

I-52

美幌覆道の衝撃応答解析

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 岸 徳光
 室蘭工業大学 正員 菅田 紀之

1. はじめに

現在、落石覆道の上には、落石による衝撃力を緩和する目的で一般的に砂が敷かれているが、砂には、緩衝効果に限界があること、死荷重が大きく覆道本体がトップヘビーになること、締固め度や含水比により特性が変化すること等、問題点が多いことが指摘されている。

このため当研究室では、最近土木の分野で盛土材として使用されるようになったEPSが敷砂と同程度の衝撃吸収能力を持ち¹⁾軽量であることに着目し、これを緩衝材構造の一部に使用した三層構造緩衝システム（以後、三層緩衝構造と呼ぶ）を開発するための実験研究を平成2年度より行ってきた。その結果、三層緩衝構造が敷砂あるいはEPSを単層で用いた場合よりも優れた緩衝性能を有していることが平成2年度および3年度の屋外実験により確認された²⁾。さらに平成3年9月には一般国道336号の美幌覆道において実証実験を行いその実構造物への適用の妥当性を確認した³⁾。

この実証実験は、新設の覆道を使用して行ったものであり、覆道本体にあらかじめ、鉄筋にはひずみゲージを、頂版にはロードセルを施工中に取り付け、重錘落下衝撃による本体構造の応答波形を測定した。本実験のように重錘衝撃力、伝達衝撃力さらに覆道本体の応答値までの一連の動的挙動を測定した実験は全国的にもこれまでに例がなく、貴重なデータが得られた。

一方、覆道の設計手法は、現在静的な二次元（平面）骨組解析を基本⁴⁾にして行われているが、二次元動的骨組解析によれば、覆道の応答値は静的載荷時の1.6倍程度になることも明らかになっており⁵⁾、実覆道が1ブロック12mの奥行きをもった構造であることから、骨組構造にモデル化する事を含め、実状に則した合理的設計手法を確立することが必要であるものと考えられる。

本論文では、上記のような覆道の合理的な設計解析手法確立の基礎資料を得ることを目的として、美幌覆道の実証実験データを用いた二次元骨組解析や有限帯板法による解析により実験結果との比較を行い、各解析法の妥当性について検討を行った。

2. 美幌覆道実証実験の概要

実証実験を行った美幌覆道は、箱型構造のRC覆道であり、図-1に示すように海側側壁には1ブロック12mの中央に幅5mの採光部を有する構造となっている。実験は、ブロック中央の頂版上に三層緩衝構造（上部より砂50cm、RC版20cm、EPS50cm）あるいは敷砂（90cm）を設置し、直径1m、球底の2tおよび3tの重錘をトラッククレーンにより5~20mの高さに吊り上げ、頂版の中央（L/2点）、L/4点、3L/4点の3箇所に自由落下させたものであり、この時の重錘加速度、頂版上のロードセル応力、覆道本体の鉄筋ひずみ、頂版の加速度を測定した。本論文では表-1に示す2つの実験ケースを対象に各解析を行った。尚、実証実験の詳細については文献3)を参照されたい。

表-1 解析を行った実験の内容

実験 No.	緩衝構造	重錘 重量	落下高	落下 位置
1-2	三層構造	3 t	20 m	L/2点
2-2	砂	3 t	10 m	L/2点

Dynamic Response Analysis of Bihoro Rock-Shed Structure

by Osamu NAKANO, Hisashi KONNO, Norimitsu KISHI and Noriyuki SUGATA

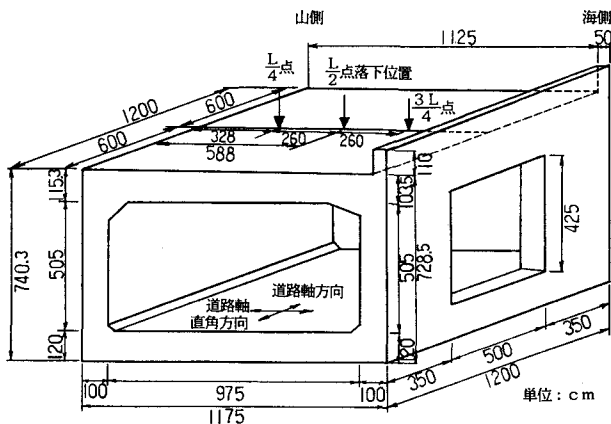


図-1 美幌覆道の形状寸法

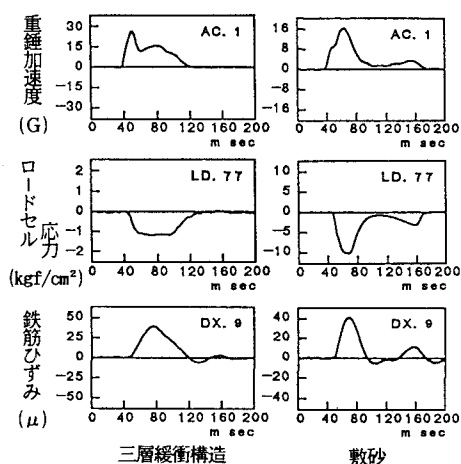


図-2 実験により得られた応答波形

図-2は、解析を行った2つの実験ケースの重錘加速度と重錘落下点直下のロードセル応力および覆道頂版の下縁鉄筋ひずみの応答波形である。実験条件は、重錘重量は両者とも3tであるが、落下高は三層緩衝構造が20m、敷砂が10mと異なっている。

波形形状および応答値は、緩衝材構造の違いによって異なっており、重錘加速度の最大値は、三層緩衝構造が27G、敷砂が16Gである。ロードセル応力は、三層緩衝構造ではRC版の荷重分散効果により1.2kgf/cm²と非常に小さく、敷砂では荷重分布範囲が狭く中央部に応力が集中し10.2kgf/cm²と大きくなっている。鉄筋ひずみは、両者とも約40μである。

3. 解析モデル

有限帯板理論を用いた覆道の解析モデルは、図-3に示すように節点数・要素数ともに54である。また、道路軸方向については、実際の覆道では実験箇所ブロックは、前後とも他のブロックによって接合されているが、実験での載荷荷重が局所的であり、前後のブロックの影響はそれほど大きくないと思われるため、解析モデルでは1ブロック12mの両端を単純支持と仮定している。さらに、海側側壁は採光部を有しているものの比較的剛性の大きいことが実験結果より明らかになったので、本解析では海側側壁の質量および伝達軸力が等しくなるように、換算質量およびヤング率を用いた板要素としている。尚、本解析における軸方向Fourier級数の項数は、文献6)を参考にして51項とし、全ての自由度を用いたモード法によって解析を行っている。減衰定数は、「道路橋示方書IV耐震設計編」を参考にすべてのモードに対して5%とした。

二次元骨組解析の要素分割は、有限帯板法による解析モデルの道路軸直角方向断面と同じとし、奥行き1mで解析を行った。表-2に頂版、山側および海側側壁、底版の奥行き1m当たりの断面諸量および材料定数を示す。尚、動的有限帯板法および動的二次元骨組解析法についてはそれぞれ文献6)、7)に詳細に示されているのでそれらの理論については、ここでは省略する。

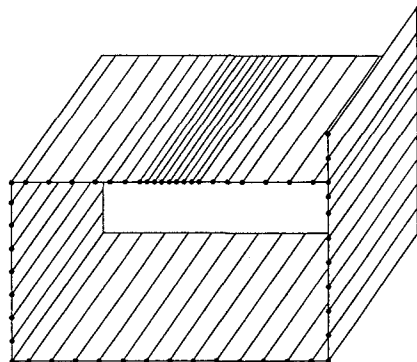


図-3 解析モデル

表-2 断面諸量および材料定数

部 材	断面積 (cm ² /m)	断面二次 モーメント (cm ⁴ /m)
頂 版	11,000	11,091,667
山側側壁	10,000	8,333,333
海側側壁	5,833	4,861,111
底 版	12,000	14,400,000
弾性係数	3.0×10 ⁵ kgf/cm ²	
単位重量	2.5 t/m ³	

4. 载荷荷重

入力荷重に関しては、重錘衝撃力（重錘加速度と重錘質量の積）を入力する方法と、覆道本体に作用する伝達衝撃力（ロードセル応力の合力）を入力する方法が考えられる。本研究では後者の方法に従い、覆道頂版に設置されているロードセルから得られた波形を用いた。

有限帯板法の場合には、入力荷重は、最大伝達衝撃力発生時のロードセル応力分布を

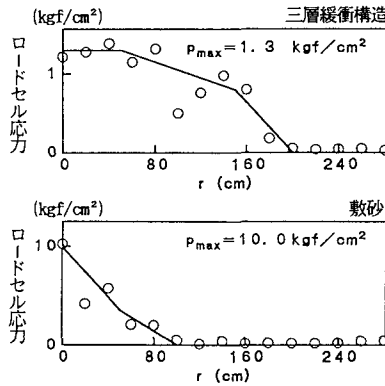


図-4 入力荷重の形状図

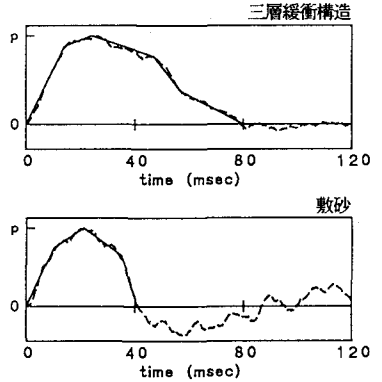


図-5 入力波の時間方向分布図

図-4のように折線近似し、図-6に示すような軸対称の荷重として使用した。また、その時間方向分布は、全ての位置で同一と仮定し、伝達衝撃力波形を代用しており、図-5のように最初の半波のみを折線近似して使用した。

二次元骨組解析においては、奥行き方向の荷重分布を仮定できないため、ここでは上記ロードセル応力分布が一様に作用しているものと仮定して解析を行っている。図-7に荷重の载荷状況を示す。

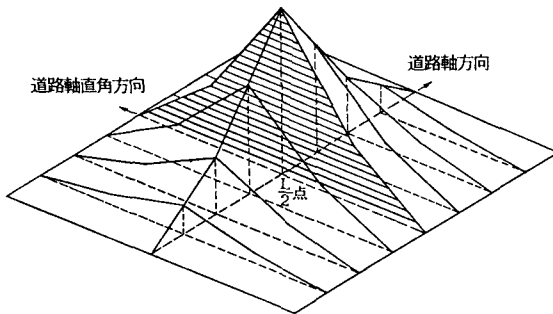


図-6 有限帯板解析の荷重形状図（敷砂）

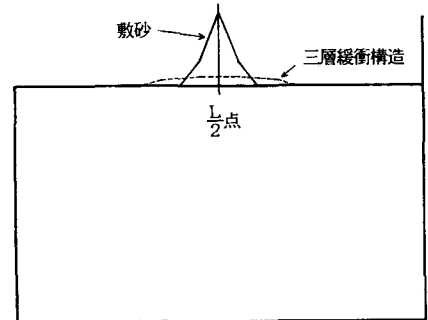


図-7 二次元骨組解析の荷重载荷図

5. 解析結果

5.1 頂版下縁鉄筋のひずみ波形

重錘落下点を中心とする5点について頂版下縁鉄筋のひずみ波形の比較を行った。図-8にその測点位置と測点番号を示す。なお、理論解析結果は、断面モーメントと軸力を用い梁理論に従って算定している。図-9、10にそれぞれ三層緩衝構造を用いた場合と敷砂を用いた場合の結果を示す。

(a) 図は、二次元骨組解析の結果を中心に示しており、(b) 図は縦軸を拡大して、主に実験結果と有限帯板法による解析結果を示している。両図より、三層緩衝構造と敷砂のいずれの場合にも二次元骨組解析法による計算結果が実験結果あるいは有限帯板法による解析結果に比較して数倍大きい応答分布を示していることが分かる。

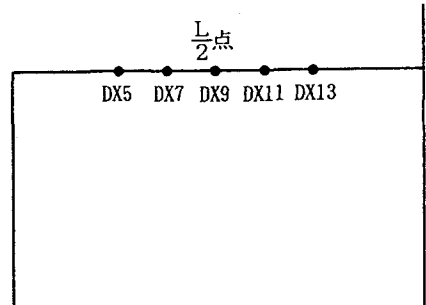


図-8 計算結果出力位置

図-9の三層緩衝構造の場合は、実験結果および各解析結果とも主応答が入力荷重載荷時の1波目だけとなり、それ以降は急速に減衰している。これは入力波の時間方向分布が図-5より80msecと覆道の固有値（実験結果より約70msecと算定できる）とほぼ同じであるためと考えられる。有限帯板理論による解析結果には、低次振動モードに高次のモードが重ね合わされた状態となっているが、概略的には実験結果と同様の応答分布を示している。一方、二次元骨組解析は、実験結果および有限帯板法に対し最大応答時で約3倍の応答となっている。

図-10の敷砂を用いた場合には、実験結果、解析結果とも低次の振動状態になっている。これは入力波形の時間方向分布が図-5のように半波が約40msecとなっており、覆道の低次固有振動の半周期に近いためと考えられる。理論解析結果と実験結果との比較においては、有限帯板法による解析結果は最大応答時で実験結果より2割程度小さい値を示しているが、三層緩衝構造の場合と同様に近い近似を示している。一方、二次元骨組解析法による結果は、実験結果の6.5倍程度の応答を示している。

以上により、二次元骨組解析法による解析結果は、実験結果と大きく異なり問題があるが、立体解析である有限帯板法は覆道構造の衝撃挙動解析法として有効であるものと考えられる。

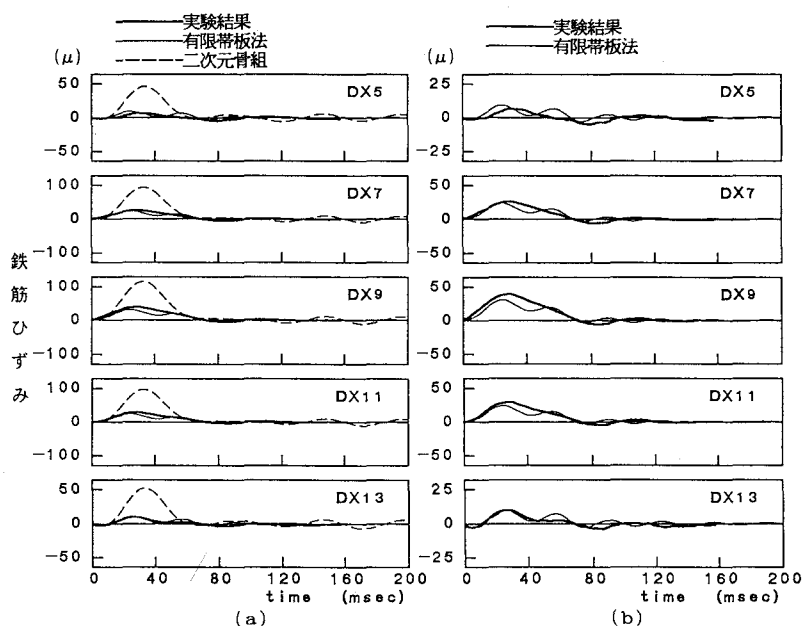


図-9 鉄筋ひずみ応答波形（三層緩衝構造）

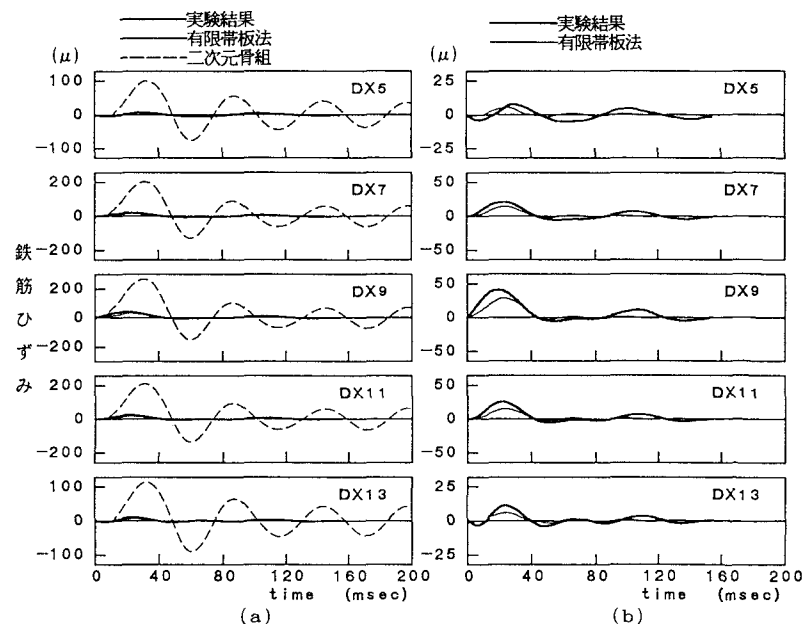


図-10 鉄筋ひずみ応答波形（敷砂）

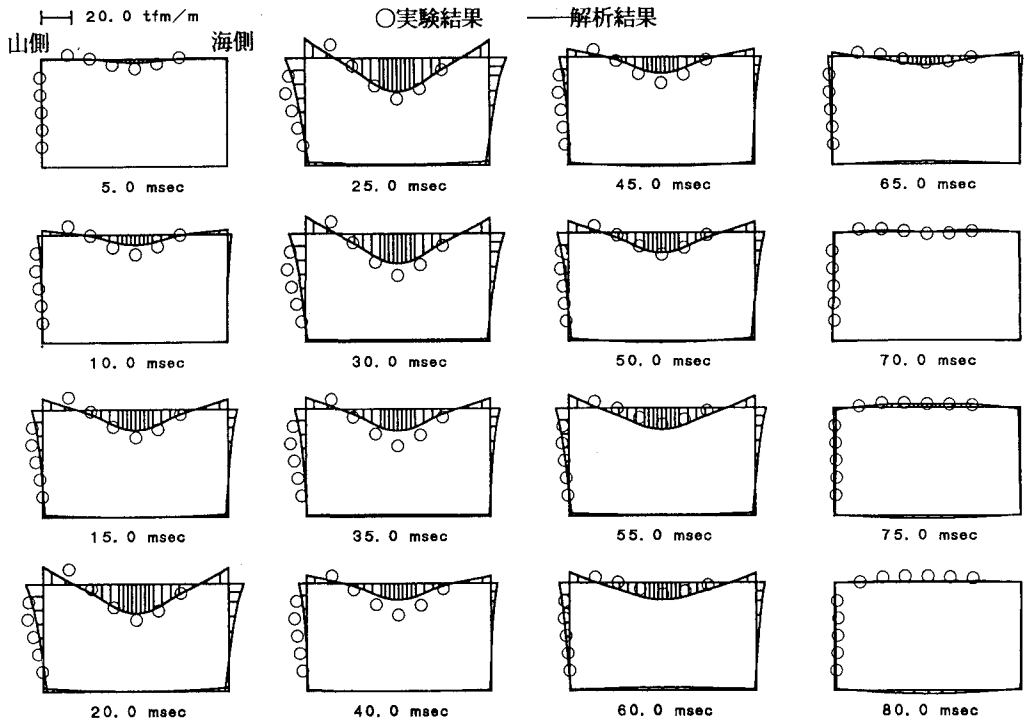


図-11 曲げモーメントの実験結果と解析結果の比較（三層緩衝構造：重錘重量3t、落下高20m）

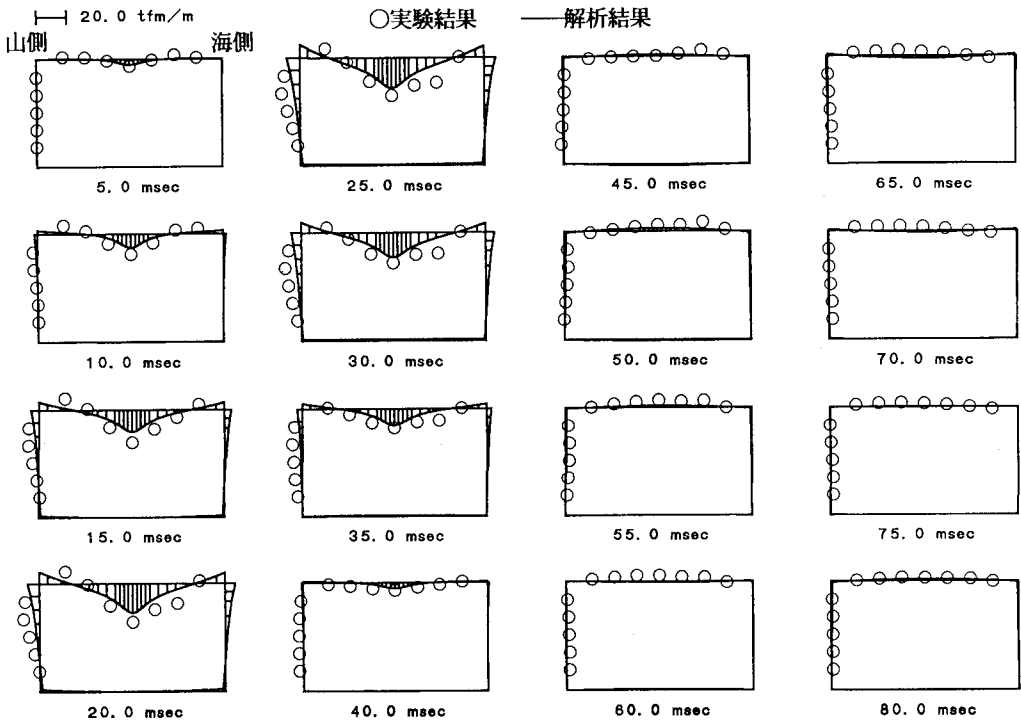


図-12 曲げモーメントの実験結果と解析結果の比較（敷砂：重錘重量3t、落下高10m）

5. 2 曲げモーメント分布

鉄筋ひずみの応答波形による実験結果と計算結果の比較では、有限帯板法による解析は実験結果を非常によく近似することが分かったため、ここではこの解析法のみに着目し、覆道の重錘落下断面の曲げモーメント分布について検討を行った。図-11および図-12は、三層緩衝構造および敷砂の各時刻の曲げモーメント図である。図中の丸印は、実験によって測定された、上縁および下縁の鉄筋ひずみより計算した曲げモーメントを示しており、実線は解析結果を示している。

三層緩衝構造の計算結果は、時刻35msec前後で、頂版中央での曲げモーメントが実験結果よりも小さくなっており、また山側側壁の分布形状が実験結果と多少異なっているものの、概略的には応答開始から減衰に到るまでの応答過程をよく近似している。

敷砂の計算結果についても、山側側壁の分布形状が最大曲げモーメント発生時前後で多少実験結果と異なっているものの、頂版部の応答値および応答過程は実験結果をよく近似している。

曲げモーメントの分布形状についてみると、入力荷重の違いから、三層緩衝構造では、分布荷重載荷時の曲げモーメント分布に近く、また敷砂では、集中荷重載荷時の曲げモーメント分布に近くなっている。

6. まとめ

落石覆道の合理的な設計手法確立のための基礎資料を得ることを目的として、美幌覆道の実証実験データを用いた二次元骨組解析および有限帯板法による解析結果と実験結果の比較検討を行い、以下の結論を得た。

- ① 二次元骨組解析法による覆道頂版の応答分布は、実験結果に比較して数倍大きい結果を示した。
- ② 有限帯板法による解析結果は、実験結果をよく近似しており、覆道構造の衝撃挙動解析法として有効である。

今後は、さらに有限帯板法による解析を進めるとともに、落石覆道の現行設計法による静的解析等との比較検討を行い、より合理的な落石覆道の設計解析手法を確立して行きたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 吉田 博・松葉美晴・法貴賢志郎・久保田努：発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究、土木学会論文集、第427号／VI-14、pp.143～152、1991年3月
- 2) 中野 修・今野久志・金子 学・小野裕二：EPSの落石覆工緩衝材への適用について、建設省技術研究会、平成3年11月
- 3) 中野 修・今野久志・金子 学・岸 徳光：美幌覆道における重錘落下衝撃実験、土木学会北海道支部論文報告集、第48号／I-51
- 4) 北海道開発局建設部道路建設課：道路防災工調査設計要領（案）（落石覆道編）、平成2年3月
- 5) 菅田紀之・岸 徳光・中野 修・松岡健一：剛性マトリックス法を用いた落石覆工の衝撃応答解析、構造工学論文集
- 6) 岸 徳光・能町純雄・松岡健一・吉田絃一：一方向に補剛された両端単純支持矩形板の衝撃応答特性について、構造工学論文集、Vol. 33A、1987年3月
- 7) 菅田紀之・岸 徳光・松岡健一・尾崎 一：剛性マトリックス法の衝撃応答解析への適用性、構造工学論文集、Vol. 37A、1991年3月