は、いずれの試験体においても重錘の衝突時点より若干遅れて励起している。これは載荷点からの波動伝播差によるものと考えられる。また、支点反力波形は重錘衝撃力波形の正弦半波に高周波成分が合成されたような分布性状を示しており、その継続時間は3波を含めた重錘衝撃力波形の継続時間とほぼ対応している。

載荷点変位波形 δ は、支点反力波形と同様にいずれの試験体も重錘衝突から若干遅れて励起して

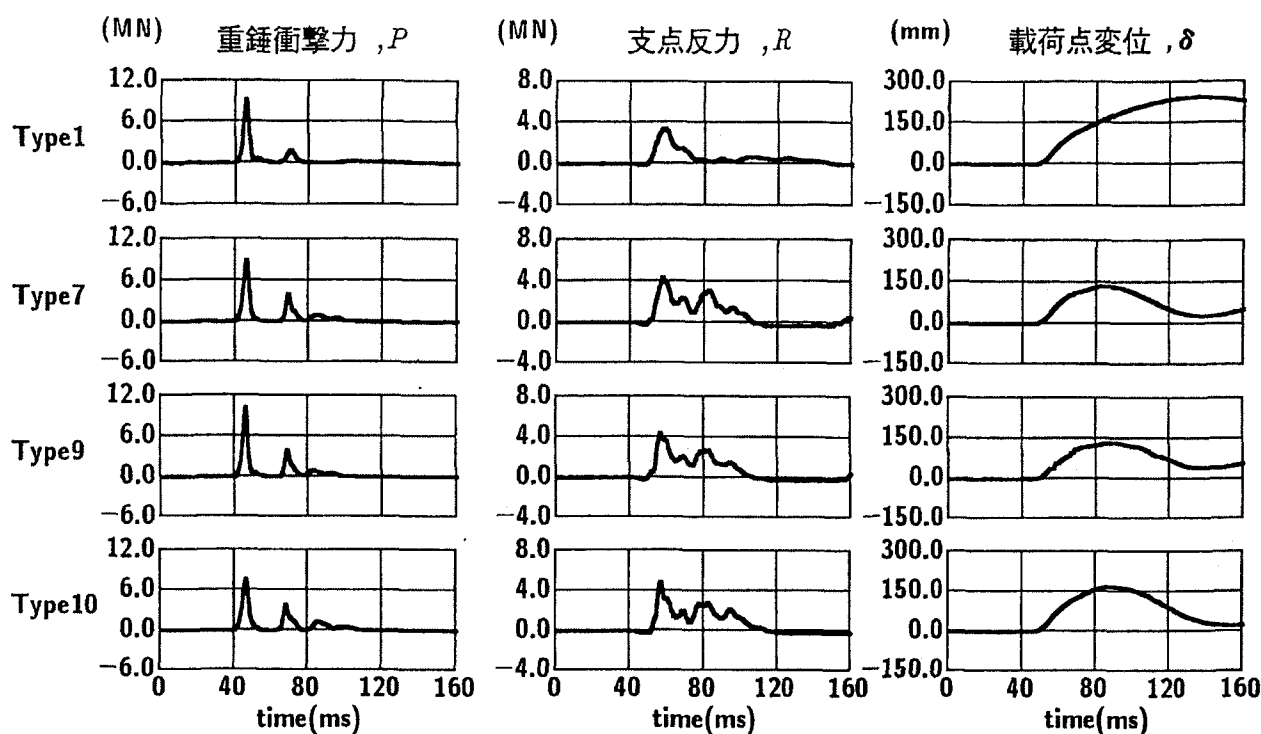


図-3 重錘衝撃力, 支点反力, 載荷点変位の時系列応答波形図 ($m=3,000\text{kg}$, $h=22.5\text{m}$)

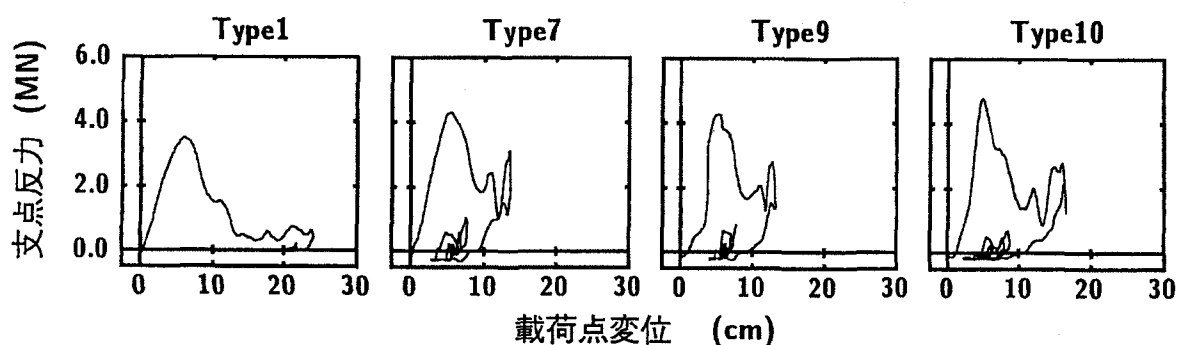


図-4 支点反力-載荷点変位履歴曲線 ($m=3,000\text{kg}$, $h=22.5\text{m}$)

いる。荷重除荷後の変位波形は、緩やかな減衰自由振動状の波形を示している。最大変位発生時間と最大支点反力発生時間を比較すると、前者が後者より遅れて発生している。この現象は両者がほぼ同一時点に発生している過去の曲げ破壊型を示す小型矩形断面¹⁾や小型T型断面²⁾桁に関する実験結果と異なっている。この違いは、本試験体が実規模で曲げ剛性が大きいことより、変位が励起していない衝撃初期に周期が短く振幅の大きい重錘衝撃力、支点反力が励起することや、その後に桁が低次振動状態に移行することによるものと推察される。

また、Type7, 9, 10の各応答波形は3者とも

ほぼ同様な分布性状を示しているものの、Type1の場合は重錘衝撃力および支点反力波形の2波目以降の形状が他の3試験体の場合と大きく異なっている。これは、載荷点変位波形からも明らかにこの時点でせん断破壊により大きな残留変位を生じ、終局に至ったためと推察される。

3.2 支点反力-載荷点変位履歴曲線

図-4には、実験結果より得られた支点反力 R と載荷点変位 δ に関するヒステリシスループを示している。Type1については底面の広い三角形状の履歴曲線を示しており、また変位もほとんど復元していないことより、せん断破壊に至っている

表－3 実験結果の最大変位, 残留変位および
エネルギー吸収量一覧

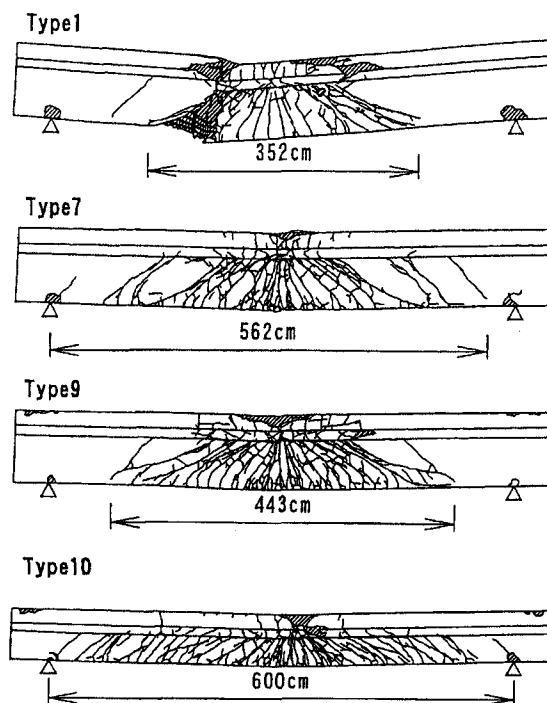
試験体名	最大変位 $\delta_{\max}$ (cm)	残留変位 δ_r (cm)	エネルギー吸収量 E_a (kJ)
Type1	24.2	21.5	303.2
Type7	13.7	6.3	311.0
Type9	13.4	6.5	256.7
Type10	16.6	6.8	325.2

ことが確認できる。Type7, 9, 10 では緊張比や下端筋鋼材の種類, 本数が異なるため履歴曲線の形状が各試験体で若干異なっている。Type10 の履歴曲線は単純な三角形状の分布性状を示しているものの, 除荷後は変位の小さい状態で振動傾向を示しており, 未だ終局に至っていないことがわかる。

3.3 最大変位, 残留変位およびエネルギー吸収量

表－3には最大変位, 残留変位およびエネルギー吸収量を示している。ここで, エネルギー吸収量は, 図－4における履歴曲線の正載荷状態（第1象限）におけるループで囲まれた部分の面積を用いて評価している。

現行設計法に基づいた基準試験体である Type1 は, せん断破壊により残留変位が 20 cm 以上を示したのに対して, 他の3試験体はいずれも残留変位が破壊基準値を多少超えた程度を示し, 前述のように未だ限界耐力に至っていないことがわかる。Type1 を除く3試験体について比較すると, 下端筋鋼材として総ネジ PC 鋼棒を用い桁高を 65 cm と他タイプに比較して 25 cm 低減し, かつ曲げ耐力, せん断耐力を Type1 と同程度に設定した Type10 の場合は, 最大変位, 残留変位とも3者間で最も大きいものの限界耐力に至っていないことから, 最も効率的な断面になっているものと判断される。また Type7 と Type9 の比較より, 最大変位は緊張率を 0.8 とし, 下端異形鉄筋を2段配筋とした Type9 の場合が小さいものの, 残留変位は Type7 が小さく, また後述するひび割れ損傷の程度からも Type7 が耐衝撃的に優れているものと推察される。



図－5 ひび割れ状況

3.4 ひび割れ状況

図－5には, 実験終了後のひび割れ状況を示している。いずれの試験体も載荷点に向かう斜めひび割れが発生しており, せん断破壊型の傾向を示していることが確認できる。

緊張比のみ異なる Type1 と Type7 を比較すると, Type1 は, 上縁から下縁方向に貫通するひび割れが大きく開口し終局に至っている。一方, 緊張比が 0.5 である Type7 の場合には中央部にひび割れが集中するものの緊張比を低減したことによって桁全体で衝撃荷重に抵抗するため, 桁全体にひび割れが分散しており, 未だ終局に至っていないことがわかる。これより, 曲げ耐力, せん断余裕度が同程度の場合には, 緊張比を 0.5 程度に低減することにより, 耐衝撃性を向上させることが可能であることがわかる。

次に緊張比が 0.5 である Type7 と緊張比が 0.8 で下端筋鋼材本数が Type7 の 2 倍配筋されている Type9 を比較すると, Type9 の場合は桁中央部にひび割れが集中する傾向を示しているのに対して, Type7 の場合には上述のようにひび割れ間隔が大きいもののひび割れが桁全体に分散分布しており桁全体で衝撃荷重に抵抗していることがわかる。また, 損傷の程度も Type7 が軽微であり, 下

端異形鉄筋量を増加させることによって、桁の耐衝撃性が向上しないことがわかる。

Type10 は、下端筋鋼材として総ネジ PC 鋼棒を用いて、曲げ耐力を Type7 と同程度にするために桁高を 65 cm に低減した場合である。そのひび割れ分布性状は、Type7 に比較してひび割れ間隔も小さくかつ分散性も向上していることがわかる。また、載荷点近傍部においてコンクリートの剥落している部分も見られるが、角折れも生じず、未だ終局に至っていないことがわかる。これより、総ネジ PC 鋼棒を用いることにより、断面の小型化が可能となる Type10 は、Type7 に比較してもより効率的な断面であるものと判断される。

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) PC 道路防災構造物マニュアルに基づき下端異形鉄筋を 2 段配置する場合よりも、下端筋として総ネジ PC 鋼棒を配置する場合の方が、ひび割れが桁全体に分散し、耐衝撃性に優れている。
- 2) 現行設計法に基づく PRC 桁に対して、緊張比を 0.5 に低減することによって、終局までの靱性能を向上でき、より大きな落石に対処可能である。
- 3) 現行設計法に基づく PRC 桁に対して、せん断余裕度を同程度とする条件下で、PC 鋼材の緊張比を 0.5 程度に低減し下端筋鋼材を高強度材料である総ネジ PC 鋼棒とする場合が最も耐衝撃性に優れ、桁高が同じ場合にはより大きな落石に対応可能である。また、同じ落石荷重に対しては桁高を低減できるためコスト縮減が可能である。

参考文献

- 1) 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，No.2，pp.1155-1160，1997.6

- 2) 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
- 3) 岸 徳光，佐藤昌志，三上 浩，今野久志，佐藤 大：各種大型 PRC 桁の重錘落下衝撃実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 55 号(A)，pp.240-245，1999.2
- 4) 今野久志，佐藤昌志，松岡健一，西 弘明：各種大型 PRC 桁の静的載荷実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 55 号(A)，pp.246-251，1999.2
- 5) 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
- 6) 今野久志，岸 徳光，池田憲二，竹本伸一：各種大型 PRC 桁の耐衝撃挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1819-1830，2000.3
- 7) 岸 徳光，今野久志，竹本伸一，武井信雄：各種大型 PRC 桁の重錘落下衝撃実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 57 号，pp.22-25，2001.2
- 8) 今野久志，岸 徳光，池田憲二，竹本伸一：せん断余裕度を変化させた各種大型 PRC 桁の静的耐荷性状，土木学会北海道支部論文報告集，第 57 号，pp.294-297，2001.2
- 9) 今野久志，池田憲二，岸 徳光，竹本伸一：せん断余裕度を変化させた大型 PRC 桁の静載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.631-636，2001.6
- 10) 北海道土木技術会 コンクリート研究委員会：PC 道路防災構造物マニュアル，2001.3
- 11) 佐藤 勉，山住克也，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，No.8，1988.8