

論文 落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計法に関する一提案

今野 久志*1・岸 徳光*2・池田 憲二*3・竹本 伸一*4

要旨：耐衝撃性および靱性能に優れた落石覆工用 PRC 桁を開発することを目的として、PC 鋼材の導入緊張率、せん断余裕度さらには下端筋鋼材の材質や本数を変化させた実規模 PRC 桁を製作して重錘落下衝撃実験を行うとともに、実験結果を基に、最大支点反力と静的曲げ耐力の関係やエネルギー収支関係を用いた落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計用曲げ耐力算定のための簡易算定式の定式化を試みた。検討結果、本設計法の提案により、落石覆工用 PRC 桁の合理的な耐衝撃設計を可能にす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, 耐衝撃設計法

1. はじめに

落石災害から人命や道路交通の安全を確保するための道路防災構造物の一つに落石覆工がある。この種の構造物には主に RC 製と PC 製が採用されている。特に PC 覆工はプレキャスト部材を現地で組み立てることによって施工されることから、労働者不足への対応や工期短縮が可能であり、今後需要が増加するものと予想される。PC 覆工を採用する場合には、大規模落石への対応を考慮すると、PC 覆工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と考えられる。現在の 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 % であることを考慮すると、PC 鋼材の導入緊張率を低減すること、あるいは PC 鋼材量を低減してひび割れ制御用の異形鉄筋量を増加させることによって残存耐力やエネルギー吸収量を増加させることが可能であるものと考えられる。

上記の様な考えの基に、筆者らは PC 落石覆

工への PRC 部材の適用を考え、耐衝撃性および靱性能に優れた落石覆工用 PRC 桁の開発を目的として、PC 鋼材の導入緊張率、せん断余裕度さらには下端筋鋼材の材質や本数を変化させた実規模 PRC 桁を製作して静載荷実験および重錘落下衝撃実験を行い、終局時近傍までの耐荷性状について検討を行ってきた^{1),2),3)}。その結果、1) 現行設計法に基づいた PRC 桁に対して、せん断余裕度を同程度とする条件下で、PC 鋼材の緊張率を 50 % 程度に低減することによって終局時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こと、2) 下端異形鉄筋を高強度材料である総ネジ PC 鋼棒に置き換えることによって、耐衝撃性および靱性能を確保しつつ桁高を低減可能であること、等が明らかとなっている。

落石覆工の設計は許容応力度法に基づいて実施されているが、覆工構造物の供用期間中に発生する確率の低い比較的規模の大きい落石に対しては、主桁の終局状態を設定して設計を行うことがより合理的であるものと考えられる。

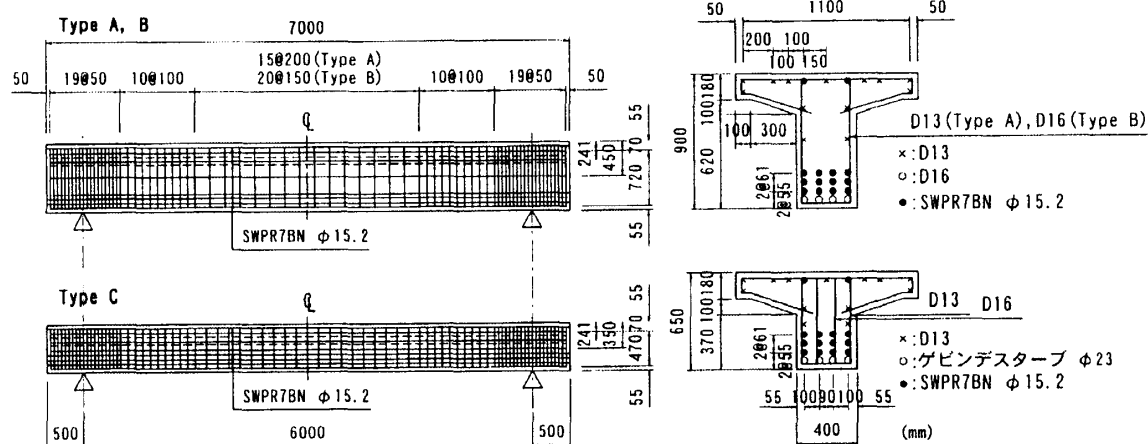
本論文では上記実験結果の概要を述べるとともに、実験結果に基づき、最大支点反力と静

*1 北海道開発土木研究所 構造部構造研究室主任研究員 工博 (正会員)

*2 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)

*3 北海道開発土木研究所 構造部構造研究室長 (正会員)

*4 ドーピー建設工業(株) 北海道本店設計部 (正会員)



図－１ 試験体の形状寸法および配筋図

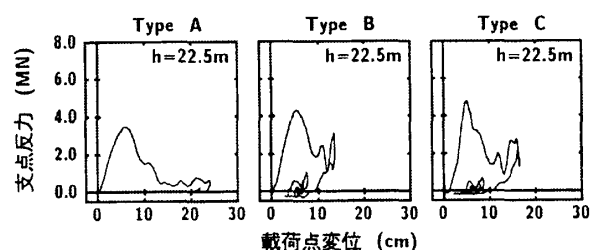
的曲げ耐力の関係やエネルギー収支関係を用いた落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計用静的曲げ耐力算定のための簡易算定式を提案するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体および実験方法

図－１には、終局時近傍の耐荷性状を比較するために使用した試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、桁長 700 cm、ウェブ幅 40 cm、上フランジ幅 120 cm、桁高 90 cm (Type C は 65 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。使用した PC 鋼材は、SWPR7BN-φ15.2 である。試験体下縁の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プ φ23 であり、圧縮側鉄筋およびスターアップには SD295A-D13 を使用している。コンクリートの設計基準強度は 58.8 MPa である。

Type A は、設計落石衝撃力を約 600 kN (落石質量 1,000 kg, 落下高さ 10 m) として現行設計法により製作した基準試験体である。Type B および Type C はこれまでの一連の実験的研究^{2),5)}により耐衝撃性に優れていると考えられた試験体である。すなわち、Type B は PC 鋼材の緊張率を 50 % に低減した場合、Type C は



図－２ 支点反力－載荷点変位履歴曲線

PC 鋼材の緊張率を 50 % に低減しさらに下端筋鋼材を総ネジ PC 鋼棒としたものである。いずれの試験体もせん断余裕度は 1.3, 断面分割法による静的曲げ耐力は 1.53 MN である。

実験は、各試験体の耐衝撃性を直接比較検討するために、質量 3,000 kg の重錘を所定の落下高さから一度だけ衝突させる単一載荷法により実施している。重錘落下衝撃実験における試験体の破壊基準は、実験終了時の残留変位量が純スパン長の 1 % に達した時点 (本試験体では 6 cm) を目安とした。本研究では、終局時近傍の挙動が確認できるように、落下高さをこれまでに実施した一連の実験を参考に 22.5 m とした。

2.2 実験結果

図－２には、各試験体の支点反力－載荷点変位履歴曲線を、また図－３には実験終了後のひび割れ状況を示している。

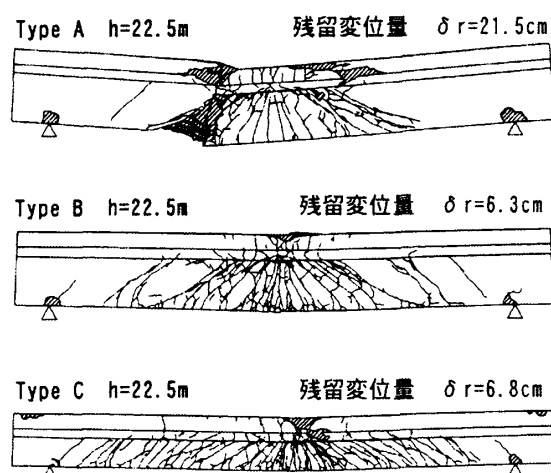


図-3 実験終了後のひび割れ状況

図-2より、いずれの試験体もピークの鋭い三角形の履歴曲線を示していることがわかる。このような分布性状はせん断破壊型 RC 梁の場合と同様であることより、せん断破壊型の傾向を示しているものと判断される。Type A 試験体の場合は、底面の広い三角形の履歴曲線を示しており、図-3のひび割れ状況からも確認できるようにせん断破壊に至っていることが確認できる。実験終了時の残留変位も 21.5 cm と破壊基準である 6 cm を大幅に超過している。一方、Type B および Type C の履歴曲線は単純な三角形の分布性状を示しているものの、除荷後はプレストレス力の影響により残留変位が小さい値まで復元し振動状態を示している。残留変位量が破壊の目安として設定した値を多少超過しているものの、未だ余剰耐力を有しているものと考えられる。

図-3より、各試験体のひび割れ状況を比較すると、Type B の場合は、Type A に比較してひび割れが桁全体に分散しており、桁全体で衝撃荷重に抵抗していることがわかる。Type C の場合には、ひび割れ間隔が狭くかつ分散性も向上していることがわかる。また、載荷点近傍部でコンクリートが剥落している部分も見られるが、角折れも生じていないことより、未だ終局に至っていないものと推察される。

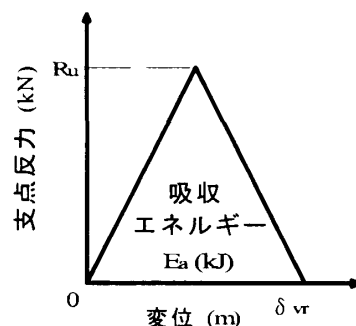


図-4 支点反力-変位関係の模式化

3. 落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計法

3.1 耐衝撃設計用曲げ耐力算定式の定式化

前述の実験結果により、現行設計による PRC 桁に対して、せん断余裕度を同程度とする条件下で、PC 鋼材の緊張率を 50 % 程度に低減することや下端筋鋼材を総ネジ PC 鋼棒とすることによって、耐衝撃性や靱性能を向上できることが明らかとなった。このような耐衝撃性に対する優れた性能を有効に活用し、許容応力度設計に替わるより合理的な設計を行うために、最大支点反力と静的曲げ耐力の関係やエネルギー収支関係を用いた落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計用静的曲げ耐力算定のための簡易算定式の定式化を試みる。

定式化において、以下の事項を考慮した。すなわち、1) 桁の静的せん断余裕度は現行設計によるものと同程度 (1.3) であること、2) 設計のための終局限界状態を桁の残留変位が純スパン長の 1 % に達した時点とすること、3) 桁の支点反力-載荷点変位履歴曲線 ($R-\delta$ 履歴曲線) は、図-2に示す実験結果からも明らかのように、終局時近傍ではほぼ三角形の分布性状を示すこと、4) 衝撃荷重除荷終了近傍において、プレストレス力の作用により残留変位が大幅に低減されることより、エネルギー吸収量算定のための仮想残留変位 δ_{vr} を設定すること、等である。以上の考慮の基に、支点反力-載荷点変位履歴曲線を、図-4に示す最大支点反力 R_u と載荷点の仮想残留変位 δ_{vr} で囲まれる三角形分布に模式化する。

表-1 実験結果の残留変位と仮想残留変位の関係一覧

試験桁	エネルギー吸収量 * E_a (kJ)	最大支点反力 R_u (kN)	残留変位 ① δ_r (cm)	仮想残留変位 ② δ_{vr} (cm)	γ ②/①
Type B	311.0	4,280	6.3	14.5	2.30
Type C	325.2	4,750	6.8	13.7	2.01
				平均値	2.16

* : 図-2に示す支点反力-載荷点変位履歴曲線の面積より算出

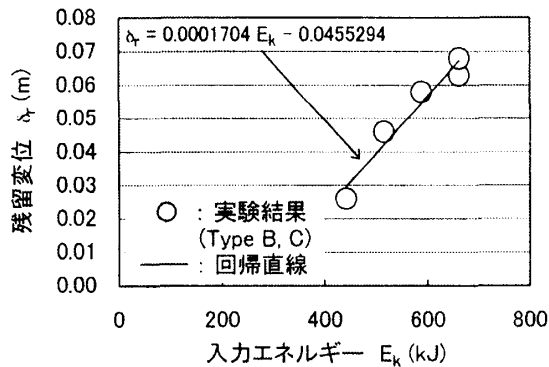


図-5 入力エネルギーと残留変位の関係

定式化に際しては、Type B, C の落下高さ 22.5 m における単一載荷実験結果と過去に実施した Type B の落下高さ 15.0, 17.5, 20.0 m における単一載荷実験結果⁵⁾を用いることとする。

図-4の支点反力-変位関係の模式図より吸収エネルギー E_a は、式 (1) で表される。

$$E_a = R_u \cdot \delta_{vr} / 2 \quad (1)$$

仮想残留変位 δ_{vr} を残留変位 δ_r を用いて評価するために、各実験結果の残留変位 δ_r に対する倍率 γ を求めると表-1のように示され、平均値 $\gamma = 2.16$ を得る。

いま、設定残留変位に対してもこの値を適用可能であるものと仮定すると、式 (1) は、

$$\begin{aligned} E_a &= R_u \cdot \delta_{vr} / 2 \\ &= R_u \cdot 2.16 \cdot \delta_r / 2 \\ &= 1.08 R_u \cdot \delta_r \\ &\doteq R_u \cdot \delta_r \end{aligned} \quad (2)$$

として求めることができる。

ここで、最大支点反力 R_u と静的曲げ耐力 P_{usc} の比を動的応答倍率 α 、吸収エネルギー E_a と入力エネルギー E_k の比をエネルギー比 β とすると、

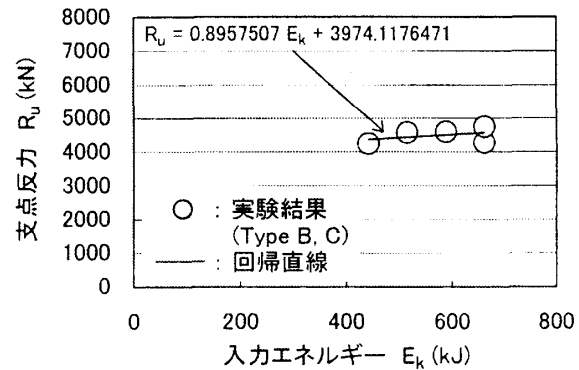


図-6 入力エネルギーと支点反力の関係

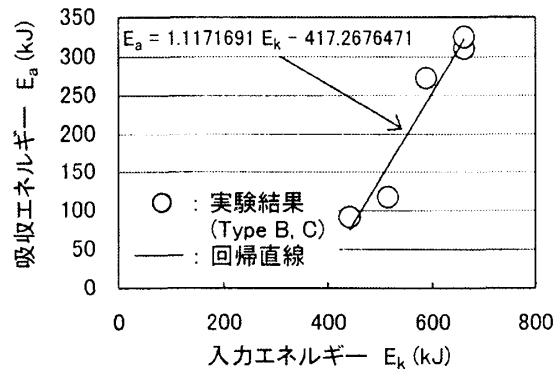


図-7 入力エネルギーと吸収エネルギーの関係

$$R_u = \alpha P_{usc} \quad (3)$$

$$E_a = \beta E_k \quad (4)$$

より、式 (2) は、

$$\begin{aligned} E_a &= R_u \cdot \delta_r \\ \beta E_k &= \alpha P_{usc} \cdot \delta_r \\ P_{usc} &= (\beta \cdot E_k) / (\alpha \cdot \delta_r) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、設計のための静的曲げ耐力 P_{usc} が決定される。

ここで、実験結果から設定残留変位到達時の入力エネルギー E_k とその時の最大支点反力 R_u 、吸収エネルギー E_a を求める。

図-5は、入力エネルギー E_k と残留変位 δ_r

の関係を示している。回帰式から残留変位が終局限界状態として規定した純スパン長の 1 % ($\delta_r = 0.06 \text{ m}$) に達する時の入力エネルギー E_k を求めると、以下の値となる。

$$E_k = 619 \text{ kJ}$$

図-6 は、入力エネルギー E_k と支点反力 R_u の関係を示している。回帰式から上記入力エネルギーに対する支点反力を求めると、以下の値となる。

$$R_u = 4,529 \text{ kN}$$

図-7 は、入力エネルギー E_k と吸収エネルギー E_a の関係を示している。回帰式から入力エネルギー $E_k = 619 \text{ kJ}$ ($\delta_r = 0.06 \text{ m}$) に対する吸収エネルギーを求めると、以下の値となる。

$$E_a = 274 \text{ kJ}$$

以上の結果より、動的応答倍率 α とエネルギー比 β を求めると、

$$\begin{aligned} \text{動的応答倍率 } \alpha &= R_u / P_{usc} \\ &= 4,529 / 1,530 = 2.96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{エネルギー比 } \beta &= E_a / E_k \\ &= 274 / 619 = 0.44 \end{aligned}$$

上記 α , β を式 (5) に代入すると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} P_{usc} &= (\beta \cdot E_k) / (\alpha \cdot \delta_r) \\ &= (0.44 \cdot E_k) / (2.96 \cdot \delta_r) \\ &= 0.15 \cdot E_k / \delta_r \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、耐衝撃設計時に要求される PRC 桁の静的曲げ耐力 (以下、試験体の静的曲げ耐力 P_{usc} と区別し、耐衝撃設計用静的曲げ耐力 P_{usd} と呼ぶ。) を定式化すると、 P_{usd} は式 (6) の定数を丸めて次式のように示される。

$$P_{usd} = \frac{1}{6} \frac{E_{kd}}{\delta_{rud}} \quad (7)$$

ここで、

P_{usd} : 耐衝撃設計用静的曲げ耐力 (kN)

E_{kd} : 落石による設計入力エネルギー (kJ)

δ_{rud} : 落石覆工用 PRC 桁の終局残留変位 (m)

ただし、式 (7) は、落石衝突時に PRC 桁の残留変位が純スパン長の 1 % 程度に達する状態を終局時とした場合の算定式である。

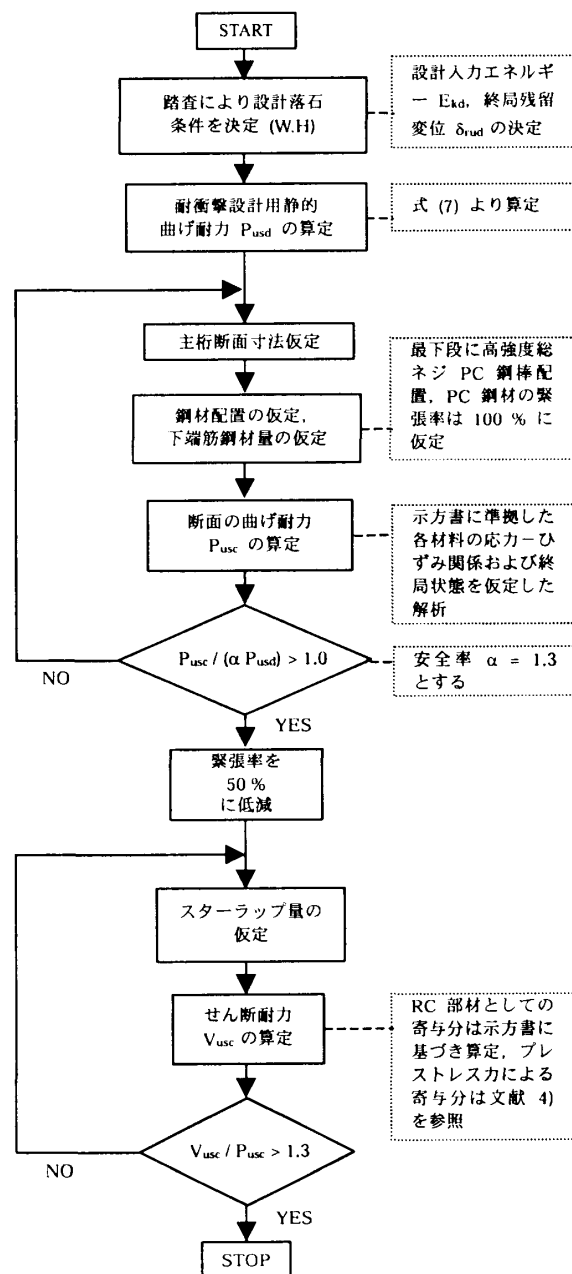


図-8 落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計フロー

3.2 曲げ耐力算定式の妥当性検討

Type B, C 試験体に関する実験結果を用いて式 (7) の妥当性を確認する。Type B, C の単一載荷実験における最大入力エネルギー 661.9 kJ (重錘質量 3,000 kg, 落下高さ 22.5 m) と終局残留変位 $\delta_{rud} = 0.06 \text{ m}$ を式 (7) に代入すると、耐衝撃設計用静的曲げ耐力 P_{usd} は、 $P_{usd} = 1,838 \text{ kN}$ となる。ここで、各試験体の静的曲げ耐力は等しく $P_{usc} = 1,530 \text{ kN}$ であることから、耐衝

撃設計用静的曲げ耐力が試験体の静的曲げ耐力に対して 20 % 程度大きな値を示している。この結果は、各試験体の実験時残留変位が 0.06 m より 5 % ～ 13 % 程度大きいことと対応している。

従って、提案した算定式 (7) は、設計入力エネルギーに対してほぼ妥当な耐衝撃設計用静的曲げ耐力を与えていることがわかる。

3.3 耐衝撃設計のフロー

前節において、現行設計法の下に製作した試験体よりも耐衝撃性、靱性能に優れた PRC 桁の耐衝撃設計用静的曲げ耐力の算定式を定式化した。特に静的せん断余裕度を現行の PC 桁の設計と同程度とし、PC 鋼材の緊張率を 50 % に低減し、下端筋鋼材として高強度総ネジ PC 鋼棒を使用する場合には、1) 現行の設計に基づいて設計した PC 桁断面に対して大幅な小型化が可能であり、製造、輸送、施工の観点からコスト縮減に寄与できること、2) 下端筋鋼材に異形鉄筋を用いる場合よりも一層ひび割れの分散効果が期待できること、3) PC 落石覆工で対応可能な落石範囲をさらに拡大可能であること、等の理由により、上記設計法に基づいて設計された PRC 桁は耐衝撃性および靱性能に優れた合理的な断面になるものと考えられる。図-8 は、提案の設計手法に基づいた落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計フローを示している。

4. まとめ

耐衝撃性および靱性能に優れた落石覆工用 PRC 桁を開発することを目的として、PC 鋼材の導入緊張率、せん断余裕度さらには下端筋鋼材の材質や本数を変化させた実規模 PRC 桁を製作して、重錘落下衝撃実験を行い、終局時近傍までの耐荷性状について検討を行った。さらに実験結果を基に、最大支点反力と静的曲げ耐力の関係やエネルギー収支関係を用いた落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計用静的曲げ耐力算定のための簡易算定式の定式化を試みた。本研究で得られた結果を要約すると、

- 1) 静的せん断余裕度を現行設計による値と同程度に確保することを前提として、設計入力エネルギーと桁の終局残留変位を設定することにより、耐衝撃設計用静的曲げ耐力を算定可能な簡易算定式を定式化した。
- 2) 本算定式に基づいた耐衝撃設計用静的曲げ耐力は、設計入力エネルギーに対して妥当な値であることを確認した。
- 3) 静的せん断余裕度を現行設計と同程度として、PC 鋼材の緊張率を 50 % 程度とし下端筋鋼材として高強度総ネジ PC 鋼棒を使用した場合の落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃設計のフローを示した。
- 4) 本設計法の提案により、現行の設計に基づいて設計した PC 桁断面に対して、耐衝撃性および靱性能に優れ、コスト縮減にも寄与できる落石覆工用 PRC 桁の合理的な耐衝撃設計を可能にすることができるものと考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 今野久志, 岸 徳光, 池田憲二, 竹本伸一: 落石覆工用 PRC 桁の耐衝撃性向上に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002.3