

砂防ダム用鋼製セル緩衝材の緩衝効果に関する実験的研究

Experimental Study on Shock Absorbing Effect of Steel Cell Filled with Sand for Check Dam Structure

政枝憲太郎^{*}, 香月智^{**}, 石川信隆^{***}, 竹内大輔^{****}

Kentarou MASAEDA, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA and 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)
^{****} 住友金属工業株式会社 建設・エネルギー事業部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)

This paper presents an experimental study on the shock absorbing effect of the steel cell filled with sand utilizing for the open type steel check dam structures. The impact responses of the steel cell models which have various size of filled with sand and/or gravel are investigated by using the horizontal weight collision test apparatus. The repeated impact loads with incremental collision velocities are applied to the sand filled steel cell assembled with truss steel frame. The impact load and the dent deformation were observed in relation to the various filled material conditions. The axial force occurred in the diagonal member of the truss structure which supports the steel cell was also observed as the representative transmitted force of the steel cell. The impact force at the collision point was remarkably reduced by installing the shock absorbing cell. Therefore, the axial force of the truss structure which supports the shock absorbing cell became significantly smaller than the force at the collision point.

Keywords: shock absorbing, sand filled steel cell, check dam structure, impact load, collision test

1. 緒言

降雨土砂災害から市民を守るための努力はたゆむことなく続けられているが、残念ながらその努力にも拘わらず毎年のように土砂災害が起こっている。例えば、平成11年6月29日～7月1日にかけて九州北部～中国地方にかけて襲った集中豪雨では、各地に土砂崩れや土石流を発生させ、不幸にも32名もの命が奪われることとなった¹⁾。また、家屋や土木構造物の被害も甚大であった。現在、全国で土石流危険渓流と指定されているのは、79,318渓流であり、このうち砂防ダムなどの整備が進んでいるのは約2割である²⁾。このような災害を抑止するために、近年では土石流対策機能を強化した砂防ダムが多く建設されるようになってきた。その1つに写真-1に示すような鋼管を用い、格子またはスリット型構造をつくることにより土石流中の巨礫をスクリーニングして土石流を受け止める、いわゆるオープン型鋼製砂防ダムがある。この構造では、前面の鋼管は巨礫衝突によって生ずる局所的な変形応答に耐えたうえで、その後の土石流後続流の流体荷重にも耐える構造であるため、一部材で2つの機能を満足する必要がある。このため、星川

ら^{3),4),5)}は、巨礫衝突によって生ずる鋼管の局部変形量を妥当に評価したうえで、その部材の曲げ耐力低下を見込んだ立体骨組構造解析による土石流に対する耐衝撃安全性評価法を提案している。このように部材に直接巨礫が衝突する場合には、複雑な安全性照査の過程を踏む必要がある。また、2つの

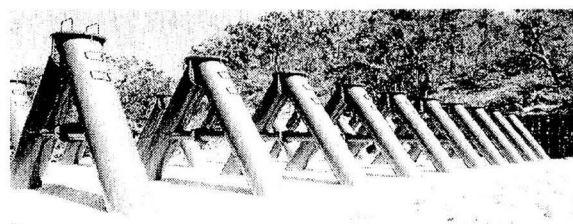


写真-1 鋼製スリットダム

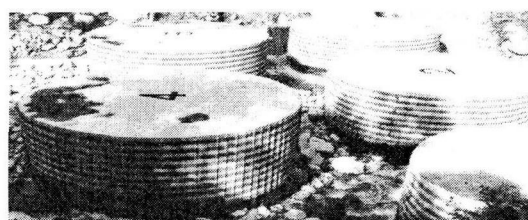


写真-2 鋼製セル型砂防ダム

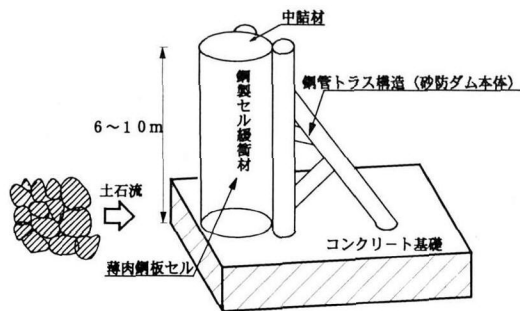
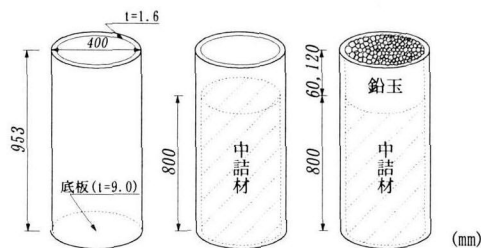


図-1 鋼製セル緩衝材付砂防ダム



(a) 中詰材無し (b) 中詰材有り (c) 中詰材+上載荷重

図-2 鋼製セル緩衝材供試体

機能を同時に満足するための十分な鋼材量も必要となる。一方、写真-2に示す鋼製セル型砂防ダムは、鋼製セル内に現地で採取される土砂を鋼製のセル構造に詰めて作られる砂防ダムであり、天竜川流域と田切川に設置された本ダムは、幾度かの土石流の襲来を受けたが極めて有効に巨礫をスクリーニングしている⁶⁾。特に平成6年8月5日の土石流では最大径が6mに及ぶ巨石の衝突も受けているが、30cm程度の局部めりこみ変形が生じる程度で、有効に巨礫を捕捉したことが報告されている⁷⁾。しかし、この構造は、ダム堤体の自重によって抵抗するいわゆる重力式ダムであるので、巨礫衝突に対する抵抗力に加えて流体荷重等の組み合わせに対して、堤体の大きさを抵抗力を確保する必要があるため、かなり大きな堤体構造となる。堤体の安定性については、滑動、転倒および沈下について検討するとともに、堤体のせん断変形に関する抵抗力も評価される。このせん断抵抗力については、北島⁸⁾の研究やこれを根入れセルに応用した古川、飯田⁹⁾らの研究がある。さらに、伊藤は鋼製セルダム中詰め材の締め固め効果を考慮したせん断抵抗力の推定法¹⁰⁾を明らかにするとともに、重錘衝撃実験と個別要素法を用いてシミュレートする方法¹¹⁾についても検討している。しかし、鋼製セルを緩衝材として用いるための評価法についての研究や設計法は未だ見当たらない。

本研究で対象とするのは、これらのスリット型ダムとセル型ダムのそれぞれの利点を生かして組み合わせ構造形式とする新しい砂防ダムである。これは、図-1に示すように土石流の巨礫衝突を直接受ける砂防ダム前面に、薄肉の鋼板セル内に土砂を中詰めた鋼製セル緩衝材を設置し、その後方でこれを

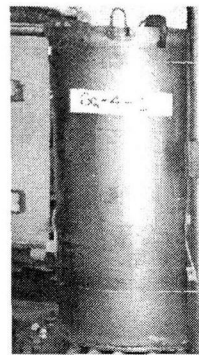
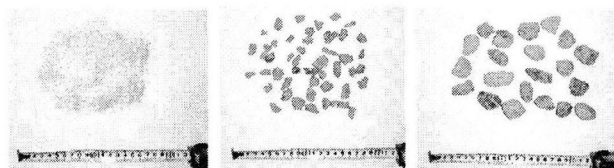


写真-3 鋼製セル供試体



(a) けい砂5号 (b) 砕石5号 (c) 川砂利4号

写真-4 中詰材

表-1 中詰材の諸元

種 類	けい砂5号	砕 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

支える鋼製トラス構造の砂防ダム本体を作ろうとするものである。この構造では、巨礫の衝突時に鋼製セルの緩衝効果によって衝撃荷重を低減でき、その低減された荷重を砂防ダム本体に作用させることが期待できる。さらに、本体の部材は巨礫衝突を避けることが出来るため、巨礫衝突による部材の局部変形を無視でき、本体構造部材のスリム化が可能である。この新しい砂防ダムは、未だ開発段階にあるため、このような期待性能を発揮できるか、また緩衝効果などの詳細なメカニズムについては、全く未解明な状態にある。そこで本研究は、この構造のミニチュアモデルに対する水平衝撃実験を行い、鋼製セル緩衝材の効果について基礎的に検討したものである。

2 実験の概要

2.1 供試体

実験用の鋼板セルは、写真-3および図-2(a)に示すように高さ95cm、直径40cm、肉厚0.16cm($d/t=250$)の薄肉の鋼板セルであり、材質はSS400材である。これに、図-2(b)に示すように中詰材を高さ80cmまで詰めた。中詰材は、写真-4および表-1に示すけい砂5号、砕石5号、川砂利4号である。粒径範囲は、表-1に示すようにふるいを通した単粒径のものであり、呼称としてそれぞれ1mm、5mm、25mmとする。詰め方は、基本的に流し込みの手均しによる緩詰めとした。これは、現場での締め固め作業が十分に出来ない場合を想定している。なお、1回目に詰め込んだ総重量をもとに、2回目以降は同一総重量と

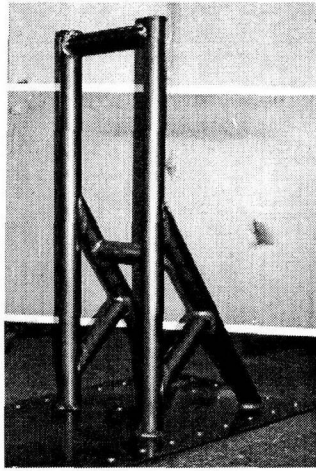


写真-5 本体部供試体

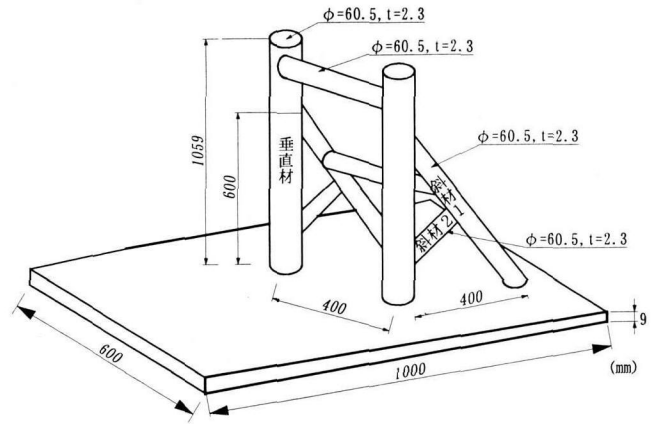


図-3 本体部供試体(模型図)

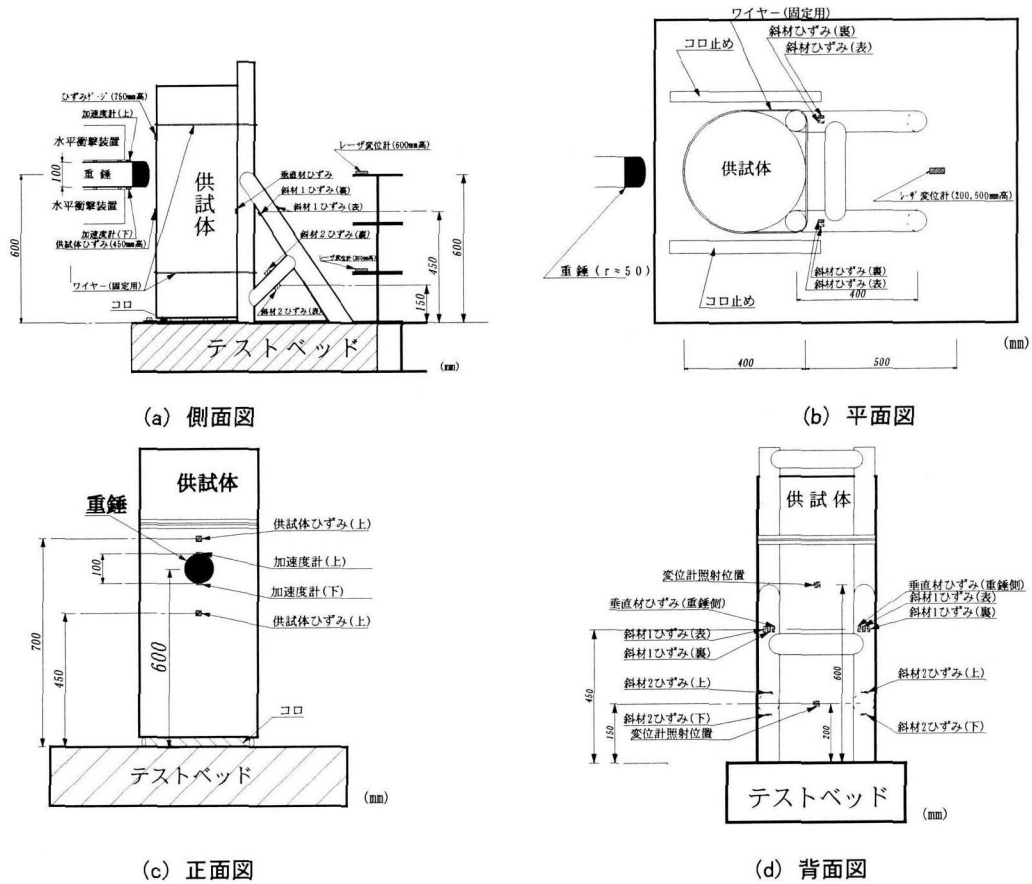


図-4 供試体セット要領および計測項目

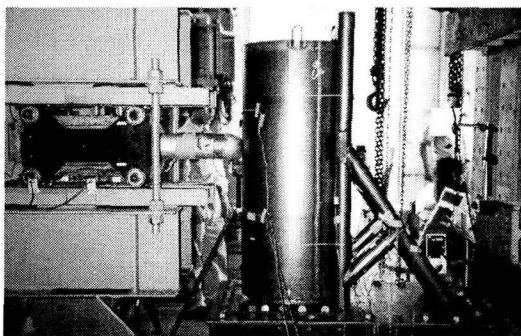


写真-6 水平衝撃実験(側面)

なるように締め固めを管理し、その際得られた単位体積重量は、表-1に示すように約0.015N/cm³である。また、衝突位置が中詰材上面からの深さ方向に変化することの影響を調べるために、衝突位置を変えずに、中詰材上面に鉛玉を上載し、その拘束圧を加えた場合についても検討した。この際の鉛玉の上載厚さは、6cm(総重量600N)と12cm(同1200N)であるが、けい砂に換算するとそれぞれ30cm、60cmのけい砂を上載したことに相当するものである。

本体部の供試体は、写真-5および図-3に示すようにφ=60.5、

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				砕石	5			2
Im-I-25				川砂利	2.5			2
Im-I-0				空	—		1,2,3	1
Im-I-1-60				けい砂+上載鉛(60kg)	1		1,2,3,4,5,6,7	1
Im-I-1-120				けい砂+上載鉛(120kg)	1			1
Im-I-Fr			無	—	—		1,2	1
Im-S-1	静的載荷荷重	—	有	けい砂	1	単一載荷	6	2
St-1			有	けい砂	1			1
St-1-120				けい砂+上載鉛(120kg)	1			1
St-Fr			無	—	—			1

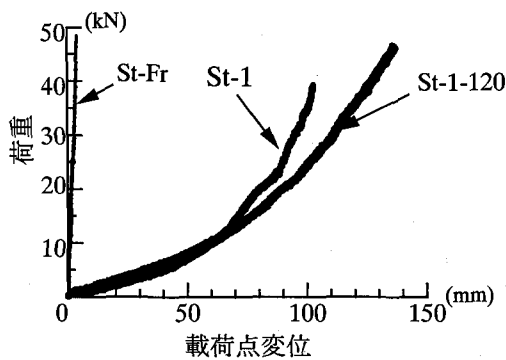


図-5 荷重～載荷点変位関係

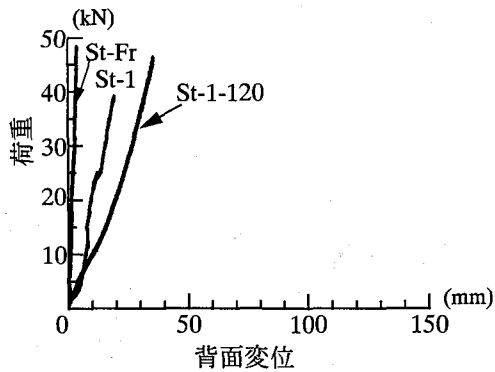


図-6 荷重～背面変位関係

t=2.3mmの鋼管(STK400)を用いて溶接接合されたトラス構造であり、底面は、600×1000×9mmの鋼板に溶接し固定されている。これらの2つの供試体を図-4および写真-6に示すように、水平衝突載荷装置に組み合わせてセットした。まず、鋼製セル供試体は、本体部前面に据え付けられ垂直材と直接接触するように高さ15cmと80cmの位置でワイヤーによって締め付け固定した。なお、底面からの摩擦抵抗は受けないように、コロを敷き詰めその上に載せている。また、内部の中詰材が衝突時に飛散することを防止するため、中詰材上面には厚さ4.5mmの鋼板(重さ19N)を軽く載せて蓋をしている。実験は、図-4および写真-6に示すように緩衝材用鋼板セルの高さ60cmの中心線上に、重量1500Nの鋼製の重錘をガイドレールに沿って自由走行させて衝突させるものである。重錘の先端は、直径10cmの円柱を半径5cmで球面加工したものである。衝突速度は、同一供試体に対して、何度も衝突させる漸増載荷と一度だけ衝突させる単一載荷を行った。漸増載荷は、1m/sから始めて1m/sずつ速度を増加させて7m/sまで行った。なお、この間トラス構造本体のひずみが、弾性限界を超えた場合や鋼製セルの残留直径が初期形状の60%よりも小さくなった場合には試験を中止する。単一載荷は、漸増載荷によってほぼ本体部の弾性応答限界衝突速度とされる6m/sに設定して行った。緩衝供試体の種類としては図-2で示した3種

類の中詰材を変えた6種類であるが、緩衝セルが存在しないで直接本体に衝撃荷重が作用した場合に相当するものとして、本体部の垂直材に高さ60cmの位置に100×100×6×8mmのH型鋼を水平に渡し、その中央部に直接衝突させる場合についても実験をした。また、比較のためにけい砂中詰材、けい砂中詰材に上載荷重を加えた場合、鋼製セルのない場合について静的実験も行った。静的実験では、重錘衝突位置に油圧ジャッキによる静的荷重を作用させた。すなわち、表-2に示す11ケース(15回)について実験を行った。

3 実験結果と考察

3.1 静的載荷実験

図-5に静的載荷実験の荷重～載荷点変位関係を示す。緩衝用鋼製セルを置かずに本体をH型鋼はりを通して直接載荷した場合(St-Fr)には、弾性的に大きな剛性の線形関係を示すのに対して、鋼製セルを置いた場合(St-1, St-1-120)には、セルのへこみ変形が生じるので、下に凸な放物線状の非線形な荷重～変位関係が得られている。また当然のことながらその剛性は本体直接載荷よりも小さい。鋼製セルのけい砂のみの場合(St-1)とこれに1200Nの上載荷重を加えた場合(St-1-120)では、上載荷重を加えた場合の方が若干剛性が小さくなっている。図-6には、同じ実験の荷重～セル背面変位の関係を示

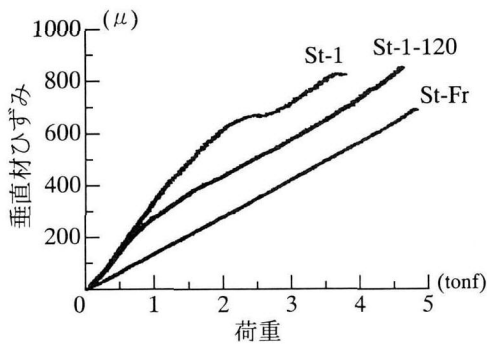


図-7 垂直材ひずみ～荷重関係

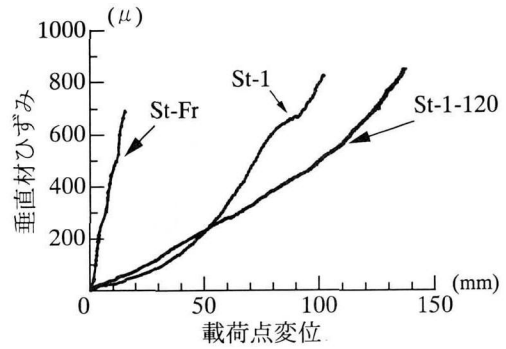


図-8 垂直材ひずみ～載荷点変位関係

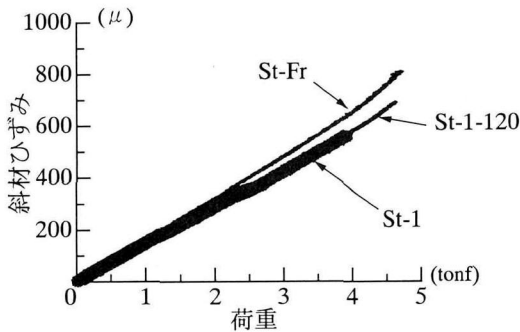


図-9 斜材ひずみ～荷重関係

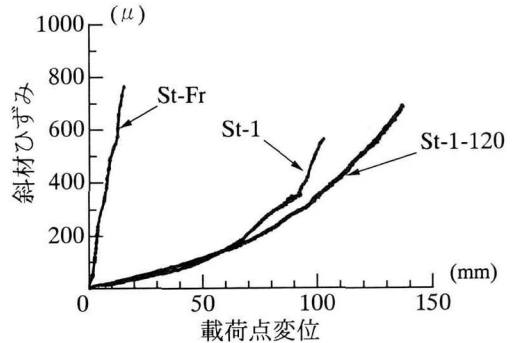
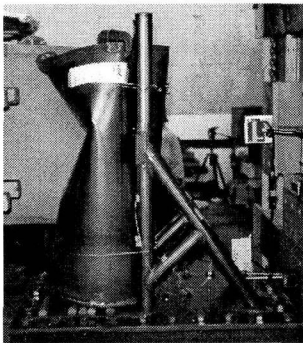
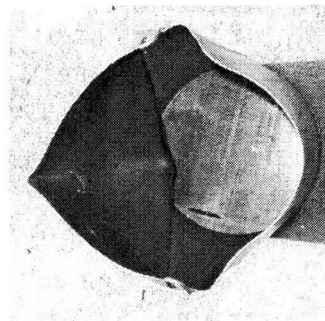


図-10 斜材ひずみ～載荷点変位関係



(a) 側面方向



(b) 断面方向

写真-7 セル緩衝材の衝突後の変形状況(1m-I-1, 1.7m/s)

している。この場合には、図-5の同一荷重に比べて、変位が小さくなっているため剛性が大きいように見えるが、これは前面を押すとセルの凹み変形が生ずるため、背面変位は小さくなるためである。背面変位で比較すると上載荷重1200Nの方が上載荷重のない場合に比べて明瞭に剛性が小さくなっている。これは、上載荷重を加えた場合の方がセルが滑らかな楕円形状を保つため、見かけ上やや後側に飛び出すような変形となるためである。

図-7および図-8には、それぞれ垂直材ひずみ～荷重および載荷点変位関係を示す。図-7の垂直材ひずみ～荷重関係では、セルを介する場合は、本体直接載荷よりも上側にひずみが現れている。これは、セルを通して本体に作用する荷重が垂直方向に分布するため、垂直材に発生する曲げモーメントの影響が現れているものと思われる。図-8の関係は、図-5の

関係と相似的であり、けい砂のみのセルの方が上載荷重を加えた場合に比べて垂直材の曲げモーメントの負担が大きくなっていることが推定される。

図-9および図-10には、それぞれ斜材ひずみ～荷重および載荷点変位関係を示す。まず図-9の斜材ひずみと荷重関係はセルの有無に関わらず、ほぼ同一直線上にそろっており、斜材への荷重の伝達率は同じであることがわかる。すなわち、斜材の方が垂直材よりもトラスとして忠実な応答を示している。図-10の関係は図-5、図-8の関係と相似的であり、セルの変形によってトラス本体のひずみ負担が軽減される効果が明瞭に認められる。

3. 2 衝突実験の破壊状況

写真-7にけい砂中詰材を詰めた鋼製セル緩衝材を用いた場合の漸増載荷衝突実験の7m/s載荷後の破壊状況を示す。

これより、衝突による鋼製セル緩衝材は、衝突面で局所的に凹み変形を生ずるとともに、本来、円形断面であったものが、複雑な凹凸のある形状へと変形しているのがわかる。また、砂防ダム全体としては、緩衝材の変形によって衝突エネルギーが吸収されるため、トラス本体には、判別可能な変形は生じていないことがわかる。

3. 3 衝突実験の各データの時刻歴応答

図-11にけい砂中詰材に対する漸増載荷衝突実験(1m-I-1)での衝突速度1m/sにおける荷重(重錘衝撃力)および重錘変

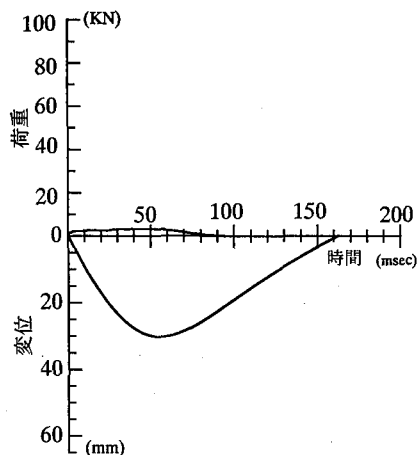


図-11 1m-I-1.1m/sにおける時刻歴応答

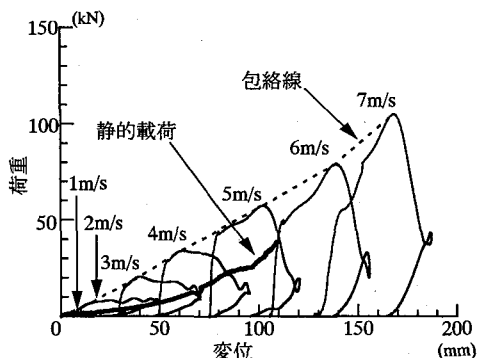


図-13 漸増載荷の荷重～変位関係 (1m-I-1)

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50msで最大値の約3kNに達し60msくらいまで持続した後、100msで0となる。すなわち、100ms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、50msでピーク値の約30mm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100msであるのに対し、重錘が初期接触開始変位0mmに戻る時刻が160msと遅れるのはセルに残留変位が残るためである。

図-12には、1m/sから始まって逐次に衝突速度を増やした7m/sで衝突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100kNまで達するが、その作用時間は30msとV=1m/sの場合よりも小さくなる。また変位応答も最大変位が60msと大きくなるのに対し、変位が0に戻るまでの時間は50msと小さくなっている。

図-13には、漸増載荷実験の荷重～変位関係を示す。衝突後には残留変位が残るため、重複部分を有する弾塑性応答のヒステリシス曲線を描いているが、その最大値部分の包絡線を描くと、静的実験の耐力を約2倍にした放物線形状となっている。これは文献(11)でも述べられているように、砂質材のひずみ速度効果による抵抗力増加率とほぼ一致している。図-14には、衝突速度V=1m/sにおける垂直材と斜材のひずみ応答

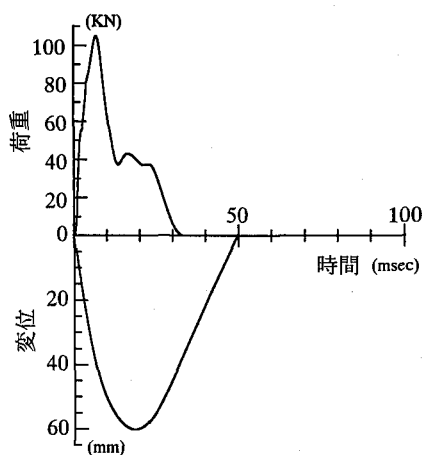


図-12 1m-I-1.7m/sにおける時刻歴応答

を示す。この場合には垂直材の最大ひずみが80 μ であり、斜材の方は50 μ と斜材ひずみの方が小さい。しかし、図-15のV=7m/sになると垂直材の最大ひずみは600 μ であるのに対し、斜材のひずみは950 μ と斜材の方が大きくなっている。このように、全てのケースで衝突速度が速くなると斜材のひずみの方が大きくなる傾向が見られた。

3. 4 最大重錘衝撃力～衝突速度関係

図-11および図-12に示したように衝突実験で得られる重錘衝撃力の時刻歴応答に最大値が得られる。図-16はこの最大重錘衝撃力と衝突速度関係を示す。これより、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。緩衝用鋼管セルを用いずに直接砂防ダム本体に衝突させた場合(1m-I-Fr)には、衝突速度V=2m/sで140kNの衝突荷重を生じ、これは、緩衝用の鋼管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(1m-I-0)には、衝突速度V=3m/sで約5kNとなるのに対し中詰材を詰めた場合には約25kN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、後述するように、V=3m/sでセルの局部変形量が17.7cm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い。④けい砂中詰材を用いた単一載荷のV=6m/s(1m-S-1)では、衝突荷重は約45kNとなり、漸増載荷の場合の約100kN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。

図-17には、けい砂を用いた漸増載荷実験の中詰材上面の高さの変化を示すが、V=3m/sまでは明らかに載荷ごとに中詰材の上面が低下し、中詰材が締め固められていることがわかる。その後、上面が再度上昇するが、これは、写真-7に見られる局部めりこみによるセルの内容量が減少するためであり、中詰材自体は締め固まっているものと考えられる。

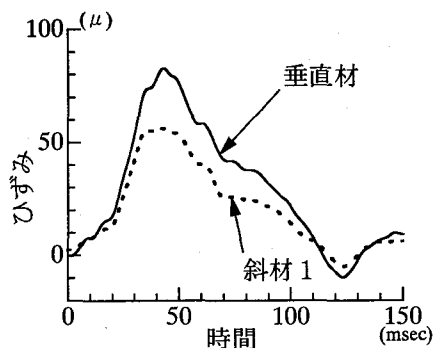


図-14 ひずみの時刻歴応答(Im-I-1, V=1m/s)

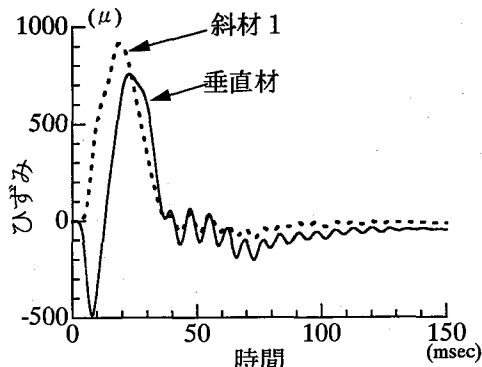


図-15 ひずみの時刻歴応答(Im-I-1, V=7m/s)

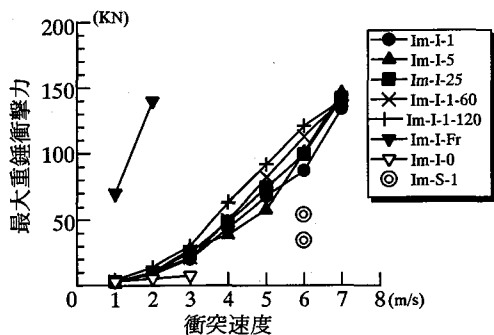


図-16 最大重錘衝撃力～衝突速度関係

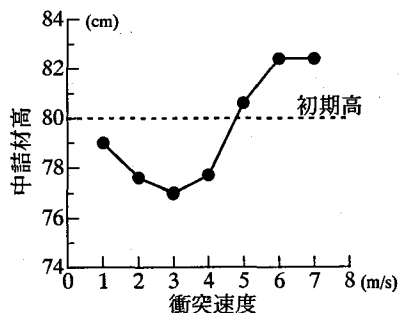


図-17 中詰材上面の高さ変化(Im-I-1)

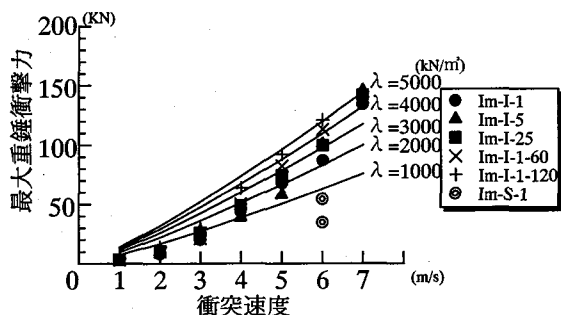


図-18 最大重錘衝撃力～速度関係の予測値

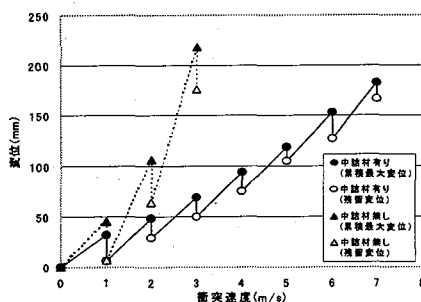


図-19 漸増載荷による変位量の履歴

さて、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¹²⁾では、次式を用いるものとしている。

$$Pw = 2.108\lambda^{2/5}W^{2/5}H^{3/5} \quad (1)$$

ここで、 Pw ：重錘衝撃力(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との関係は次のようになる。

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

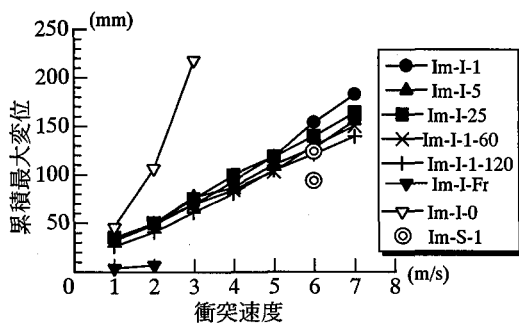
これを代入すると衝突速度と重錘衝撃力の関係が次のように得られる。

$$Pw = \frac{2.108}{(2g)^{3/5}} \lambda^{2/5} W^{2/5} V^{3/5} \quad (3)$$

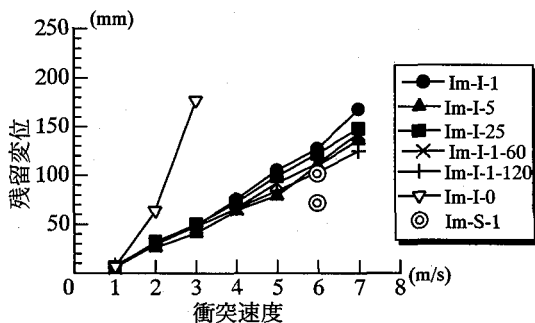
ここで、 g ：重錘加速度(9.8m/s²)， V ：衝突速度(m/s)。

そこで、式(3)にラーメの定数 $\lambda=1000, 2000, 3000, 4000, 5000$ kN/m²を代入して求めた予測値と実験値を比較すると図-18のようになり、事前衝突の履歴効果が少ない $V=1, 2, 3$ m/sの漸

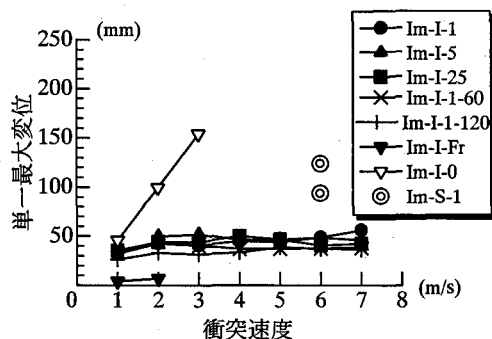
増載荷と履歴効果のない $V=6$ m/sの単一載荷に対しては、 $\lambda=1000$ kN/m²で、実験値よりもやや大きな安全側の重錘衝撃力を推定できることがわかる。また、漸増載荷全体に対しては、 $\lambda=5000$ kN/m²の予測値が安全側で適度な推定値を与えるものと認められる。ただし、この場合、履歴効果の小さい $V=1 \sim 3$ m/sでは実験値の3～5倍の推定値となる。参考までに、吉田ら¹³⁾は、野外実験で得られた重錘衝撃力についてそれまでの既往研究^{14), 15)}と比較したうえで、新しい予測式を提案しているものの、砂質土の実験値を式(1)で予測する場合には、 $\lambda=1000$ kN/m²が安全側に適切な予測値を与えることを示している。また岸ら¹⁶⁾は、敷砂の厚さを変えた野外実験を行い、その際得られた最大衝撃力は、敷砂厚が90～120 cmでは $\lambda=1000$ kN/m²で良いが、敷砂厚が60 cmと薄い場合には、 $\lambda=2000$ kN/m²より大きくして推定する必要があることを示している。このようにラーメの定数 λ についてはロックシェッドの研究分野でも検討中の課題であるが、本研究での値は、これらの既往研究の範囲と一致している^{13), 16)}。



(a) 累積最大変位～衝突速度関係



(b) 残留変位～衝突速度関係



(c) 単一最大変位～衝突速度関係

図-20 変位量と衝突速度関係

3.5 鋼製セル緩衝材の変位量～衝突速度の関係

図-19に、けい砂中詰材と中詰材を用いない鋼製セルのみの場合の漸増载荷実験における衝突速度増加に伴うセルの変形の履歴を示す。中詰材を用いない場合には、まず最初の $V=1\text{m/s}$ で45mmまで重錘は変位し、めり込むが弾性的にはね返すために残留変位は6mmとなる。2回目の 2m/s では105mmまで一旦変化して65mmの残留変位となっている。3回目の 3m/s で225mm(全直径の56%)まで変化して、175mm(全直径の43%)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170mmの最大変位と165mmの残留変位となり、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。このように衝突速度の増加に応じて全変位(最大変位)、残留変位およびその1回だけの最大変位量の関係が現れる。

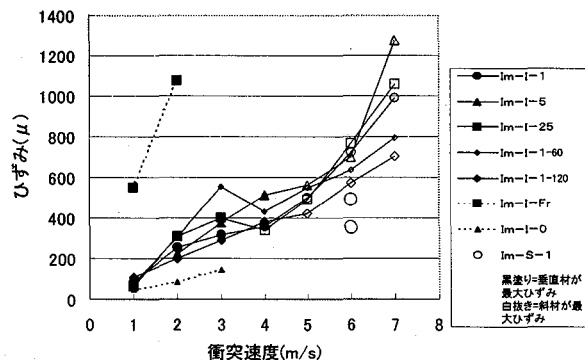


図-21 本体部の最大ひずみ～衝突速度関係

そこで、累積最大変位、残留変位および単一最大変位と衝突速度との関係を図-20(a), (b), (c)に示す。図-20(a)より累積最大変位は衝突速度とほぼ比例して増加していることがわかる。中詰材種類の影響はあまり明瞭でないながらも、小粒径よりも大粒径の方が変位量が小さく、また同じ粒径のけい砂では上載荷重が大きい方が変位は小さくなるようである。また、図中の単一载荷との比較では、単一载荷の方が同じ 6m/s であっても若干最大変位が小さい。図-20(b)の残留変位も衝突速度と比例的に増加していることをはじめ、全体的な傾向は累積最大変位～衝突速度の関係と非常によく似ている。図-20(c)には、载荷前の残留変位を無視したその1回だけの最大変位と衝突速度との関係を示す。この場合、中詰材を詰めた場合には衝突速度 2m/s 以上における単一最大変位は概ね $30\sim 50\text{mm}$ でほぼ一定となっている。これらの3つのグラフを比較すると、累積最大変位に占める残留変位(塑性変形)の割合が大きいことがわかる。すなわち、中詰材を詰めたセル緩衝材砂防ダムでは中詰材と鋼板セルの塑性変形吸収エネルギーによる緩衝効果が卓越していることがわかる。

3.6 本体ひずみ～衝突速度関係

図-21に本体に生じたひずみの最大値と衝突速度の関係を示す。図-14および図-15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-21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、総じて衝突速度が $4\sim 5\text{m/s}$ でこれらが入れ替わり、衝突速度が 6m/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、衝突速度 3m/s で空の場合は 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、前述の図-19で示したように空のセルでは、 3m/s で残留直径が初期直径の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

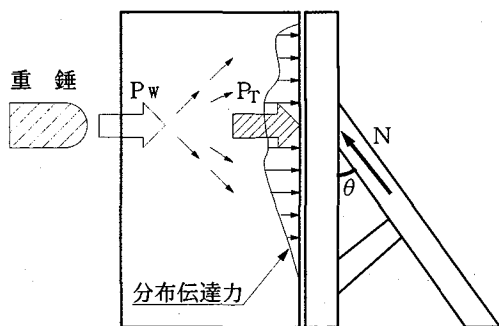


図-22 衝撃力の伝達機構

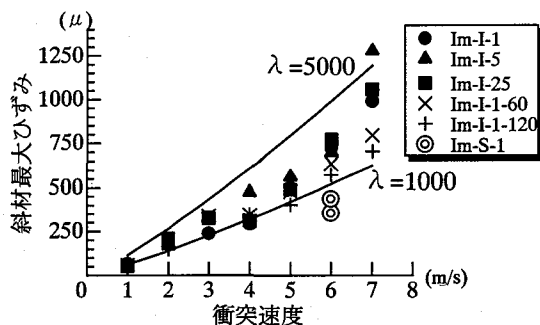


図-24 斜材ひずみと推定値の比較

は、 $V=2\text{m/s}$ で 1100μ と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、 $200\sim400\mu$ と概ね $1/3$ 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、 $V=6\text{m/s}$ における漸増載荷と単一載荷を比べると単一載荷のひずみの方が小さくなっており、漸増載荷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 6m/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上載荷重が大きくなると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 1000μ ($\sigma=21\text{kN/cm}^2$)を越えており、 6m/s 程度が限界の衝突速度となることがわかる。

3.7 伝達衝撃力～衝突速度関係

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-22のようになると考えられる。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伝達されて、分布した伝達力となって本体構造に作用する。これを等価な集中荷重 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。

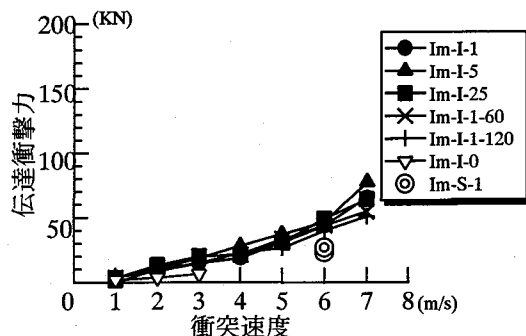


図-23 伝達衝撃力～衝突速度関係

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

ここで、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-18において $V=4\text{m/s}$ 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、限界衝突速度の $V=6\sim7\text{m/s}$ では、斜材のひずみが卓越しており、トラスの仮定が成り立つものと考えられる。ちなみに、左右2部材のひずみは対称的であった。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-23のようになる。これを図-16で示した重錘衝撃力と概観して比較すると、概ね45%ほど荷重が低下していることがわかる。そこで、これを衝突荷重緩衝係数 β ($=0.55$)と名付けようとして、伝達衝撃力を求める式(5)が得られる。

$$P_T = \beta P_w \quad (6)$$

これを式(4)に代入して、斜材軸力を求めると

$$N = \frac{\beta}{\sin \theta} P_w \quad (7)$$

よって、重錘衝撃力を使って、本体の最弱ひずみを求める式は、次のようになる。

$$\bar{\epsilon} = \alpha \frac{N}{AE} = \alpha \frac{\beta}{AE \sin \theta} P_w \quad (8)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}$:斜材の推定最大ひずみ、 α =曲げモーメント効果による補正係数(ここでは、全実験データの平均を 1.47 とした)。

この式(8)の重錘衝撃力 P_w を式(3)の $\lambda=1000, 5000\text{kN/m}^2$ を用いて、斜材の最大ひずみを求めると、図-24のようになる。

図より、式(8)による推定値は、中詰材の衝突履歴による締め固め効果がない単一載荷の $V=1\text{m/s}$ と $V=6\text{m/s}$ に対して、 $\lambda=1000\text{kN/m}^2$ によって推定できることがわかる。また、履歴効果が現れる漸増載荷のデータに対して、 $\lambda=5000\text{kN/m}^2$ が、若干過大な推定値を与えるが、全般的な傾向をよく推定していることがわかる。

4 結 言

本研究は、現地発生土砂を中詰材として利用する緩衝鋼製セルを有する砂防ダムの鋼製セルの緩衝効果について、水平衝撃モデル実験により検討したものである。本研究の成果を要約すると以下のようになる。

- (1) 中詰材を有する鋼製セルの静的耐力は、変形の増加に伴って剛性が増加する非線形関係を示す。
- (2) 静的実験では、トラス本体の斜材ひずみはセルに作用する荷重と線形関係を示すが、垂直材ではセルの中詰材内部で、荷重が分布して広がった力が伝達されるため、垂直材に曲げモーメントの影響が現れ、非線形性が生ずる。
- (3) 漸増载荷による衝突荷重～変位関係の包絡線は、静的な荷重～変位関係と同様な下に凸な放物線状の非線形関係となるが、その大きさは、静的な耐力の約2倍と大きくなる。これは、中詰材のひずみ速度効果による抵抗力の増加によるものと考えられる。
- (4) 衝撃力～衝突速度の関係に対して、中詰材の種類による顕著な差異は認められなかった。
- (5) 重錘衝撃力と衝突速度の関係は、落石対策便覧の落石衝撃力推定式を修正して推定することができる。なお、その際衝突前歴がない場合には $\lambda=1000\text{kN/m}^2$ を用い、漸増载荷のように履歴効果がある場合には $\lambda=5000\text{kN/m}^2$ を用いると安全側に推定できる。
- (6) 漸増载荷実験の最大変位に占める残留変形の割合は非常に大きく、緩衝鋼管セルの塑性変形が吸収エネルギーに大きな影響を及ぼしている。
- (7) 緩衝鋼製セルを介して本体トラス構造に伝達される伝達衝撃力は、セル前面の重錘衝撃力の約55%程度に低減される。

以上の考察は、限られた実験条件のデータに基づくものであり、実験条件をより広範囲に拡張した検討や解析的な検討が必要である。また実験のスケールが実物に比して小さいので、サイズを変えた大型の実験も今後の課題として検討する必要がある。

謝 辞

本実験を行うにあたり、防衛大学校研究員 圓林 栄喜氏、同研究科学生 竹本 憲介氏、西本 安志氏のご援助をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 毎日新聞首都圏版；平成11年6月30日夕刊，同7月1日朝刊，同夕刊。
- 2) 国土庁：防災白書（平成9年度版）大蔵省印刷局，平成9年6月24日。
- 3) 星川辰雄，石川信隆，彦坂照，阿部宗平：局部変形とひずみ速度効果を考慮した鋼管固定はりの衝撃応答変位，土木学会論文集，No. 513/I-31，pp. 101-115，1995. 4.
- 4) 星川辰雄，石川信隆，彦坂照，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.
- 5) 星川辰雄，石川信隆，彦坂照，水山高久，阿部宗平：，土木学会論文集，No. 525/I-33，pp. 139-152，1995. 10.
- 6) 今井一之：与田切鋼製セル群ダムの効果，新砂防（砂防学会誌）Vol. 44，No. 5，pp. 33-37，1992年1月。
- 7) 中安正晃，白江建造，佐藤敏明：平成5年8月に発生した土石流と与田切鋼製セル群ダムの効果，新砂防（砂防学会誌）Vol. 49，No. 5，pp. 33-37，1994年1月。
- 8) 北島昭一：岩盤状のセル構造破壊について，土と基礎，Vol. 10，No. 8，pp. 25-33，1962年10月。
- 9) 古川浩平，飯田毅，高瀬幸紀，森山彰：根入れ式鋼板セル護岸の最適設計の関する研究，土木学会論文集，No. 380/I-7，pp. 419-427，1987. 4.
- 10) 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.
- 11) 伊藤一雄，香月智，石川信隆，阿部宗平：水平衝撃実験による砂中詰材の動的変形特性と個別要素法解析，土木学会論文集，No. 591/I-43，pp. 351-364，1998. 4.
- 12) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月。
- 13) 吉田博，榎谷浩，鈴木哲治：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧の関する実験的研究，土木学会論文集，Vol. 352/Ⅲ-2，pp. 61-70，1984. 12.
- 14) 鋼材倶楽部：新しい落石覆いの開発に関する研究，鋼材倶楽部，研究報告書，1973年4月。
- 15) 和仁達美，赤沢稔：鉄道土木施工法講座，pp. 263-271，1963年。
- 16) 岸徳光，中野治，松岡健一，西弘明ら：野外実験による敷き砂の緩衝性能，構造工学論文集，Vol. 39A，pp. 1587-1597，1993年3月。

（1999年9月17日受付）