

論文 鋼・コンクリート合成版を用いた落石覆道の開発

木下昌樹^{*1}・今野久志^{*2}・佐藤昌志^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：工期短縮，経済性および耐衝撃性に優れた覆道の開発，実用化を目的として，鋼・コンクリート合成版を覆道の頂版に応用することを提案し，4 連から成る実規模模型を用いた重錘落下衝撃実験を行った．実験は緩衝材として 90 cm 厚の敷砂緩衝材および三層緩衝構造を用いた場合に関し，重錘質量 10 ton，最大落下高さを 30 m として行った．実験の結果，敷砂緩衝材を用いる場合には上縁応力が降伏点を超える場合もあるが模型は未だ健全であり，提案する合成覆道は耐衝撃性に優れていることが実証的に確認できた．

キーワード：落石，ロックシェッド，覆道，鋼・コンクリート合成構造，衝撃挙動

1. はじめに

既存の RC, PC 製覆道は，永久構造物として，落石以外に地震時に対する応答も考慮して設計されていることから基礎部も含め大がかりな工事となる場合もある．

著者らは，工期短縮，経済性，簡易性および，架設時に支保工を必要としない構造とすることを目的として，鋼，コンクリート，ボルトから構成される合成構造（以下，サンドイッチ版）を考え，覆道頂版への応用の実用化に関する実規模重錘落下衝撃実験を行った．すなわち，90 cm 厚の敷砂緩衝材を設置することを条件に設計された実規模合成構造覆道模型を用い，敷砂緩衝材の他三層緩衝構造を設置した場合の重錘落下衝撃実験を行い，柱部を含めた構造全体に関する落石覆道への適用性について検討している．

ここで，三層緩衝構造は 50 cm 厚の敷砂（上層），20 ～ 30 cm 厚程度の鉄筋コンクリート（RC）版（芯材），50 ～ 100 cm 厚の発泡スチロール（EPS）（下層）から構成される構造である．

サンドイッチ版は，運搬，架設を容易にするため，上下鋼板をボルト連結した中空状態までを工場製作とし，現場にてコンクリートを充填し合成

構造とすることとした．また，サンドイッチ版は，コンクリート充填後の逆キャンバーを防ぐため，工場製作時に予めキャンバーを付けて，現場架設時に支保工を用いないように工夫している．

本実験に先立ち，基礎的なデータを取ることを目的として，道路軸方向幅 1.9 m，道路軸直角方向幅 10.9 m で柱部が 1 本である模型を製作し重錘落下衝撃実験を行った．90 cm 厚の敷砂緩衝材を設置し，重錘質量 3 ton，落下高さ 15 m の場合における実験の結果，サンドイッチ頂版部の最大曲げモーメントが，同規模の幅員を有する PC 覆道頂版部の 1/3 ～ 1/2 程度になることが明らかとなっている¹⁾．また，頂版と柱，壁との接合部，頂版の添接部，頂版のボルトには変形および損傷は確認されず，耐衝撃性に優れていることが確認された．本研究は，これらの基礎実験に基づいて実施されたものである．

2. 実験概要

2.1 試験体設計方法

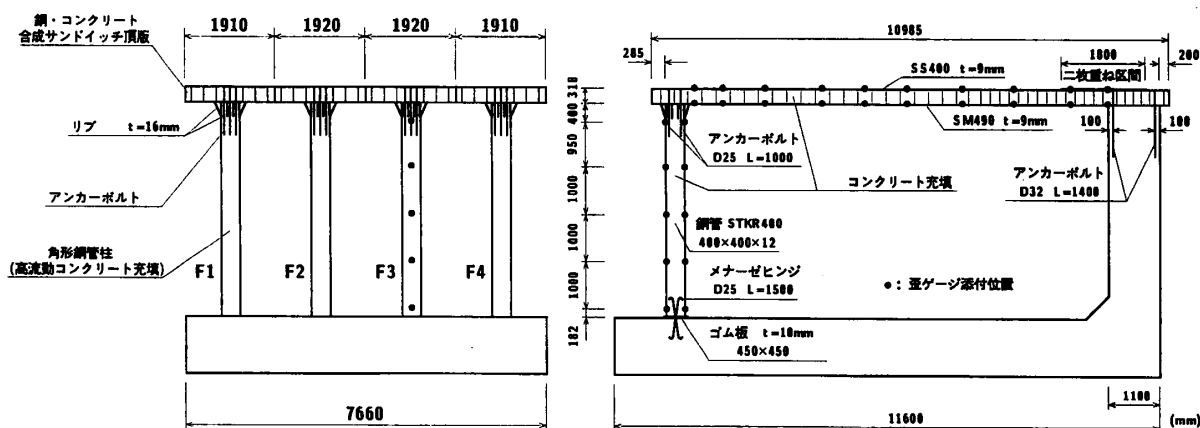
本実験に用いた実規模サンドイッチ覆道は，下記の手順に従って設計している．

*1 ショーボンド建設(株) (正会員)

*2 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室 工修 (正会員)

*3 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長 工博 (正会員)

*4 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)



図ー１ 提案するサンドイッチ覆道の構造図

- 1) 落石は、質量が 10 ton、落下高さが 30 m で鉛直に自由落下する。
- 2) 90 cm 厚の敷砂緩衝材を設置することを条件に、ラーメの定数を $\lambda = 0.98 \text{ MPa}$ とし、振動便覧式²⁾ から算定された 5.39 MN の衝撃荷重が作用する。
- 3) 上記衝撃荷重を用い、静的骨組解析により断面力を算定する。
- 4) 各部材の設計：サンドイッチ頂版の設計は鋼板を鉄筋に換算し、土木学会コンクリート示方書に基づき RC 部材の曲げ耐力に関する安全性の照査を行った。また、ボルトの径、間隔は、作用せん断力に抵抗できるように配置した。製作キャンペーンは、骨組解析により算出している。

柱の設計は、文献³⁾に準じ軸方向圧縮力と曲げモーメントを同時に受ける合成柱部材として設計を行っている。

頂版と柱の接合部の設計は、省力化施工を可能とするために頂版上鋼板までを考慮したボルト接合を採用することとし、許容応力度法に基づいて、曲げとせん断に対し部材、ボルト、溶接部の照査を行った。各ボルトには、頂版との連結を確実なものとするため 137 kN の軸力を導入している。

壁部に対する頂版のアンカーボルトの定着長は、30D (D: 鉄筋径) と設定した。また、壁頂部道路側には、せん断による破壊を防止する目的で鋼板 (t=9mm) にアンカーを取り付け設置し

ている。

三層緩衝構造の設計は、落石質量 10 ton、落下高さ 30 m とし、文献⁴⁾に準じて設計を行い、芯材 RC 版に作用する最大衝撃力 7.15 MN、伝達衝撃力 1.93 MN より、敷砂 50 cm 厚、EPS 厚 100 cm、RC 版厚 30 cm とした。

2.2 試験体概要

本実験に用いたサンドイッチ覆道は、図ー１に示すように、頂版が道路軸方向幅 7.660 m (1.90 m × 4 + 0.02 m × 3)、道路軸直角方向幅 10.985 m、厚さ 0.3 m で、柱の高さが 4.5 m である。サンドイッチ版の上下鋼板の厚さは共に 9 mm で、上面鋼板の材質は SS400 (降伏応力 326 MPa, 引張強度 462 MPa)、下面鋼板の材質は SM490 (降伏応力 364 MPa, 引張強度 525 MPa) である。壁側隅角部は、骨組解析により大きな曲げモーメントになることが明らかになっていることから、上面鋼板上に同材質の 9 mm の鋼板を 1 枚重ねて配置している。上下鋼板は、コンクリート充填時におけるサンドイッチ頂版の有効高さの保持およびコンクリート硬化後の荷重作用時におけるせん断剛性低下を阻止するために、スペーサーとして $\phi 65 \times 300$ の圧力鋼管 (STGP 370) を用い、M24 (SD390) をその鋼管を通して配置し、137 kN/本の軸力を導入して連結している。また、圧力鋼管内部には無収縮モルタルを充填して鋼管とボルトの一体化を計っている。さらに、各プロ

ックの頂版相互の連結は、添接板を用い T.C.B-M24 にて連結している。

柱部は、頂版との接合性、道路軸方向および直角方向の効率的な曲げ剛性確保を考慮して角形鋼管 400 × 12 × 400 mm (STKR400) を使用し、上端部にフランジおよびリブプレート 16 枚を設けた。頂版との連結には、外側の 1 列に M24PC 鋼棒を、他には M24 (SD390) ボルトを用い、上面鋼板より貫通させて 137 kN/本 の軸力を導入している。底版との連結部はメナーゼヒンジとしている。また、壁部との連結は、D32 (SD390) ボルトにより壁部コンクリートに定着長 1 m を取るにより行っている。

各部を連結後、頂版コンクリート充填孔にガスマンを立て水頭圧を利用して高流動コンクリートの充填性の向上を図りつつ頂版、柱内部を充填し、その後壁部を打設した。

2.3 実験方法および実験ケース

実験は、落石対策便覧²⁾に基づいてサンドイッチ頂版上に 90 cm 厚の敷砂緩衝材を設置した場合と、文献³⁾より算出された三層緩衝構造を設置した場合について重錘を自由落下させることにより行っている。重錘はトラッククレーンを用いて所定の高さより落下させている。なお、実験は、最初に三層緩衝構造を設置した場合について行い、全て弾性範囲内の挙動であることを確認の後、敷砂緩衝材を用いて塑性に至るケースについて行った。また、実験は、トラッククレーンの能力より、重錘質量 10 ton、落下高さ 30 m を限界とした。

実験ケースを表 1 に、各実験における重錘落下位置を図 2 に示している。緩衝材は図に示した重錘落下位置を中心に、三層緩衝構造の場合には 4 × 4 m の範囲に、敷砂の場合には 2 × 2 m の範囲に設置している。なお、測定項目は、重錘に埋設した加速度計による重錘加速度、頂版部および柱鋼板に添付した歪である。

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力

図 3 は、敷砂緩衝材を用い、重錘を模型中央

表 1 実験ケース一覧

実験ケース	落下位置	重錘質量 (ton)	落下高さ (m)	緩衝材種類
1	F2-F3 中央	10	30	三層緩衝構造
2	F2-F3 柱側	10	30	三層緩衝構造
3	F3-F4 中央	10	30	三層緩衝構造
4	F4 中央	10	5	敷砂
5	F3 中央	10	5	敷砂
6-1	F2-F3 中央	10	5	敷砂
6-2~11	落下高さ 2.5 m ピッチで 30 m まで			

×：重錘落下位置（三層緩衝構造）

●：重錘落下位置（敷砂緩衝材）

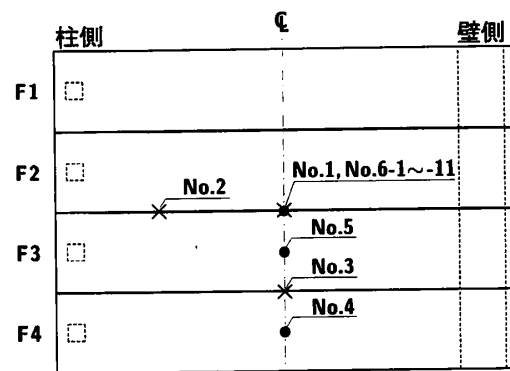


図 2 各実験における重錘落下位置

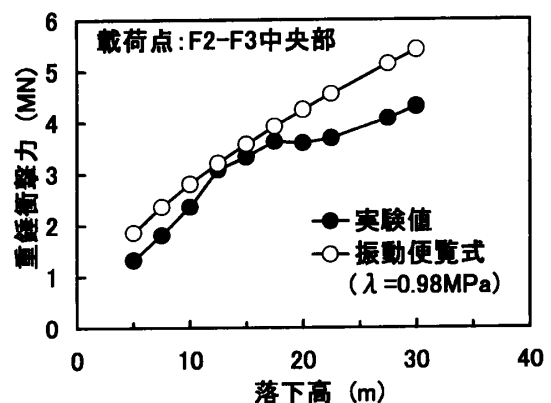


図 3 重錘衝撃力と高さの関係（敷砂緩衝材）

部 (F2-F3) に落下した場合の最大重錘衝撃力分布を敷砂のラーメ定数を $\lambda = 0.98 \text{ MPa}$ とする振動便覧式から算定される値と比較して示している。

図より、本実験結果は $\lambda = 0.98 \text{ MPa}$ とする振動便覧式による結果よりも小さな分布となっていることがわかる。これらの結果は、過去に行われた剛基礎での実験結果³⁾が $\lambda = 0.98 \sim 1.96 \text{ MPa}$

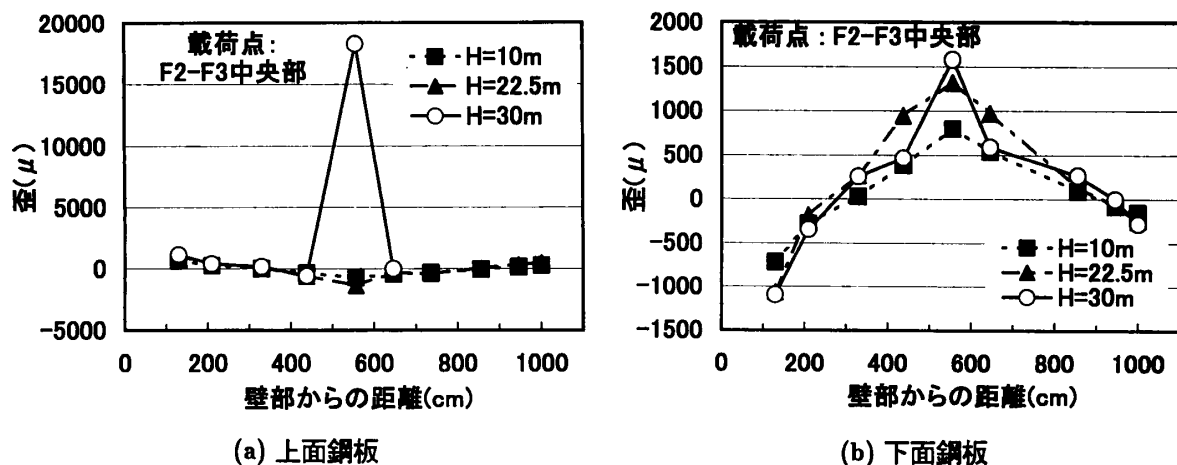


図-4 敷砂緩衝材を用いる場合の上下鋼板の最大応答時の断面方向の歪分布

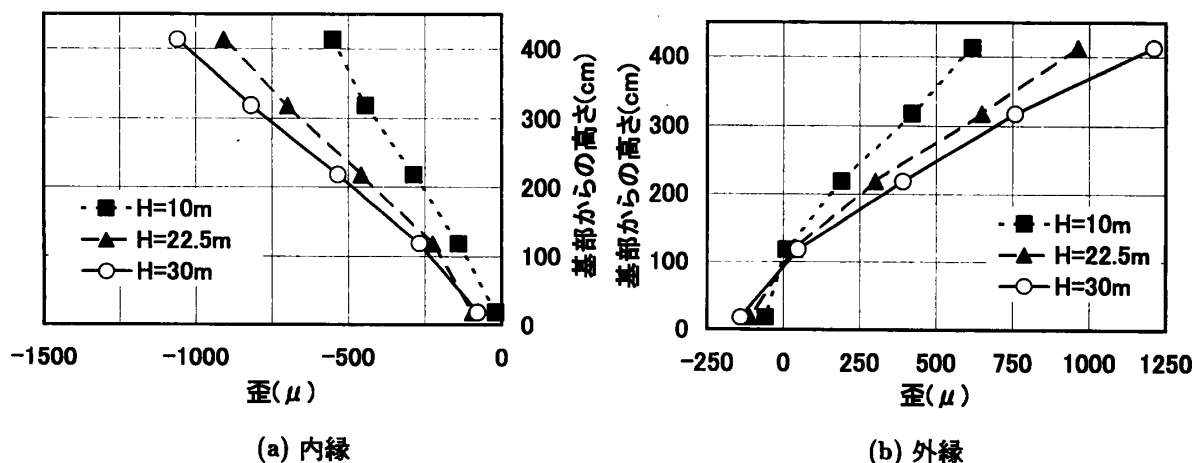


図-5 敷砂緩衝材を用いる場合のF3柱内外縁歪分布

とする振動便覧式による結果に対応していることと大きく異なっている。これは、本頂版が厚さ30 cm程度と薄く撓み性に富んだ構造となっていることに起因しているものと判断される。

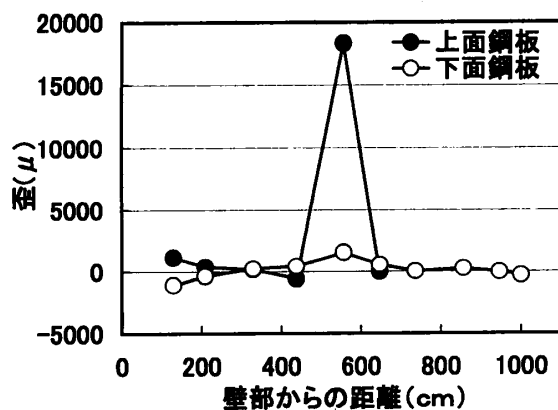
3.2 各落下高さにおける歪分布

図-4には、敷砂緩衝材を用い、載荷位置を試験体中央部(F2-F3)とした場合の頂版上、下面鋼板の断面方向の歪分布を示している。

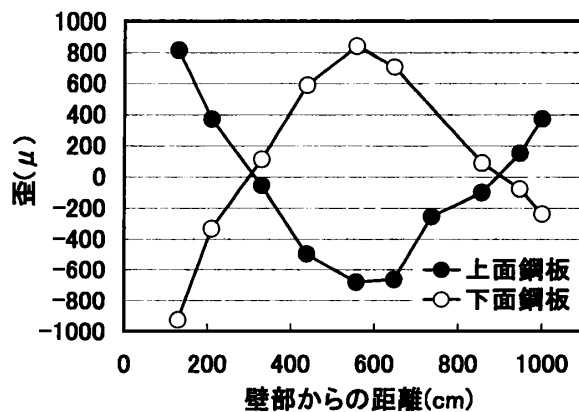
図-4(a)の落下高さ $H = 10, 22.5$ mにおける上縁歪分布より、この程度の落下高さに対しては骨組構造としての歪分布にほぼ対応していることがわかる。一方、 $H = 30$ mの場合には、載荷点部で $18,000 \mu$ 程度の引張歪を示しており、上面鋼板が局部的に大きく塑性変形をしていることがわかる。図-4(b)の下縁歪分布を見ると、 H

$= 30$ mにおいても最大歪が $1,500 \mu$ 程度であり、上縁応力と比較して小さな分布となっている。これは、上縁鋼板が大きな衝撃力によって局所的に大きな損傷を受けるものの、下縁鋼板部は充填コンクリートやせん断力伝達の働きをするボルトの作用により、効率よく応力の再分配が行われていることを意味しているものと推察される。

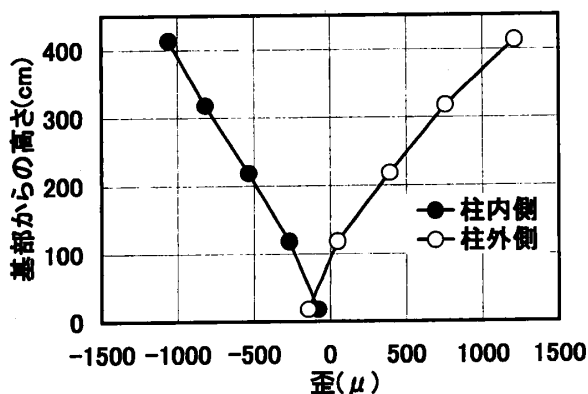
図-5には、図-4と同様の実験ケースに関するF3柱の内外縁の高さ方向歪分布を示している。図-5において、落下高さ $H = 30$ mの場合に対しても歪分布は高さ方向にほぼ線形変化している。これより、図-4に示されている上面鋼板の大きな歪分布は局所的なものであり、構造全体としては未だ十分な余剰耐力を保持していることがわかる。また、基部の歪値より、基部は設定どおりに



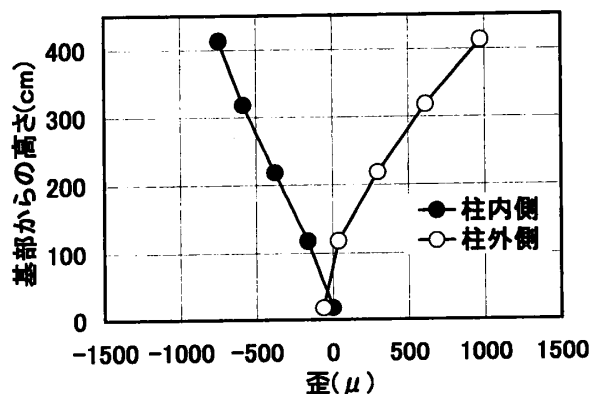
(a) 敷砂緩衝材を用いた場合



(b) 三層緩衝構造を用いた場合

図-6 落下高さ $H = 30$ m における頂版上下縁断面方向歪分布

(a) 敷砂緩衝材を用いた場合



(b) 三層緩衝構造を用いた場合

図-7 落下高さ $H = 30$ m における柱内外縁歪分布 (F2-F3 中央載荷時)

ほぼピン支持に近い状態で挙動していることが確認できる。

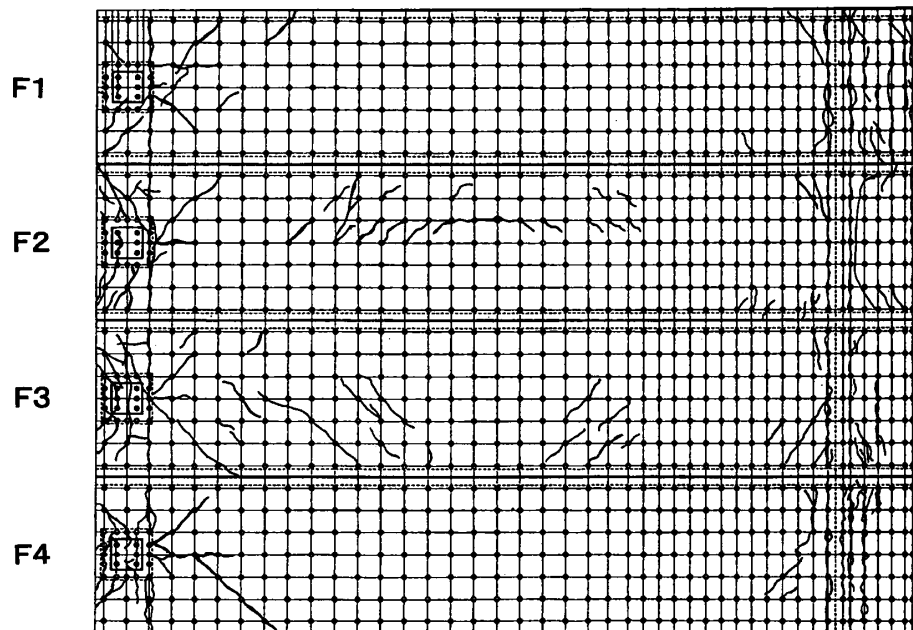
3.3 緩衝材の違いによる応答歪分布

図-6, 7には、落下高さが $H = 30$ m で各緩衝材を用いた場合における最大応答時の頂版上下縁、柱内外縁歪分布を比較して示している。なお、載荷点は試験体中央 (F2-F3) である。図より、敷砂緩衝材を用いる場合は、前述のように頂版上縁部が大きく塑性化しており、柱上端部においても $1,000 \mu$ を超える値となっている。一方、三層緩衝構造を用いる場合には、芯材 RC 版の働きにより衝撃力が広く分散するため、最大歪値が $1,000 \mu$ 以下で頂版の歪分布も等分布載荷時と類似な分布となっていることがわかる。柱部にお

ける歪分布は、敷砂緩衝材を用いる場合に対して若干小さな値となっているものの顕著な差異はみられない。これは、柱がほぼ 2 m 間隔に設置されていることより、衝撃荷重が分散して頂版に作用するものの柱が分担する衝撃力としては同程度の値となっているためと推察される。

3.4 実験後の供試体

敷砂緩衝材を用い、落下高さ $H = 30$ m 実験後のサンドイッチ頂版部は、重錘落下点近傍部で、20 mm 程度の残留変位が確認された。さらに上面鋼板を撤去しコンクリート表面のひび割れ状況を確認した (図-8)。図に示されているように落下点を中心に同心円状にひび割れが発生しているが、未だ圧壊に至っていないことを確認した。



図－8 実験後の内部コンクリートひび割れ展開図

柱、壁側接合部付近には、負の曲げによると考えられるひび割れが発生している。また、柱と頂版の接合部には柱である角形鋼管の隅角部近傍から放射状に走るひび割れが発生している。これは、角形鋼管によって頂版の接合部周辺に面内せん断力が作用することにより発生したものと推察される。さらに、試験体中央部の頂版コンクリートを縦横に切断し、コンクリート内部を目視した結果、頂版部の押し抜きせん断型のひび割れが発生していることを確認している。

4. まとめ

施工性、工期短縮、経済性および、耐衝撃性に優れた覆道の開発、実用化を目的として、サンドイッチ版の落石覆道への適用性について実規模模型を用いた重錘落下衝撃実験により検討を行った。実験の結果を整理すると、

- 1) 提案したサンドイッチ覆道は、頂版厚が 30 cm であるが、90 cm 厚の敷砂緩衝材を用いる場合でも質量 10 ton、落下高 30 m の落石に対して十分安全性を確保することが明らかになった。
- 2) 三層緩衝構造を用いる場合には、敷砂緩衝材

を用いる場合よりもさらに十分な安全性を確保できることが明らかになった。

- 3) 提案するサンドイッチ覆道は、概算すると施工費が従来の覆道に比較して、1/2 程度と大幅に縮減できる。

以上のことから、提案するサンドイッチ覆道を用いることにより、工期短縮、コスト縮減への道が開けたものと考えられる。今後、この種の構造形式に関する合理的な設計手法を確立するため、頂版部のボルトピッチ、頂版厚および側壁部のサンドイッチ化に関する研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 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トの衝撃挙動，土木学会北海道支部論文報告集，第 55 号 (A)，pp.84～89，1999.2
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，1983.7
- 3) 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]，1997.9
- 4) 土木学会：構造工学シリーズ [8] ロックシェットの耐衝撃設計，1998.11