

I-30

芯材をRCスラブとした場合の三層緩衝構造の緩衝特性

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 開発土木研究所 正員 中 野 修
 開発土木研究所 正員 今 野 久 志
 室蘭工業大学 正員 松 岡 健 一
 室蘭工業大学 学生員 西 弘 明

1. はじめに

社会基盤のより一層の整備のために、厳しい条件下での施設構造物の建設が要求されるようになってきた。その一つにロックシェッド構造物が挙げられる。この種の構造物には崩落土砂、落石などによって静的荷重の数十～数百倍の衝撃荷重が作用するため、緩衝材として山砂あるいは山土などが敷かれている。敷砂は落石エネルギーの吸収性能に優れている反面、衝撃荷重の分散効果が小さいこと、その重量の大きさによりトップヘビー構造となるため地震時の安全性確保のため下部工が大がかりになることなどが指摘されている。

また、敷砂に代わる緩衝材として軽量で緩衝性能に優れているEPS(Expanded Poly-Styrol)材を用いた室内実験¹⁾や野外実験²⁾が行われ、敷砂と同等あるいはそれ以上の緩衝効果があることが明らかになっている。しかしながら、EPS材の欠点として表層の載荷点部がせん断型に破壊するため十分な敷厚が要求されること、敷厚が不十分な場合には敷砂同様荷重の分散効果をそれほど期待できないことがあげられる。数値解析や室内実験結果によれば、表裏層材として砂層あるいはEPS材の剛性の低い材料を用い、芯材としてRCスラブ等の剛性の大きい材料を用いた三層構造とすることにより、従来まで緩衝材として用いられてきた砂層に比較して、荷重分散効果を大幅に向上させられることが明らかになっている¹⁾。

本論文では、このような複層緩衝システムに注目し、芯材としてRCスラブを用いた場合の実証実験を行ったので報告する。本研究で採用した緩衝システムは、実構造への直接的な適用を前提として考え、荷重の分散効果および軽量化を考慮して、表層材として敷砂材、芯材としてRCスラブ(単鉄筋および複鉄筋)、裏層材としてEPS材から構成される三層緩衝構造である。本論文では三層緩衝構造の緩衝特性検討の他、緩衝構造の使用耐久性をも検討するため、重錘(3tf)の落下高さを30mに固定し、同一点に3回の繰返し落下を行い、重錘衝撃力、伝達衝撃力の分布性状の推移および実験終了後のRCスラブの破壊性状について調査、検討を行った。

2. 実験概要

2.1. 実験方法

図-1に実験の概要を示す。実験は680cm×680cm×50cmのコンクリート剛基礎の上に、400cm×400cmの三層緩衝構造を設置し、その中央部に重量3tfの重錘(直径100cm、高さ17.5cmの球底)を所定の高さより自由落下させることによって行っている。重錘には容量100Gから500Gの歪ゲージ型加速度計を数個取り付け、重錘の加速度波形を測定できるようにしている。

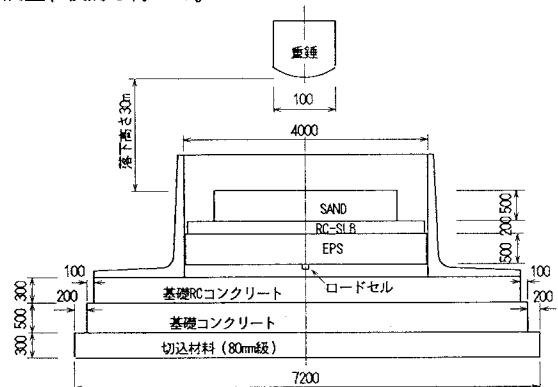


図-1 実験の概要

Absorbing Effect of 3-layer Absorbing System with Core Layer Made by RC Slab
 by Norimitsu KISHI, Osamu NAKANO, Hisashi KONNO, Ken-ichi MATSUOKA
 and Hiroaki NISHI

表一に実験ケースを示す。表中RC-sは単鉄筋RCスラブを、RC-dは複鉄筋RCスラブを示す。以後、各実験ケースを芯材RC名に載荷番号を付記して表すものとする。

2.2. ロードセル

本実験では衝撃力の算定、評価のために重錘加速度の他、コンクリート剛基礎上への伝達衝撃力を算定するために、ロードセルを剛基礎上に最小間隔10cmで計25個を一列に設置している（図一）。ここで採用したロードセルは受圧部直径25mm、容量300kgf/cm²の衝撃荷重測定用ロードセルである。なお、ロードセル出力は各設置点の直径25mmの円内に作用する荷重として出力されるが、本実験では伝達土圧を評価するために用いているので、ここでは全て応力の単位を用いて評価することとする。

2.3. EPS材

EPS材は石油精製過程で生ずるスチレンモノマーの重合から得られるポリスチレン樹脂に、発泡材を加えたものを過熱軟化させると同時に気体が発生させて発泡樹脂としたものである。製造方法としては押出法と形内発泡法の2種類がある。物性値的には弾性挙動を示す領域は圧縮歪が1%程度以下であり、このときの荷重は5%圧縮強度の約1/2である。本実験では、型内発泡法で製造された密度20kg/m³、5%圧縮強度1.1kgf/cm²、ポアソン比0.05で、寸法200cm×100cm×50cmのEPSブロックを組み合わせて400cm×400cm×50cmに設置している。

2.4. 敷砂材

本実験で用いた敷砂材は、単位体積重量1.618gf/cm³、比重2.57、吸水率1.86%の栗丘産砂である。敷砂材は20cm毎に平均的に踏み固めを行い所定の敷厚としている。なお、繰返し載荷時には、重錘衝突部を掘り返し、再度前記同様踏み固めを行い、所定の高さに整地している。

2.5. コンクリートスラブ

三層緩衝構造体の芯材として使用したコンクリートスラブは、単鉄筋および複鉄筋のRCスラブである。各スラブの形状寸法はいずれも395cm×395cm×20cmである。主鉄筋は鉄筋比が約1%（複鉄筋の場合は片側約1%）になるようにD13を10cm間隔で配置している。コンクリートは設計強度210kgf/cm²として設計し、現場にて打設および養生を行った。材令28日の圧縮強度は239kgf/cm²であった。また、主鉄筋にはスラブ中央部より2方向に20cm間隔で計19枚（複鉄筋の場合には上側筋にも40cm間隔で7枚）の歪ゲージを添付し、衝撃荷重載荷時の応答歪波形を計測している。RCスラブの配筋図を図一に示す。

3. 実験結果および考察

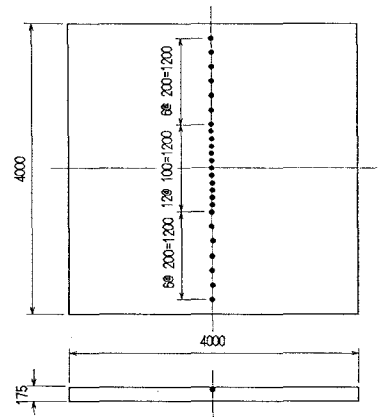
3.1. 重錘加速度およびロードセル波形

図一には、各実験ケースにおける重錘加速度と重錘落下中心部の基部ロードセル応力波形分布を示している。以下、各ケースについて考察を行う。

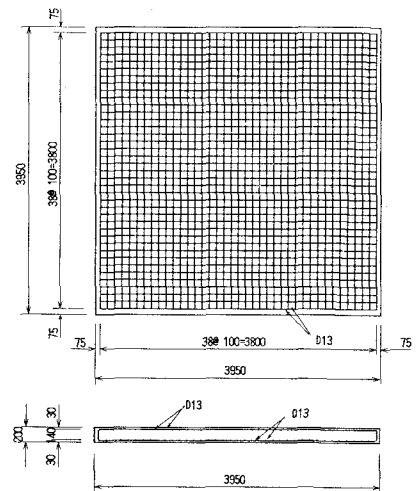
表一 実験ケース

芯材RC名	載荷番号	落下高さ
RC-s	-1	30m
	-2	//
	-3	//
RC-d	-1	30m
	-2	//
	-3	//

但し、表層：砂50cm、裏層：EPS材50cm
重錘重量3tonf



図一 ロードセル配置図



図二 RCスラブ配筋図

RC-s-1, RC-d-1の加速度波形について検討を行うと、衝突初期に両者とも最大値に達しており、その値もほぼ40G前後の値を示していることがわかる。その後20G程度に減少し、一定時間その大きさを維持し、やがて零に減じている。一定加速度を呈する時間はRC-sスラブの場合が50 msec、RC-dスラブの場合は多少短く40msec前後となっている。これはスラブ以外の諸条件が等しいことより、スラブの剛性が大きく関与しているものと思われる。すなわち、RC-sスラブの場合は、RC-dスラブより剛性が低いため載荷点近傍のひび割れなどの塑性化がより大きく進行し、周期が延びたものと考えられる。

一方、ロードセルの応力波形は概形的には両者は等しいものとなっている。しかしながら、その応答値はRC-sスラブの場合がRC-dスラブの1.5倍強となっており、スラブの剛性による分散効果差が明確に示されている。重錘加速度波形と対比して

ロードセル応力波形分布特性を検討すると、重錘加速度が初期の最大応答を示す領域では、ロードセル応力は最大値を示さず、その2/3程度の値となっており、重錘加速度が零に向かって減少傾向にある時点で、最大応答を示していることがわかる。両波形の比較より、芯材RCスラブの効果により、重錘加速度波が直接基部ロードセルに伝達せず、芯材RCスラブによる荷重分散効果によって、伝達荷重が平滑化されることが明らかになった。

次に繰返し落下時の挙動について検討すると、第2,3回目のRC-sスラブの場合の重錘加速度波形は、最大値がほぼ類似の2つのピークが存在する波形に推移している。応答時間が第1回目とほぼ等しいものの、最大値は第1回目にして約10G低下している。最大値の減少は、RCスラブの載荷点部がひび割れ発生によって塑性化が進行し、軟化が促進され、表裏材の緩衝効果が卓越してくるためと考えられる。また、第1波目と第2波目の谷部の大きさは、2回目, 3回目の順に大きくなり、塑性化の程度に深く関係しているものと思われる。一方、RC-dスラブの場合には、RC-sスラブの場合同様2つのピークが現れているが、RC-sスラブほど顕著でなく、谷部も小さくかつ、第2波目のピーク値も第1波目に比較して小さい。これより、RC-dスラブの場合は、RC-sスラブの場合に比較して、複鉄筋配置によって耐衝撃補強効果に優れていることがわかる。

一方、ロードセルの応力波形を調べると、RC-sの場合は第2,3回目の値が40~50kgf/cm²の値を示しており、第1回目の10倍以上の値となっている。これは補強筋が切断され、重錘がEPS材中にもぐり込んでいるためと考えられる。これに対してRC-dの場合は、第2回目で5kgf/cm²、第3回目で10kgf/cm²程度と、RC-sに比較して1/5以下の値を示しており、補強筋がRC-sの場合ほど損傷せず、未だ効果的に作用しているものと考えられる。

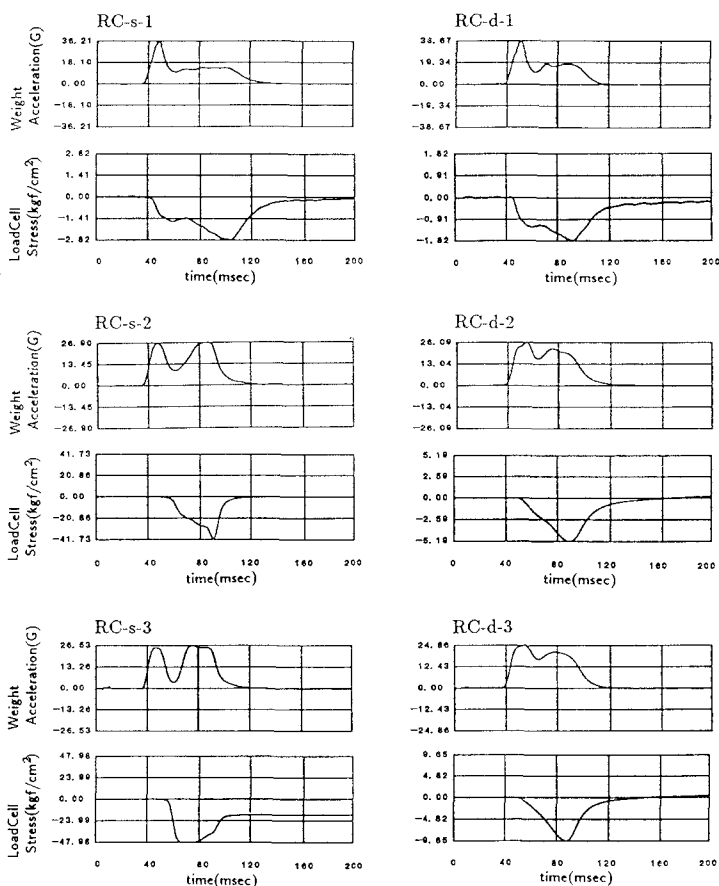


図-4 重錘加速度およびロードセル応力波形分布

3.2. 伝達衝撃力の分散性状

図-5には各実験ケースについてのロードセル応力波形を3次元的に示している。図中、横軸は重錘落下中心点を原点とした場合のロードセル位置、奥行き方向が時間軸を示している。

図より、RC-s,RC-dの第1回目はいずれも、中央部が若干大きい応答を示すものの、全ロードセルがほぼ等しい圧力を感知しており、芯材RCスラブによって効率的に荷重分散が行われていることがわかる。これに対しRC-sの2回目以降の場合には、中央部半径50~60cmの領域に応力が集中していることがわかる。これより、2回目の重錘落下によって鉄筋が破断し、重錘がEPS材中にもぐり込んだ状態にあることが本応答分布波形からも推察できる。なお、第2回目の中央部、および中央部より20cm離れた点、第3回目の中央部の過度の応力やドリフトは、破壊されたコンクリート破片などによって、極度の応力集中が生じたため発生したものと考えられる。一方、RC-dの2回目以降の応力分布は、中央点から離れるにしたがい応力値は減少しているが、未だ広い領域で応力が発生しており、荷重分散作用が効果的に働いていることがわかる。

3.3. 重錘衝撃力および総伝達衝撃力

図-6には、重錘衝撃力（実線）とロードセル応力を用いて算定した総伝達衝撃力（破線）の時間的変動について示している。

なお、重錘衝撃力は重錘重量に重錘加速度を乗じたものであり、総伝達衝撃力は基部への伝達応力が軸対称に分布するものと仮定し、台形則を用いて応力を集積し評価したものである。

まず、第1回目落下の総伝達衝撃力波形について論じると、RC-sスラブ,RC-dスラブともに波形の立上がりは、重錘衝撃力のそれより10msec程度遅れている。波形の立上がりから最大値発生までの経過時間はRC-sの場合には約20msec,RC-dの場合には約30msecである。また、RC-sの場合には最大値に到達後20tfほど低下して、その値を約30msec維持してから徐々に零に減少しており、RC-dの場合には最大値近傍の15msecでほぼ一定の値を呈し、零へと減じている。両者とも波形分布の形状はほぼ台形状になっており、前記の中心部ロードセル応力の波形分布とは異なっている。ロードセル応力波形（図-4）と比較すると、最大値発生までの経過時間は総伝達衝撃力波形の方が短く、それ

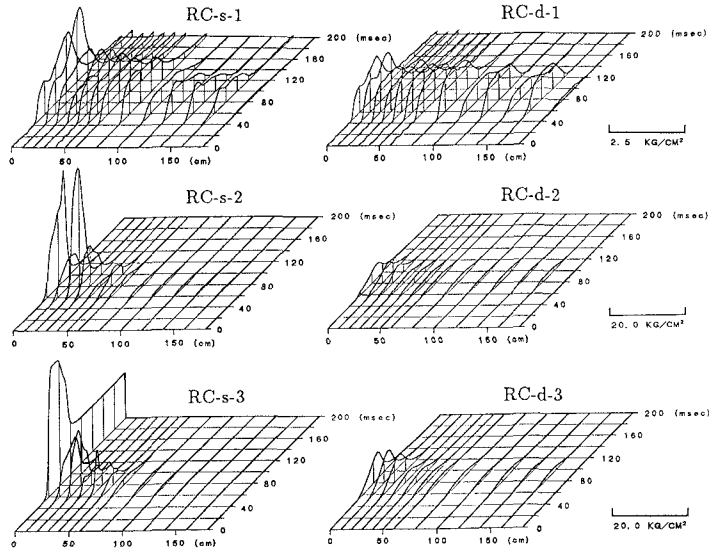


図-5 ロードセル応力分布

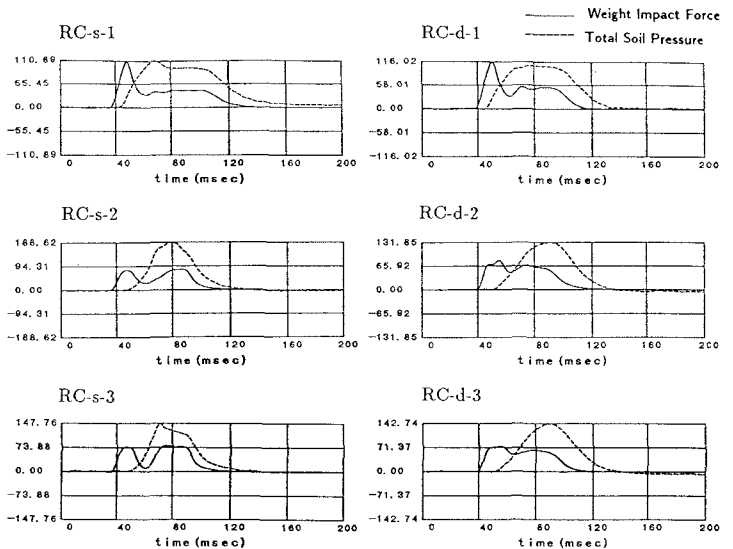


図-6 重錘衝撃力および総伝達衝撃力の時間的変動

は重錘衝撃力波形の性状により近い分布となっている。総伝達衝撃力波形の最大値は、必ずしも中心部ロードセル応力の最大時に発生せず、それより10～20msec早い時点で発生している。

第2,3回目の落下では、総伝達衝撃力波形は概形的にはRC-s,RC-dで大きな差異はなくなっているようである。第1回目落下と比較して、立上がりりが5msec程度遅く緩やかとなっているため、最大値も約15msec遅れて発生している。また、最大値発生前後で一定の値を呈することはなく、最大値発生後単純に零へと減じている。

3.4. 最大重錘衝撃力および最大総伝達衝撃力

図-7には、重錘衝撃力および総伝達衝撃力の最大値を落下回数毎にプロットしている。○,●印がそれぞれRC-sスラブの場合の最大重錘衝撃力,最大総伝達衝撃力を、□,■印がRC-dスラブの場合のそれを示している。

重錘衝撃力についてみると、第1回目の落下ではRC-sが111.0tf,RC-dが116.0tfで、第2回目の落下では芯材のRCスラブの剛性の低下によって、それぞれ約30tf減少しているが、第3回目においては数tf程度の減少であった。2,3回目の減少率の低下は、前述のように重錘衝突部の芯材RCスラブのひび割れ等による劣化が進行し、剛性が低下して軟化が促進され、表裏材の緩衝効果が卓越してくるためと考えられる。これに対し、総伝達衝撃力は落下毎に徐々に大きくなっている。重錘衝撃力と比較した場合、総伝達衝撃力は第1回目では同程度であるのに対し、RC-sの第2回目落下を除いて、他は約20tf/回でほぼ線形的に増大しているようである。RC-sの第2回目落下の最大伝達衝撃力は、190tf程度となっている。これは、前述のように芯材RCスラブの損傷程度が激しくコンクリート破片などによって応力集中が生じ、その成分が積分値に含まれたためと考えられる。また、第3回目の落下においてはRC-sとRC-dの場合ではロードセル応力の最大値およびその分布性状には大きな違いがみられたのにもかかわらず、その値を集積した基部における総伝達衝撃力については両者は同程度になるようである。

3.5. 芯材RC矩形板の破壊性状

写真-1に、各RCスラブの3回目落下終了時点の破壊状況を示す。(a),(b)がそれぞれRC-sスラブの表面および裏面であり、(c),(d)がRC-dスラブのそれである。

(a),(b)よりRC-sスラブでは、表面にはスラブ中央部より同心円状および放射状のひび割れが全体に多数見られ、裏面はかぶり部分のコンクリートが直

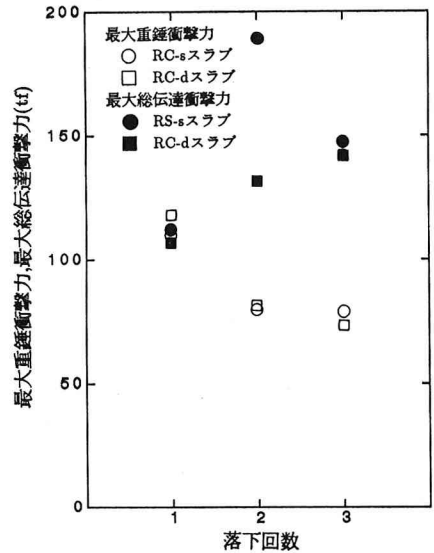
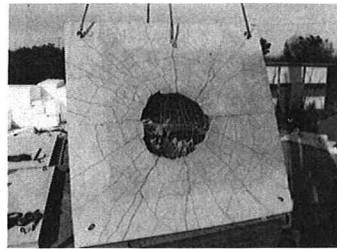


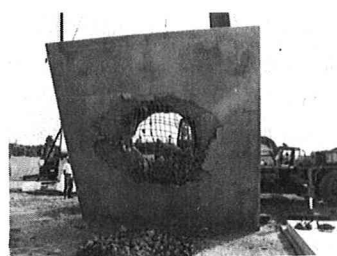
図-7 最大重錘衝撃力および最大総伝達衝撃と落下回数との関係



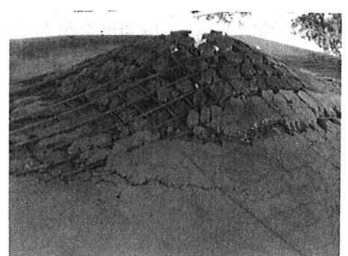
(a) RC-s表面



(c) RC-d表面



(b) RC-s裏面



(d) RC-d裏面

写真-1 RCスラブの破壊状況

径150cmほどの円形状に剝離している。また、主鉄筋は中心部が下に大きくふくれあがり、数ヶ所の破断も見られる。重錘落下部のコンクリートが抜け落ちているため、第2、3回目の落下では周辺部への荷重分散効果はほとんど期待できず、図-5のような分散状態になったものと考えられる。これに対し、(c),(d)よりRC-dスラブの表面には重錘落下部周辺のみ同心円状ひび割れと、放射状には十字方向のひび割れがみられる程度である。裏面の剝離もかなり抑えられ、RC-sスラブに比して損傷の度合いは少なくなっている。RC-dスラブの場合、第2回目、第3回目の落下の時点でも重錘落下部の鉄筋の破断が生じていないため、曲げ剛性の低下はあるものの、鉄筋による膜効果により、未だ荷重の分散効果が発揮されているものと考えられる。

4. まとめ

ロックシェッド構造物の緩衝材として三層緩衝構造を取り上げ、大型の野外実験を行い、その緩衝性能について検討を行った。本論文で採用した緩衝構造は、表層材として敷砂材、芯材として単鉄筋または複鉄筋のRCスラブ、裏層材としてEPS材から構成されるものである。実験は緩衝構造の緩衝特性の他、使用耐久性をも検討するため、同一条件で3回の繰返し載荷を行った。

本実験で得られた結果を要約すると、

第1回目の衝撃力載荷時

- 1) 芯材RCスラブの剛性は重錘衝撃力（加速度）の波形特性に関与する。
- 2) 芯材にRCスラブ程度の剛部材を使用することによって、衝撃荷重が分散され、裏層EPS材の面全体による荷重吸収効果を期待できる。これにより、本構造に伝達される衝撃力は重錘衝撃力にほぼ等しい値に低減できる。
- 3) 芯材RCスラブによる荷重分散効果によって、伝達荷重波形は平滑化される。

繰返し載荷時

- 4) 荷重分散特性は芯材RCスラブの損傷状態により、大きく異なってくる。
- 5) 載荷毎に重錘衝撃力は減少していくのに対し、基部の総伝達衝撃力は大きくなる。
- 6) 単鉄筋にする場合と複鉄筋にする場合では、伝達荷重の分散状態が異なっているにもかかわらず、基部の総伝達衝撃力の最大値はほぼ同程度であるものと考えられる。
- 7) 単鉄筋スラブを用いる場合には2回目の落下後鉄筋が破断し、重錘が深くRCスラブに貫入するが、複鉄筋RCスラブの場合には3回目落下終了時点でも鉄筋の破断がなく、未だ良好な荷重分散効果を保持している。これより、実構造では複鉄筋断面とする方が大きな安全余裕度を確保できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 松岡健一, 中野 修, 菅田紀之, 西 弘明: EPSを用いた複層緩衝構造の落錘衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第47号, pp.131~136, 1991.2.
- 2) 北海道開発局開発土木研究所構造研究室: 平成2年度落石覆道に関する屋外実験資料報告書, 構造研究室資料第13号, 1991.1.
- 3) 岡田憲治, 中松俊裕: 覆道の衝撃実験について, 第23回北海道開発局技術研究発表会, 1979.2.
- 4) 吉田 博, 榎谷 浩, 鈴木哲治: 敷砂上の落石による衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第352号, pp.61~70, 1984.12.
- 5) 吉田 博, 榎谷 浩, 岡 衛: 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文集, 第362号, pp.461~470, 1985.10.
- 6) 三上敬司, 能町純雄, 松岡健一: 落石覆工への落石による衝撃力に関する評価, 第2回落石の衝撃力及びロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集別冊, pp.1~10, 1986.7.
- 7) 吉田 博, 榎谷 浩, 佐藤 真: 落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価についてについて, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.571~583, 1987.3.