

PC ロックシェッドの現状と今後の展望

北島 幹士*1・今野 久志*2・岸 徳光*3

1. はじめに

日本の国土は、地震、豪雨、積雪、雪崩等の厳しい自然環境下におかれ、災害時には交通ネットワークがたびたび分断される。道路交通網の安全性確保と自然環境との共生は大きな課題の一つである。

道路防災に用いられる代表的な PC 技術には、ロック（スノー）シェッド（写真 - 1）、スノーシェルター（写真 - 2）、ロックキーパー、雪崩防護柵等があり、とくに雪害・落石等のエネルギーが比較的大きい場合に用いられる事例が多い。そのため、PC 防災構造物には高い安全性、信頼性が求められている。

また、これらの構造物はプレキャスト化が進んでおり工期短縮や、交通止めを必要としない施工のニーズなどに対応した工法である。

本稿では、なかでも施工実績が多くもっとも設計荷重の大きいロックシェッドについて、現行の設計法とその将来に向けた取組みなどについて紹介する。



写真 - 1 ロックシェッドの一例



写真 - 2 スノーシェルターの一例

2. 現在のロックシェッドとその設計法

2.1 概要

ロックシェッドの設置目的は、落石から人や車両を防護することにある。一般に道路の側方に余裕がなく、落石の規模が比較的大規模な場合に設置されることが多い。材料面からは PC 製、RC 製、鋼製などがある。

2.2 構造形式

図 - 1 にロックシェッドの構造形式を示す。このうち (a) 図から (e) 図までがわが国における事例であり、(f) 図および (g) 図は外国の事例である。各構造形式ごとの概要は表 - 1 に示すとおりである。構造形式の選定は、落石の規模、地盤条件、供用条件および使用する材料に依存する。たとえば、不同沈下が問題になるような場合には、山側基礎と谷側基礎を地中で連結した箱型や、逆 L 型の地中連結型、単純梁のような構造形式を採用することが望ましい。

これらの構造形式において、PC 製が多く採用される形式は (c) 図、(d) 図、(e) 図、および (f) 図の各構造形式であ



*1 Mikio KITAJIMA

ドーピー建設工業(株)
北海道支社 技術部



*2 Hisashi KONNO

独立行政法人
北海道開発土木研究所
構造研究室



*3 Norimitsu KISHI

室蘭工業大学 工学部
建設システム工学科 教授

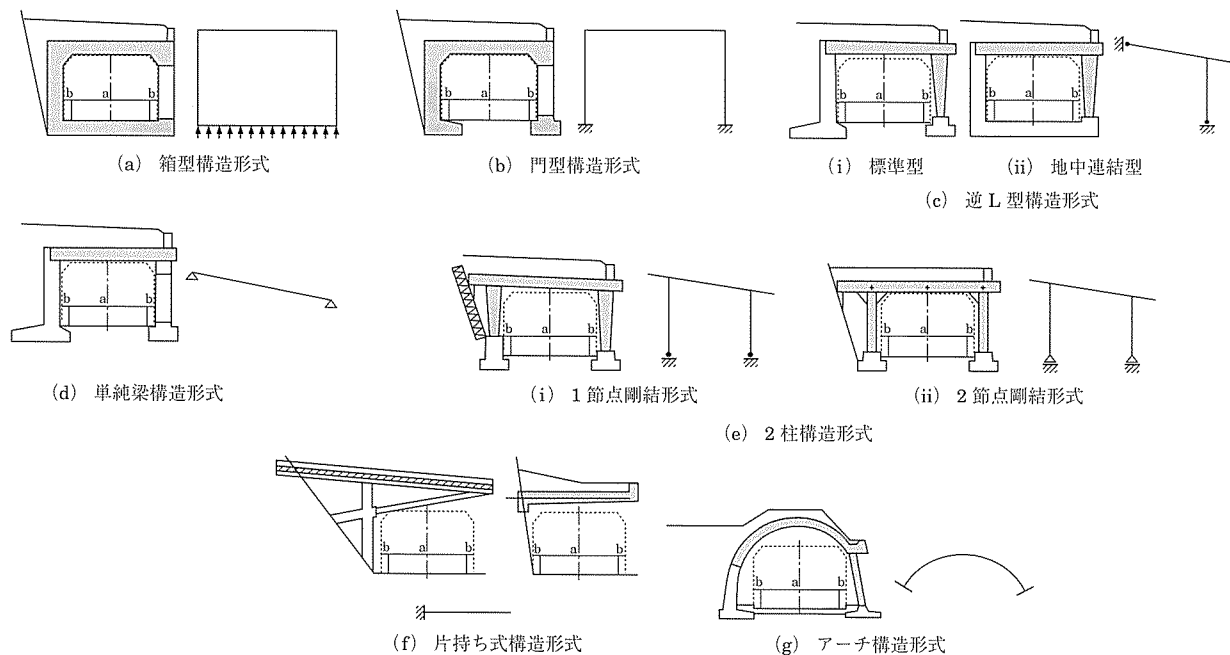


図 - 1 ロックシェッドの構造形式¹⁾

表 - 1 各構造形式の概要

箱型構造形式	主に場所打ちのRCロックシェッドに多く採用され、底版まで一体化する構造形式のものである。
門型構造形式	箱型構造形式と同様、主に場所打ちのRCロックシェッドに多く採用され、屋根部と屋根支持部を一体化する構造形式のものである。
逆L型構造形式	鋼製ロックシェッドにも採用されているが、PCロックシェッドにもっとも多く採用されている。屋根部が梁部材、屋根支持部が柱および擁壁で構成され、屋根部と柱部を剛結して支持する構造形式のものである。
単純梁構造形式	主にPCロックシェッドに採用され、屋根支持部を支点とする構造形式のものである。
2柱構造形式	主にPCまたは鋼製ロックシェッドに採用され、屋根支持部を柱とする構造形式のものである。
片持ち式構造形式	屋根部をアウトケーブルとそれを固定するPCアンカで支持する構造形式である。
アーチ構造形式	屋根部を弧状とする構造形式である。

る。(c)図および(e)図は、柱付け根部にヒンジを設け、基部の曲げモーメントを零にした構造形式である。ヒンジにはメナーゼヒンジが採用される事例が多い。

2.3 設計の考え方

ロックシェッドのように大きな衝撃力を受ける構造物は、その構造物の動的応答特性や、塑性変形によるエネルギー吸収能を考慮した概念に基づいて合理的に設計を行わなければならないものと考えられる。ロックシェッドの設計をエネルギー論的な概念に基づいて行う手法には、近年いくつかの提案があるが¹⁾、実務に取り入れるにはさらに検討すべき課題が残されており、その解決に向けた検討が鋭意行われている。

現在のロックシェッドの設計は、落石および雪崩等による衝撃力を静的荷重に置き換え、許容応力度法により行われるのが一般的である。実際には、ロックシェッド頂版上に1個の落石を静的載荷させるのを原則とし、着目部材に対してもっとも不利になるように載荷させることとしている。

なお、落石エネルギーを静的荷重に置き換えて設計する場合においても、衝撃じん性が高くなるような構造形式、構造材料を選択するよう心がけることが大切である。

2.4 落石荷重

緩衝材として砂を用いる場合の落石衝撃力は、通常次式

により算出している。

$$P = 2.108 (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha$$

ここに、 P ：落石の衝撃力 (kN)

m ：落石の質量 (t)

g ：重力加速度 (m/s^2)

λ ：ラーメの定数 (kN/m^2)

H ：落石の落下高 (m)

α ：砂層厚と落石直径の比から決定される割増し係数

$$a = \sqrt{\frac{D}{T}} \quad (\text{ただし、} T \geq D \text{ のとき } \alpha = 1)$$

T ：砂層厚 (m) (ただし、 $T \geq 0.9$ m とする)

D ：落石直径 (m)

この式の適用にあたっては、ラーメの定数 λ の選び方が重要となる。土木学会編「土木技術者のための振動便覧」²⁾では表-2に示す値が示されている。日本道路協会編「落石対策便覧」³⁾では、緩衝材の砂層厚が落石直径程度の場合には、ラーメの定数を $\lambda = 1000$ kN/m^2 と設定している。ただし、使用する砂の粒度分布、含水比、締固め度等によってはラーメの定数 λ が1000 kN/m^2 以上となることがあるため、ラーメ定数 λ の決定にあたっては現地状況を考慮し、慎重に検討する必要があるとしている。

表 - 2 ラーメ定数

非常に軟らかいもの	1 000 kN / m ²
軟らかいもの	3 000 ~ 5 000 kN / m ²
固いもの	10 000 kN / m ²

緩衝材を設置する場合には、衝撃力は通常緩衝材の効果によって分散される。緩衝材に砂を用いる場合の衝撃力の分散は、落石対策便覧では図 - 2 に示すとおり緩衝砂層厚に対して 1 : 0.5 の範囲を考え、そこに等分布荷重が作用するものと仮定している。ただし、飛散防止材による衝撃力の分散は考慮していない。なお、計算の簡略化のため円形等分布荷重を図 - 2 に示すような正方形分布に換えてよいものとしている。

2.5 その他の荷重

落石対策便覧では、考慮すべき荷重および荷重の組合せを表 - 3 のように規定している。なお、落石や地震、雪崩荷重が常時に比較して過度に大きいことや、その発生確率が高くないことを理由に許容応力度を常時の 1.5 倍としている。

3. 今後の設計手法

3.1 安全性の設定

発生確率の非常に少ない落石荷重に対して従来まで採用されている許容応力度法を適用することは、過大設計となり、ときとして設計が不可能となる場合がある。

一方、道路橋示方書⁴⁾では供用期間中にしばしば発生する地震動をレベル 1 地震動、供用期間中に一度発生するかどうかという規模の地震動をレベル 2 地震動とし、レベル 1 地震動に対しては橋としての健全性を損なわない。またレベル 2 地震動に対してはある程度の損傷は認めるが、橋としての機能回復が速やかに行い得る性能と規定している。

ロックシェッドなどの落石防災構造物に対しても、道路橋の耐震設計法と同様に各落石規模の発生頻度に対応した設計用落石荷重（たとえばレベル 1 落石、レベル 2 落石など）や設計法を設定することにより、工学的に合理的な設計を行うことができるものと考えられる。

残念ながら、現在のところ落石規模や設計用落石荷重を

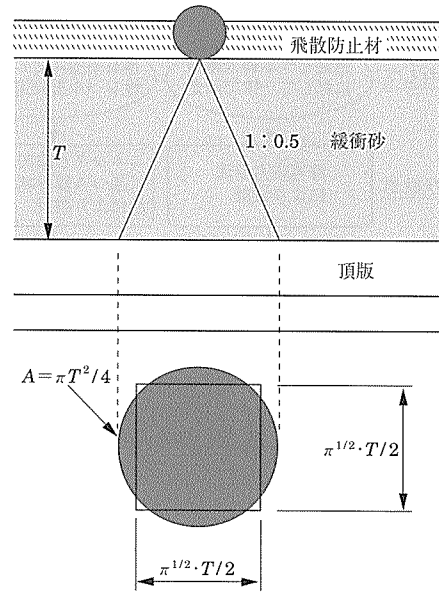


図 - 2 衝撃力の作用面積

適切に定める手法は確立されていない。今後データの蓄積を進めるとともに、落石レベルとその頻度を明らかにする手法の開発が望まれる。

3.2 エネルギー概念に基づく設計手法

現行の設計では、許容応力度法によって設計を行うのが一般的である。しかしながら、許容応力度設計法の場合には、想定される落石荷重に対して PC 鋼材や引張主鉄筋の残存耐力が少なく、衝撃じん性能に劣ることが指摘されている。

より高い耐衝撃性能を有するロックシェッドの設計を行うためには、前述のエネルギー論的な概念に基づく設計手法の確立が急務である（図 - 3）。

著者ら⁵⁾は残存耐力が大きく衝撃じん性能やエネルギー吸収能の大きい耐衝撃性に優れた PRC ロックシェッドを開発することを目的として、各種実規模実験結果に基づいた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、耐衝撃設計フローを提案しているので参考とされたい。

表 - 3 荷重の組合せ³⁾

設計時の状態	荷重の種類	死	土	水	堆	積	落	地	な	自	の許 割容 増応 係力 数度
		荷	圧	圧	積	土	雪	石	震	だ	
常時*	時*	○	○	●	●	●					1.00
落石	時*	○	○	●		●	○				1.50
地震	時*	○	○	●	●	●		○			1.50
なだれ等		○	○	●	●	●			○		1.50
自動車衝突		○	○	●						○	1.50

* は必ず考慮すべき組合せを示す。
 ○ は想定する状態において必ず考慮すべき荷重を示す。
 ● は想定する状態において現場条件により考慮すべき荷重を示す。
 注) 堆積土荷重は非常に大きいため、土砂が堆積した場合には、取り除くことを原則とする。

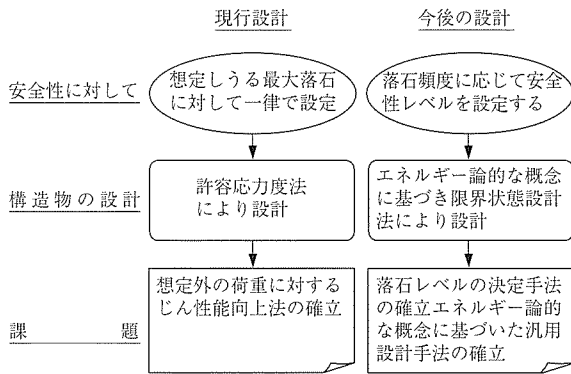


図 - 3 現行と今後の設計の対比

3.3 エネルギー概念に基づく実物大衝撃実験

3.3.1 概要

著者ら⁶⁾⁷⁾は残存耐力が大きく衝撃じん性能やエネルギー吸収能の大きい耐衝撃性に優れた PRC ロックシェッドを開発することを目的として、PC 鋼材への導入緊張力、引張鋼材の材料特性等を変化させた実物 PRC 桁試験体を用いた重錘落下衝撃実験を行っている (写真 - 3)。

従来から使用されている PRC 桁と本実験で提案している PRC 桁についての比較検討で興味深い結果が得られているので、ここではその実験事例について紹介する。

3.3.2 試験体

図 - 4 には実験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 2 種類あり、N タイプは従来から PC ロックシェッドの主桁として使用されてきた PRC 桁である。一方、G タイプは著者らが提案する PRC 桁であり、PC 鋼材の緊張率を N タイプの 50% 程度に低減し、下端筋鋼材を異形鉄筋から総ネジ PC 鋼棒に置き換えたものである。試験体はいずれもプレテンション方式で製作した単純 T 型断面の実規模 PRC 桁であり、桁高は N タイプが

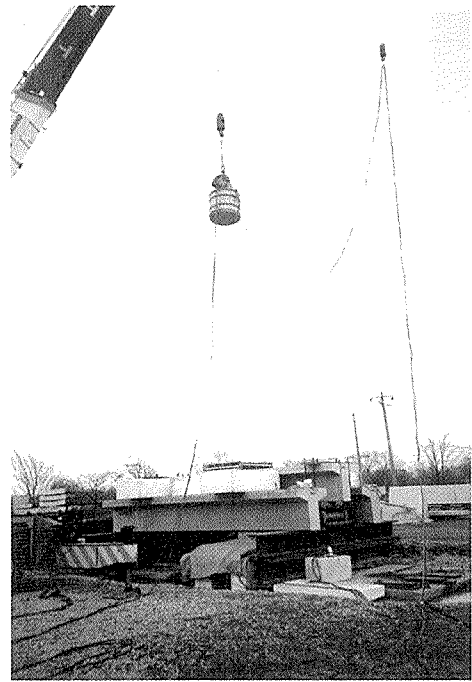


写真 - 3 実験状況

80 cm、G タイプが 65 cm となっている。使用した PC 鋼材は、両タイプとも SWPR 7 BN-φ15.2 (公称断面積 138.7 mm²) である。有効緊張力は N タイプが 129.1 kN/本、G タイプが 66.7 kN/本となっている。また下端筋鋼材は、N タイプが SD 345-D 22、G タイプが SBPD 930 / 1080-φ26 (総ネジ PC 鋼棒、母材部断面積 530.9 mm²、降伏点荷重 554 kN) である。また、圧縮側鉄筋は両タイプとも SD 345-D 13、スターラップは N タイプが SD 295A-D 10、G タイプが SD 345-D 13 を使用している。コンクリートの実験時の圧縮強度は N タイプが 67.2 MPa、G タイプが 65.4 MPa で

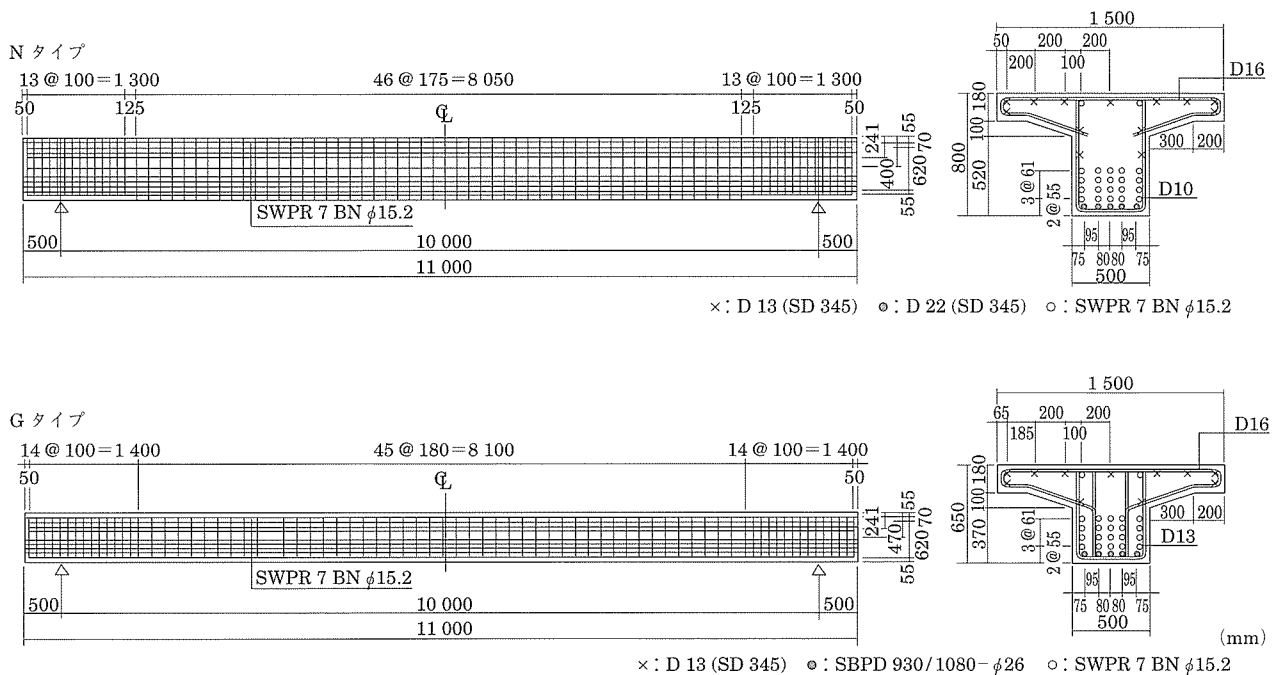


図 - 4 試験体の形状寸法および配筋状況

ある。

断面分割法を用いて計算した曲げ耐力，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はそれぞれ同程度であり，せん断耐力を曲げ耐力で除したせん断余裕度はNタイプが1.28，Gタイプが1.31となっている。なお，本試験体の許容応力度設計法における設計落石条件は，両タイプともに90 cm厚の敷砂材を設置する条件で，落石質量1 000 kg，落下高さ9.5 m程度（落石エネルギーで $E = 93.2 \text{ kJ}$ ）となっている。

3.3.3 実験方法

図-5には重錘落下衝撃実験の概要図を示している。衝撃荷重は質量5 000 kg，直径1 mで，底部17.5 cmが半径80 cmの球状である重錘を所定の高さから1回だけ自由落下させる単一載荷方式により与えている。また，試験体の載荷点部には厚さ20 cmまたは90 cmの敷砂緩衝材を設置している。表-4には実験ケース一覧を示している。表中の試験体名は試験体のタイプ，敷砂の厚さ（S1:20 cm，S2:90 cm），重錘落下高さ（a:11.5 m，b:25.0 m，c:27.5 m）を順に並べ記号化している。試験体の終局の目安はこれまでの一連の実験と同様に残留変位が純スパン長の1%程度に達した時点としており，両試験体タイプにおける耐衝撃性状の違いあるいは各タイプの終局時近傍の耐衝撃性状を比較検討できるように落下高さを設定している。

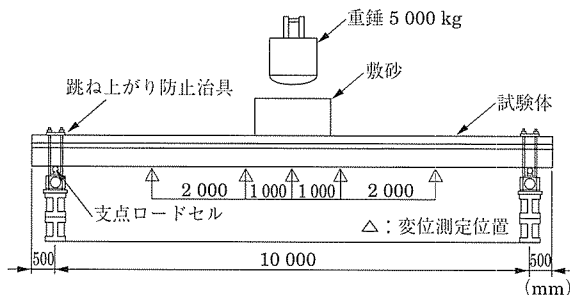


図-5 実験概要図

表-4 実験ケース一覧

試験体名	タイプ	敷砂厚 (cm)	落下高さ h (m)
N-S1-a	N	20	11.5
G-S1-a	G		
G-S2-a		90	11.5
G-S1-b			25.0
G-S2-c			27.5

3.3.4 ひび割れ状況

図-6には，各試験体の実験終了後のひび割れ状況を示している。敷砂厚が20 cmと薄いN-S1-a，G-S1-a試験体のひび割れ状況を見ると，いずれも載荷点近傍部には斜めひび割れが卓越して発生しており，せん断破壊型の傾向を示していることがわかる。またN-S1-aの場合には損傷が載荷点近傍に集中しており，上縁から下縁方向に貫通する斜めひび割れが大きく開口し崩壊に至っている。一方，G-S1-aの場合には載荷点部にひび割れが集中しているものの桁全体にひび割れが分散しており，PC鋼材の緊張率を低減した

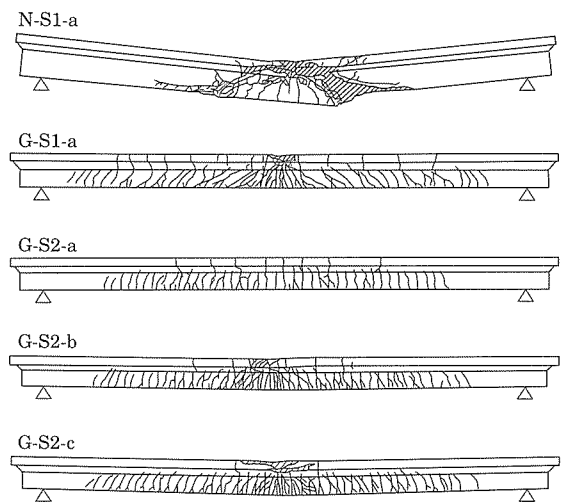


図-6 ひび割れ状況

ことによる効果が現れている。以上の結果から，実規模試験体においても著者が提案するGタイプがNタイプと比較して耐衝撃性に優れていることが確認された。

敷砂厚を90 cmとしたG-S2-a～cでは敷砂の緩衝効果により衝撃力が緩和・分散されることから，下縁から上縁に向かう曲げひび割れが桁全体に分散分布し曲げ破壊型の傾向を示していることがわかる。また，落下高さの増加とともに載荷点直下のひび割れが密になるとともにフランジ部の損傷が顕在化する様子がうかがえる。

写真-4には実験終了後の状況を示している。

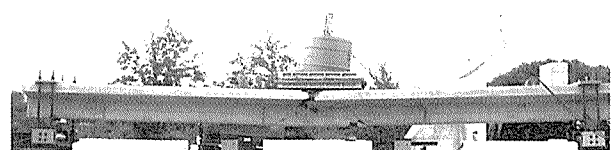
3.3.5 応答波形

図-7には敷砂厚のみ異なるG-S1-aおよびG-S2-aの重錘衝撃力，合支点反力（両支点反力を足し合わせた値，以後単に支点反力），載荷点変位の時系列応答波形を示している。なお，重錘衝撃力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り，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。

せん断破壊型の傾向を示したG-S1-aの重錘衝撃力波形は，重錘衝突初期の継続時間が10 ms程度の振幅の大きい独立した正弦半波と，その後試験体の応答と重錘との相互作用により連続して発生する振幅の小さい正弦波より構成されている。波形の継続時間は130 ms程度である。つき



(a) N-S1-a



(b) G-S1-a

写真-4 実験終了後の状況

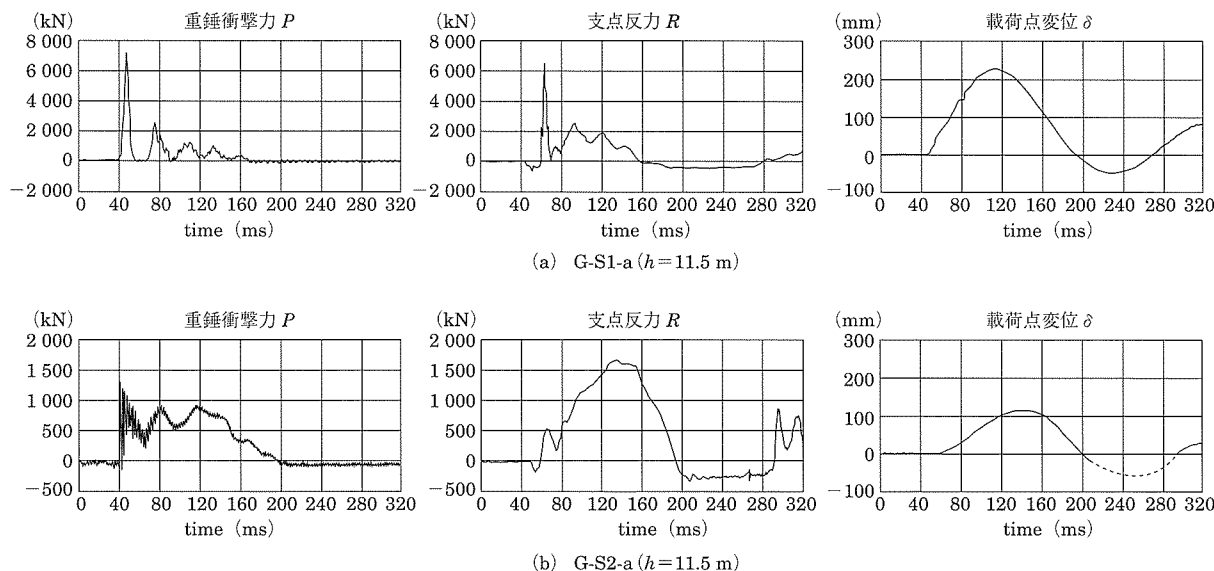


図-7 重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の時系列応答波形

に支点反力波形は、重錘の衝突時点より若干遅れて励起されている。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、後述の変位波形の衝撃初期に発生する正弦半波波形と重錘衝撃力波形が合成されたような分布性状を示している。載荷点変位波形は、支点反力波形と同様に重錘衝突時から若干遅れて励起されており、継続時間が140 ms程度の正弦半波とその後の緩やかな減衰自由振動波形を示している。

一方、曲げ破壊型の傾向を示したG-S2-aの重錘衝撃力波形は、敷砂の緩衝効果により重錘衝突初期の振幅がG-S1-aに比較して1/7~1/6程度に低減している。また、G-S1-aの独立した正弦半波状の波動が見られず、継続時間が200 ms程度の正弦半波波形と周期が40 ms程度の高周波成分から成る波形となっている。支点反力波形はG-S1-aと同様に初期変位波形の正弦半波に重錘衝撃力波形が合成されたような分布性状を示している。変位波形は、緩衝材の影響によってG-S1-aの場合よりもさらに遅れて励起し、立ち上がりの勾配も緩やかに示されている。したがって、最大値発生までの経過時間も長い。なお、一部重錘衝突後に非接触式レーザ変位計のレーザ光線が飛散した砂によって遮られたため測定ができなかった。200 ms前後から波線となっているのは、推定値として繋いだものである。

3.3.6 吸収エネルギー

実ロックシェッドと同様に90 cm厚の敷砂材を設置した場合の本試験体の終局時落石条件を、落石質量5 000 kg、落下高さ27.5 m（落石エネルギーで $E=1\,348.4$ kJ）とすると、落石エネルギー的には現行の許容応力度設計における落石条件（ $E=93.2$ kJ）に対して14.5倍の安全余裕度を有していることがわかる。このことは、提案のPRC桁を採用することにより、所用の安全余裕度を確保しても設計落石エネルギーを数倍程度まで大きく設定可能であることを意味している。

3.3.7 実験のまとめ

PC鋼材の緊張率を従来の50%に低減し、下端筋鋼材に

総ネジPC鋼棒を使用した、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PRC桁を対象に、重錘落下衝撃実験を実施した。本実験により得られた結果を要約すると、以下のとおりとなる。

- 1) 実規模試験体において、PC鋼材の緊張率を50%に低減し下端筋鋼材に総ネジPC鋼棒を用いたPRC桁は、現状のPRC桁よりも耐衝撃性に優れていることが確認された。
- 2) 本PRC桁の終局時の破壊形態は、敷砂厚を90 cmとした場合には曲げ破壊型となる。
- 3) 本PRC桁の終局時を残留変位が純スパン長の1%に達した時点とした場合の終局時落石エネルギーは、現行の許容応力度設計による落石条件に対して、落石エネルギー的には約14.5倍の安全余裕度を有している。

4. あとがき

本稿ではPC技術を用いた防災構造物の一例としてロックシェッドを取り上げ、その現行の設計法と将来に向けた取り組みなどについて述べた。

実験の結果からも明らかのように、エネルギー論的な概念に基づいた設計を行う場合には、現行の設計法を適用する場合に比較して、衝撃じん性能やエネルギー吸収性能に優れた構造物を安価に提供することが可能であるものと判断される。

このようにPC技術を用いたロックシェッド等の防災構造物に関しても衝撃じん性能に優れた安全性の高い構造物が提供されることが期待される。そのためには、効果的に衝撃エネルギーを吸収できる構造形式、使用材料の適用方法等を研究整理し、設計手法を確立することが重要であるものと判断される。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ8 ロックシェッドの耐衝撃設計，1998
- 2) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1985

- 3) 土木学会：落石対策便覧，2000
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002
- 5) 今野，池田，岸，竹本：落石覆工用 PRC 主桁の耐衝撃設計法，第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-108，2002
- 6) 今野，池田，岸，竹本：敷砂を設置した落石覆工用 PRC 桁の重錘

- 落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文集，vol.26，No2，2004
- 7) 土木学会：構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用，2004

【2004 年 10 月 4 日受付】



刊行物案内

フレッシュマンのためのPC講座 プレストレストコンクリートの世界

頒布価格：会員特価 3 000 円（税込み・送料別途 400 円） ○申込み先：

：非会員価格 3 600 円（税込み・送料別途 400 円）

体 裁：A4判，140頁

内容紹介

(社)プレストレストコンクリート技術協会 事務局

〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4番6号 第3都ビル5F

TEL：03-3260-2521 FAX：03-3235-3370

＝基 礎 編＝

- 基 礎 編 1 PCとは何か
- 基 礎 編 2 PCはどんなものに利用できるか
- 基 礎 編 3 プレストレスの与え方について考えてみよう
- 基 礎 編 4 プレストレスは変化する
- 基 礎 編 5 荷重と断面力について考えてみよう
- 基 礎 編 6 部材に生じる応力度について考えてみよう
- 基 礎 編 7 プレストレス量の決め方について考えてみよう
- 基 礎 編 8 PCに命を与えるには(プレストレッシングとその管理)
- 基 礎 編 9 PCを長生きさせよう

＝PC 橋 編＝

- PC 橋 編 1 PC橋にはどんなものがあるか
- PC 橋 編 2 PC橋を計画してみよう
- PC 橋 編 3 PC橋を設計してみよう
- PC 橋 編 4 現場を見てみよう

＝PC 建築 編＝

- PC 建築 編 1 PC建築とは
- PC 建築 編 2 PC建築にはどんなものがあるか
- PC 建築 編 3 プレキャストPC建築の設計について考えてみよう
- PC 建築 編 4 PC建築でオフィスを設計してみよう

資 料 PCを勉強するときの参考図書
索 引