

(52) セル型砂防ダム中詰材の局部衝撃実験

IMPACT TEST ON LOCAL BEHAVIOR OF FILLED MATERIAL IN CELLULAR CHECK DAM

伊藤一雄*, 香月智**, 石川信隆***, 阿部宗平****, 中村徹*****

Kazuo ITOH, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Souhei ABE and Toru NAKAMURA

* 工修 防衛大学校研究員 土木工学科(〒239 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 横須賀市走水1-10-20)

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

**** 研究開発課長 (財) 砂防・地すべり技術センター(〒162 新宿区市谷砂土原町2-7)

***** 技術サービス室長 共生機構株式会社(〒160 新宿区新宿1-23-1)

キーワード:セル型砂防ダム, 粒状体, 衝撃荷重, 局部変形

(cellular check dam, granular materials, impact load, local deformation)

1. 緒言

セル型砂防ダムは, 写真-1に示すように鋼壁板の中に土砂等の中詰材を充填した砂防ダムである. 著者ら¹⁾は, この砂防ダムに対する土石流中の巨礫衝突を想定したモデル実験を行い, 衝突点における堤体の局部変形が重要な破壊形態であることを示した. この局部変形のメカニズムを明らかにするには, 堤体鋼板の中に裏込めされる中詰材自体の局部的な抵抗力と衝撃荷重に対する変形の関係を明らかにする必要がある. そこで本研究は, 中詰材の局部抵抗力について検討するため, 砂中詰材に対して静的および衝撃の局部変形実験を行い, 深さや砂の詰め方および変形速度が中詰材の局部抵抗力とその変形メカニズムに及ぼす影響について考察したものである.

2. 実験の概要

2.1 中詰材

実験に用いた中詰材は気乾状態のケイ砂で, その特性は, 表-1に示すように, 比重が2.66で, 形状は角張っており粒径範囲は0.5mm~1.0mmで, 図-1のような粒径分布を持つ砂である. 中詰材の詰め方は単位体積重量が1.33gf/cm³となる緩詰め,

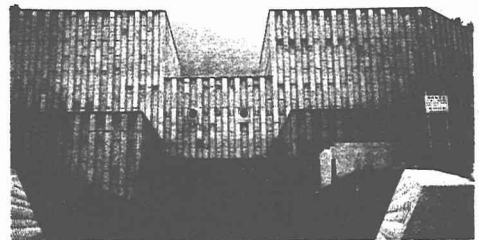


写真-1 セル型砂防ダムの一例

表-1 ケイ砂の諸元

比重	2.66	
形状	角張っている	
粒径範囲	0.5~1.0mm	
内部摩擦角	密($\rho=1.53\text{gf}/\text{cm}^3$)	40°
	緩($\rho=1.33\text{gf}/\text{cm}^3$)	30°

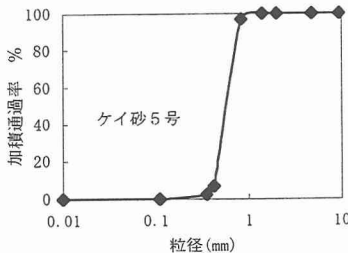


図-1 ケイ砂の粒径加積曲線

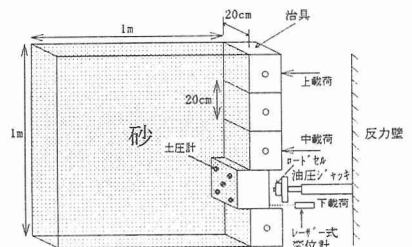


図-2 静的実験装置

1.53gf/cm³となる密詰めめの2種類の詰め方を行った。

2. 2 静的実験装置

供試体は、図-2に示すような厚さ20cm、高さ1m、幅1mの容器に、ケイ砂を充填して作成した。供試体の一側の側壁は固定しているが、他方の壁は20cm×20cm×20cmの立方体の鋼製の箱を5個積み重ねて作成した。この5個の箱の中で、載荷点以外の箱は固定して、載荷点の箱を上下にコロを挟んで水平に移動できるようにし、反力壁に取り付けた油圧ジャッキを用いて水平方向に載荷した。計測項目は、ジャッキ先端に取り付けたロードセルによって荷重(抵抗力)を、治具の前面に貼付した土圧計で土圧(抵抗力)を計測した。また、レーザー式変位計を用いて載荷箱の変位量を計測した。載荷点の位置は一番上の箱を動かす上載荷と3番目、4番目の箱を動かす中載荷、下載荷の3種類の載荷位置について実験を行った。実験パラメーターを表-2(a)に示す。

2. 3 衝撃実験装置

静的実験と同じ供試体に、図-3に示す横衝撃載荷実験装置を用いて、100kgfの重錘を衝突速度1、2および4m/sで衝突させる実験を行った。計測データは、移動する治具の前面に取り付けた土圧計により土圧(抵抗力)を計測し、治具の変位をレーザー式変位計を用いて計測した。実験ケースを表-2(b)に示す。

3. 実験結果および考察

3. 1 静的実験

(1) 抵抗力～変位関係

図-4に抵抗力～変位関係を示す。ここで抵抗力は、ロードセルの抵抗力を載荷箱の断面積で除したものである。

図-4(a)に示す緩詰めの場合には、抵抗力は変位とほぼ比

比例的に大きくなる。一方、図-4(b)の密詰めの場合には、限界値に向かって漸近する弾塑性型の挙動を示している。緩詰めと密詰めとの抵抗力の大きさを比較すると下載荷の変位10cmにおいて、緩詰めが1.2kgf/cm²、密詰めが3kgf/cm²となっており、詰め方を密にすることによって局部抵抗力が約2.5倍大きくなる。また、図-5は図-4(b)で得られた最大抵抗力と深さの関係を表している。ここで、最大抵抗力とは図-4(b)で抵抗力が最大になったときの値である。これより、最大抵抗力は深さと比例関係にあることがわかる。

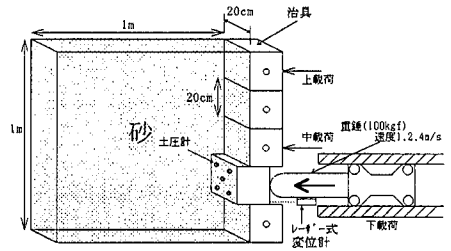


図-3 衝撃実験装置

表-2 実験ケース

(a) 静的実験		(b) 衝撃実験		
載荷点	詰め方	載荷点	詰め方	衝突速度
上載荷	緩	上載荷	緩	1m/s
上載荷	密	上載荷	緩	2m/s
中載荷	緩	上載荷	密	1m/s
中載荷	密	上載荷	密	2m/s
下載荷	緩	中載荷	緩	1m/s
下載荷	密	中載荷	緩	2m/s
		中載荷	密	2m/s
		中載荷	密	4m/s
		下載荷	緩	1m/s
		下載荷	緩	2m/s
		下載荷	密	2m/s
		下載荷	密	4m/s

各供試体×2

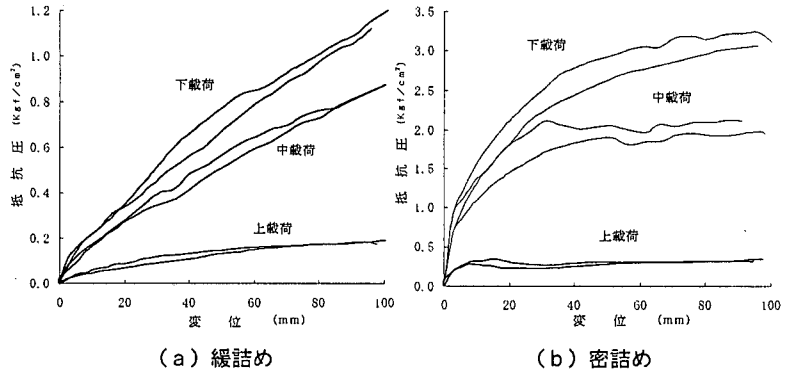


図-4 抵抗力～変位関係 (静的実験)

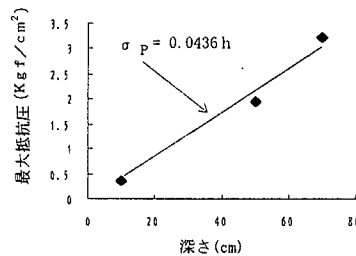


図-5 密詰め最大の抵抗力～深さ関係 (静的実験)

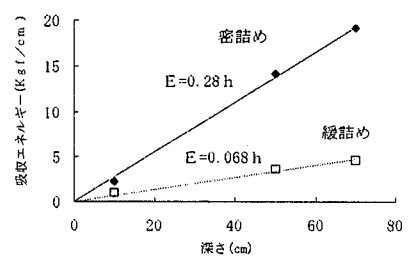
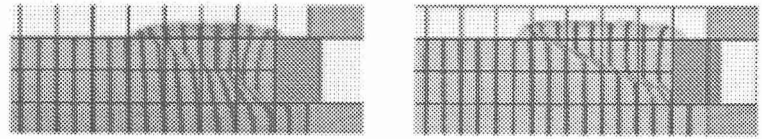


図-6 単位面積吸収エネルギー～深さ関係 (静的実験)

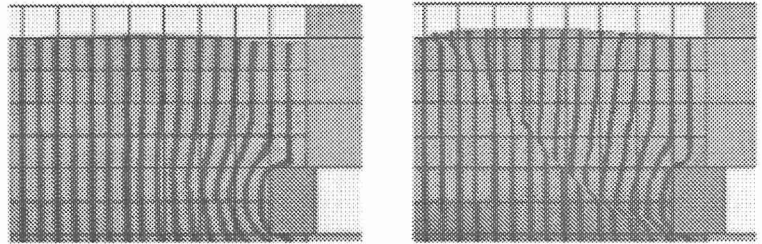
(2) 吸収エネルギー

図-6に変位8cmにおける単位面積吸収エネルギー～载荷点深さ関係を示す。ここで、単位面積吸収エネルギーは、図-4の抵抗圧～変位関係を変位に関して積分することによって求めたものである。これより、深さと単位面積吸収エネルギーには線形関係があることがわかる。また、下载荷の場合密詰めでは19kgf/cmに対して、緩詰めでは4.6kgf/cmと、密に詰めることにより約4倍の吸収エネルギー能が得られる。



(a) 上载荷, 緩詰め

(b) 上载荷, 密詰め



(c) 中载荷, 緩詰め

(d) 中载荷, 密詰め

写真-2 変位10cm時の変形形態
(静的実験)

(3) 変形形態

写真-2は、変位10cmでの砂の挙動を色砂を用いて

可視化したものである。まず、写真-2(a)は緩詰め、(b)は密詰めの上载荷の場合で、密詰めではすべり線が明瞭に形成されているが、緩詰めではやや不明瞭である。また、砂の体積変化を比較すると、载荷箱の移動による縮小体積が 4000cm^3 ($20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 10\text{cm}$)であるのに対して密詰めは隆起体積は 3900cm^3 であるので、ほぼ体積変化なしにすべり線に沿って移動している。一方の緩詰めでは、同一の縮小体積に対して隆起体積は 2600cm^3 となり、砂の体積が約12%減少している。ちなみに、緩詰めの実験後の単位体積重量は、密詰めに近い 1.52gf/cm^3 となっている。これより、緩詰めの場合、砂の空隙が減少して密詰めに近い状態になる体積変化と局部的すべり変形が進行するメカニズムを交互に繰り返すため、すべり線が波打ちかつ抵抗力が徐々に上昇していくものと考えられる。次に、写真-2(d)の中载荷の密詰めの場合は、やや円弧を描くようにすべり線が明瞭に形成されている。一方、写真-2(c)の緩詰めの場合は、押し込まれた治具の前方30cm付近内で圧縮された変形が局部的に見られるが、密詰めと異なりすべり線は上部までは連続していない。これを、隆起体積で比較すると密詰めは 3300cm^3 、緩詰めは 870cm^3 となり、緩詰めは隆起体積がかなり小さいことがわかる。これは、深さが増すことにより上部(自由面)までの距離が長くなり、また自重による拘束圧が大きくなるためと考えられる。以上のメカニズムを考えると、緩詰めの中詰材の局部抵抗力も、密詰めの場合の最大値(図-5)に至る過程にあると考えられる。また、その最大値は、深さに比例することがわかる。

3.2 衝撃実験

(1) 抵抗圧～変位関係

図-7に、緩詰めおよび密詰めの衝撃実験における抵抗圧～変位関係を示す。図中には、比較のために静的実験での抵抗圧～変位関係も示している。衝撃的な変形に対して、重錘の衝突直後に大きなピーク値を持つ山形の抵抗圧～変位関係を示した後、変形の増大につれて緩やかに抵抗圧が増加している。この後半の抵抗圧は静的抵抗圧～変位関係と似た形状を示すが、いずれの変位においても衝撃実験の抵抗圧の方が大きく、衝突速度が大きくなるにつれてその差は大きくなる。なお、図-7(d)に示した密詰めの上载荷の場合は、一般的傾向に反して後半の抵抗圧が静的と同程度または小さな値を示している。これは、第1波の次に現れた第2波の抵抗力の影響により砂中詰材自体が運動を開始し、抵抗力が低下したのと考えられる。

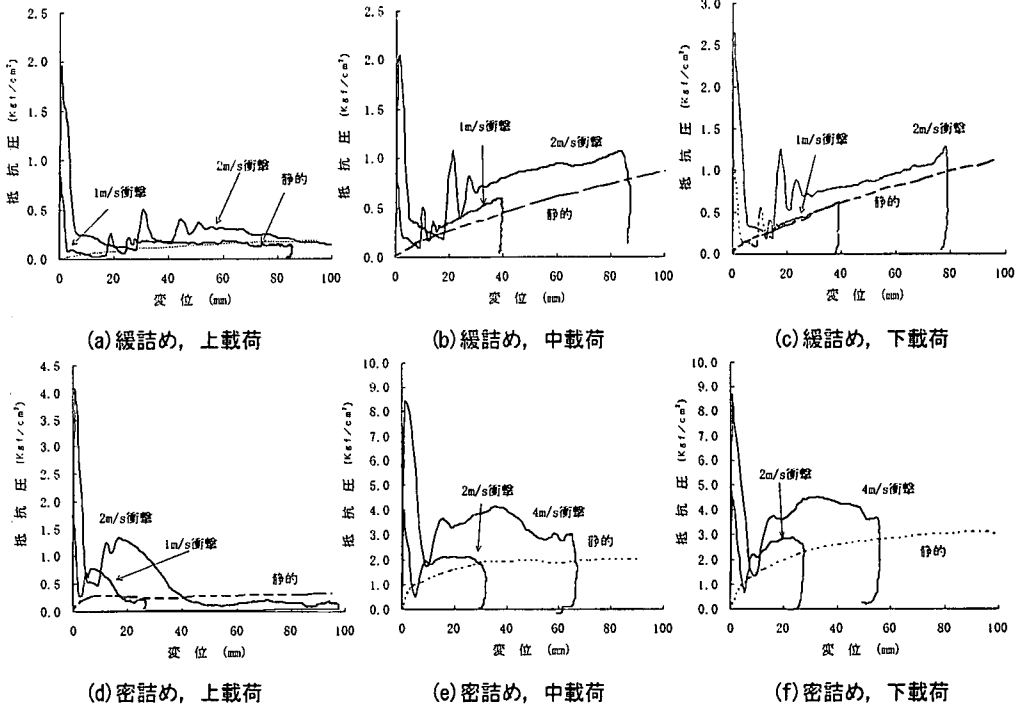


図-7 抵抗圧～変位関係（衝撃実験）

(2) 抵抗圧比～変形速度関係

図-7に示した抵抗圧～変位関係の中で、後半の部分は、静的な抵抗圧～変位関係に対して、ひずみ速度効果による抵抗の増加が現れたように見える。なお、本実験は衝撃実験であるので図-8に示すように、実験中に変形速度が時々刻々と変化している。そこで、第1波の山形波形の応答部分を除いて、1cm単位ごとの衝撃抵抗圧 σ_D と静的抵抗圧 σ_s の比を抵抗圧比とし、対応する変形速度との関係を調べた。図-9に抵抗圧比～変形速度関係を示す。これより、抵抗圧比は変形速度に比例して大きくなることわかる。これを、最小二乗法を用いて近似すると次式が得られる。

$$\sigma_D / \sigma_s = 0.33 v + 1.0 \quad (1)$$

ここで、 σ_D :動的抵抗圧、 σ_s :静的抵抗圧、 v :変形速度

(3) 単位面積吸収エネルギー～変位関係

図-10に単位面積吸収エネルギー～変位関係を示す。ここで、単位面積吸収エネルギーは、図-7の抵抗圧～変位関係を積分することにより求めたものである。これより、衝撃吸収エネルギーは静的吸収エネルギーに比べて明らかに大きくなっており、特に衝突速度が大きいほど増加比率が大きくなってい

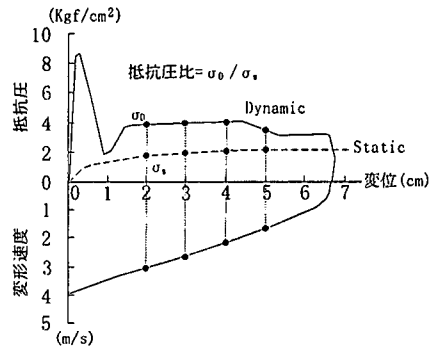


図-8 抵抗圧比～変形速度の求め方

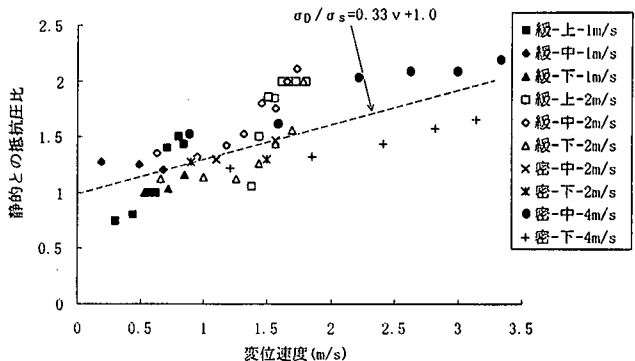


図-9 抵抗圧比～変形速度関係

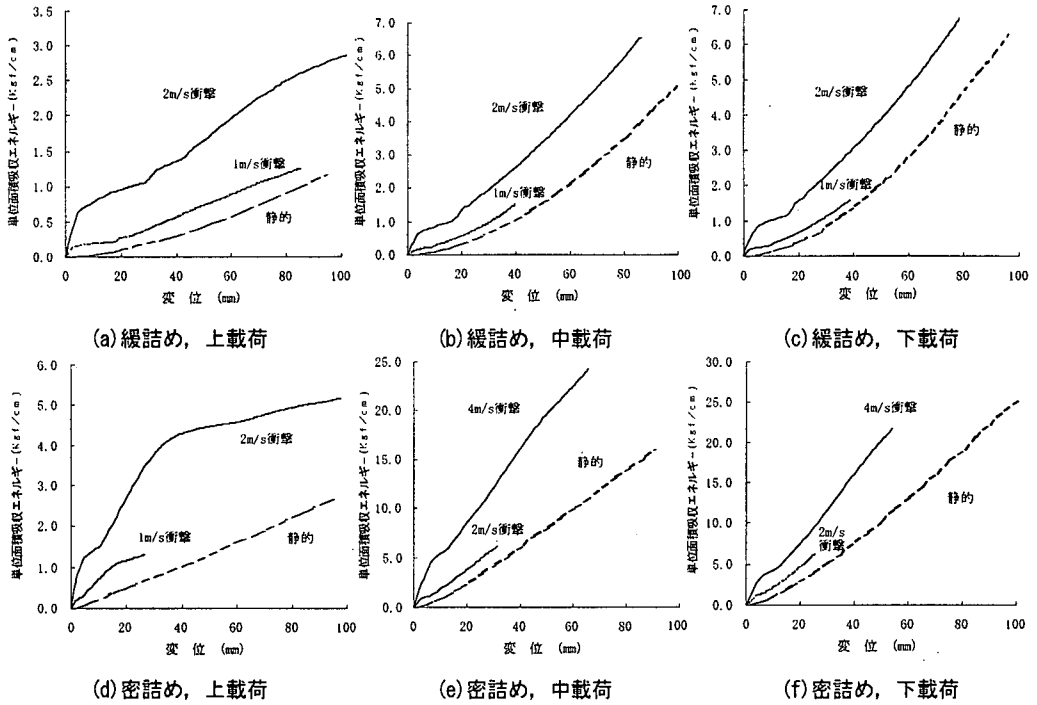


図-10 単位面積吸収エネルギー～変位関係（衝撃実験）

る。

(4) 吸収エネルギー比～平均変形速度関係

図-11に静的実験と衝撃実験の吸収エネルギー比～平均変形速度関係を示す。ここで、吸収エネルギー比とは、衝撃実験で生じた最大応答変位に対して静的に吸収できるエネルギー(E_s)と重錘の運動エネルギー(E_i)の比を表したものである。また、平均変形速度とは、最大応答変位を最大応答変位に達する時間で除したものである。これより、平均変形速度が大きくなるにつれて、吸収エネルギー比が大きくなるのがわかる。参考までにこれを最小二乗法で近似すると次のようになる。

a. 緩詰め $E_i/E_s = 0.19v + 1.0$ (2)

b. 密詰め $E_i/E_s = 0.50v + 1.0$ (3)

(5) 変形形態

中詰材の変形形態を確認するために、色砂を用いて視覚化を行い、その現象を高速ビデオを用いて撮影を行った。図-12～15は、衝撃実験の局部変位10cmにおける画像データを処理して静的実験のものと比較したものである。図-12(a)に示した静的の緩詰めの上載荷では、載荷点から前方へ40cm付近までの中詰材に変形が生じているが、図-12(b)の衝撃では載荷点の前方20cm以内の中詰材のみが変形している。また、その変形は衝撃の場合の方が線の間隔が狭くなっており、載荷点付近に変形が集中する特徴が見られる。図-13は、密詰めの上載荷の変形状態を示す。この場合、衝撃によって変形範囲が狭められることなく、すべり線も形成されている。また、衝撃では、動いた土塊が静的のものよりも大きく、ほぐれたような体積膨張が現れている。図-14、15には、中載荷の緩詰めおよび密詰めの変形挙動を示すが、総合的に見て、衝撃荷重の場合は、載荷器具近傍の中詰材に変形が集

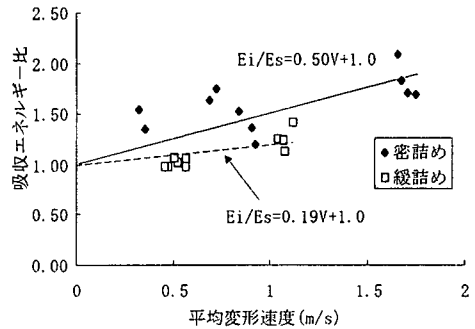


図-11 吸収エネルギー比～平均変形速度

中することがわかる。すなわち、静的には深くなるにつれて、また、緩く詰めることによって中詰材の変形が局部に集中し、明瞭なせん断すべり線が形成されないことを示したが、衝撃では、载荷速度が速くなるにつれてこの傾向が強まることがわかる。

4. 結 言

本研究の成果を要約すると以下のようになる。

(1) 側方からの局部変形を受ける中詰材の抵抗圧は、中詰材の詰め方を密にするほど、载荷点が深いほど大きくなる。

(2) 静的実験における密詰めの中詰材の変形形態では、体積変化が少ないため、かなり深いところにおいても明瞭なすべり線が形成されるが、緩詰めでは载荷部近傍の変形に集中する。

(3) この結果、緩詰め抵抗圧～変形関係は、単純漸増型を示すのに対し、密詰めでは、限界値のある弾塑性型の挙動を示した。

(4) 衝撃実験における抵抗圧～変形関係は、変形初期に山形の大きな抵抗を示すが、その後の抵抗圧と変形量の関係は、静的なものを相似的に大きくしたものとなる。

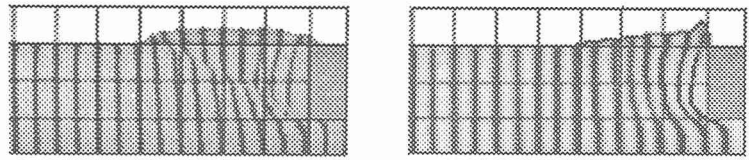
(5) 衝撃抵抗圧の静的抵抗圧に対する増加比は、変形速度に依存することを示し、変形速度と抵抗圧比の関係式を求めた。

(6) 衝撃実験の変形形態は、静的に比べて载荷点付近に変形が集中することがわかった。

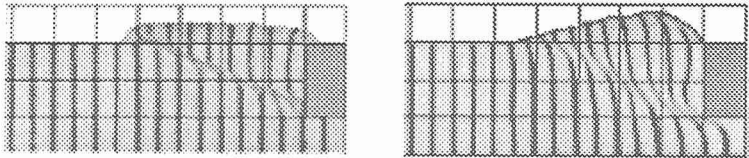
謝辞：本衝撃実験において、八千代エンジニアリング下田義文氏のご援助を頂いた。また、実験にあたり吉岡修君（当時本校学生）のご援助を頂いた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

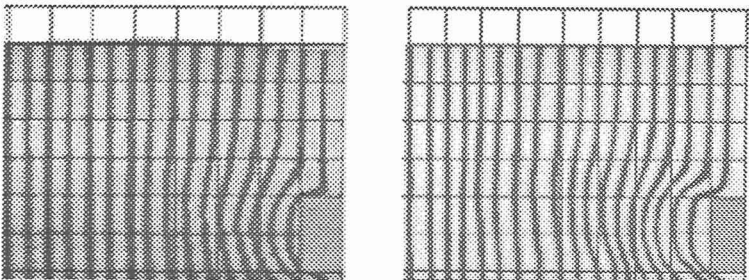
- 1) 伊藤一雄, 香月智, 石川信隆, 阿部宗平, 中村徹: ダブルウォール砂防ダムの衝撃破壊限界に関する実験, 平成7年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 21~24, 平成7年



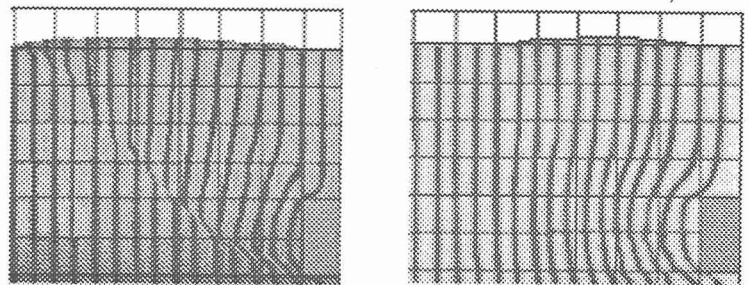
(a) 静的実験 (b) 衝撃実験
図-12 変位10 cmの変形形態(上載荷, 緩詰め)



(a) 静的実験 (b) 衝撃実験
図-13 変位10 cmの変形形態(上載荷, 密詰め)



(a) 静的実験 (b) 衝撃実験
図-14 変位10 cmの変形形態(中載荷, 緩詰め)



(a) 静的実験 (b) 衝撃実験
図-15 変位10 cmの変形形態(中載荷, 密詰め)