

サンドイッチ版を芯材に用いた緩衝材の開発

A DEVELOPMENT OF THREE-LAYERED ABSORBING SYSTEM WITH SANDWICH CORE SLAB

近藤悦郎*, 岸 徳光**, 今野久志***, 温泉重治****

Etsuro KONDO, Norimitsu KISHI, Hisashi KONNO and Shigeji ONSSEN

*工修 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 (〒305-0004 茨城県つくば市桜1丁目)

**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)

***博(工) (独)北海道開発土木研究所 主任研究員 (〒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) 事業本部土木部 顧問 (〒003-0004 北海道札幌市白石区東札幌4条2丁目)

キーワード: サンドイッチ版, 三層緩衝構造, 重錘落下実験

(sandwich slab, three-layered absorbing system, falling-weight impact test)

1. はじめに

積雪寒冷地域の山岳部の道路では, 雪崩や積雪に対する防護施設としてスノーシェッドが設置されている。これらの地域では, さらに落石災害に対する安全性を向上させるため, ロックシェッドとしての機能を付加することを目的に, 既設のスノーシェッド頂版上に緩衝構造を設置している。

現在, 一般的に用いられている緩衝構造としては,

1) 敷砂, 2) EPS (Expanded Poly-Styrol) ブロックの積層構造, および 3) 敷砂—RC版—EPS材から構成される三層緩衝構造, 等がある。しかしながら, 既設スノーシェッドへの緩衝材の設置に際しては, 本体が積雪荷重に対してのみ設計されている場合が多いことより, 衝撃力の緩衝効果および分散性能に優れているとともに, 本体構造や下部構造への影響を極力軽減するためにできるだけ軽量であることが要求される。

一方, 著者らは近年の鋼材加工技術の高度化およびコンクリートの高性能化に着目し, 鋼・コンクリート合成サンドイッチ構造から成るロックシェッドを研究開発してきた¹⁾。サンドイッチ構造の特長として, 1) 高耐荷力であり, 優れた靱性能を有すること, 2) 押し抜きせん断破壊が生じないこと, 3) 剛性が高く薄肉断面とすることができるため, 軽量化が可能であること, 4) ハーフプレハブ部材であるため, RC版のような配

筋型枠作業が不要であり, 大幅な工期短縮が期待できること, 等が挙げられる。

著者らは, これらの研究成果を踏まえ, より軽量で緩衝性能に優れた緩衝構造の開発を目的として, 既に提案されている三層緩衝構造²⁾の芯材部を鉄筋コンクリート版(RC版)から鋼・コンクリート合成版(以後, サンドイッチ版)に置換した構造形式を考案した。

本論文では, サンドイッチ版を芯材として用いる場合の三層緩衝構造に関して, まず, 1) その緩衝構造としての適用性に関する数値解析的な検討を行い, 次に 2) その解析結果を踏まえて, 大型供試体による重錘落下衝撃実験を実施した結果について述べるものである。

2. 三層緩衝構造

本研究で対象とした三層緩衝構造は, 図-1に示すように, 表層材として20cm厚の敷砂, 芯材として上

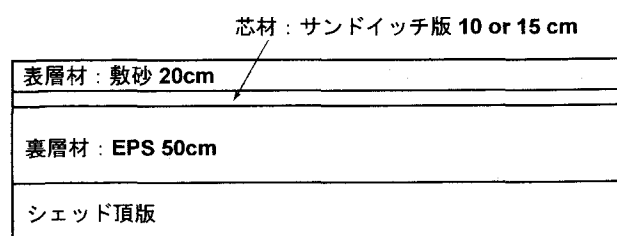
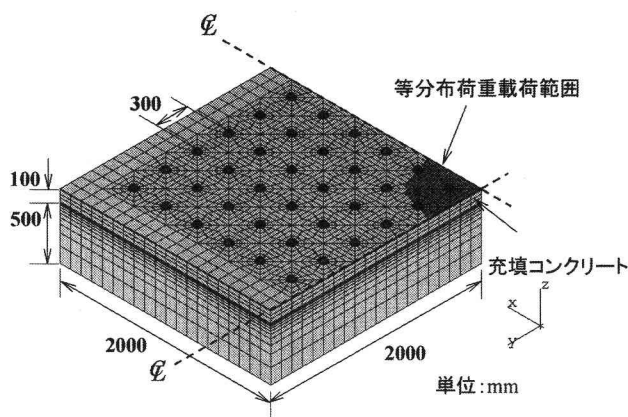
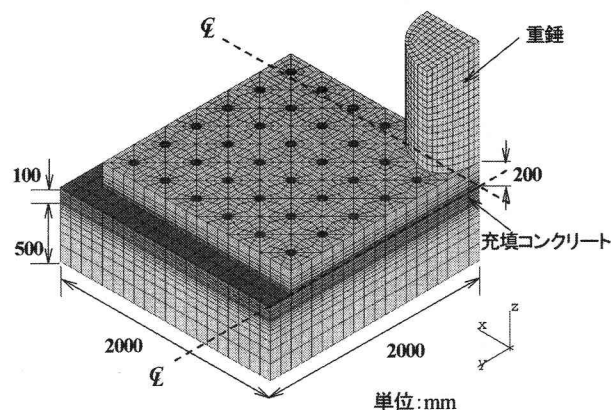


図-1 考案した三層緩衝構造の概要

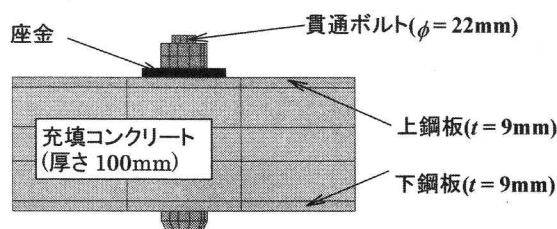


(a) 静的解析（充填コンクリートの場合）



(b) 衝撃応答解析

図－2 解析モデル



図－3 サンドイッチ版部の拡大図

下鋼板を高力ボルトで結合した鋼殻内部に高流動コンクリートを充填した厚さ約 10 cm または 15 cm のサンドイッチ版、裏層材として 50 cm 厚の発泡スチロール (EPS) 材より構成される。従来の一般的な三層緩衝構造形式は敷砂厚 (表層材) が 50 cm、芯材部の RC 版厚が 20～30 cm であることより、提案の三層緩衝構造は重量を大きく軽減できる特長を有している。

3. 数値解析の概要

ここでは、サンドイッチ版を芯材とした三層緩衝構造の緩衝効果に関する基礎的な資料を得ることを目的として、有限要素法を用いた静的および衝撃応答解析を実施した。

静的解析は、三層緩衝構造を構成する芯材のサンドイッチ版および裏層材の EPS 材から成る 2 層構造を解析対象とし、表層材の敷砂に関しては、解析の簡略化を図るために省略することとした。芯材部のサンドイッチ版に関しては、1) 厚さ 15 cm 程度の中空サンドイッチ版とした場合と、2) 厚さ 10 cm 程度のサンドイッチ版に高流動コンクリートを充填した場合の 2 ケースについて実施した。载荷条件は両ケースともに中央部の半径 500 mm の範囲に 1,960 kN に相当する等分布荷

重を作用させた場合について検討を行っている。

一方、衝撃応答解析は、敷砂による緩衝効果を考慮するために、敷砂厚 20 cm を考慮した解析モデルを構築し、中央部に 3,000 kg の鋼製重錘を 10 m の高さから自由落下させた場合について実施している。なお、本解析では内部に高流動コンクリートを充填した場合の 1 ケースについてのみ検討を行っている。また、静的および衝撃応答解析には、それぞれ構造解析用汎用プログラム ABAQUS³⁾および LS-DYNA⁴⁾を用いた。

図－2 には、両解析モデルの要素分割状況を示している。サンドイッチ版は図－3 に示すように上下鋼板の板厚を 9 mm、貫通ボルトとして M22 ボルトを仮定し、ボルトピッチを 30 cm に設定している。また、解析モデルは対称性を考慮し 1/4 モデルとした。各構成要素の材料構成則モデルとして、サンドイッチ版を構成する鋼材に関しては、塑性硬化を考慮した等方弾塑性体モデル、充填コンクリートに関しては引張応力のカットオフを考慮した弾塑性体モデルを使用した。また、EPS 材には弾塑性クラッシュブルフォーム、敷砂には弾塑性土質体モデルを用い、鋼製重錘は弾性体と仮定した。

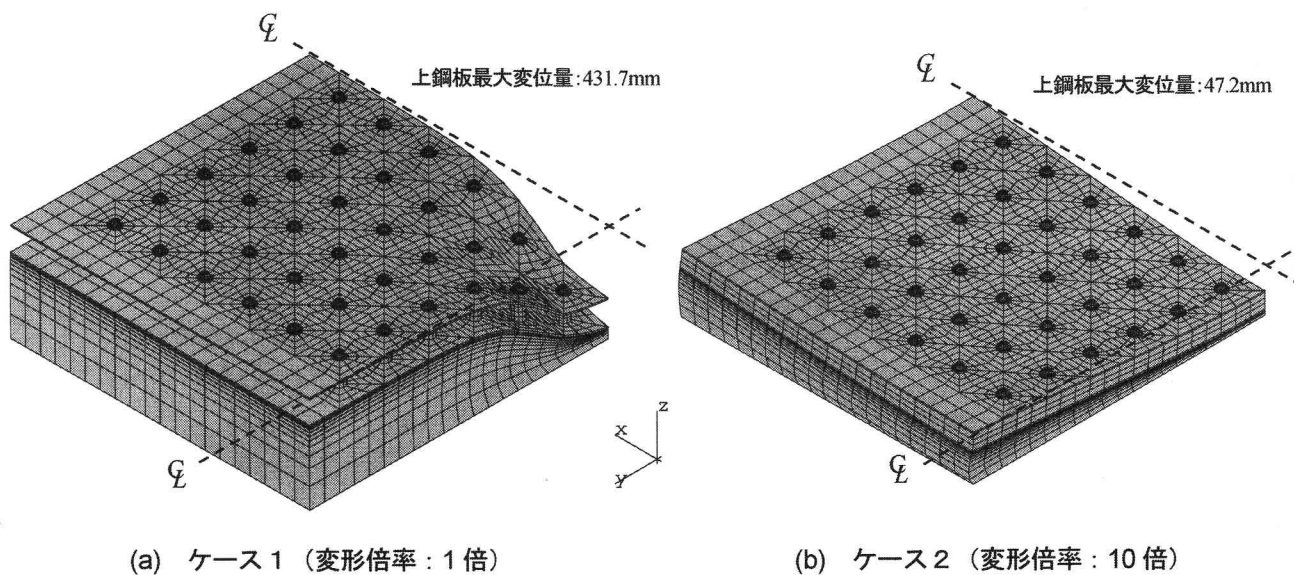
境界条件は、EPS 材下面を完全固定、スパン方向および断面方向境界面には連続性を考慮した拘束条件を与えた。また、部材間の接触面は剛結とし、重錘と敷砂間のみに接触・剥離が考慮可能な接触面を導入している。

4. 解析結果および考察

表－1 に静的および衝撃応答解析結果を示している。また、図－4 には静的解析における変形状況を比較し

表－１ 解析結果一覧

	解析種類	載荷荷重	表層材 厚さ t_s (cm)	裏層材 厚さ t_E (cm)	芯材の種類と 厚さ t_c (cm)	最大変位量 (mm)	鋼板応力 (N/mm ²)		EPS 材 応力 (N/mm ²)
							上鋼板	下鋼板	
ケース 1	静的解析	1,960 kN	なし	50 cm	中空 (15 cm)	431.7	100	200	0.59
ケース 2					充填 (10 cm)	47.2	273	300	0.14
ケース 3	衝撃応答解析	3,000 kg, 10 m	20 cm			63.0	300	300	0.13



図－４ 静的解析における変形状況

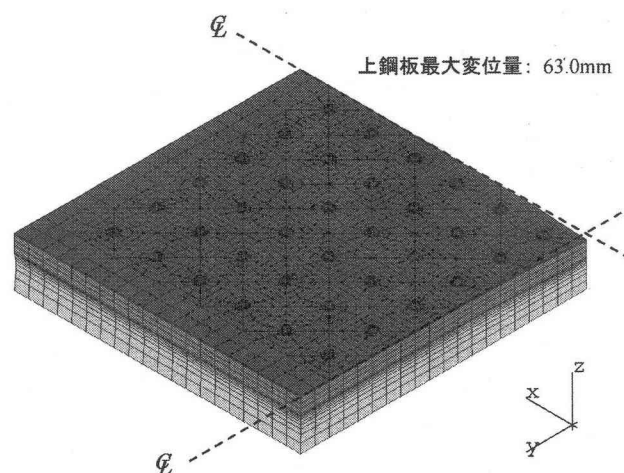
で示している。表－１および図－４より静的解析結果から以下のことが明らかとなった。

- (1) 芯材を厚さ 15 cm 程度の中空サンドイッチ版とするケース 1 の場合には、版の変形が載荷点近傍に集中する傾向にあり、かつ変形量が大きくなる (図－４a 参照)。
- (2) 内部に高流動コンクリートを充填した厚さ約 10 cm のサンドイッチ版を芯材とするケース 2 の場合には、局所的な変形が抑制され、かつ変形量も小さいことから、緩衝構造の芯材としての機能を十分に有している (図－４b 参照)。
- (3) また、EPS 材に生じる応力度も、コンクリートを充填するケース 2 の場合が充填しないケース 1 の場合の 1/4 程度と小さい。

以上のことから、緩衝効果および荷重分散性は、コンクリートを充填したサンドイッチ版が良好であることが明らかとなった。

図－５には、衝撃応答解析結果から求められた変形状況を示している。表－１および図－５より、衝撃応答解析結果から以下のことが明らかとなった。

- (1) 衝撃応答解析における最大変位量は、静的解析結

図－５ 衝撃応答解析における変形状況
(変形倍率 : 5 倍)

果と比較して若干大きいものの、上下鋼板および EPS 材に発生する応力度は概ね一致している。

- (2) 局所変形は生じず、荷重分散性に優れている。
- (3) 上下鋼板に発生する応力度が 300 N/mm² 程度と弾性範囲であることから、安全余裕度が高い。

以上のように、衝撃応答解析の結果からもコンクリートを充填したサンドイッチ版を芯材に用いた三層緩

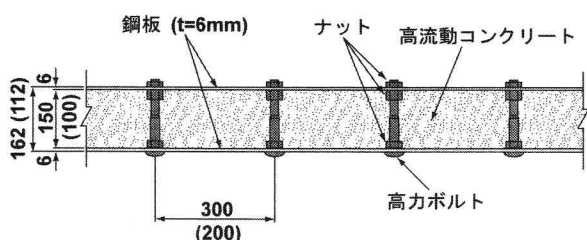
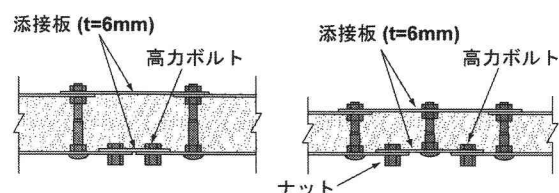


図-6 サンドイッチ版の構造 (単位: mm)



(a) 版厚 15 cm の場合 (b) 版厚 10 cm の場合

図-7 添接部の構造

衝構造は、緩衝材として良好な性状を有することを示唆する結果が得られた。

5. 実験の概要

前節による解析結果より、コンクリートを充填したサンドイッチ版は三層緩衝構造の芯材としての機能を十分に満たしていることが明らかになった。ここでは、これらの解析結果を踏まえ、実構造物への適用性を検討する前段階として、剛基礎上に提案する三層緩衝構造を設置し、その緩衝効果を実験的に検討した。

図-6には、実験で使用したサンドイッチ版の詳細を示している。サンドイッチ版は、上下鋼板 (SS400) と高力ボルト (M22) から構成される鋼殻を工場で製作し、現場で部材の連結を行った後、鋼殻内部に高流動コンクリートを打設するものである。なお、前節の解析結果を踏まえて、実験に使用したサンドイッチ版の上下鋼板は、板厚が 6 mm と解析モデルよりも薄くしている。また、高力ボルトの間隔は、版厚が薄い場合にはせん断耐力が減少することを考慮し、版厚 10 cm の場合に対しては 20 cm 間隔、版厚 15 cm の場合に対しては 30 cm 間隔で配置している。

部材相互の連結は、図-7のように添接板と高力ボルトによる摩擦接合とし、施工性を考慮して添接作業がすべて上面からの施工ができる構造としている。

重錘落下衝撃実験は、伝達衝撃応力測定用ロードセルを埋設したコンクリート剛基礎上に 4 m×4 m の緩衝構造を設置し、その中央部に 3,000 kg の重錘を所定の高さより自由落下させることによって行った。実験は繰り返し落下および単一落下実験の 2 種類を実施し



写真-1 実験状況

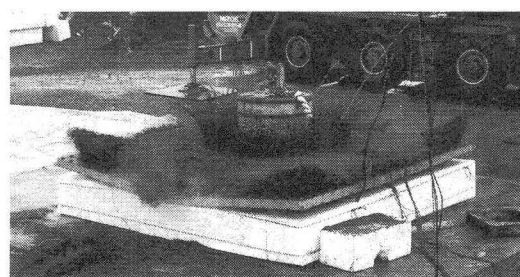


写真-2 載荷状況 (実験ケース: No.4)

た。また、最も厳しい条件で実験を行うこととし、重錘の落下位置直下が芯材の添接部となるようにサンドイッチ版を設置した (後述、図-8 参照)。なお、繰り返し落下実験では EPS 材を取り替えずに行っている。写真-1には実験状況を、写真-2には衝突状況を示している。

重錘は、鋼製円筒 (高さ 97 cm, 直径 100 cm, 底部が半径 80 cm の球状) で、内部に鋼塊とコンクリートを充填して重量を調整している。

表-2には実験ケースの一覧を示している。供試体は、表層材として 20 cm 厚の敷砂および裏層材として 50 cm 厚の EPS 材とし、芯材のサンドイッチ版の版厚を 2 種類 (10 cm または 15 cm) に変化させている。なお、いずれの場合もサンドイッチ鋼殻内部には、高流動コンクリートを充填している。

実験における測定項目は、重錘に埋設した加速度計による重錘加速度、サンドイッチ版の上下面鋼板に貼付したひずみゲージによるひずみおよび剛基礎上に設

表一 2 実験ケース一覧

実験 ケース	実験 種類	芯材の種類 と厚さ t_c (cm)	表層材 厚さ t_s (cm)	裏層材 厚さ t_E (cm)	落下 高さ H (m)
1-1	繰り 返し	充填 (15 cm)	20 cm	50 cm	2.5
1-2					5.0
1-3					7.5
1-4					10.0
1-5					12.5
1-6					30.0
2	単一	充填 (10 cm)			
3					15.0
4					30.0

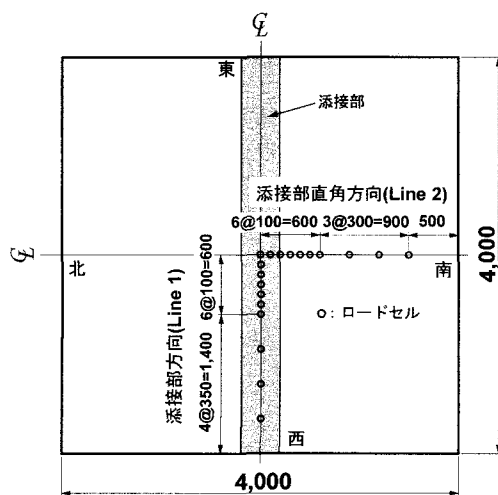


図-8 ロードセルの配置位置 (単位: mm)

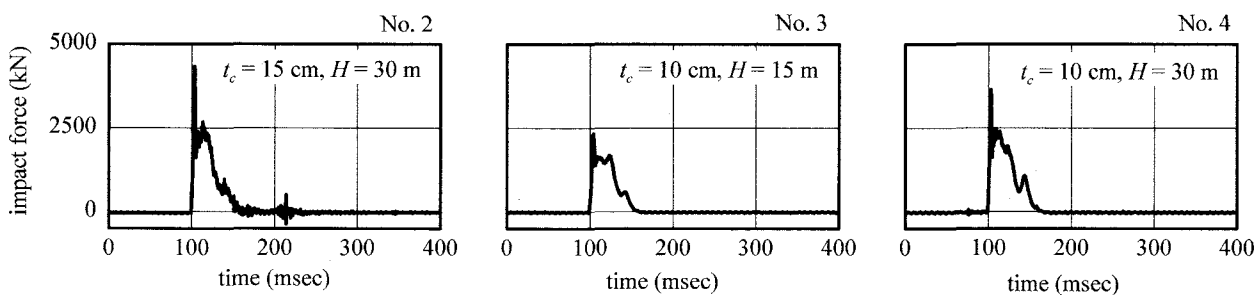


図-9 重錘衝撃力の時系列分布（単一落下実験）

置したロードセルによる伝達衝撃応力である。

ロードセルは、図-8に示すように重錘落下位置を中心とサンドイッチ版の添接部に沿う方向（Line 1）とその直角方向（Line 2）に設置（中心から 600 mm までは、100 mm ピッチ、その外側は 300 あるいは 350 mm ピッチ）し、傳達衝撃応力の分布性状が評価できるようにした。また、ロードセルの設置に際しては、剛基礎上のロードセル近傍の応力に乱れが生じないように、基礎コンクリート表面とロードセル受圧部の高さが等しくなるようにしている。なお、計測はアンプ内蔵のデータレコーダ（サンプリング周波数：5,000 Hz）で一括収録している。

6. 実験結果および考察

図-9には、重錘加速度に重錘質量を乗じて算出される重錘衝撃力の時系列分布を示している。ここでは、単一落下実験結果(No. 2~4)について示している。図より、いずれの場合も載荷初期に急激に立ち上がり最大値を示した後に、最大値の1/2~3/4程度の振幅が20 msec程度持続し、その後緩やかに減少していることがわかる。また、衝撃継続時間は、芯材版厚におよ

び落下高さ H にかかわらず、60 msec 程度となっている。なお、同一落下高さ ($H = 30$ m) である No. 2 および No. 4 の最大重錘衝撃力を比較すると、サンドイッチ版の剛性が大きい前者が後者よりも大きな値を示している。しかしながら、1) 載荷初期の最大値を除いて、両者の応答特性は良く対応していること、また 2) 最大値発生後、2,500 kN 程度の衝撃力が 20 msec 程度作用していることなどから、芯材厚 t_c が重錘衝撃力に与える影響は小さいものと考えられる。

図-10には、剛基礎上に設置されたロードセルから得られる伝達衝撃応力波形を3次元的に示している。図は横軸に重錘落下中心を原点としたロードセル位置を、奥行き方向に時間軸を、縦軸に伝達衝撃応力を取って整理している。なお、ここでは紙面の都合上、同一落下高さ H である No. 2 および No. 4 の結果のみ示している。

図より、両者における伝達衝撃応力分布は、落下中心から添接部方向および添接部直角方向に広く分散しており、RC版を芯材として用いる場合と同様に荷重分散性に優れていることがわかる。また、波動の継続時間は、落下中心から鉛塊半径に相当する50 cm程度

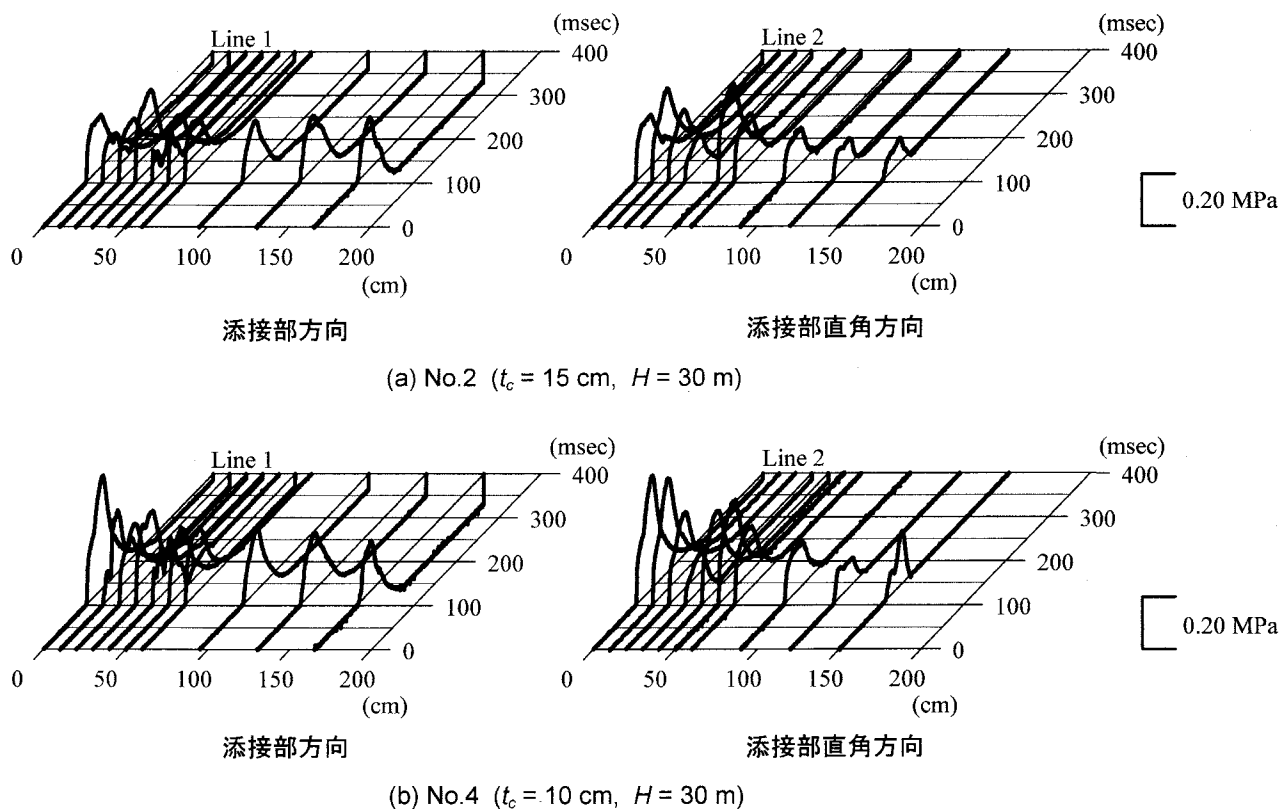


図-10 伝達衝撃応力の分布性状

までの範囲で約 100 msec となっており、それ以外では端部に向かうほど小さくなる傾向を示している。また、両者の応力分布を比較すると、版厚の薄い No. 4 の実験では、重錘落下中心近傍部の応力が若干大きく示されており、応力が集中する傾向を示している。

以上より、三層緩衝構造の芯材にサンドイッチ版を適用する場合においても RC 版と同様に荷重分散性に優れ、十分な緩衝効果を期待できることが明らかになった。

7. まとめ

本論文では、サンドイッチ版を芯材として用いた場合の三層緩衝構造の緩衝性能に関する基礎資料を得ることを目的に、有限要素法を用いた数値解析および大型供試体による重錘落下衝撃実験を実施した。得られた結果を整理すると以下のようである。

(1) 解析結果より、三層緩衝構造の芯材を中空サンドイッチ版とする場合には、版の変形が载荷点近傍に集中する傾向にあり、かつ変形量が大きくなる。一方、コンクリート充填サンドイッチ版を用いる場合には局所的な変形が生じず、変形量も小さくなることから、芯材としての機能を備えていることが明らかになった。

(2) 重錘落下衝撃実験より、三層緩衝構造の芯材にサンドイッチ版を適用する場合には、RC 版を適用する場合と同様に荷重分散性に優れており、十分な緩衝効果が期待できることが明らかになった。

謝辞: 本実験で用いた EPS 材は、三菱化学フォームプラスチック (株) よりご提供戴いた。また、野外実験に関しては (株) KG エンジニアリングにご協力を戴いた。さらに、数値解析および実験データの整理に際しては、当時室蘭工業大学大学院生の岡田慎哉君 (現北海道開発土木研究所) および同大学院在学中の鈴木健太郎君に多大なご協力を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 木下昌樹, 今野久志, 佐藤昌志, 岸 徳光: 鋼・コンクリート合成版を用いた落石覆道の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 1555-1560, 1999.7.
- 2) 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修: 三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 1257-1265, 1995.3
- 3) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.8, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.
- 4) Hallquist, J.O.: LS-DYNA User's Manual, Ver. 950, Livermore Software Technology Corporation, 1999.