

(49) 実規模ハーフプレハブ鋼・コンクリート合成 落石覆道に関する重錘落下実験

Prototype weight falling impact test on half-prefabricated steel-concrete composite rock-sheds

近藤 悦郎*, 池田 憲二**, 今野 久志***, 温泉 重治****, 岸 徳光*****

Etsuro Kondo, Kenji Ikeda, Hisashi Konno, Shigeji Onsen, Norimitsu Kishi

*工修, ショーボンド建設(株), 北海道支店技術部 (〒003-0004 北海道札幌市白石区東札幌4条2丁目1番6号)

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

***工修, 北海道開発局開発土木研究所, 構造部構造研究室 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

****ショーボンド建設(株)部長, 北海道支店技術部 (〒003-0004 北海道札幌市白石区東札幌4条2丁目1番6号)

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

In rock-sheds constructed over the road near mountainous and/or coastal area to protect vehicles and people from falling rocks, usually Reinforced Concrete (RC), or Prestressed Concrete (PC), and/or steel type structures are applied. However, the dimensions of those structures are enlarged to ensure the safety against the bigger falling rocks and can not be reduced the construction costs. Here, in order to solve the defects of the conventional types of structures, a new type of rock-shed is developed which is composed of the upper and lower surface steel plates with bolts and filled concrete for roof slab and concrete filled steel columns (hereafter, half-prefabricated steel-concrete composite type rock-shed). In this paper, the design concept on this type of structure and its features are described, and also its applicability is confirmed performing the prototype steel weight falling impact test.

Key Words : half-prefabricated, rock sheds, steel-concrete composite

1. はじめに

現在供用されている落石覆道は、RC、PC および鋼製が一般的である。RC および PC 構造の場合には、通常頂版厚が1m程度で、緩衝材の質量も考慮するとトッパヘビー型の構造となり、その結果基礎も大規模なものとなる。また、鋼製の場合には、施工性には優れているものの経済性に劣るため、一般に小規模な落石に対して設計される場合が多いようである¹⁾。

著者らは、耐衝撃性や経済性に優れた落石覆道を開発することを目的として、上下鋼板をボルトで結合した構造にコンクリートを充填した鋼コンクリート合成サンドウィッチ構造が、軽量かつ高耐荷力であり、じん性に優れることに着目し、実規模の覆道模型を作製し重錘落下衝撃実験を行った。

本構造の特徴は、①撓化性があることにより、RC、PCと比較して落石荷重のエネルギー吸収性が高いこと、②破壊形式が延性的な曲げ破壊が卓越し、押し抜きせん断破壊を生じないこと、③同一落石荷重であれば、RC構造と比較して大幅なコストの縮減が可能であることなどが挙げられる。

また、覆道の柱部および頂版部は、工場製作が可能で

あることより、現場にてコンクリートの打設を行うハーフプレハブ化が可能となり、施工性および経済性に優れている。

本文では、鋼コンクリート合成構造製落石覆道（以降、サンドウィッチ覆道またはサンドウィッチ頂版）の特徴について概説し、その衝撃挙動の把握を目的に実施した実規模覆道模型による重錘落下衝撃実験および3次元動的解析により得られた結果について述べる。

2. 構造概要および特徴

2. 1 構造概要

サンドウィッチ覆道の構造を、図-1 および図-2 に示す。サンドウィッチ落石覆道は、頂版厚約30cmのサンドウィッチ頂版とRC構造の側壁およびコンクリート充填鋼管柱から構成されている。

サンドウィッチ頂版は、厚さ9mmの上下鋼板とガス管(STPG 65A)を配した貫通ボルトから成り、内部は高流動コンクリートを充填している。鋼板の材質は、上鋼板がSS400、下鋼板がSM490である。貫通ボルトは、作用せん断力に抵抗できるように、軸力(14tf/本)を導入している。

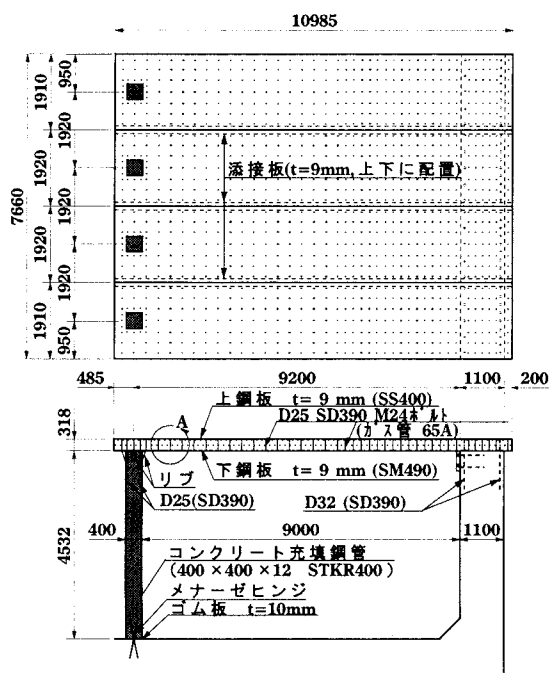


図-1 実規模覆道模型の形状寸法（単位：mm）

ボルト径は、M24とし、ボルト間隔は、300 mm または 200 mm 間隔で配置することを標準としている。

柱部は、厚さ 12 mm の角形鋼管 (STKR400) と流動コンクリートによる合成構造とし、頂版コンクリート打設と同時に鋼管内にもコンクリートを充填し、頂版との一体化を図っている。高流動コンクリートの打設に際しては、より完全な充填を確保するため、上側鋼板の打設口に鋼管を設置し、水頭圧を利用するように工夫している。また、頂版部のコンクリート自重によるたわみを打ち消すために、頂版部にはあらかじめカンバーをつけている。なお、これらのカンバー計算は、骨組解析により比較的精度良く算定できることが、既往の実験²⁾により確認されている。

柱基部はメナーゼヒンジ構造としている。また側壁部は厚さ 110 cm の RC 構造とした。

サンドウィッチ頂版と側壁および柱部との接合部の構造は、側壁側は頂版からアンカー鉄筋を配筋して一体構造とした。柱側はサンドウィッチ頂版の上側鋼板と軸力を導入したボルトにより剛結している。

また、接合部での局部的な破壊を防止するために、柱部にはリブ ($t = 16 \text{ mm}$) を設置し、側壁部には厚さ 9 mm の鋼板を配置するとともに、水平方向にアンカー筋を埋込む補強対策を施している。

2. 2 特徴

サンドウィッチ落石覆道の特徴は、以下のとおりである。

る。

- ①脆性的な押し抜きせん断破壊を生じず、かつ撓化構造であることより、耐衝撃特性に優れている。
- ②頂版の薄肉化により、大幅な自重の軽減が図られる。
- ③構成される部材が単純である。
- ④柱および頂版は、コンクリート打設前の状態で自立する構造であり、型枠や支保工の仮設を必要としない。
- ⑤柱および頂版は工場製作でハーフプレハブ製であり、現場工期の大幅な短縮が可能である。
- ⑥全てボルト構造としているため、現場での溶接作業がない。
- ⑦縦断勾配や道路線形への対応が容易である。

本覆道に関する重錘落下衝撃実験の詳細は後述するため、ここでは省略するが、撓化性、耐衝撃性に優れていることが確認されている。また、従来の RC や PC 覆道と比較して、②～⑥の特徴を有していることから、軽量化、省力化および簡素化が可能となり、建設コストの削減が図られている。

3. 実規模覆道模型による重錘落下衝撃実験

3. 1 覆道模型の設計

実大規模覆道模型を作製するに際して、検討を行った結果について、概説すれば以下のとおりである。なお、詳細については、既往の文献³⁾を参照されたい。

(1) 頂版厚の決定

実規模覆道模型の頂版厚さの決定に際しては、頂版部のみについて行った既往の実験⁴⁾を参考に決定した。

なお、この実験は、4m × 4m の合成頂版（断面形状は、図-2 と同様）の 2 辺を単純支持した状態で、10 t の重錘を 30 m の落下高さから頂版中央に自由落下させ、衝撃応答特性の確認を行ったものである。

実験の結果、RC 版の 1 / 2 の厚さで RC 版と同等以上の耐衝撃性を示すことが確認されている。また、単純支持された等方性版に集中荷重が作用したとして求めた断面力から頂版に生じる応力を求め、実験値と比較した結果、両者はほぼ一致するとの知見が得られている。

従って、実規模覆道模型は、頂版寸法の増大によって固有周期が長くなること、および等方性版と考えた場合には、部材寸法に関わらず断面力はあまり変化しないことから、頂版厚を同一とするものとした。

(2) 部材の設計

各部材の設計に際しては、2 次元静的骨組解析による断面力を用いて部材の設計を行うとともに、全体系および接合部の挙動を確認するために 3 次元静的 FEM 解析による検討を行った。

落石荷重は、既往のサンドウィッチ頂版のみの重錘落下衝撃実験⁴⁾で得られた重錘加速度の最大値を用いて算定評価した。以下、部材毎の設計の考え方について簡単に述べる。

頂版部については、上下鋼板を考慮して通常の RC 部

材の曲げ耐力算定法により安全性の照査を行った。また、ボルト径、ボルト間隔およびボルト軸力については、コンクリート打設時の剛性の確保および作用せん断力に対して抵抗するように決定した。

柱部は、文献⁵⁾に準じて、軸方向圧縮力と曲げモーメントを同時に受ける合成柱として設計している。

接合部の設計は、許容応力度設計法により検討を行い、曲げおよびせん断に対する応力度の照査を行った。

3. 2 実験概要

実験に用いた覆道模型は、前述の図-1 に示すとおりである。重錘落下衝撃実験は、サンドウィッチ頂版の中央に 10 tf の重錘を最大 30 m の高さから自由落下させることにより行った。落下高さは、2.5 m ピッチで段階的に大きくした。緩衝材としては、厚さ 90 cm の敷砂を用いた。測定項目は、重錘の加速度、上下鋼板と柱部のひずみおよび頂版変位であり、すべて動的に計測した。

3. 3 実験結果および考察

(1) 破壊状況

実験は、緩衝材として用いた敷砂厚 90 cm に対して、重錘の敷砂への陥入量が超過した場合、重錘が損傷する可能性があるため、落下高さ 30 m で終了した。従って、本覆道の動的挙動は、本実験の範囲では終局時までは得られていない。

本実験の範囲では、段階的な重錘落下衝撃実験にともなって、残留変位が観察されたものの、外観上の顕著な損傷は認められなかった。実験終了時の重錘落下点近傍の残留変位は、20 mm 程度であった。

実験終了後に上面鋼板および内部コンクリートの状況を観察した結果、重錘落下点直下の鋼板に僅かな変形および内部コンクリートの軽微な損傷が認められたものの、接合部や柱部の損傷は見受けられなかった。

また、実験終了後の頂版は、上下鋼板とコンクリートとの間に、はく離を生じていたことが打撃音調査によって確認されている。しかしながら、本構造は上下鋼板とコンクリートとの合成効果を、貫通ボルトにより伝達する構造であり、付着力に期待していないため、合成効果は実験終了時点まで維持されていたものと考えられる。

(2) 重錘衝撃力の挙動

重錘に設置した加速度計により得られた最大加速度を用いて算出した最大重錘衝撃力と、振動便覧式⁶⁾から算定される落石衝撃力との比較を図-3 に示す。

現在、落石覆道に作用する落石衝撃力は、落石対策便覧に基づき、RC、PC、鋼製を問わず頂版上に 90 cm 厚の敷砂緩衝材を設置し、敷砂のラームの定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ と仮定して、算定評価している。

しかしながら、既往の実験結果⁷⁾によれば、最大重錘衝撃力は、ラームの定数が $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ とした値とほぼ対応することが明らかとなっていることから、図中では、 $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とした場合の他、 $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ とした場合の計算値を併記している。

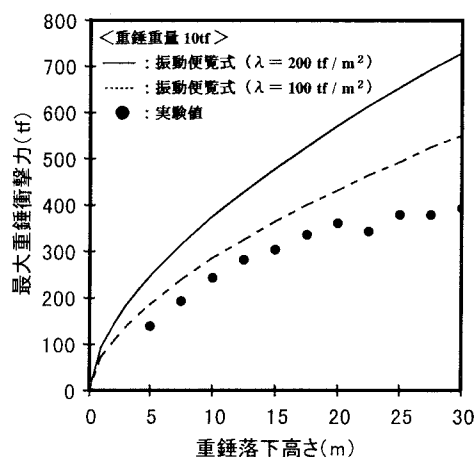


図-3 最大重錘衝撃力と重錘落下高さの関係

図より、本覆道の重錘衝撃力は、従来の RC および PC 構造の落石覆道とは異なり、いずれの落下高さにおいても $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とする場合より小さい値を示していることがわかる。すなわち、同一落石高さであれば、従来の RC や PC 製の落石覆道と比較して、より大きな落石荷重に耐え得ることを示している。これは、RC、PC 製の場合にはより剛な構造となっているのに対し、本合成構造の場合には脆化性に富み、落石エネルギーを効率よく吸収するためと推察される。

(3) 頂版部および柱部の挙動

重錘落下衝撃実験における上下鋼板のひずみ挙動は、落下点直下を除き、弾性範囲内であった。落下点直下の上鋼板のひずみは、30 m の落下高さの時点で、著しく大きな値となった。これは、上述のように鋼板および内部コンクリートに、軽微な凹状の変形が生じていたことが一因ではないかと推察される。

落下高さ 30 m における下面鋼板ひずみの最大値は、 1500μ 程度であり、事前の 3 次元静的 FEM 解析の結果 (1350μ) と概ね一致した。

重錘落下衝撃実験における鋼コンクリート合成柱部のひずみ挙動は、実験終了時まで弾性範囲内にあった。また、断面方向のひずみ分布は、図心にほぼ対称であり、実験終了時点まで、合成効果を維持していたことが確認された。

4. 3次元動的解析による衝撃挙動の推定

4. 1 概要

サンドウィッチ覆道の衝撃挙動について、基礎的な資料を得ることを目的に、3次元動的解析を実施した。

解析では、実規模サンドウィッチ覆道(覆道軸方向長さ 7.66 m、柱 4 本)の重錘落下衝撃実験に先立って実施した 1 ブロック(覆道軸方向長さ 1.92 m、柱 1 本)のみの重錘落下衝撃実験⁸⁾との比較を行うこととし、図-4 に示すモデルを用いて行った。なお、解析には、非線形衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA を用いている。

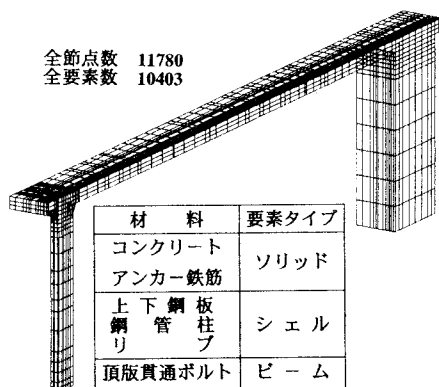
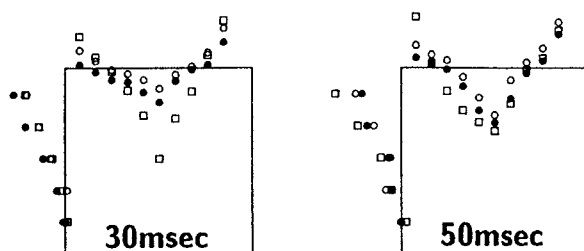


図-4 解析モデル



○ : CASE-1, □ : CASE-2, ● : 実験値
図-5 解析結果と実験値との比較

4. 2 解析方法

解析は、重錘重量 3 tf、落下高さ 10 m のスパン中央載荷の場合について 2 ケース実施した。CASE-1 は、伝達衝撃力を重錘衝撃力の 2 倍と仮定して実験より得られた重錘衝撃力波形を用いて評価した場合である。CASE-2 は、文献⁹⁾に準じ、振動便覧式におけるラームの定数を $800 \text{ tf} / \text{m}^2$ として伝達衝撃力を求め、全載荷時間を 35 msec とする台形分布波形を用いて評価した場合である。すなわち、CASE-1 は、サンドウィッチ覆道の実験結果に基づき、伝達衝撃力を仮定して解析したものであり、CASE-2 は、最近提案された RC 覆道の動的設計手法に基づき解析したものである。

4. 3 解析結果および考察

解析によって得られた各ケースのひずみ分布と、実験で得られたひずみを比較した一例を、図-5 に示す。図中のひずみは、頂版は上鋼板、柱部は断面外側のひずみであり、部材軸より内側が圧縮、外側は引張として表示している。

図より、実験値は CASE-2 の RC 覆道の動的設計手法のひずみ分布よりも小さい値となり、サンドウィッチ覆道の伝達衝撃力は、その撓化性により RC 覆道の場合よりも小さいものと考えられる。また、実験値は、伝達衝撃力を重錘衝撃力の 2 倍と仮定し、伝達衝撃力を低減して解析した CASE-1 の値とほぼ一致していることから、サンドウィッチ覆道の衝撃特性については、本解析手法により、概ね実験値を推定できるものと思われる。

以上のことより、サンドウィッチ覆道の衝撃特性は、撓化性に優れた構造であることより、RC 覆道のそれとは異なることが明らかとなった。

5. まとめ

鋼合成サンドウィッチ頂版を有する落石覆道について、実規模重錘落下衝撃実験および 3 次元動的 FEM 解析を行った。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 実規模のサンドウィッチ覆道に対し、10 tf の重錘を 30 m の高さから自由落下させた場合でも、落下点直下に軽微な損傷を生じたものの、各部材は弾性範囲内であった。
- 2) サンドウィッチ覆道の重錘衝撃力は、従来の RC および PC 構造の落石覆道と比較して小さくなることから、同一落下高さであれば、より大きな落石に耐え得るものと考えられる。
- 3) 3 次元動的 FEM 解析により、衝撃挙動の推定を行った結果、伝達衝撃力を重錘衝撃力の 2 倍と評価することによって、実験値をほぼ推定できることが明らかとなった。
- 4) 3 次元動的 FEM 解析により、実験結果を満足する伝達衝撃力は、従来の RC 構造の落石覆道と比較して小さくなることが明らかとなった。

以上のように、鋼コンクリート合成構造を用いた落石覆道は、従来の構造形式と比較して耐衝撃性に優れていることが、実験および解析的検討から明らかとなった。

今後、同種の構造物の合理的で簡易な設計手法確立に向けてさらに検討する予定である。

参考文献

- 1) 佐藤昌志：RC 落石覆道の合理的耐衝撃設計手法に関する研究、学位論文、北海道大学、1997.6
- 2) 谷口直弘、温泉重治、今野久志、佐藤昌志、西弘明：建設コスト削減を目指した中空鋼床版の開発について、土木学会北海道支部論文報告集、第 54 号(A), pp.340-343, 1998.2
- 3) 近藤悦郎、温泉重治、佐藤昌志、今野久志、岸徳光：鋼合成サンドイッチ構造を用いた落石覆道の開発、土木学会北海道支部論文報告集、第 55 号(A), pp.80-83, 1999.2
- 4) 野原栄治、今野久志、岸徳光、西弘明：鋼合成サンドイッチ版の耐衝撃特性に関する実験と考察、土木学会北海道支部論文報告集、第 54 号(A), pp.46-49, 1998.2
- 5) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 [平成 9 年度版]、1987.9
- 6) 日本道路協会：落石対策便覧、1983
- 7) 岸徳光、中野修、松岡健一、西弘明：野外実験による敷砂の緩衝性能、構造工学論文集、Vol.39A, pp.1587-1597, 1993.3
- 8) 佐藤昌志、岸徳光、西弘明、温泉重治、川瀬良司：鋼・コンクリート合成頂版を有するロックシェッドの衝撃挙動、土木学会北海道支部論文報告集、第 55 号(A), pp. 84-89, 1999.2
- 9) 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, 1988.11