

支持フレーム付きセル型砂防ダムの衝撃挙動と相似則に関する実験的検討

An Experimental Study on Impact Behavior and Similarity Law of Cellular Check Dam with Support Frame

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

Kentaro MASAEDA, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Kazuki MATSUMURA 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 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)^{***}工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)^{****}(財)砂防・地すべり技術センター砂防技術研究所 (〒102-0074 東京都千代田区九段南 4-8-21)^{*****}住友金属建材株式会社 道路土木製品技術部 (〒100-0003 東京都中央区日本橋小伝馬町 7-2)

This paper presents an experimental study on the impact behavior and similarity law of cellular check dam supported by steel frame. The impact test was performed for the half size (1/2) scale model of the cellular check dam supported by the steel frame. The 1050kg collision mass hits on the cellular model with various velocities, i.e., 2m/s ~ 11m/s, and the impact load, transmitted load and displacement were measured. It is found that the cellular check dam can absorb the kinetic energy of collision weight effectively by elastic plastic deformation of cell filled with dry sand and can decrease the transmitted load on the support frame. By comparing with 1/5 scale model test result which was performed previously, it is confirmed that the Froude similarity law is much better applicable to the impact test than the Replica similarity law.

Keywords: cellular check dam with support frame, impact test, impact behavior, similarity law

1. 緒言

近年、砂防ダムの一部を開口しておき、通常時には流砂を下流に流し¹⁾、土石流時には巨礫成分が開口部を閉塞することにより土石流を止めるオープン式砂防ダムが数多く建設されるようになってきた。写真-1に示すセル型砂防ダムは、現地土砂を中詰めした鋼板セルを配置することによりオープン式砂防ダムの機能を果たすものである²⁾。天竜川支川与田切川に設置されたセル型砂防ダムは幾度か土石流に襲われたが、十分に期待性能を発揮して土石流を止めたことが報告されている^{3), 4), 5)}。しかし、周辺地形の要因によって、流水が通過する開口面積を広くする必要が生じても、このセル型砂防ダムは基本的にはフィル構造であるので堤体を小さくすることに制約が生じ、水理機能面に制約が生じる場合もある。そこで、図-1に示すようなセルダム部分を小さくし、減少した抵抗力を支持フレームによって補う支持フレーム付のセル型砂防ダムが提案され、その力学的性能について検討されている⁶⁾。著者らは、先に支持フレーム付セル型砂防ダムの1/5スケールモデルを用いて、その巨礫衝突に対する応答を水平衝撃実験によって調べた。その結果、セル型砂防ダム前面で生ずる最大衝撃力は、落石便覧式を修正した方法で推定可能であり、後方に位置する支持フレームに伝達される衝撃力は、前面の衝撃力の約55%程度に低減されること等を確認した。しかし、衝撃実験のミニチュアモデルに対する相似則については、未解明な部分もあり、この結果のみから実物の応答を推定することは困難で



写真-1 セル型砂防ダム

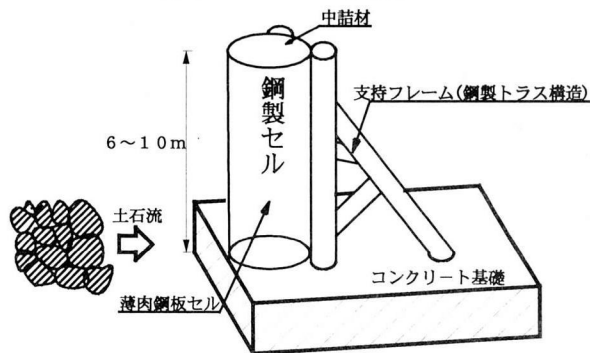
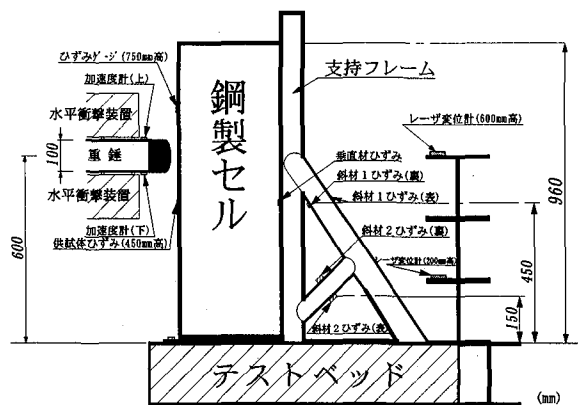
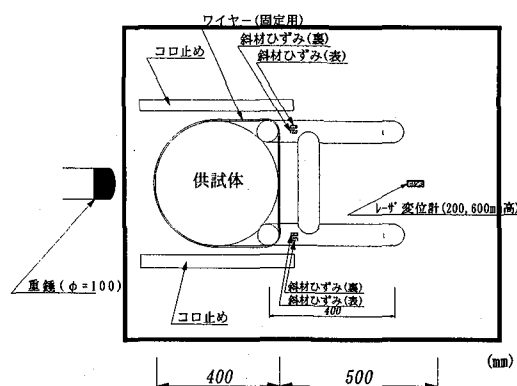


図-1 支持フレーム付鋼製セルダム



(a) 断面図



(b) 平面図

図-2 水平衝撃载荷装置

表-1 中詰材の緒元

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/cm³)	0.0148	0.0146	0.0145	0.0743

表-2 実験ケース

ケース名	重錘重量	鋼製セル	中詰材	粒 径 (mm)	载荷要領	衝突速度 (m/s)	
Im-t-1	150kgf	有	けい砂	1	漸増载荷	1,2,3,4,5,6,7	
Im-t-5			砕 石	5			
Im-t-25			川砂利	2 5			
Im-t-0			空	—		1,2,3	
Im-t-1-60			けい砂+上載鉛(60kg)	1			1,2,3,4,5,6,7
Im-t-1-120			けい砂+上載鉛(120kg)	1			
Im-t-Fr		無	—	単一载荷	6		
Im-S-1		有	けい砂			1	

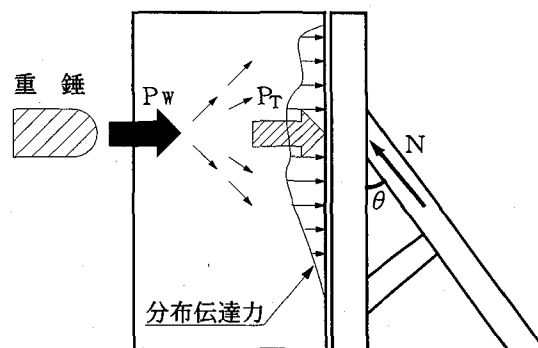


図-3 衝撃力の伝達機構

あった。最も望ましいのは実物大モデル実験を行うことであるが、実験施設の制約等の問題もあり、不可能である。

本研究は、以上の背景を踏まえて1/2スケールのセル堤体を作成して、梁構造の支持フレーム上に載せたミニチュアモデルに対する鉛直落下実験を行い、その相似関係について検討したものである。なお、1/5スケールモデル実験については、文献6)で報告済みであるが、ここではまずその概要を述べた後に、1/2スケールモデル実験の結果と1/5スケールモデル実験との相似則について検討することにした。

2. 1/5スケールモデル実験⁶⁾

2.1 実験の概要

実験は、図-2(a),(b)に示すようにミニチュアモデルに巨礫を模した鋼製の重錘を水平衝撃载荷装置によって衝突させるものである。供試体は、高さ960mm、直径400mm、肉厚1.6mm、(D/t=375)、材質SS400の薄肉鋼板セルに中詰材を高さ800mmまで詰めたものであり、下面からの抵抗をなくするため、コロの上に設置した。実構造では、セル部も地盤に埋め込まれていることを考えると、これは、支持フレームにとって負担の大きな設定となっているが、後述する評価式では安全側の設定となる。支持フレームは、φ=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に示す粒径1mmのけい砂、同5mmの碎石、同25mmの川砂利の3種類を用い、一部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も検討した。実験は、セルの高さ600mmの中心線上に150kg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。载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载荷の場合と一度だけの衝突の単一载荷について行い、前者は衝突速度1m/sから始めて1m/sずつ増やし7m/sまで行った。この際、支持フレームに生じた最大ひずみが6m/sの衝突速度までは弾性限界を超えないが、7m/sでは弾性限界を超えた。そこで単一载荷は、漸増载荷において弾性の応答限界速度とされた6m/sで行った。また、比較のために中詰材を詰めないで衝突させた場合と、支持フレームの垂直材中央にH型鋼を渡し、直接衝突させた場合についても漸増载荷を行った。以上の条件を組み合わせ、表-2に示す実験ケースについて検討している。なお、後述する文中の凡例は表-2のケース名にしたがうものとする。

2.2 実験結果

重錘が鋼製セル本体を介して支持フレームへ荷重が伝播される伝達機構を、図-3のように模式化して考察した。衝突点で生じた集中荷重としての重錘衝撃力 P_w は、次式によって与えられる。

$$P_w = M_{w0.2} \alpha_w \quad (1)$$

ここで、 $M_{w0.2}$:1/5モデルの重錘質量(=150kg)、 α_w :重錘加速度(m/s^2)。

式(1)において加速度 α_w は時々刻々変化するが、衝撃力 P_w の時刻歴応答の最大値を最大重錘衝撃力とし、最大重錘衝撃力と衝突速度との関係を図-4に示す。これより、中詰材の粒径を変えた場合や衝突位置の高さを変化させても、最大重錘衝撃力にはあまり顕著な違いが現れないことがわかった。ま

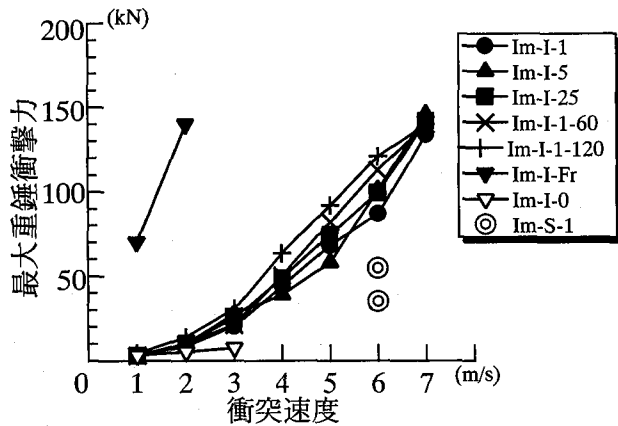


図-4 最大重錘衝撃力～衝突速度の関係

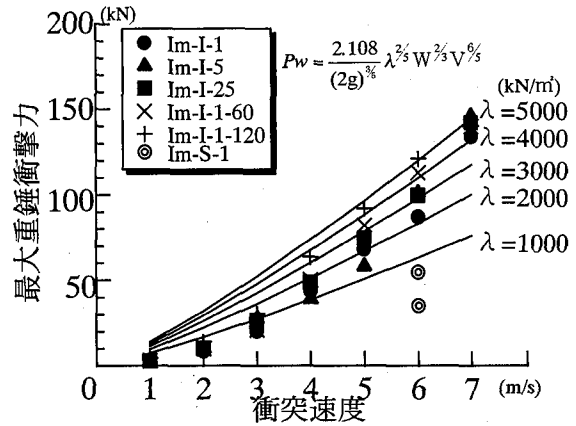


図-5 最大重錘衝撃力の予測値

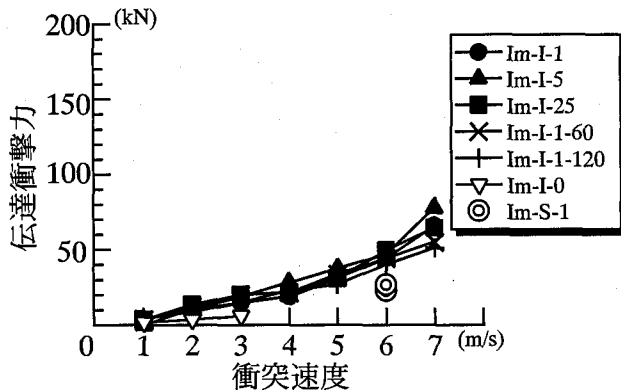


図-6 伝達衝撃力～衝突速度の関係

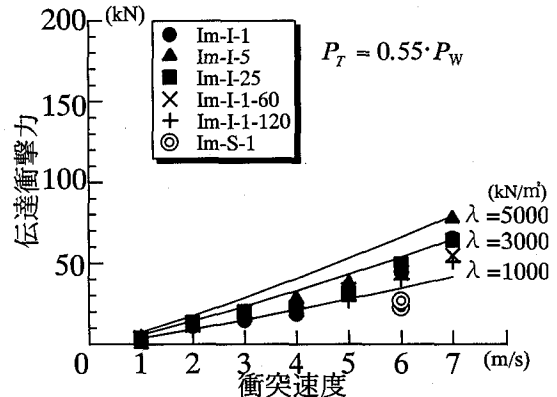


図-7 伝達衝撃力の予測値

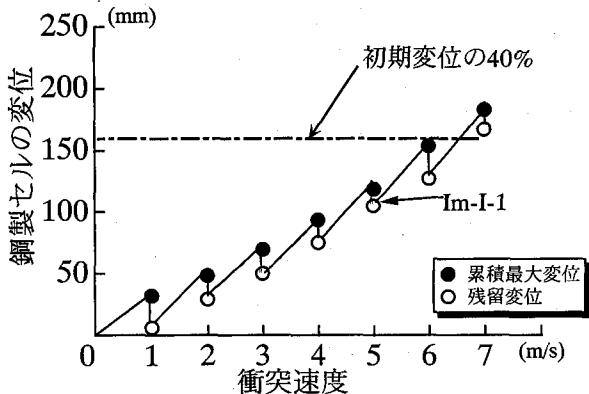


図-8 鋼製セルの変形履歴

た、漸増载荷において衝撃力は、速度の増加につれて非線形的に増加しているのがわかる。

これを落石対策便覧⁷⁾で用いられている衝撃力推定式を衝突速度をパラメータとして修正した次式によって最大重錘衝撃力を推定することを試みた。

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

ここで、 P_w ：最大重錘衝撃力、 λ ：ラーメの定数 (kN/m^2)、 W ：落石重量 (kN)、 V ：衝突時における重錘速度 (m/s)。

図-5に λ を1000～5000 kN/m^2 でパラメトリックに変化させた場合の推定値を実験値と比較して示す。これより、 $\lambda=1000 \sim 5000 \text{ kN/m}^2$ で概ね実験値を推定できることが認められた。

一方、支持フレームへ伝わる伝達力は、鋼製セル内部で拡散しながら伝達され、図-3に示すような分布した伝達力となりフレームへ作用するが、これを等価な集中荷重 P_T として考え

るものとした。その大きさは、支持フレームの斜材に生ずる軸力から求められ、次式によって伝達衝撃力を算定した。

$$P_T = A_B E \bar{\epsilon} \sin \theta \quad (3)$$

ここで、 P_T ：伝達衝撃力、 A_B ：斜材断面積、 E ：ヤング係数、 $\bar{\epsilon}$ ：斜材に生じた最大軸ひずみ、 θ ：斜材と垂直材のなす角。

この伝達衝撃力と衝突速度の関係を図-6に示す。これより、図-4の最大重錘衝撃力と比較すると同じような傾向を示しているが、伝達衝撃力の大きさについては約55%に低減される。

そこで、式(2)で求めた最大重錘衝撃力に低減係数 β を乗じて伝達衝撃力を求めるものとした。すなわち、

$$P_T = \beta P_w \quad (4)$$

ただし、 β ：荷重低減係数(ここでは、0.55)。

式(4)を実験値と比較すると、図-7のようになる。やはり、 $\lambda=1000 \sim 5000 \text{ kN/m}^2$ の範囲で良く推定できることがわかる。また、衝突におけるセル本体の変形量として漸増载荷実験の载荷方向における重錘の最大変位およびセルの衝突後の残留変形と衝突速度との関係を図-8に示す。これより、重錘最大変位・残留変位とも衝突速度にほぼ比例して大きくなり、7回目の $V=7 \text{ m/s}$ において残留変形が165mm(約41%)となる。

3. 1/2スケールモデル実験

3.1 実験要領

(1) 概要

先に行った1/5スケールモデル実験との相似実験を忠実にを行うには、水平衝突実験を行う必要があるが、実験施設の制約から困難であるので、図-9に示すような時計塔内部に設置

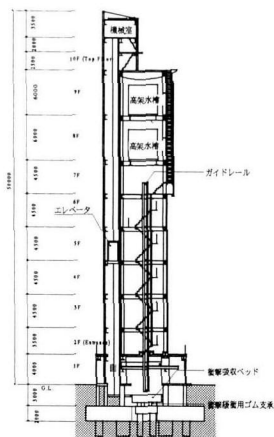


図-9 時計塔内部の重錘落下実験装置

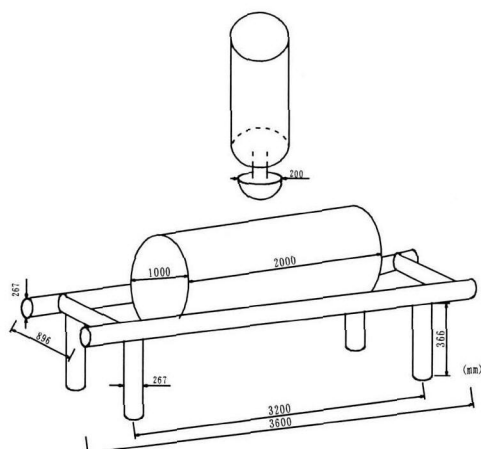


図-10 重錘落下衝突装置

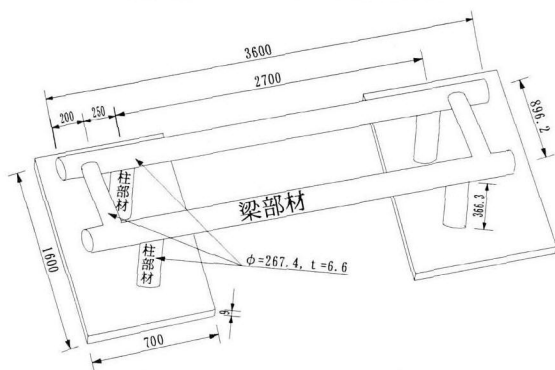


図-11 支持フレーム
表-3 実験ケース

载荷 要領	中詰材	落下高さH (m), 衝突速度V (m/s) (1/5 スケール相当速度)	実験 回数
漸増 载荷	けい砂	H 0.13, 0.50, 1.15, 2.04, 3.18, 4.58	2
		V 1.58, 3.16, 4.74, 6.32, 7.90, 9.48, 11.06 (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0)	
単一 载荷	けい砂	H 3.18	1
		V 7.90 (5.0)	

された鉛直型の重錘落下実験装置を使用して、図-10に示すように質量1050kgの重錘を鋼製セル供試体中央部に自由落下衝突させた。これに伴いセル供試体は水平に寝かせた状態となり、またトラス構造の支持フレームが使用できないので鋼管によって作られる梁構造とした。なお、セルと支持フレームの接合は、特別な接合を行わず、単にセルを支持フレーム上

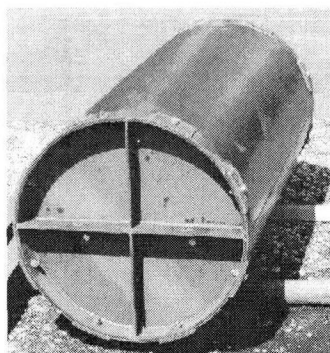


写真-2 鋼製セル供試体

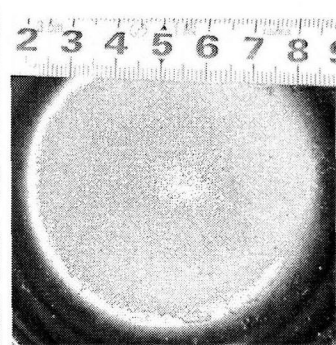


写真-3 けい砂5号

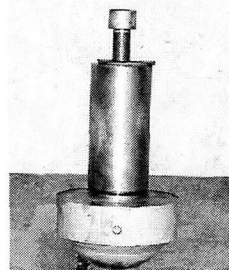
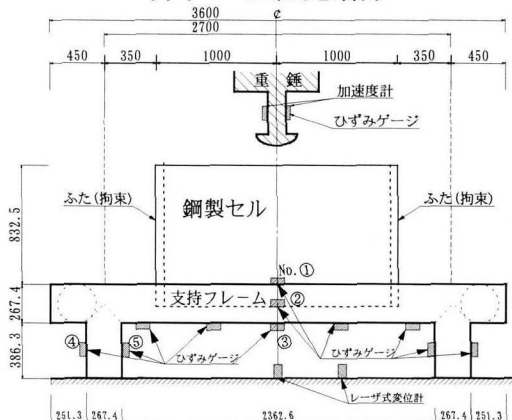
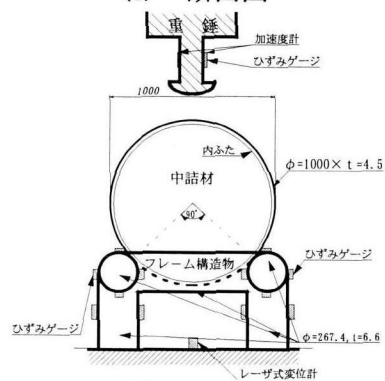


写真-4 重錘先端部



(a) 断面図



(b) 側面図

図-12 供試体計測位置

に置いただけとした。このように実物を全体のパラメータについて忠実にスケールダウンした実験条件が得られないので、実験目的を1/5スケール実験の最大重錘衝撃力、伝達衝撃力およびセルの変形に関する相似性を重視して実験要領を決定した。

(2) 鋼製セル供試体

鋼製セル供試体は、写真-2に示す長さ2.0m、直径1.0m、肉

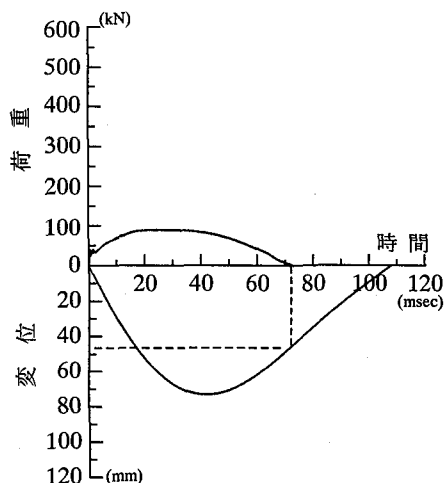


図-13 漸増载荷 $V=3.16\text{m/s}$ における時刻歴応答

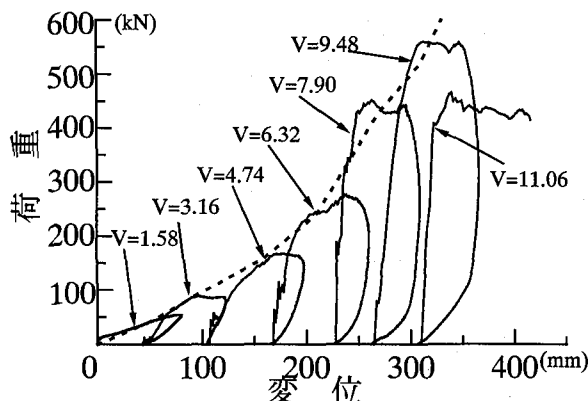


図-15 漸増载荷実験の荷重～変位関係

厚4.5mm, ($D/t=375$)の薄肉のSS400の鋼板セルの中に写真-3に示すけい砂5号(粒径0.5～1.0mm)を単位体積重量0.0146N/cm³となるよう緩く詰めたものである。両端部は蓋で密閉し、中詰材が飛び出ないようにしている。

(3) 支持フレーム供試体

支持フレームは、図-11に示すように $\phi=267.4\text{mm}$, $t=6.6\text{mm}$ の鋼管(STK400)を梁柱構造として溶接接合したものである。この梁中央部の集中荷重に対する剛性が、1/5スケールのトラスモデルの剛性と概ね相似関係となるように部材を選定した。さらに柱の基部は、厚さ9mmの鋼板(700mm×1600mm)とリブを添えて溶接接合した。

(4) 重錘

重錘は、長さ1.5mの鋼棒の先端に写真-4に示す直径200mmで球面状($R=150\text{mm}$)の加工した治具を取り付けたもので総重量は10.3kNである。

(5) 計測要領

計測項目は図-12に示すような要領で行った。重錘衝撃力を得るために、重錘に2つの加速度計を貼付した。また、支持フレームの応答については、ひずみおよび変位について計測した。

(6) 衝突速度および実験ケース

载荷要領は、同一供試体に対して逐次に衝突速度を増しながら何度も衝突させる漸増载荷と、1つの供試体に1度だけ衝突させる単一载荷を行い、漸増载荷は2回、単一载荷は1回実施した。漸増载荷の衝突速度の設定は、1/5スケールモデル実験とフルード則の相似関係になるように設定し、表-3に示

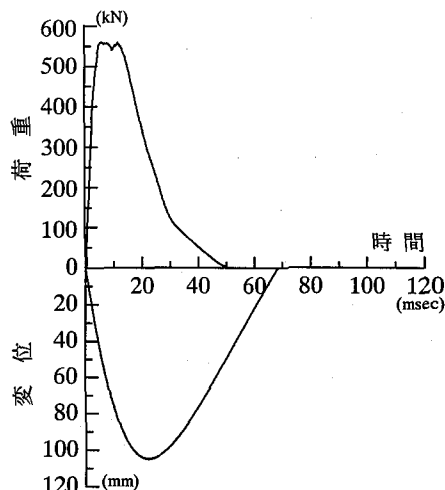


図-14 漸増载荷 $V=9.48\text{m/s}$ における時刻歴応答

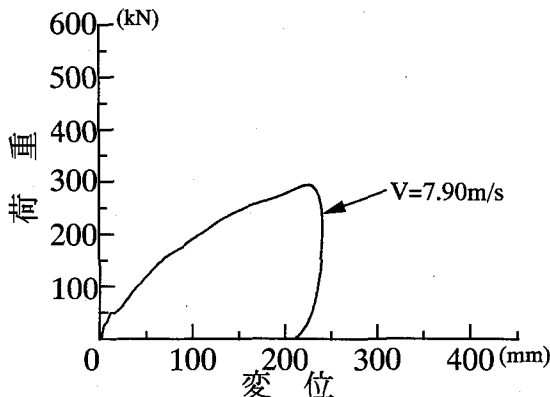


図-16 単一载荷実験の荷重～変位関係

す1.58m/s(1.0m/s:1/5モデル相当)から11.06m/s(7m/s:1/5モデル相当)までの7段階とした。また、単一载荷については7.9m/sとした。

3. 2 実験結果と考察

(1) 実験における時刻歴応答

図-13に漸増载荷衝突実験における $V=3.16\text{m/s}$ ($H=0.5\text{m}$)の荷重(重錘衝撃力)および重錘変位の時刻歴応答を示す。ここで、荷重は式(1)によって、また重錘変位は加速度データを積分して求めたものである。

これより、衝突荷重は25msecで最大値の約90kNに達し、その後緩やかに除荷され、約72msecで0となる。すなわち、72msecで重錘がセルとの接触がなくなり重錘が跳ね返された状態となる。この間の変位は、45msecでピーク値の約70mmになり、110msecで0とな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が72msecであるのに対し、重錘が接触開始変位0mmに戻る時刻が110msecと遅れるのはセルに残留変位が残るためである。ちなみに荷重が0となる時刻72msecにおいての重錘の変位は47mmであった。

図-14には、逐次に衝突速度を増やし、 $V=9.48\text{m/s}$ 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550kNまで達するが、その作用時間は50msecと $V=3.16\text{m/s}$ の場合よりも小さくなる。また変位応答も最大変位が105mmと大きくなるのに対し、変位が0に戻るまでの時間は68msecと小さくなっているのがわかる。

このように、漸増载荷実験において衝突速度が速い方が遅

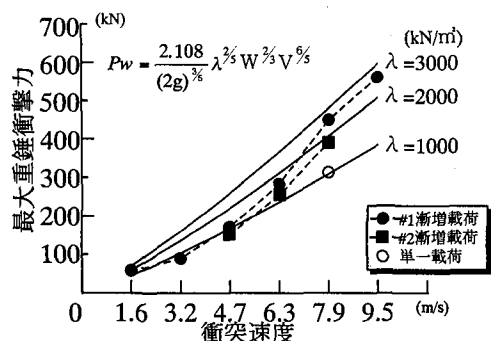


図-17 最大重錘衝撃力～衝突速度関係

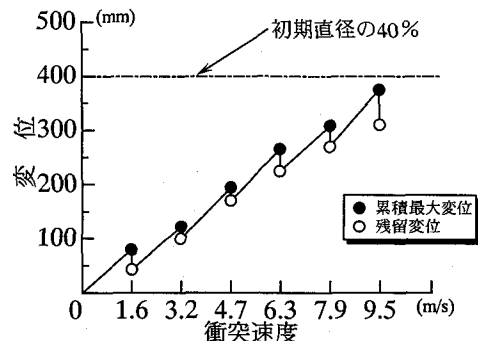


図-18 鋼製セルのへこみ量～衝突速度関係

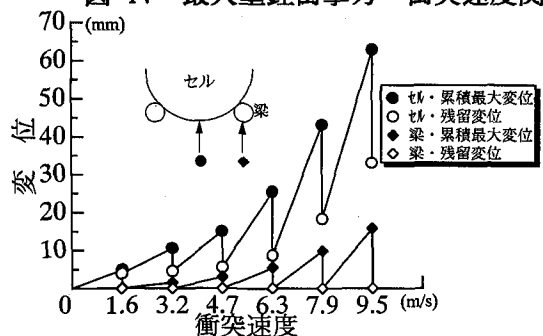
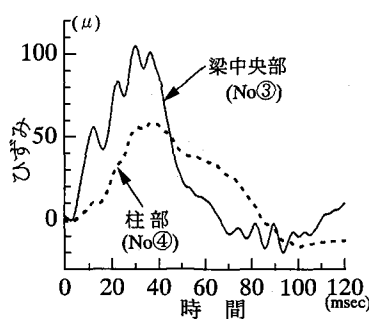
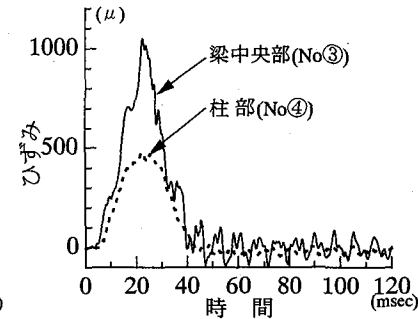


図-19 下面の変位～衝突速度関係



(a) $V=3.16\text{m/s}$



(b) $V=9.48\text{m/s}$

図-20 支持フレームのひずみ応答

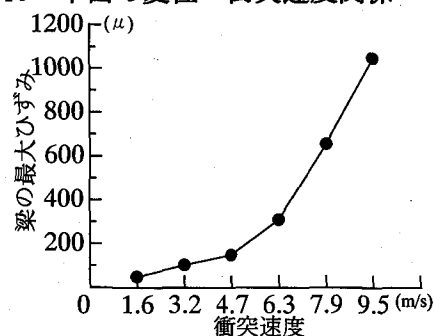


図-21 梁の最大ひずみ～衝突速度関係

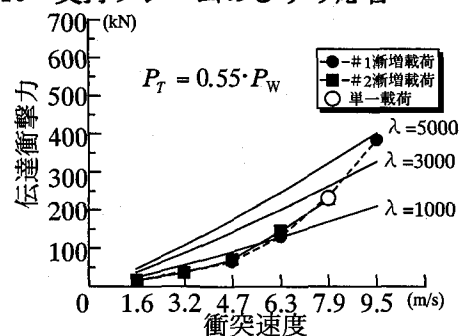


図-22 伝達衝撃力～衝突速度関係

い方に比べて早く跳ね返されるのは、载荷の進行に伴って徐々に中詰材が締め固まり、剛性が大きくなることや、既に凹んだ接触面に重錘が衝突して、接触面積が相対的に大きくなることなどの影響と思われる。

(2) 荷重～変位関係

図-13または図-14の時間軸を同調させ、さらに衝突速度を増加させると、図-15のような漸増载荷実験の荷重～変位関係の履歴曲線が得られる。一回の衝突ごとに载荷時と除荷時の経路が異なるヒステリシスループを描き、残留変形が残っている。また、衝突速度が大きくなるにつれて、そのヒステリシスは大きくなり、大きなエネルギーが消費されることがうかがえる。図中に破線で示した包絡線は変位(重錘のめりこみ)が増加するにつれて、剛性が大きくなる非線形の単調増加型の抵抗力が生じていることを示唆している。ただし、衝突速度 11.06m/s では、この包絡線傾向からはずれて小さな最大荷重となっている。これは、セル体の鋼管が破断した状態を示しているためである。

図-16には、単一载荷($V=7.90\text{m/s}$)の荷重～変位状態を示す。これは、処女载荷のため中詰材が緩く詰まった状態のままであるので、剛性が小さいため、荷重は小さいが大きな変形量によって、衝突エネルギーを吸収していることがわかる。

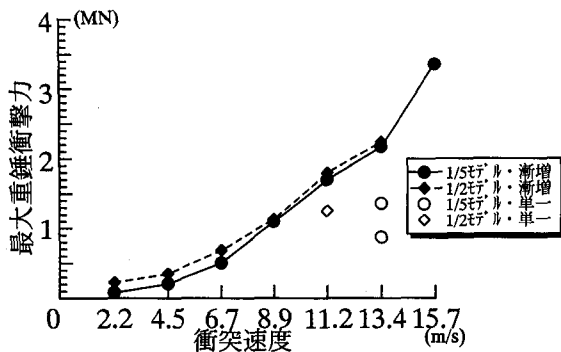
(3) 重錘衝撃力～衝突速度関係

図-17に、各衝突速度ごとの最大重錘衝撃力と速度の関係を示す。速度の増加につれて最大重錘衝撃力も増加しており、その傾向は図-4のような1/5スケールモデルと良く似ている。そこで式(2)を用いて推定値を求めてみると $\lambda=1000 \sim 3000\text{kN/m}^2$ の範囲で実験の傾向を良く表すことがわかる。

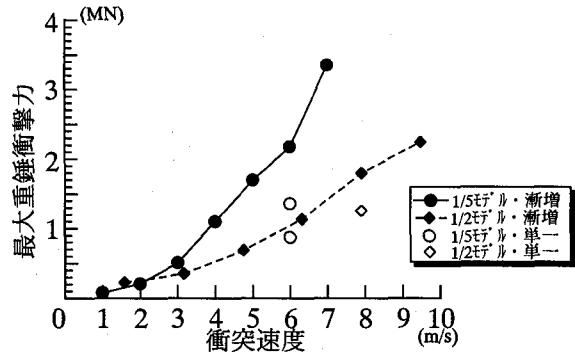
(4) 鋼製セルおよび支持フレームの変形

図-18には、漸増载荷実験のセル前面の変形の履歴を示す。これより、1/2モデルにおいても1/5モデル実験(図-8)と同様に衝突速度の増加にほぼ比例して最大変位および残留変位が増加しており、各衝突時の復元変形量(●と○の差)は、梁は弾性範囲内で挙動しているためほぼ一定であることがわかる。

図-19には、セル下面および梁の下面側の最大変位と衝突速度の関係を示す。これより、セル下面の最大変位(60mm)は上面の最大変位(400mm)の約1/6程度となっており、上面と同様な傾向で残留変位も残ることがわかる。一方、梁の下面の変位は衝突速度の増加に伴って大きくなるものの、その大きさ(最大15mm)はセル下面(最大60mm)の1/4程度であるため、セルが徐々に梁と梁の間に沈み込むような変形をしていることがわかる。また、梁の変形については、各回ごとに零点まで復帰

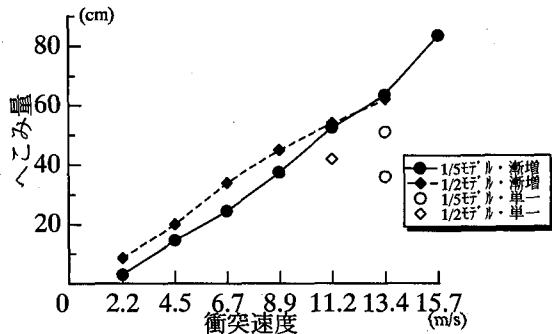


(a) フルード則

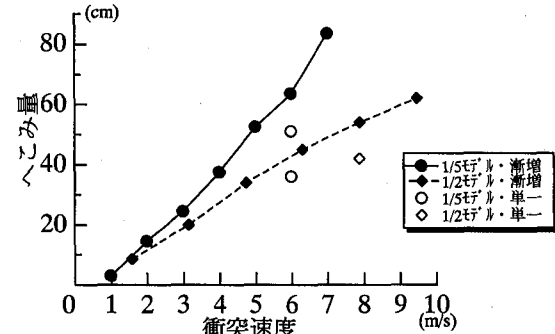


(b) レプリカ則

図-23 実物相当の最大重錘衝撃力～衝突速度関係

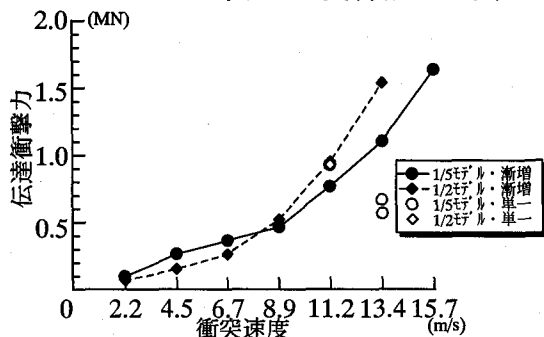


(a) フルード則

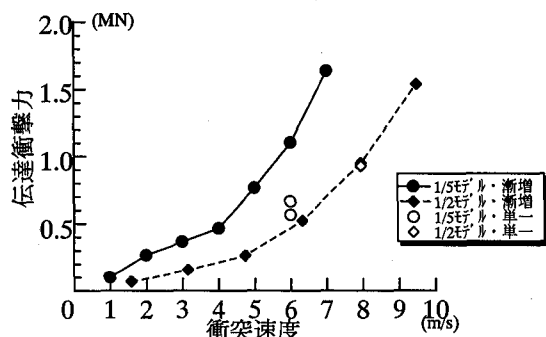


(b) レプリカ則

図-24 実物相当の鋼製セルのへこみ量～衝突速度関係



(a) フルード則



(b) レプリカ則

図-25 実物相当の伝達衝撃力～衝突速度関係

表-4 相似則

物理量	次元	フルード相似則			レプリカ相似則		
		相似比	1/5	1/2	相似比	1/5	1/2
長さ	L	S	0.2	0.5	S	0.2	0.5
質量	M	S^2	0.04	0.25	S^3	0.008	0.125
重量	W	S^2	0.04	0.25	S^2	0.04	0.25
時間	T	$S^{1/2}$	0.45	0.71	S	0.2	0.5
ひずみ	—	1	1.0	1.0	1	1.0	1.0
応力	WL^{-2}	1	1.0	1.0	1	1.0	1.0
速度	LT^{-1}	$S^{1/2}$	0.45	0.71	1	1.0	1.0
加速度	LT^{-2}	1	1.0	1.0	S^{-1}	2.0	5.0
力	MLT^{-2}	S^2	0.04	0.25	S^2	0.04	0.25

表-5 フルード相似則による実寸相当パラメータ

	1/5モデル	1/2モデル
セル直径(mm)	2000	2000
セル鋼厚(mm)	8.0	9.0
重錘質量(kg)	3750	4000
セル質量(kg)	3950	11252
衝突速度(m/s)	2.23, 4.47, 6.69, 8.94, 11.18, 13.42, 15.65	2.23, 4.47, 6.69, 8.94, 11.18, 13.42, 15.65

表-6 レプリカ相似則による実寸相当パラメータ

	1/5モデル	1/2モデル
セル直径(mm)	2000	2000
セル鋼厚(mm)	8.0	9.0
重錘質量(kg)	18750	8000
セル質量(kg)	19750	22504
衝突速度(m/s)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1.58, 3.16, 4.74, 6.32, 7.90, 9.48, 11.06

しており弾性挙動であったことがわかる。

図-20には、 $V=3.16\text{m/s}$ と 9.48m/s における梁中央部上面と柱中央部のひずみの時刻歴応答を示す。どちらの衝突速度においても、梁のひずみの方が柱よりも大きくなっており、支持フレームの負担は梁部の方が大きいことがわかる。また、梁中央部の最大ひずみは $V=3.16\text{m/s}$ では 100μ であるのに対し、 9.48m/s では 1050μ と概ね弾性限界まで達している。

図-21には、梁中央部の最大ひずみと衝突速度の関係を示

すが、速度の増加に連れて明瞭に梁のひずみが増加することがわかる。

(5) 伝達衝撃力

図-20に見られるように、本実験での支持フレームの中で最

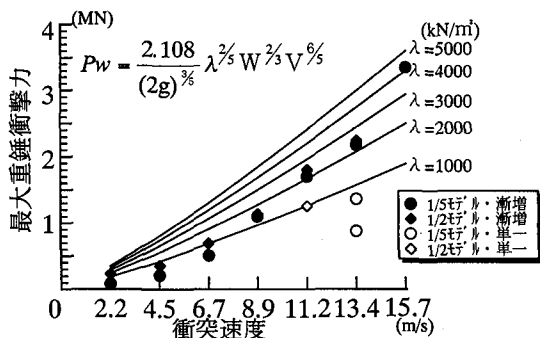


図-26 最大重錘衝撃力の予測値

も卓越したひずみを生ずるのは梁の曲げモーメントひずみである。そこで、梁の曲げモーメントによるひずみを用いて梁に伝達された荷重を次式で求めた。

$$P_T = \frac{EZ}{M_s} \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_L}{2} \right) \quad (5)$$

ここで、 P_T ：伝達衝撃力、 E ：ヤング係数、 Z ：断面係数、 M_s ：静的荷重($W=1\text{ton}$)時の平均曲げモーメント、 $\varepsilon_u, \varepsilon_L$ ：梁の中央点での上・下面のひずみ(最大値)。

図-22に伝達衝撃力と衝突速度の関係を示す。これより、伝達衝撃力は実験の1回目と2回目のばらつきがほとんどなく再現性が良いことがわかる。また、その傾向は、図-17で示した最大重錘衝撃力と相似的でその値は小さい。そこで1/5モデルで提案した式(4)によって推定値を当てはめると図-22の実線のようになり、やはり $\lambda = 1000 \sim 5000 \text{ kN/m}^2$ の値の間で良く推定できることがわかる。

4. 相似則による検討

衝撃実験における相似則には、表-4に示すようにフルード則とレプリカ相似則の2つの方法がある^{8),9)}。フルード則は支配重力加速度はモデルと実物で同じものとする。しかし、同一材料でスケールすると表中の網掛けした質量が S^2 となるため、材料内にダミー質量を入れたり、異なる密度の材料を用いたりする工夫を要する。一方、レプリカ則は、材料を同一にして忠実にモデリングするもので、加速度場にスケールを用いる。しかし、これは遠心载荷などの手法が必要であり、通常では網掛けした重量場に相似性のひずみが生ずる。

本実験では、材料は同一で寸法のみスケールしているため、どちらの相似則に対してもひずみのある相似関係となっている。しかし、仮に相似性がどちらかに近く成立しているならば、1/5モデルおよび1/2モデルの結果を実物相当に戻したときに概ね一致する傾向が得られるはずである。表-5, 6にそれぞれフルード則およびレプリカ則を用いて1/5モデルおよび1/2モデルの実験を実物相当に戻した場合の諸元を示す。これより、フルード則に基づくと実物相当の相似則がほぼ成り立つが、レプリカ則では、衝突速度の相似性が成り立たないことがわかる。

図-23～25には、それぞれ最大重錘衝撃力、鋼製セルのへこみ量および伝達衝撃力について、フルード則またはレプリカ則を用いて実験値を実物大相当値に戻した場合の2つの実験を比較して示す。これらより、フルード則に基づいた変換は1/2モデルと1/5モデルの実験結果がほぼ一致するのに対して、レプリカ則では全く異なったものとなっていることがわかる。すなわち、本実験は完全なるフルード則の条件を満足してい

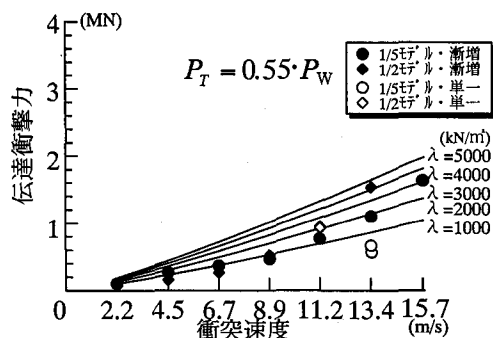


図-27 伝達衝撃力の予測値

るわけではないが、得られた荷重や変形に関してはフルード則による相似関係がほぼ成立した実験であったことがわかる。本来、中詰材の密度を調整すべきであったがその影響が現れなかったのは、中詰材の抵抗力として慣性力よりも中詰材の粘性的なメカニズムが卓越していることなどの要因が考えられる。

図-26, 27には、実物大に戻した実験値の最大重錘衝撃力および伝達衝撃力と衝突速度の関係に対して、式(3),(4)による推定値を比較して示す。これらより、やはり式(3),(4)において $\lambda = 3000 \text{ kN/m}^2$ 程度にすれば安全側に推定し、 $\lambda = 1000 \text{ kN/m}^2$ を用いれば、10m/s程度までの衝突速度ではほぼ適切な推定値を与えることがわかる。

5. 結言

本研究は、1/2スケールの支持フレーム付きセル型砂防ダムの重錘落下衝撃実験を行い、土石流中の巨礫衝突に対するセル堤体および支持フレームの衝撃挙動について検討した。そのうえで、前回行った1/5スケールモデル実験との相似についてフルード則およびレプリカ則による検討を行い、実物大の応答推定を試みたものである。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 漸増载荷実験による衝突荷重～変位関係の履歴によると、セル堤体の原直径の約40%程度のへこみまでは、その包絡抵抗線は減少することなく変位の増大に伴って大きくなる。すなわち、安定型の抵抗則になっている。また、この間にセル堤体の破損はない。
- (2) 漸増载荷実験でのセル堤体の応答は、各衝突ごとに残留変形に生ずる弾塑性応答となる。この際、残留変位および最大応答変位は衝突速度とほぼ比例して増加するが、最大応答変位～残留変位量は、いずれの衝突速度でもほぼ一定である。
- (3) 単一载荷実験の衝撃荷重は、漸増载荷のものよりも小さいが、セルの変位量は大きくなる。これは、漸増载荷では、事前の履歴衝突によってセルの残留変形による内容積の減少および振動による締め固め効果などが複合化して、中詰材の剛性が载荷ごとに大きくなるためである。
- (4) 1/2スケール実験では、支持フレームの応答は質量1tonの重錘が約10m/sで衝突しても弾性応答を示す。
- (5) 今回の実験を1/5スケールモデル実験と比較するとフルード則による相似性が良く成立していることがわかった。よって、実物相当で約4tonの巨礫が15m/s程度の速度で衝突した場合、セル堤体は直径の40%程度変形するものの、支持フレームは弾性応答することが推定された。
- (6) 最大重錘衝撃力は、振動便覧式を速度入力型に修正し

た提案式にラーメの定数 $\lambda=4000\text{kN/m}^2$ を用いて速度 15m/s の場合十分安全側に推定でき、また $\lambda=1000\text{kN/m}^2$ を用いると低速度 (約 6m/s 以下) および単一載荷の場合も推定が可能であることが認められた。さらに、支持フレームの伝達衝撃力は、最大重錘衝撃力を約 55% 程度に低減すると良く推定できることがわかった。

なお、実験結果を観察すると、漸増载荷において衝突速度が大きくなると見かけ上のラーメ定数 λ が大きくなるなど、中詰材の密度の影響や、支持フレームの弾塑性応答域での検討など残された課題も多くある。よって、本実験で得られたセル内部の力の伝達メカニズムや相似性についてシミュレーション解析によりトレースし、その力学的メカニズムを解明する必要があり、現在数値解析により検討中である。

謝 辞

本実験を行うにあたり、防衛大学校 建設環境工学科 教授 大野友則先生、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) 松村和樹: 砂防計画の新しい展開と施設機能, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.52, No.6, pp.76-80, 2000年3月

- 2) 砂防・地すべり技術センター: 鋼製砂防構造物設計便覧, 昭和62年版
- 3) 尾崎幸忠、鴨川義宣、水山高久、葛西俊一郎、嶋丈示: 流木が混入した土石流の鋼製透過型ダムによる捕捉形態の調査, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.51, No.2, pp39-44, 1998年
- 4) 中安正晃、白江健造、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, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.46, No.5, pp33-37, 1994年
- 5) 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, pp351-364, 1998.4
- 6) 政枝憲太郎、香月智、石川信隆、竹内大輔: 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, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1775-1784, 2000年3月.
- 7) 日本道路協会: 落石対策便覧, 1983年7月.
- 8) 江守一郎: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 1985年.
- 9) 坂巻勝、伊藤康人、大野友則: 衝撃実験に用いる供試体寸法と相似則の適用, 土木学会第40回年次学術講演会, pp.1560-1561. 平成6年9月.

(2000年9月14日受付)