

鋼・コンクリート合成構造を用いた重錘落下衝撃実証実験

PROTOTYPE IMPACT TEST OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE TYPE ROCK-SHEDS

佐藤昌志*, 池田憲二**, 今野久志***, 岸 徳光****, 巽 治*****

Masashi SATO, Kenji IKEDA, Hisashi KONNO, Norimitsu KISHI, Osamu TATSUMI

*博(工) 国土交通省北海道開発局次長 旭川開発建設部 (〒070-8528 旭川市八条通12丁目)

**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34)

***博(工) 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34)

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

***** (株) ケイジーエンジニアリング部長 事業部 (〒065-0020 札幌市東区北20条東15丁目3-1)

キーワード: 落石覆工, 重錘落下実験, 鋼・コンクリート合成構造, 伝達衝撃力

rock-shed, falling-weight impact test, steel-concrete composite structure, transmitted impact force

1. はじめに

急峻な地形に隣接する道路において, 落石による災害から安全な道路交通網を確保するための落石覆工は, 今後更に整備が必要な構造物の一つと考えられる. しかし, 基盤整備におけるコスト縮減は社会の趨勢であり, 整備にあたっては, 緩衝性能のみならずより経済性に優れた覆工構造の開発が望まれている.

近年, 鋼・コンクリート合成の新しい構造形式が開発され, 道路橋や鉄道橋床版などで多く採用されている. 鋼・コンクリート合成構造は, ①靱性に富み, RC, PC 構造に比較してエネルギー吸収能力が高いこと, ②破壊形態が延性的な曲げ破壊先行で, 押し抜きせん断破壊を生じないこと, ③軽量化とそれに伴う耐震性の向上が期待できること, ④施工省力化や工期短縮に伴うコスト低減が期待できること等, 多くのメリットが期待される構造形式である.

北海道開発局は, 鋼・コンクリート合成構造形式の版 (サンドイッチ版) が有する高い耐荷性能と優れた靱性能, また効率のよい施工性に着目し, 落石覆工への適用を目指して実規模模型による重錘落下衝撃実験を実施してきた.

その研究成果を受け, この度国道 39 号線層雲

峡に位置する屏風岩覆道において落石覆工頂版部に鋼・コンクリート合成構造サンドイッチ版が初めて採用された. 北海道開発局では, 鋼・コンクリート合成構造を落石覆工に適用する場合の耐衝撃性能の照査を目的に, 屏風岩覆道で重錘落下衝撃実験を実施したので報告する.

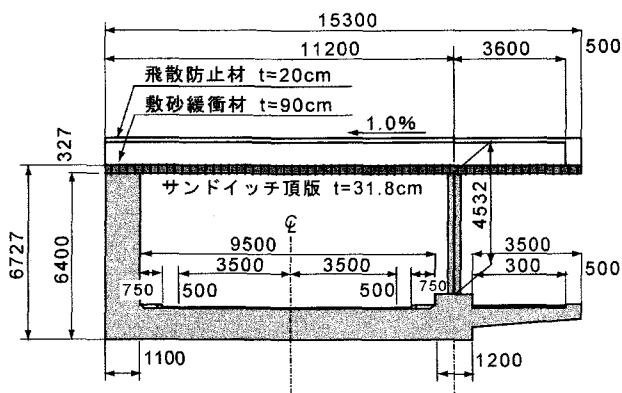
2. 実験概要

2.1 屏風岩覆道

屏風岩覆道は, 北海道開発局旭川開発建設部が, 落石対策のため一般国道 39 号上川町層雲峡に建設した覆道である. なお, 近接する観音岩覆道も同工法により建設された.

屏風岩覆道は, 柱が角形鋼管にコンクリートを充填した鋼・コンクリート合成構造, 頂版に鋼・コンクリート合成構造サンドイッチ版 (以後, サンドイッチ版と記す) を用いた柱式落石覆工である. 同覆道は延長が 216.0 m, 1 ブロック長が 12 m で 18 ブロックに分かれている. 本実験は終点側の第 18 ブロック (以下 BL と記す) において実施した. 18BL の覆道構造を図-1 に示す.

屏風岩覆道の頂版幅員方向幅は 15.3 m であり, 短辺 2,000 mm × 長辺 15,300 mm × 厚さ 318 mm の分割パネルを長辺で接続し, 道路延長方向



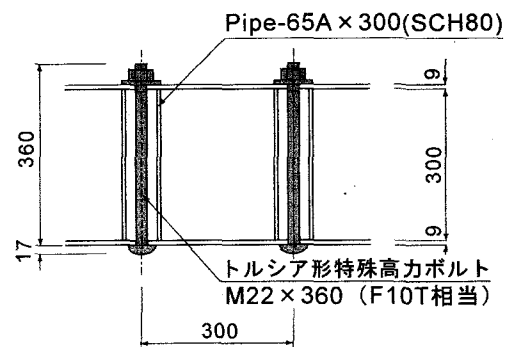
図－１ 18BL断面図および重錘载荷位置

に連続させている。パネルは鋼材部分を工場で組み立て、現場設置位置で添接板によって一体化し、内部に高流動コンクリートを打設して鋼・コンクリート合成構造としている。

柱は 400 mm × 400 mm、板厚 12 mm の角形鋼管にコンクリートを充填した構造で、サンドイッチ版 1 パネルの中間に 2.0 m 間隔で設置されている。なお、側壁および底版は従来同様 RC 構造である。

本サンドイッチ版は上鋼板が SS400、下鋼板が SM490YB で、板厚は共に 9 mm であり、上面の鋼板は壁から 2.1 m の範囲を 2 枚重ねとしている。上下鋼板間は、スペーサとなる鋼管（呼径 65A、 $t = 7$ mm、長さ 300 mm）を縦横 300 mm 間隔で設置し、M22 × 360 mm（F10T 相当）の高力ボルトを貫通させて締結している。鋼板と鋼管は、高力ボルトに 70.6 kN/本 の軸力を導入することにより一体化が図られている。（図－２に断面詳細図）

柱の角形鋼管は STKR400、中詰コンクリートは



図－２ 屏風岩覆道サンドイッチ版

表－１ 合成構造部材の許容応力度

鋼材		
部材	仕様	許容応力度 (落石時) (MPa)
上面鋼板	SS400	215
下面鋼板	SM490YB	321
角形鋼管	STKR400	215
コンクリート		
部材	仕様	許容応力度 (落石時) (MPa)
頂版部	高流動	30.6
柱部	コンクリート	24.5

高炉セメント B 種を用いた高流動コンクリートである。コンクリートの 28 日圧縮強度は 54 MPa であり、実験時はコンクリート材令が約 60 日であった。なお、設計圧縮強度はが 30 MPa 以上と規定されている。

覆工頂版上は、厚さ 900 mm の敷砂緩衝材を敷設し、その上に厚さ 200 mm の飛散防止材（転用土）が盛土される。

2.2 屏風岩覆道の設計落石荷重

屏風岩覆道の設計落石荷重は落石シミュレーションにより決定されている。すなわち、直径 2 m の岩石（質量 $M = 10,470$ kg、 ϕ 200 cm、 $\rho = 2.5$ g/cm³）が、入射角度 45° で覆道背面の敷砂緩衝材上でリバウンドし、その後覆工頂版上に入射角度 45° で作用すると想定されている。設計落石衝撃力は $P_0 = 1.7$ MN である。入射角度が 45° であり鉛直方向衝撃分力は $P_V = P_0 \times \sin 45^\circ = 1.20$ MN となる。

実験には重量 19.6 kN の重錘を用いた。振動便覧

表－２ 実験ケース一覧

実験 ケース	敷砂 緩衝材 (cm)	重錘 質量 (kg)	落下 位置	落下 高さ (m)
C1	90	2,000	1/4 壁側	6,10
C2			中央	2,4,6,8, 10,17.5
C3			柱側	6
C4			柱上	6,8
C5			張出部	2,4
C6			中央(添)	6,7
C7			柱上(添)	6,8

式によって設計衝撃力に等しい重錘落下高さを求めると、敷砂厚を 900 mm，ラーメの定数を $\lambda = 1000 \text{ kN/m}^2$ として $h \approx 14.3 \text{ m}$ を得る．表－１には設計荷重に対する鋼・コンクリート合成構造部材の許容応力度を示している．

2.3 実験方法およびケース

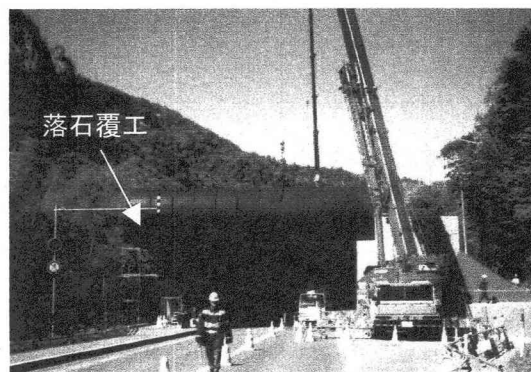
衝撃荷重は，900 mm 厚の敷砂緩衝材のみを敷設した状態で，重量 19.6 kN の鋼製重錘（直径 1.0 m，先端から 37.5 cm 間が球状）をトラッククレーンで所定の高さに吊り上げ，自由落下させて載荷した．トラッククレーンは，国道を片側通行規制し覆道終点側出口付近の規制範囲内に据え付けた．なお，車両の走行によって生じる振動の影響を避けるため，重錘落下実験時は一時的に通行止めを実施した．

載荷位置は，図－１に示されているように，サンドイッチ版 1 パネルの中心線上と，パネルの接続線上の各点とし，中心線上に C1 ～ C5 の 5 点，接続部は C6，C7 の 2 点，計 7 点とした．また，パネルおよび支間の中心を代表載荷点として，C2 を中心に計測器を配置した．実験ケース一覧を表－２に示す．

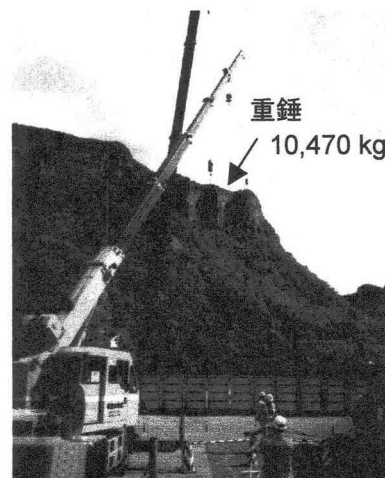
重錘の落下高さは設計荷重および 3 次元衝撃応答解析の結果を基に設定し，現地において覆工各部材応力が弾性範囲内（許容応力度以下）であることを確認しながら落下高さを上げることとした．なお，代表載荷点である C2 において，最大落下高さを $h = 17.5 \text{ m}$ までとした．

2.4 測定項目

測定項目は，①重錘加速度 (3ch)，②覆工頂版上面の伝達衝撃応力 (15 ch)，③頂版と柱部鋼版のひ



写真－１ 屏風岩覆道



写真－２ 実験状況

ずみ (122 ch)，および④頂版および柱の変位 (22 ch) である．

写真－１には国道上からの実験風景，写真－２には覆工頂版上における実験状況を示している．

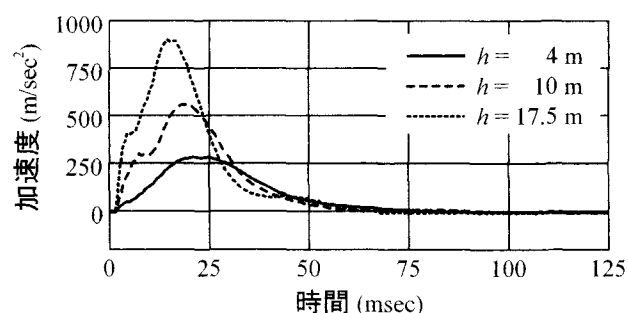
3. 実験結果のまとめ

本文では，載荷ケース C2 を中心に実験結果について述べる．

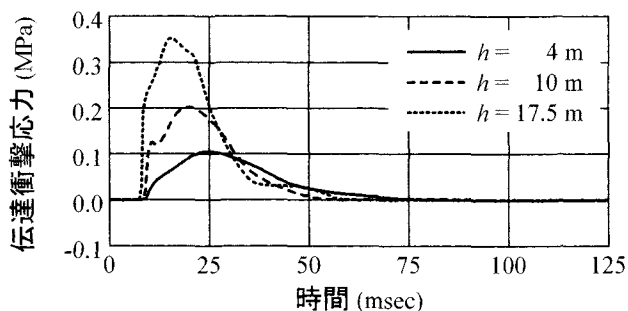
3.1 重錘加速度波形と頂版の反応波形

図－３(a)～(e)には，載荷ケース C2，落下高さ $h = 4 \text{ m}$ ， 10 m ， 17.5 m 時の重錘加速度，および落下点中心位置の伝達衝撃応力，サンドイッチ版の載荷点変位，サンドイッチ版上下面ひずみの各波形を示している．

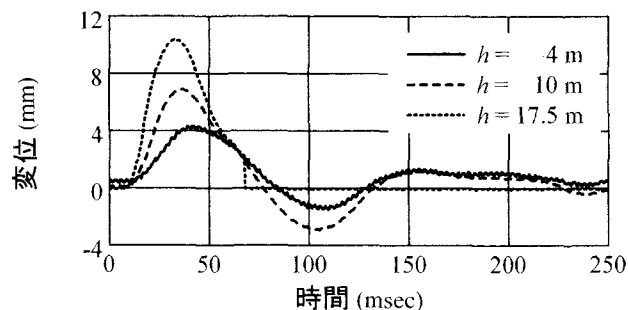
(a)図より，重錘加速度は，落下高さが高いほど波動の立ち上がりが急速になりピークまでの到達時間および波動継続時間が短くなる傾向のあることがわかる．主波動の継続時間は 60 ～ 70 msec 程度で，剛基礎上に設置した敷砂緩衝材に関する重錘落下実験の結果の 2 倍程度の値を示している．これ



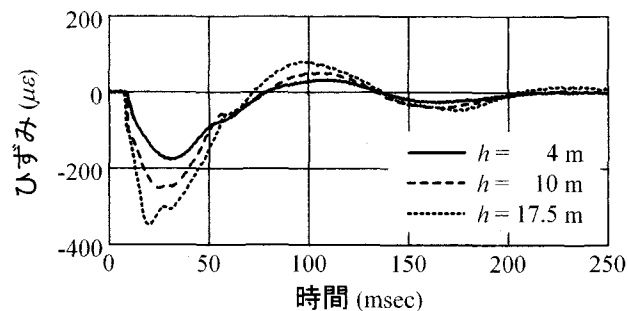
(a) 重錘衝撃(加速度)波形



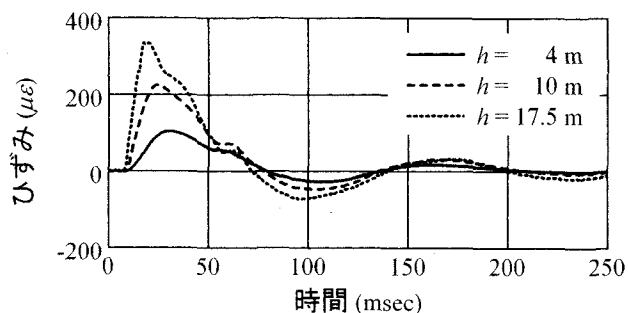
(b) 伝達衝撃応力波形



(c) 頂版下面変位計波形



(d) 頂版上面ひずみゲージ波形



(e) 頂版下面ひずみゲージ波形

図-3 測定波形(実験ケース C2)

は、サンドイッチ版の撓化性によるものと推察される。

次に(b)~(e)図の各波形と(a)図の重錘加速度波形との比較を行う。重錘加速度波形と比較すると、各波動の立ち上がりは、伝達衝撃応力波形が6.5 msec、変位波形が9.5 msec、鋼板の上面ひずみは8 msec、下面ひずみが9.5 msec程度遅れて立ち上がっている。また各波動のピーク値に関しては、頂版の場合には重錘加速度のピーク時に対して約17 msec遅れているが、鋼板ひずみの場合には、波動立ち上がりの遅れが数 msec あるにもかかわらずピークの遅れは2 msec、伝達衝撃応力の場合にはほぼ同一時間にピークが発生していた。

3.2 重錘衝撃力と伝達衝撃力

図-4には、載荷ケース C2 に関する最大衝撃力と落下高さの関係を示している。また、図中には比較のために振動便覧式においてラーメの定数を $\lambda = 500, 1000, 1500, 2000 \text{ kN/m}^2$ とした場合の衝撃力分布を示している。なお、重錘衝撃力は重錘質量と加速度の積により、伝達衝撃力は載荷点を中心に軸対称分布するものと仮定して算定している。

図より、剛基礎上の敷砂緩衝材の場合と異なり、重錘衝撃力と伝達衝撃力値に大差のないことがわかる。実験結果は、落下高さが $h = 17.5 \text{ m}$ の場合を除き、ラーメの定数が $\lambda = 1500 \text{ kN/m}^2$ とすることにより安全側で評価可能であることが分かる。また、落下高さが $h = 17.5 \text{ m}$ の場合には $\lambda = 2000 \text{ kN/m}^2$ とする場合よりも大きな値を示している。

図-5には、載荷ケース C2、落下高さ $h = 10 \text{ m}$ における重錘衝撃力と伝播衝撃力の経時変化を、また表-3には伝達衝撃力を重錘衝撃力で除した衝撃力の伝達率の一覧を示している。図より、重錘衝撃力は最大衝撃力発生時近傍の分布性状がより鋭角であるのに対し、伝達衝撃力の場合には緩やかな分布性状を示している。これはサンドイッチ版の撓化性の影響によるものと推察される。表-3に示されているように、衝撃力の伝達率は、前述のとおり剛基礎上に設置した敷砂緩衝材の場合と異なり(伝達率が1.5 ~ 2.0程度)、落下高さが低い場合はほぼ1.0であるが、6 mを越えると1.0よりも小さい傾向を示している。

図-6には、最大重錘衝撃力発生時の頂版上面の伝達衝撃応力の分布を示している。応力の分布に多少バラツキは認められるが、落下点中央付近をピー

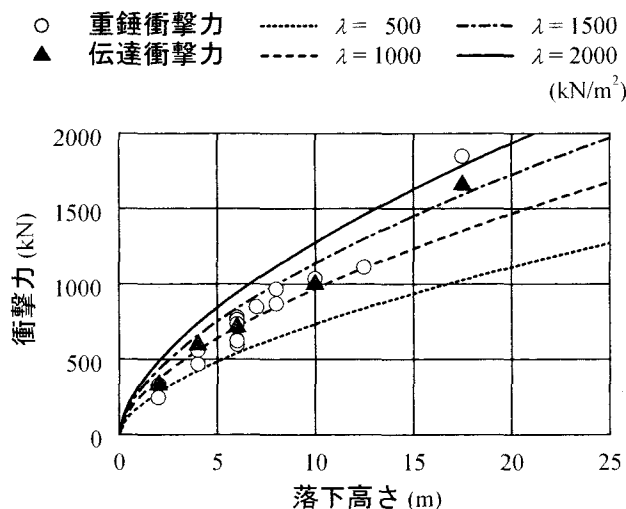


図-4 衝撃力-落下高さ分布図

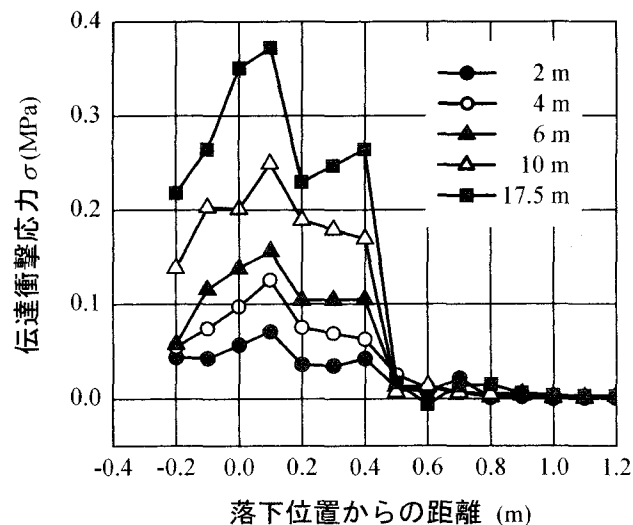


図-6 伝達衝撃応力分布図（载荷ケースC2）

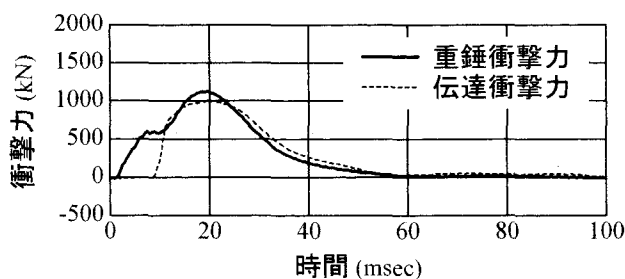
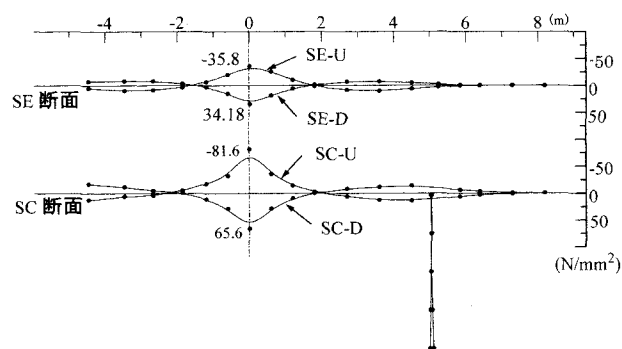
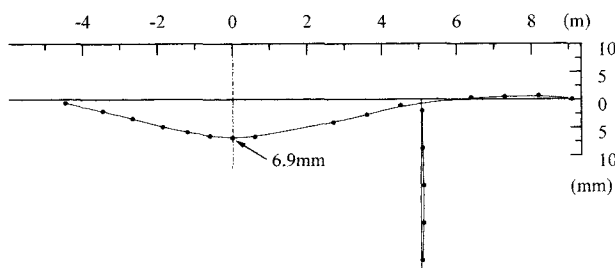


図-5 重錘衝撃力および伝達衝撃力波形



(a) 断面方向応力分布



(b) 変位分布

図-7 横断方向応力および変位図

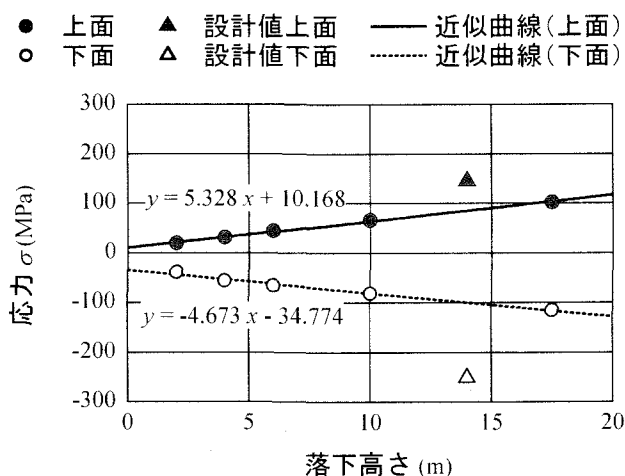
クとし、中心から 0.4 m までは落下高さに対応して 0.1 MPa ~ 0.3 MPa の値を示しているが、0.5 m の位置で急激に低下し以遠ではほぼ零応力であることが分かる。これは、重錘の直径が 1.0 m であることより、伝達衝撃応力は重錘の落下領域にほぼ均等に分散分布していることを示唆している。

3.3 頂版部および柱部のひずみ、変位

図-7(a), (b)に、実験ケース C2、落下高さ $h = 10$ m 時の頂版および柱の道路軸直角方向の応力、

変位の分布を示す。

(a)図は、重錘落下点直下における最大下面鋼板応力発生時における応力分布である。図中の SE 断面は添接板部を、SC 断面は重錘落下点位置を含む柱パネル中央部の応力分布を示している。最大応力は、SC 断面で鋼板下面が 65.6 MPa の引張応力、上面が 81.6 MPa の圧縮応力であり、上面のひずみが大きく、サンドイッチ版内で中立軸が引張側に偏心している傾向がみられる。引張および圧縮の



図－8 サンドイッチ版の落下位置応力度

表－3 設計頂版応力度と実験値の比較

	落下 高さ	入力 エネルギー (kJ)	頂版 下面 応力 (MPa)	頂版 上面 応力 (MPa)
設計値	14.0	274.4	251.0	145.0
実験値	10.0	196.0	65.6	81.6
	17.5	343.0	102.5	136.3
実験結果 による 推定応力度	14.0	274.4	86.9	111.6

範囲は、重錘落下位置から道路幅員方向にそれぞれ約 1.6 m であった。(b)図は変位の分布を示している。重錘落下点直下で最大変位 6.9 mm を示し、柱の変位はほとんど認められなかった。

3.4 設計頂版応力度との比較検討

本実験では、C2 位置において最大重錘落下高さ $h = 2 \text{ m} \sim 17.5 \text{ m}$ の落下衝撃実験を行った。図－8 に落下高さごとのサンドイッチ版の鋼板に発生する最大応力分布を、また、表－3 には設計落石エネルギーとサンドイッチ版鋼板の設計応力度、実験時の入力エネルギーおよび最大発生応力を示している。

図より、鋼板の最大応力度は、重錘落下高さに対してほぼ比例関係にありことが分かる。また、落下高さが $h = 28 \text{ m}$ の場合においても各応力は 280 MPa よりも小さいものと推察され、本サンドイッチ版は設定入力エネルギーに対して 2 倍以上の安全余裕度の有していることが分かる。

4. まとめ

鋼・コンクリート合成構造による落石覆工として、初めて採用された屏風岩覆道において、その耐衝撃性能を確認するための重錘落下衝撃実験を行った。本研究により得られた結果を要約すると、以下のように示される。

- (1) 90 cm 厚の敷砂緩衝材を用いる場合の重錘衝撃力、伝達衝撃力は、剛基礎上や RC ロックシェッド頂版上の場合と異なり、ラーメの定数を $\lambda = 1500 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式で推定可能である。また、両衝撃力は大きく類似している。
- (2) 各衝撃力波形の継続時間は、剛基礎上における実験値の 2 倍程度となる。これはサンドイッチ床版の撓化性によるものと判断される。
- (3) 頂版の鋼板における発生応力は検討した全ての点において設計値よりも小さく、許容応力度に対しても 2 倍以上の安全余裕度のあることが明らかとなった。

以上より、本覆道は、経費削減、工期短縮、省力化施工を目的として設計施工された覆工構造物であるが、十分な耐衝撃安全性を有することが確認された。

参考文献

- 1) 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集, Vol.54A, pp.46～49, 1998.2.
- 2) 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ッドの衝撃挙動, 土木学会北海道支部論文集, Vol.54A, pp.84～89, 1998.2.
- 3) 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], pp.67～72, 1998.11.
- 4) 上田多門, 塩屋俊幸: 鋼コンクリート系サンドイッチ構造, コンクリート工学, 第30巻5号, pp.5～20, 1992.
- 5) 太田貞次, 清宮 理, 清水功男: オープンサンドイッチ梁の耐荷力に及ぼすスターラップと主桁間隔の影響に関する静的載荷実験, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1147～1156, 1996.
- 6) 岸 徳光, 今野久志, 近藤悦郎, 安藤智啓: 鋼・コンクリートサンドイッチ梁の衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1633～1644, 2001.