

薄肉鋼製セル緩衝材を有する砂防ダムの衝突実験に関する基礎的考察

ELEMENTAL STUDY ON SHOCK ABSORBING EFFECT OF SAND FILL CELL IN FRONT OF STEEL CHECK DAM

政枝 憲太郎*, 香月智**, 石川信隆***, 竹内大輔****

Kentarou MASAEDA, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Daisuke TAKEUCHI

*防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**工博 防衛大学校助教授 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

****工修 住友金属工業(株) 建設・エネルギー事業部 担当副長 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)

キーワード：鋼製セル緩衝材、砂防ダム、緩衝効果、衝撃荷重、中詰材
(Sand fill cell, Check dam structure, Shock absorbing effect, Impact load, Sand fill)

1. はじめに

従来の砂防ダムは、巨礫衝突に対する緩衝効果とその後の流体圧に対する構造抵抗機能を分離していないため、ややもすると不合理な設計となることがあった^{1),2)}。本研究で対象とするのは、土石流の巨礫衝突を直接受ける砂防ダム前面に薄肉の鋼製セル内に土砂を中詰めしたセルを設置して緩衝機能を持たせ、その後方に本体部の鋼製トラス構造を持つ開発中の砂防ダムである。

本研究は、鋼製セル緩衝材の緩衝効果に関する基礎的データを得るために、1/5スケールのミニチュアモデルを用いた水平衝撃載荷実験を行っ

たものである。

2. 実験の概要

供試体として用いた鋼製セル緩衝材は、写真-1および図-1に示す高さ約96cm、直径40cm、肉厚0.16cm ($D/t=375$)、材質SS400鋼管の薄肉鋼板セルに中詰材を高さ80cmまで詰めたものである。砂防ダム本体は、 $\phi=60.5$ 、 $t=2.3$ 、材質STK400の鋼管を溶接接合したトラス構造のもので底面の鋼板と溶接固定している。中詰材は、表-1に示すけい砂5号(粒径1mm)、碎石5号(同5mm)、川砂利4号(同25mm)の3種類を用い、

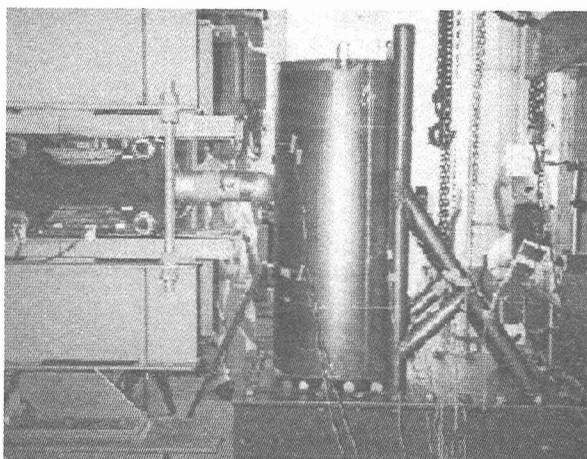


写真-1 水平衝撃載荷装置

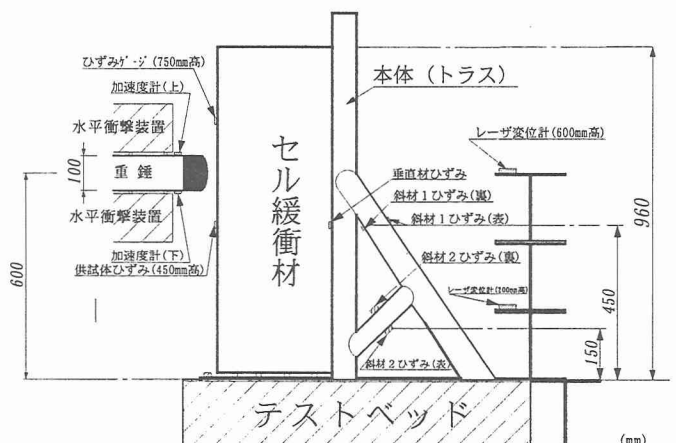


図-1 供試体側面図

表-1 中詰材の諸元

種類	けい砂5号	碎石5号	川砂利4号	鉛材
範囲(mm)	0.5~1.0	3.0~10	15~30	7mm
呼称粒径	1mm	5mm	25mm	7mm
単位体積重量(N/cm ³)	0.0148	0.0146	0.0145	0.0743

表-2 実験ケース

ケース名	荷重	重錘重量	セル緩衝材	中詰材	粒径(mm)	載荷要領	衝突速度(m/s)	回数
Im-I-1	重錘衝突荷重	150kgf	有	けい砂	1	漸増載荷	1,2,3,4,5,6,7	2
Im-I-5				碎石	5			2
Im-I-25				川砂利	25			2
Im-I-0				空	-			1
Im-I-1-60				けい砂+上載鉛(60kgf)	1			1
Im-I-1-120				けい砂+上載鉛(120kgf)	1			1
Im-I-Fr			無	-	1,2	1		
Im-S-1	有	けい砂	1	単一載荷	6	2		

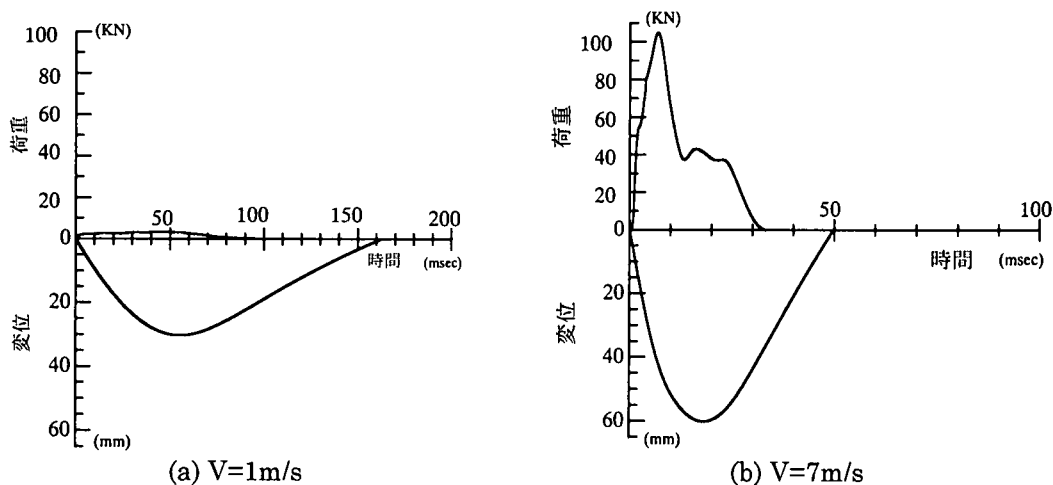


図-2 Im-I-1における荷重および変位の時刻歴応答

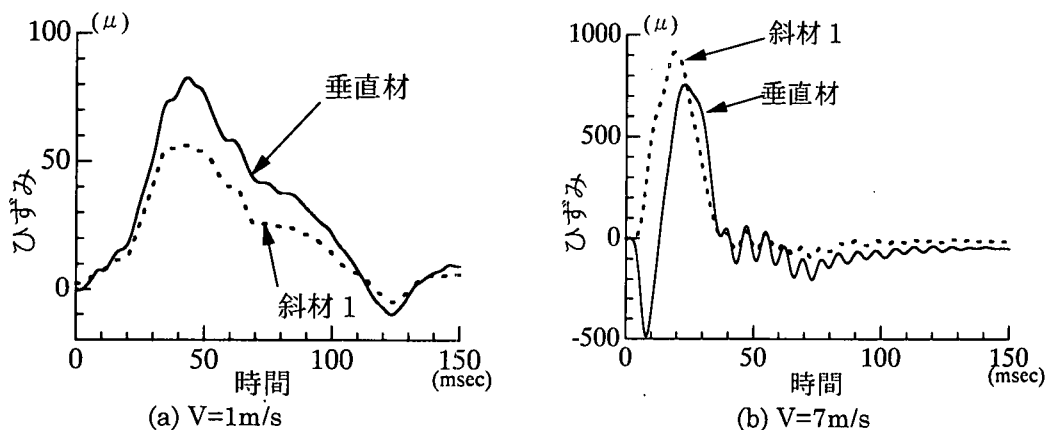


図-3 Im-I-1におけるひずみの時刻歴応答

上方からの拘束圧の影響を見るため鉛材を載せたケースについても検討した。実験は、セルの高さ60cmの中心線上に150kgfの重錘をガイドレールに沿って自由運動により衝突させたものである。載荷の要領については、同一供試体に何度も衝突させる漸増載荷の場合と一度だけの衝突の単一載

荷について行い、前者は衝突速度 $V=1\text{ m/s}$ から始めて 1 m/s ずつ増加し $V=7\text{ m/s}$ まで行うものとし、後者は漸増載荷において弾性の応答限界速度となった $V=6\text{ m/s}$ で行うものとした。また、比較のために中詰材を詰めない空のセルで衝突させた場合と、本体部垂直材の中央に $100\times 100\times 6\times 8\text{ mm}$

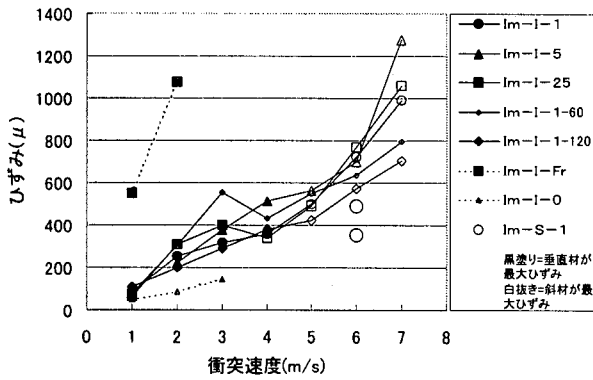


図-4 本体部の最大ひずみ～衝突速度関係のH型鋼を水平に渡し、直接本体部構造に衝突させた場合およびけい砂中詰材の上方に上載荷重を加えた場合についての漸増荷重を行った。以上の条件を組み合わせる表-2に示す8ケース(12体)について検討した。

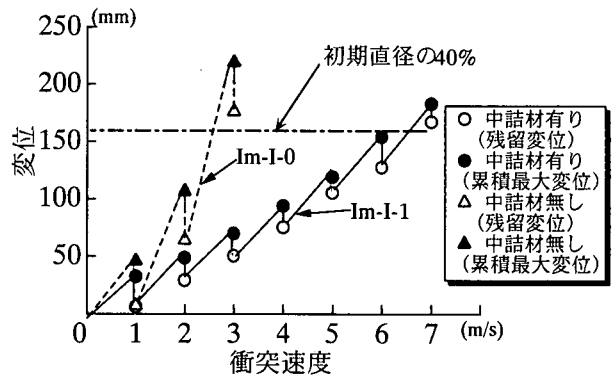


図-5 漸増荷重による変位量の履歴

材の最大ひずみが 80μ であり、斜材の方は 50μ と斜材ひずみの方が小さい。しかし、図-3(b)の $V=7\text{ m/s}$ になると垂直材の最大ひずみは 750μ であるのに対し、斜材のひずみは 950μ と斜材の方が大きくなっている。

(2) 本体ひずみ～衝突速度の関係

図-4は、図-3(a), (b)で述べたひずみの最大応答値と衝突速度の関係を示す。図-3(a), (b)で示したように多くのケースで低速度衝突では垂直材が最大ひずみを生じ、速度が大きくなると斜材の方が最大ひずみを生ずるようになる。図-4では、これをそれぞれ黒塗り記号と白抜き記号によって識別しているが、総じて $V=4\sim 5\text{ m/s}$ でこれらが入れ替わり、 $V=6\text{ m/s}$ ではすべてのケースで斜材の方が卓越した最大ひずみとなる。まず、中詰材のない空のセルと中詰材を詰めた場合を比べると、 $V=3\text{ m/s}$ で空のセルの場合は 160μ であるのに対し、中詰材を詰めた場合は $300\sim 600\mu$ と空のセルを用いる方が本体構造の負担を軽減する緩衝効果は大きい。しかし、図-5で示すように空のセルでは、 $V=3\text{ m/s}$ で残留直径が初期形状の60%を下回るため限界に達している。一方、鋼製セル緩衝材を置かず本体に直接重錘を衝突させた場合には、 $V=2\text{ m/s}$ で 1100μ とトラスの弾性限界に達するのに対し、鋼製セル緩衝材を付けた場合には、 $200\sim 400\mu$ と概ね $1/4$ 程度に本体のひずみを低減させることができ、明瞭な緩衝効果が認められる。また、 $V=6\text{ m/s}$ における漸増荷重と単一荷重を比べると単一荷重のひずみの方が小さくなっており、漸増荷重では繰り返し衝突で中詰材が締め固まるため緩衝効果が低下していることがわかる。また、中詰材の種類による差異は、限界ひずみが近づく $V=6\text{ m/s}$ の場合ではあまり大きくないが、同一中詰材のけい砂でも上載荷重

3. 実験結果および考察

(1) 衝突荷重および砂防ダム本体ひずみの時刻歴応答

図-2(a)に、けい砂中詰材に対する漸増荷重衝突実験(Im-I-1)での衝突速度 $V=1\text{ m/s}$ における荷重(重錘衝撃力)および重錘変位の時刻歴応答を示す。この荷重は、重錘の加速度データに重錘質量を乗じて求めたものであり、重錘の変位は加速度データを積分して求めたものである。衝突荷重は、50msecで最大値の約 3 kN に達し60msec位まで持続した後、100msecで0となる。すなわち、100msecでは重錘がセルとの接触が無くなり跳ね返りの等速状態になる。この間の変位は、50msecでピーク値の約 30 mm を迎える放物線上の応答を示している。ここで、荷重によって重錘がセルと離れる時刻は100msecであるのに対し、重錘が初期接触開始変位である 0 mm に戻る時刻が160msecと遅れるのはセルに残留変位が残るためである。

図-2(b)には、同一供試体で衝突速度を $V=7\text{ m/s}$ まで漸増させた際の荷重および変位の時刻歴応答を示す。この場合には、衝突荷重が約 100 kN まで達するが、その作用時間は30msecと $V=1\text{ m/s}$ の場合よりも小さくなる。また変位応答も最大変位が 60 mm と大きくなるのに対し、変位が0に戻るまでの時間は50msecと小さくなっている。

図-3(a)には、衝突速度 $V=1\text{ m/s}$ における垂直材と斜材のひずみ応答を示す。この場合には垂直

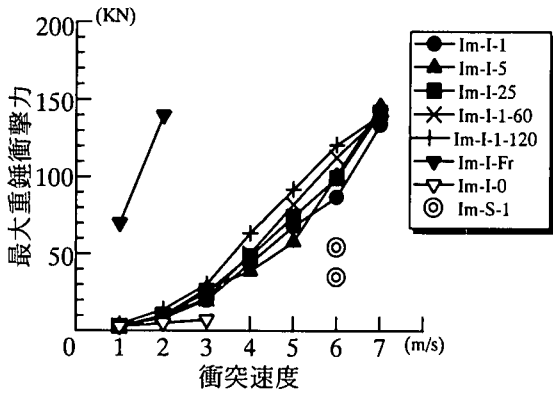


図-6 最大重錘衝撃力～衝突速度関係

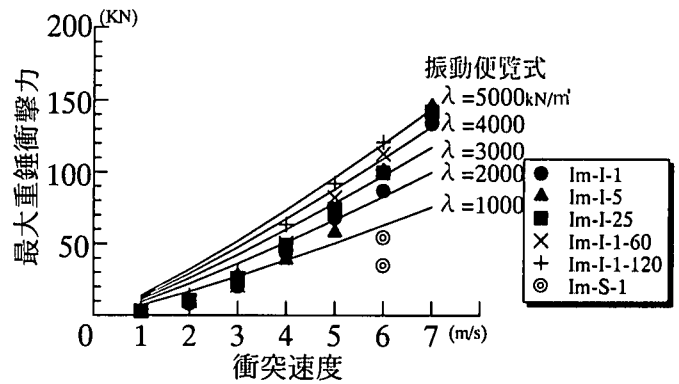


図-7 実験結果と予測値の比較

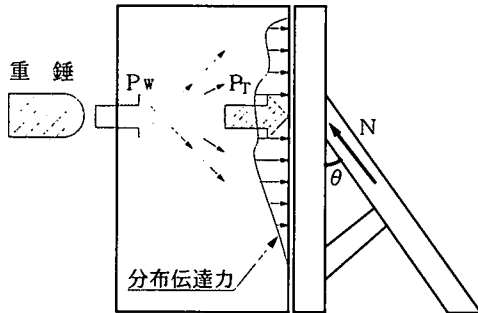


図-8 衝撃力の伝達機構

が大きくなるにつれ明瞭に本体ひずみが低下しており、衝突部材の中詰材上面からの深さの影響があることが認められる。この上載荷重を載せない場合にはけい砂、碎石、川砂利のいずれの場合にも $V=7\text{ m/s}$ で約 $1000\ \mu$ ($\sigma=21\text{ kN/cm}^2$) を越えており、 $V=6\text{ m/s}$ 程度が限界の衝突速度となることがわかる。

(3) 鋼製セル緩衝材の変位量～衝突速度の関係

図-5に、けい砂中詰材と空の鋼製セルに対する漸増載荷実験におけるセルの変形の履歴を示す。空のセルでは、まず最初の $V=1\text{ m/s}$ で 45 mm まで重錘は変位し、めり込むが弾性的に跳ね返すために残留変位は 6 mm となる。2回目の $V=2\text{ m/s}$ では 105 mm まで一旦変化して 65 mm の残留変位となっている。3回目の $V=3\text{ m/s}$ で 225 mm (全直径の 56%) まで変化して、 177 mm (全直径の 44%) の残留変形となり、すなわちセルが破壊する。一方、中詰材を詰めると最大変位・残留変位とも相対的に小さくなり、7回目の $V=7\text{ m/s}$ において 170 mm の最大変位と 165 mm の残留変位となり、セルは破壊せず、本体トラスの弾性限界を超えてしまう。すなわち、中詰材を詰めることにより鋼製セルの変形に対する抵抗力が増していることがわかる。

(4) 最大重錘衝撃力～衝突速度関係

図-6は、最大重錘衝撃力と衝突速度関係を示している。これより、以下のことが考察できる。

- ① 中詰材の種類や上載荷重を変化させた場合について漸増載荷の衝撃力はあまり顕著な違いはなく、概ね速度の増加につれて非線形的に増加している。
- ② 鋼製セル緩衝材を用いずに直接砂防ダム本体に衝突させた場合(Im-I-Fr)には、 $V=2\text{ m/s}$ で 140 kN の衝突荷重を生じ、緩衝用の鋼製セルを設置した場合の約 14 倍の荷重となっている。
- ③ 鋼製セルの中詰材を詰めない場合(Im-I-0)には、衝突速度 $V=3\text{ m/s}$ で約 5 kN となるのに対し中詰材を詰めた場合には約 25 kN で約 $1/5$ の荷重となっている。すなわち、衝撃力の低減効果は大きいことがわかる。しかし、前述のように、 $V=3\text{ m/s}$ でセルの局部変形量が 17.7 cm と 40% を越えてしまうため、これ以上の速度には耐えられなくなる。
- ④ けい砂中詰材を用いた単一載荷の $V=6\text{ m/s}$ (Im-S-1)では、衝突荷重は約 45 kN となり、漸増載荷の約 100 kN に対して約半分の荷重となっている。これは、漸増載荷実験では、逐次鋼管セル緩衝材の局部変形の残留量が増加するとともに、内部の中詰材が締め固められるためである。

また、重錘の砂質材への衝突によって生ずる重錘衝撃力を求める方法として、落石対策便覧³⁾では、次式を用いるものとしている。

$$P_{w\text{PRE}} = 2.108 \lambda^{2/3} W^{1/3} H^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 $P_{w\text{PRE}}$ ：重錘衝撃力(予測値)(kN)、 λ ：ラーメの定数(kN/m²)、 W ：落石重量(kN)、 H ：落高(m)。

これは、重錘が高さ H から自由落下する場合の式であるので、その場合の落高と衝突速度の関係は、次式のようになる。

$$H = \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

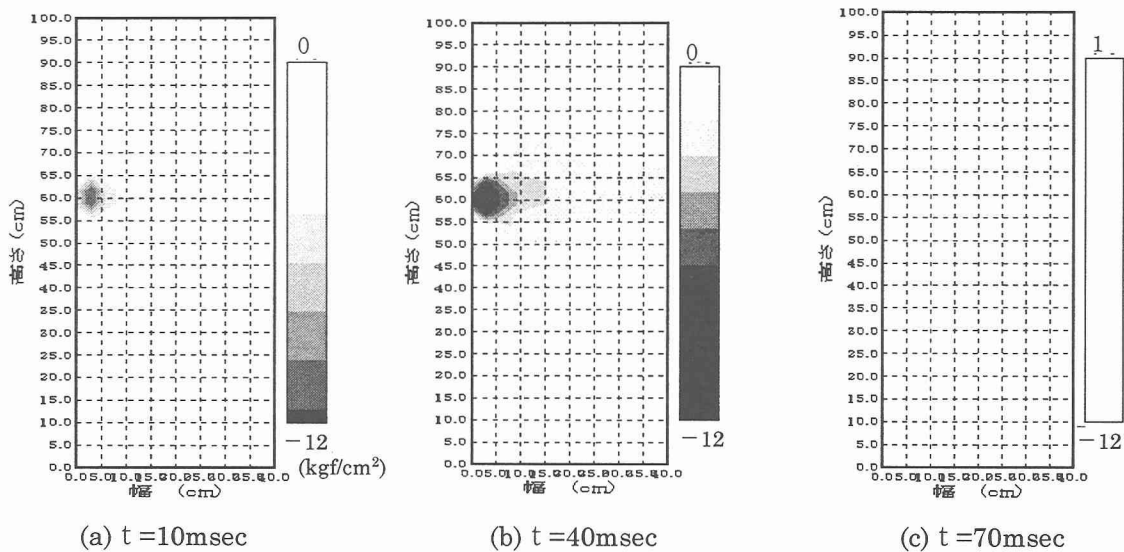


図-9 鋼製セル緩衝材内部の応力分布 (Im-S-1)

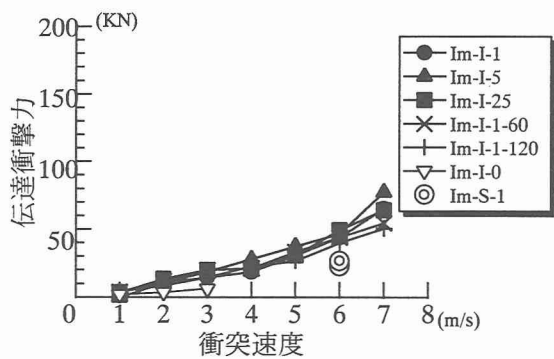


図-10 伝達衝撃力～衝突速度関係

よって衝突速度と重錘衝撃力の関係が次のように得られる。

$$P_{WPRE} = \frac{2.108}{(2g)^5} \lambda^2 W^2 v^6 \quad (3)$$

ここで、 g : 重錘加速度 (9.8m/s^2)、 v : 衝突速度 (m/s)。

そこで、図-7には、式(3)にラーメの定数を $\lambda = 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 \text{ kN/m}^2$ と仮定して代入して求めた予測値と実験値の比較を示す。これより事前衝突の履歴効果が少ない $V=1, 2, 3\text{m/s}$ の漸増载荷および履歴効果のない $V=6\text{m/s}$ の単一载荷については、 $\lambda = 1000\text{kN/m}^2$ の予測式が実験値よりもやや大きな安全側の重錘衝撃力を推定できることがわかる。また、漸増载荷全体に対しては、 $\lambda = 5000\text{kN/m}^2$ の予測式が安全側で適度な推定値を与えるものと認められる。ただし、この場合、履歴効果の小さい $V=1 \sim 3\text{m/s}$ では実験値の3～5倍の推定値となる。この λ の範囲は岸ら⁴⁾および吉田ら⁵⁾の研究の指摘と概ね一致している。

(5) 伝達衝撃力～衝突速度関係

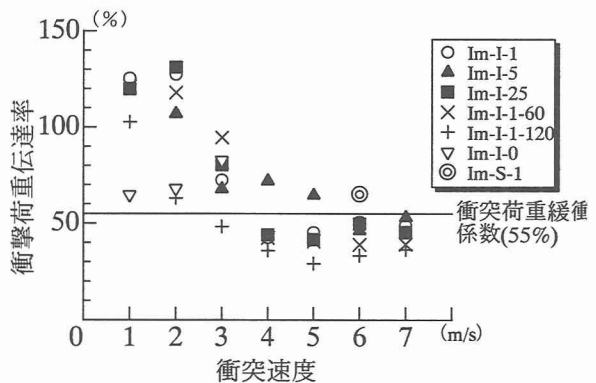


図-11 衝突荷重伝達率～衝突速度関係

ここで、鋼製セル緩衝材を用いた場合の衝撃力の伝達機構を模式化すると、図-8のようになると考えられる。参考までに、FEMによってセル内部の応力分布のシミュレーションを行うと、図-9(a)～(c)のようになる。衝突開始から10msec後では衝突局部に集中して発生した応力は後方に伝達され、40msec後になるとほぼ真後ろに伸びた水平の力の伝達経路が形成されている。その後、70msec後における荷重と鋼製セル緩衝材が完全に離れた状態になると、セル内部の応力がすべて開放されていることがわかる。すなわち、衝突点で生じた集中荷重としての重錘衝撃力 P_W は、中詰材内部で拡散しながら、分布した伝達力となって本体構造に作用する。これを図-8のように等価な集中荷重 P_T として取り扱えるものと考えた場合、本実験では、本体部の接合点と同じ位置に衝撃荷重を与えているため、概してトラス構造解析が適用できるものと考えられる。この伝達衝撃力 P_T と斜材に生ずる軸力 N との関係は次式によって与えられる。

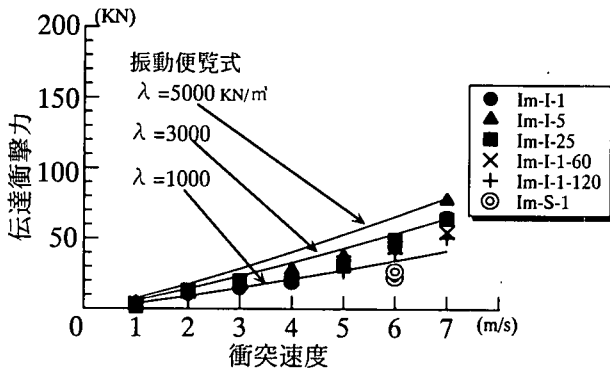


図-12 実験結果と予測値の比較

$$P_T = N \cdot \sin \theta \quad (4)$$

また、軸力 N は次式によって与えられる。

$$N = EA\bar{\epsilon} \quad (5)$$

ただし、 E : ヤング係数、 A : 2つの斜材の断面積、 $\bar{\epsilon}$: 2つの斜材に生じた平均軸ひずみ。

このモデルは極めて粗い仮定に基づいており、実際、図-3(a)のように $V=4\text{ m/s}$ 以下では垂直材の方が斜材よりもひずみが大きくなるのは伝達力が広く分布していてその影響を受けたためと考えられるが、図-3(b)のように限界衝突速度付近の $V=6\sim 7\text{ m/s}$ では、斜材のひずみが卓越しており、この事からもトラスの仮定が成り立つと考えられる。また、左右2部材のひずみは垂直材・斜材ともに対称的であることから信頼性あるデータ分析として活用できる。そこで、式(4)で求められる伝達衝撃力 P_T と衝突速度との関係を求めると図-10のようになる。そこで図-6で示した最大重錘衝撃力との比を衝突荷重伝達率 β と定義する。

$$\beta = \frac{P_T}{P_w} \quad (6)$$

この荷重伝達率と衝突速度の関係を整理すると図-11のようになる。これによると衝突速度が小さい ($V=1\sim 2\text{ m/s}$) 場合には、伝達率が100%を越えている。これは、中詰材が履歴衝突を受けていない処女載荷で、かつ、ひずみが小さい場合には弾性波伝播が卓越するためではないかと考えられる。しかし、速度が大きい ($V=4\text{ m/s}$ 以上) 場合には、 β は、1.0より小さくなり緩衝効果が確認できる。そこで、本体部の安全性照査に重要な $V=4\text{ m/s}$ 以上における伝達率を55%と仮定すると、伝達衝撃力を求める式を次のように表せる。

$$P_T = \beta \cdot P_w \quad (7)$$

ここで、衝突荷重緩衝係数 $\beta (=0.55)$ 。

式(7)の P_w に式(3)の推定式を代入すると、 P_T の推定値が得られる。そこで P_T の推定値を図-12に実験式と比較して示す。振動便覧の式に $\lambda = 1000\text{ kN/m}^2$ を用いた場合には、 $V=1\sim 2\text{ m/s}$ の衝突速度に対しては、適切な推定値となるが、 $V=4\text{ m/s}$ 以上の衝突速度に対しては、過小評価を示している。破壊限界に近づくと、 $V=5\text{ m/s}$ 、 6 m/s における安全側の推定をするには、 $\lambda = 5000\text{ kN/m}^2$ 以上を使用することが適当であることがわかる。

4. 結論

本研究の成果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 砂防トラス本体のひずみや衝撃荷重の観点からは、中詰材の粒径の影響はあまり大きくない。
- (2) 鋼製セル緩衝材を付けることによりトラス本体のひずみが緩衝材のない場合の概ね1/4程度に低減させることができ、明瞭な緩衝効果が認められた。
- (3) 鋼製セル緩衝材を設置せずに、直接重錘を衝突させた場合の重錘衝撃力は、緩衝材がある場合の約14倍となる。
- (4) 緩衝材を通して本体のトラス構造への伝達衝撃力は、重錘衝撃力の約55%に低減される。

参考文献

- 1) 星川辰雄, 石川信隆, 彦坂熙, 水山高久, 阿部宗平: 鋼製透過型砂防構造物の弾塑性衝撃応答解析と耐衝撃設計法, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.159-173, 1996.10.
- 2) 伊藤一雄, 香月智, 石川信隆, 阿部宗平: 締め固め効果を考慮した礫中詰材のせん断抵抗力推定法と砂防ダム設計への応用, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.187-201, 1997.7.
- 3) 日本道路協会: 落石対策便覧, 1983年7月
- 4) 岸徳光, 中野修, 松岡健一, 西弘明: 野外実験による敷砂の緩衝性能, 構造工学論文集, Vol.39A, pp. 1587-1597, 1993年3月
- 5) 吉田博, 榎谷浩, 鈴木哲次: 敷砂上の落石の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, No.352/III-2, pp. 61-70, 1984.12