

# 鋼製砂防構造物の中詰材のせん断抵抗力および中詰材圧の推定法に関する一考察

香月 智\*・石川信隆\*\*・大平至徳\*\*\*・  
鈴木 宏\*\*\*\*

本研究は、鋼製砂防構造物の礫中詰材のせん断抵抗力および中詰材圧を推定する手法について研究したものである。すなわち、矩形の単純せん断枠および階段型の単純せん断枠の中に数種類の礫中詰材を詰めて、そのせん断抵抗力-変位関係を実験的に求めた。つづいて、実験式および側壁面に生ずる中詰材圧の分布形状モデルを提案し、これを用いて中詰材のせん断抵抗力-変位関係および中詰材圧を推定する手法を示した。

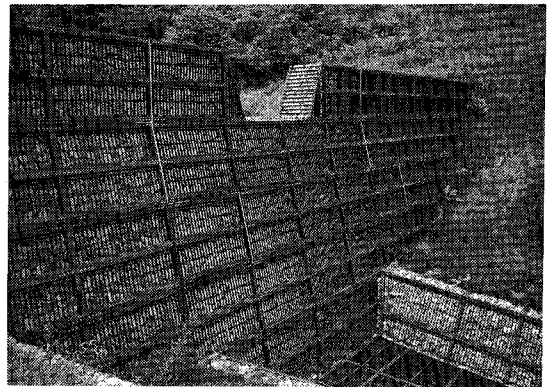
Keywords: fill materials, shear resistance, earth pressure, Sabo structure

## 1. 緒 言

鋼製砂防ダムは写真—1に示すような鋼製枠の中に玉石や礫などの中詰材を詰めて造られる砂防ダムであるが、昭和52年の有珠山の爆発時に、荒廃溪流の復旧および泥流防止対策のために、その季節の影響を受けない短期施工性が着目されて多数採用された。以来その他の地すべり地域等においても逐次その建設数が増加する傾向にある。この鋼製砂防ダムの長所としては先の短期施工性に優れることのほかに、水の透過性が良いため建設後周辺地域に不要な地下水位の変動を招かないこと、屈撓性が大きいこと、支持地盤の不等沈下に対する追従性能が良いこと、さらに軽量のユニット式鋼製部材と現地採取可能な礫材を用いて施工するため山間地での施工が可能などの利点が挙げられる<sup>1),2)</sup>。

しかし、その設計法においてこの鋼製枠と中詰材の一体挙動時の堤体のせん断抵抗力の評価法がまだ不明確であるため、現行においては鋼製枠か中詰材のいずれか一方のせん断抵抗力のみを使って設計することになっている<sup>2)</sup>。これは、構造物全体において過大な安全性を期待するため不経済な設計であるのみでなく、局部的には複合化することによる相互作用力を正當に評価しないため危険な設計となることも考えられる。

ところで、この2つの構造のうち鋼製枠に対しては従来の構造計算手法により解析が可能であるが、中詰材せん断抵抗力に関しては既往の研究が少なく、海岸の護岸構造物である鋼矢板セルおよび鋼板セルについて行った北島の研究<sup>3)-5)</sup>が見当たるのみであり、現行設計におい



写真—1 鋼製砂防構造物の一例

てもこの抵抗式を採用している<sup>2)</sup>。しかしながら、この研究は基本的に砂を中詰材として用いた場合の研究であり、礫材を中詰材として用いた場合についての検討はまだ行われていない。

従来、著者らはこれを解明するための第一歩として、碎石の中詰材とラーメン枠を用いた研究を行い、鋼製枠と礫中詰材の相互作用について基礎的に検討し<sup>6),7)</sup>、その結果、単純せん断枠の中詰材のせん断抵抗力の評価方法を確立することが重要であるとの結論を得た。また、コンクリート円筒要素によって中詰材をモデル化した実験とそのシミュレーション解析を行い、矩形単純せん断枠の中詰材のせん断抵抗力-変位関係を基礎的に検討した<sup>8),9)</sup>。その結果、中詰材せん断抵抗力は中詰材中にあたかもプレースのような力の伝達機構が形成されることによって生起するものであることなどが明らかになった。

しかし、実際の鋼製砂防構造物の解析法において中詰材せん断抵抗力の影響を同時に考慮した解析を行うためには、堤体のせん断変形量に対応した中詰材のせん断抵抗力およびその中詰材圧の分布を知る必要があるが、

\* 正会員 防衛大学校助手 土木工学教室  
(〒239 横須賀市走水1-10-20)

\*\* 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室

\*\*\* 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室

\*\*\*\* 正会員 農博 砂防・地すべり技術センター理事

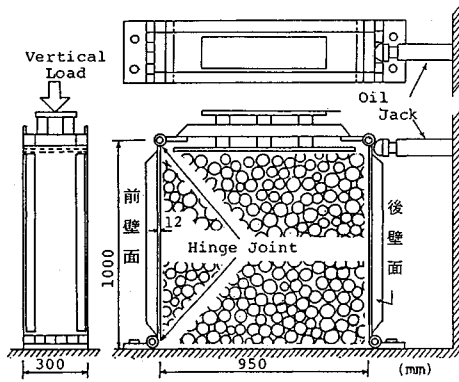


図-1 矩形単純せん断枠実験装置

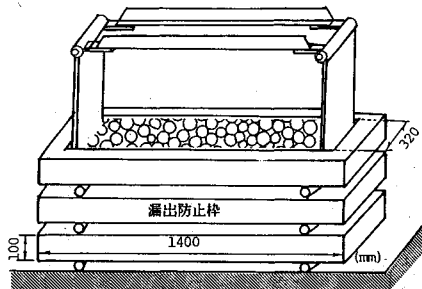


図-2 漏出防止枠

前述の研究成果ではまだこれらを解明するには至っていない。

そこで本研究は、これらの問題を解決するために、まず矩形単純せん断枠による礫中詰材のせん断抵抗力～変位関係に関する実験を行い、続いて実構造物を縮小モデル化した階段型の単純せん断枠による同種礫中詰材のせん断抵抗実験を行った。そして、矩形単純せん断枠の実験結果において、礫中詰材のせん断強度特性と上載荷重の影響を含んだ形の無次元化せん断抵抗力によって、すべてのせん断抵抗力～変位関係を1つの平均化した弾塑性挙動として表わす実験式を提案した。また、矩形単純せん断枠中に生起する礫中詰材圧分布を簡単な分布形状によって推定する手法を提示した。さらに、この分布を階段型の単純せん断枠内の礫中詰材圧分布に適用することにより、実物モデル形状である階段枠単純せん断実験におけるせん断抵抗力～変位関係およびそれに対応する礫中詰材圧分布を推定する手法を開発した。

## 2. 矩形単純せん断枠実験

### (1) 実験の概要

#### a) 実験装置および計測項目

実験装置は、図-1に示すように幅95 cm、高さ100 cm、奥行幅30 cmの、枠自体はせん断抵抗力をもたない矩形単純せん断枠である。ところで、前回は行った実験では<sup>6)</sup>、中詰材の漏出防止のために、1枚の鋼製側壁板

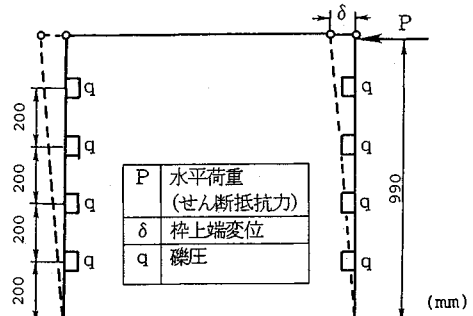


図-3 矩形単純せん断枠実験計測項目

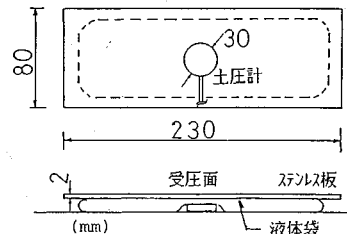


図-4 礫圧計

を設置したため、中詰材と漏出防止板との間に発生する摩擦の影響を取り除くことができなかった。よって本装置では、この端面摩擦の影響を取り除くため、図-2に示すような方形の鋼製枠を、枠の間にコロを挟みながら積み上げるものに改良した。計測項目は、図-3に示すように枠上端に作用する水平荷重  $P$  (中詰材のせん断抵抗力)、荷重作用点の水平変位  $\delta$ 、および単純せん断枠の前・後壁面に働く中詰材圧である。中詰材圧は、礫材の接触状態の不整を均等化するように図-4に示すような土圧計を液体袋 (アイスノン) を用いて改良した礫圧計によって計測した。

#### b) 中詰材

実験に用いた中詰材は、角張った形状をもつ礫径の異なる単粒度碎石6号、単粒度碎石4号および割栗石と、形状が丸い玉砂利の4種類である。各礫材の粒径分布は図-5に示すようになり、各礫材の粒径はそれぞれきわめて均等であることがわかる。

中詰材の詰め方としては、約10 cm厚ごとに軽く敷きならす緩詰めとした。この詰め方での礫材の単位体積重量等の各礫材のもつ基礎的な諸元値は表-1に示すとおりである。なお、表-1に示した内部摩擦角は、図-6に示す平面寸法32 cm×42 cmの一面せん断箱によって測定した。この大きさは、図-2に示す漏出防止枠と同じ幅であるので、枠と礫径との相対的な大きさが実験に及ぼす影響は、矩形単純せん断枠実験とおおむね等しくなっている。

#### c) 実験ケース

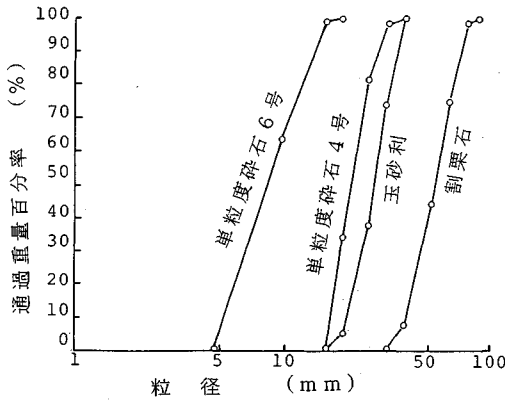


図-5 中詰材の粒径分布

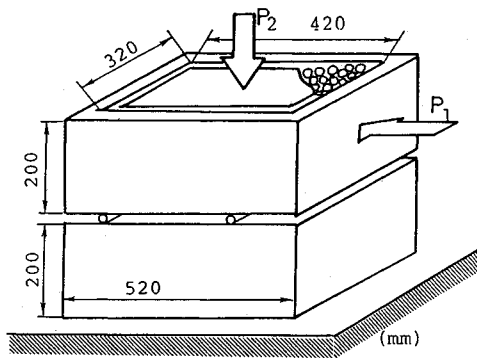


図-6 一面せん断箱

表-1 中詰材の諸元値

碾種類	単粒度砕石6号	単粒度砕石4号	割栗石	玉砂利
粒径範囲(mm)	5~13	20~30	40~80	10~40
呼称粒径	10mm	25mm	60mm	30mm
重量平均径(mm)	9.6	22	53	27
形状	角あり	角あり	角あり	丸い
碾比重	2.55	2.67	2.61	2.70
内部摩擦角(°)	36	48	51	45
砕詰時 自重(kgf)	405	415	394	433
単位体積重量 (t/m³)	1.49	1.52	1.45	1.59
間隙比	0.714	0.757	0.80	0.699

実験ケースは、中詰材の種類と上載荷重の大きさを組み合わせて表-2に示す12ケースとした。ここで、上載荷重167 kgf, 299 kgfはそれぞれ中詰材自重の約40%および75%に相当する。

(2) 実験結果

a) 中詰材せん断抵抗力-変位関係に及ぼす上載荷重の影響

図-7に単粒度砕石6号の場合の中詰材せん断抵抗力-変位関係を示す。これより、同じ実験ケースにおける2つの実験結果は非常に一致しており、実験自体の再現性が確認されるとともに、中詰材せん断抵抗力-変位関係は、硬化型の弾塑性挙動を示し、同一変位におけるせん断抵抗力の大きさは上載荷重と中詰材自重の和に対し、ほぼ比例的に増加していることが認められる。

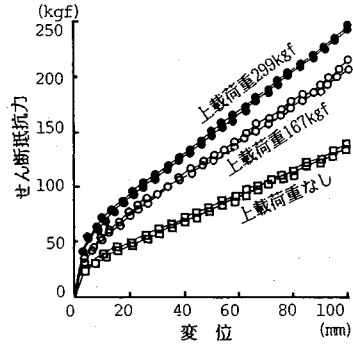


図-7 せん断抵抗力~変位関係に及ぼす上載荷重の影響 (単粒度砕石6号, 粒径10mm)

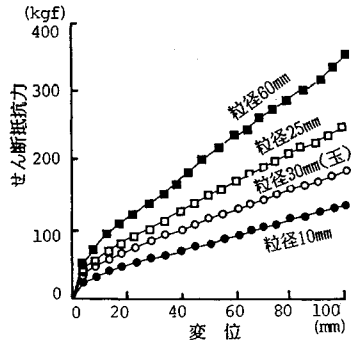


図-8 せん断抵抗力~変位関係に及ぼす碾種類の影響 (上載荷重なし)

表-2 実験ケース

ケース	碾種類	上載荷重 (kgf)	上載圧力 (kgf/cm²)	底面圧力 $\sigma_v$ (kgf/cm²)
CASE 1	単粒度砕石6号 (10mm)	0	(0)	0.142
CASE 2		167	(0.059)	0.200
CASE 3		299	(0.105)	0.247
CASE 4	単粒度砕石4号 (25mm)	0	(0)	0.145
CASE 5		167	(0.059)	0.204
CASE 6		299	(0.105)	0.250
CASE 7	割栗石 (60mm)	0	(0)	0.138
CASE 8		167	(0.059)	0.197
CASE 9		299	(0.105)	0.243
CASE 10	玉砂利 (30mm)	0	(0)	0.152
CASE 11		167	(0.059)	0.210
CASE 12		299	(0.105)	0.256

b) 中詰材せん断抵抗力-変位関係に及ぼす碾種類の影響

図-8には上載荷重を載せない場合の中詰材せん断抵抗力-変位関係を碾材の種類ごとに比較して示している。これより、中詰材の粒径が大きくなるにつれて中詰材せん断抵抗力が明瞭に大きくなっていることが認められる。ただし、玉石は碾径が単粒度砕石4号より大きいにもかかわらず、そのせん断抵抗力は単粒度砕石4号より小さい。これは、形状が丸いため碾材粒子間の滑り抵抗が小さく、表-1に示すように内部摩擦角が小さいためと考えられる。

c) 中詰材せん断抵抗力~変位関係の無次元化

実験結果によると、中詰材の種類や、その重さ(上載荷重を含めた)によってせん断抵抗力は異なっている。

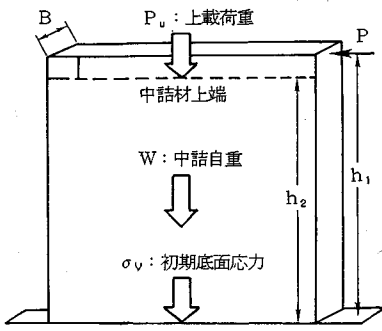


図-9 無次元化せん断抵抗力の記号

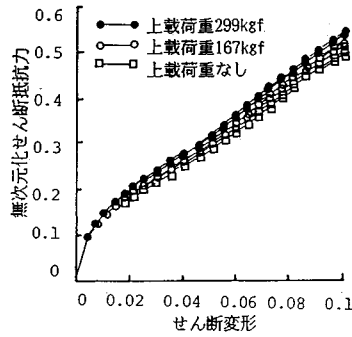


図-10 無次元化せん断抵抗力～せん断変形関係に及ぼす上載荷重の影響 (単粒度砕石6号, 粒径10mm)

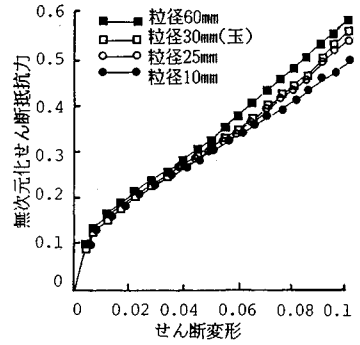


図-11 無次元化せん断抵抗力～せん断変形関係に及ぼす礫種類の影響

その傾向を分析すると、①中詰材および上載荷重による垂直方向の拘束力が強まるとせん断抵抗力が増加する。②表-1で示した中詰材の諸元値の中でせん断抵抗力に大きな影響を及ぼす要因は内部摩擦角であり、内部摩擦角が大きくなるとせん断抵抗力も大きくなる関係が認められる。③また、本実験で得られるせん断抵抗力は単一水平荷重であるのでその載荷高さによって荷重値が異なることが推測される。

そこで、上記の①、②、③の影響について比例要因は分母側に、逆比例要因は分子側になるように考慮し、以下のように無次元化した。まず計測されたせん断抵抗力を底面周りの単位幅当たりのモーメントに換算したうえで(③に対する処置)、せん断抵抗力を垂直方向の拘束力の代表値として底面における中詰材自重および上載荷重による応力、および中詰材がもつせん断強度の代表値として内部摩擦角による摩擦係数によってこれを除し(①②に対する処置)、さらに棒に作用する中詰材圧の接触長を与える中詰材高さを長さの代表値として使用することにより、次式のような無次元化式によって、その弾塑性挙動を標準化することを試みた。

$$\bar{M} = \frac{P \cdot h_1 / B}{\sigma_v \cdot h_2^2 \cdot \tan \phi} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、式(1)の記号は図-9に示すもので、 $\bar{M}$ : 無次元化されたせん断抵抗力、 $P$ : 計測されたせん断抵抗力、 $h_1$ :  $P$ を計測した高さ、 $B$ : せん断棒の奥行き幅、 $\sigma_v$ : 各実験ケースごとの詰め込み時の底面における垂直応力  $\{=(W+P_u)/A\}$ 、 $W$ : 中詰材の全自重、 $P_u$ : 上載荷重、 $A$ : 底面積、 $h_2$ : 中詰材の詰め込み高さ、 $\phi$ : 中詰材の内部摩擦角。

また、計測された上端変位量も次式によるせん断変形量  $\gamma$  として評価するものとした。

$$\gamma = \delta / h_1 \dots \dots \dots (2)$$

図-7に示した単粒度砕石6号のすべての実験結果を

式(1)、(2)によって処理すると、無次元化せん断抵抗力-せん断変形関係は図-10に示すようになる。これより、上載荷重による影響はほとんど式(1)によって標準化され、1つの弾塑性挙動群にまとめられることがわかる。そこで各礫材ごとにこの無次元化せん断抵抗力-せん断変形関係を平均したうえで、各礫材ごとの無次元化せん断抵抗力-せん断変形関係を示すと図-11のようなになる。これより、図-8にみられたような礫材ごとのせん断抵抗力の相違がなくなり、異種礫材間においても、ほぼ1つの弾塑性挙動群にまとめられることがわかる。

d) せん断変形に伴う礫圧分布の変化

図-12に矩形棒を用いた実験における各変位ごとの前壁面および後壁面に生ずる礫圧分布を示す。これより、①礫材を詰めた直後すなわち変位  $\delta=0.0\text{mm}$  においては、前・後壁面にほぼ対称な礫圧分布が得られる。つまり、礫圧は当初内部においてつり合っていることがわかる。②次に変位が増加すると、前壁面においては上部の礫圧はいったん減少した後、微少に増加するが、下部の方は変位の増加とともに礫圧が増加している。③後壁面においては明瞭に変位の増加につれて礫圧が増加する。その増加礫圧の分布形状はおおむね逆三角形となっている。④各変位ごとの前壁面と後壁面の礫圧分布では、明瞭に後壁面の方が大きくなっている。すなわち、この後壁面と前壁面の礫圧の差の合計(これを水平方向のつり合い力とよぶ)が水平外力とつり合うことを意味しており、このつり合いが中詰材のせん断抵抗力そのものとなっている。

(3) 矩形せん断棒のせん断抵抗力-変位関係の推定式

矩形棒内のせん断抵抗力-変位関係を解析的に求めるためには、矩形棒内における礫材の変形挙動モデルを詳細に検討したうえでモデル化を行い<sup>10)</sup>、そのモデルを用いた弾塑性解析法によって、そのせん断抵抗力-変位関係を求めることができる。しかし、この矩形棒内における中詰材の挙動に及ぼす要因を推察すると、まず礫材の

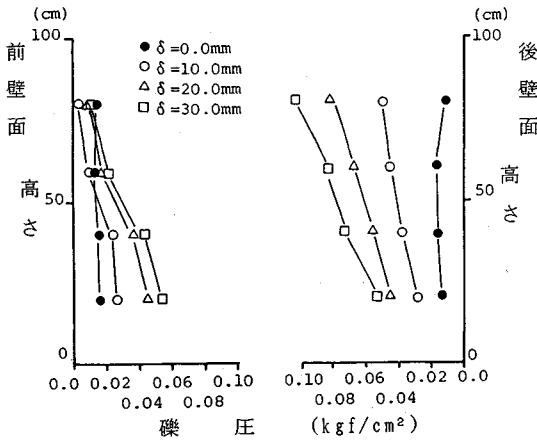


図-12 矩形枠内の礫圧分布

ダイレクション、およびその偏在、またダイレクションと応力の関係、礫材のもつ基本的な要因(たとえば形状、もろさ、摩擦強度等)など非常に多くの要因が考えられ、このような解析モデルを提案するにはさらにより詳細かつ膨大な研究が必要ではないかと思われる。また設計時に必要な解析手法は、使用時の簡便性も要求されることを考えて、本研究においては実験式の形でこれを与えることを提案する。

すなわち、図-10, 11で観察されたように、式(1)、(2)による無次元化せん断抵抗力~せん断変形関係は、ほぼ1つの弾塑性挙動にまどまることに着目し、この非線形関係を表わす実験式によって、矩形枠のせん断抵抗力-変位関係を推定することを考えた。

この非線形関数の形としては、無次元化せん断抵抗力-変位関係が硬化型の弾塑性関係になっていることを考慮して、次式のような線形モデル項と両対数モデル項の和によって表わされるものとした<sup>11)</sup>。

$$\bar{M} = a \times (\gamma) + b \times (\gamma)^c \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $\bar{M}$ :式(1)の形で求められる無次元化せん断抵抗力、 $\gamma = \delta/h$ :堤体のせん断変形量、 $\delta$ :堤体の上端変位量、 $h$ :中詰材(堤体)の高さ、 $a, b, c$ :実験定数である。

ここで、第1項は図-13に示すように弾塑性挙動の硬化域の勾配を示す項であり、第2項はこの線形式からの盛り上がりを示す非線形項となっている。特に係数 $c$ はこの非線形性の強さを表わす定数となっており、この値が小さいほど無次元化せん断抵抗力は小さなせん断変形領域で急激に大きくなることを示している。

よって、実際の相互作用解析の際に用いられる小さなせん断変形領域において安全側の推定を与えることなどを考慮して、最小2乗法によって求めると、実験式は次式のようになる。

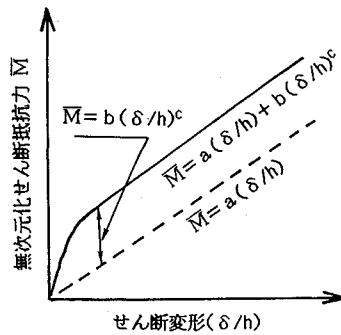


図-13 実験式の形

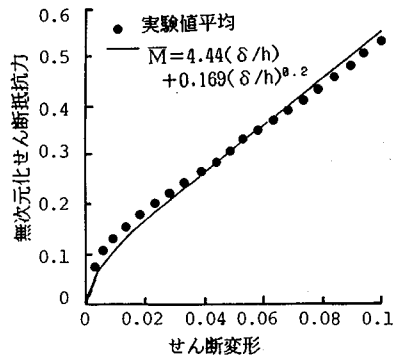


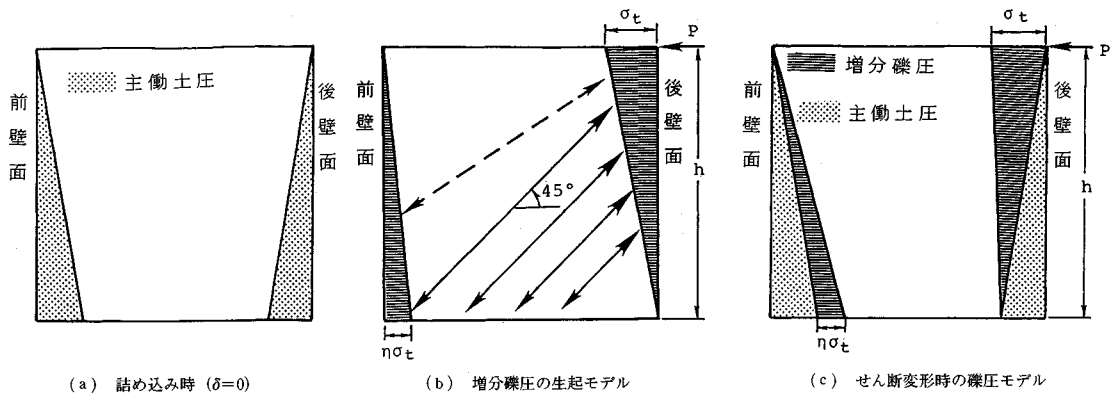
図-14 実験値と推定値の比較

$$\bar{M} = 4.44 \times (\gamma) + 0.169 \times (\gamma)^{0.2} \dots \dots \dots (4)$$

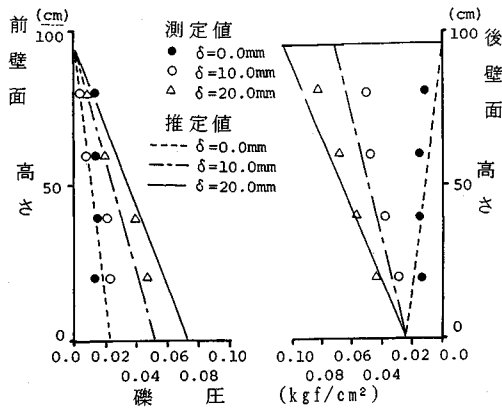
図-14は、式(4)の推定値と、図-11に示した全部の実験結果の平均値の実験値とを比較図示したもので、当然のことながら推定式は実験値をよく表わしている。

(4) 矩形枠内の礫圧分布の推定法

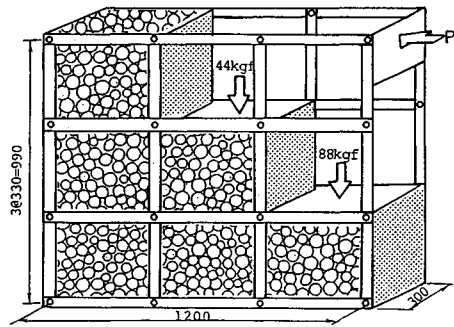
図-12における実験結果の観察から、矩形枠内の礫圧分布モデルを図-15に示すように仮定する。すなわち、まず詰め込み時における礫圧は、図-15(a)に示すように前壁面と後壁面に対称な主動土圧分布が生じるものとする。この場合、礫圧が枠内においてつり合い状態となっていることは、定性的に実験結果と一致する。続いて、堤体にせん断変形が生ずることによる礫圧増分の分布モデルを図-15(b)のように仮定する。すなわち、まず本実験の結果から後壁面の増分礫圧分布を逆三角形とする。この後壁面の増分礫圧の力の伝達機構を、著者らの行った円筒形コンクリート要素を用いた実験とその数値解析の結果を参考にして<sup>8)</sup>、図-15(b)に示すようにあたかも中詰材内部にプレースのような伝達機構が生じるものと考えた。よって後壁面の増分礫圧は、主として底面と45°の角度で伝わる伝達パスによって底面にその反力を得るものとする。しかしながら、礫材は完全に区画化されたこのパスだけによって力を伝える



図一15 矩形枠内の礫圧分布モデル



図一16 矩形枠の礫圧分布の推定値と実験値の比較



図一17 階段型単純せん断枠実験装置

のではなく、一部は、図中破線で示すように、前壁面に対してもその反力を得るパスを形成するため前壁面での礫圧増分を形成するものとする。よって、後壁面の増分礫圧の基準値  $\sigma_t$  に対して、前壁面の基準値は  $\eta$  ( $< 1.0$ ) の低減係数を乗じたものが生じるものとした。

よって、堤体にせん断変形が生ずるときの礫圧分布は図一15 (c) に示すように初期の主働土圧に加えて後壁面側では、逆三角形の増分礫圧が、また前壁面側には三角形の増分礫圧が生じるものとする。このような仮定に基づいてこの枠に働く礫圧および外力のせん断抵抗力の底面からのモーメントのつり合いを計算すると、まず外力の単位幅当たりモーメント  $M_E$  (反時計回り) は次式によって求められる。

$$M_E = P \cdot h / B \quad (5)$$

ところで、この  $P$  は明らかに式 (1) において一般に  $h = h_1 = h_2$  であることを考慮すると、同時に次式が成立する。

$$M_E = \bar{M} \cdot \sigma_u \cdot h^2 \cdot \tan \phi \quad (6)$$

また、ここで  $\bar{M}$  は式 (4) を満足するものである。

次に、増分礫圧によって形成される内力のモーメント  $M_i$  (時計回り) は、次式によって与えられる。

$$M_i = (1 - \eta / 2) \sigma_t h^2 / 3 \quad (7)$$

さらに、モーメントのつり合いによって、

$$M_E = M_i \quad (8)$$

となることを考慮して、式 (1) および式 (5)~(8) を連立して解くと礫圧分布の基準値  $\sigma_t$  が次式のように求められる。

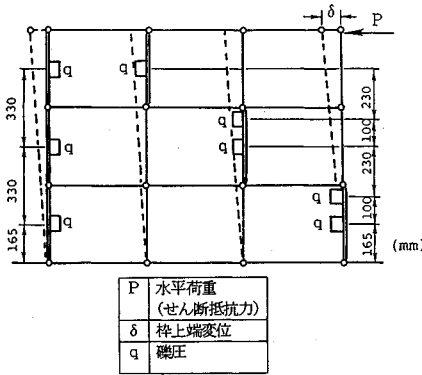
$$\sigma_t = 3\bar{M} \cdot \sigma_u \tan \phi / (1 - \eta / 2) \quad (9)$$

ここで式 (9) は、式 (4) によって与えられる  $\bar{M}$  を含むため、せん断変形量  $\gamma$  の関数となっている。

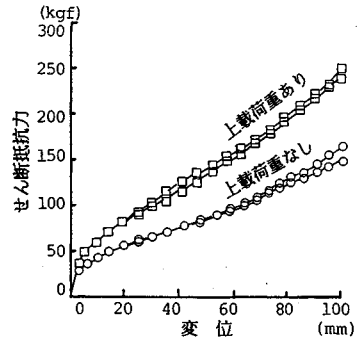
図一16に、図一12で示した実験結果に対して式 (9) によって推定した礫圧分布を比較図示する。なお、推定式において主働土圧係数  $K_a$  および  $\eta$  は次式の値を用いた。

$$K_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi) \quad (10)$$

$$\eta = 0.5 \quad (11)$$



図—18 階段型単純せん断柱実験計測項目



図—19 せん断抵抗力-せん断変位関係に及ぼす上載荷重の影響 (単粒度碎石 4 号, 粒径 25 mm)

表—3 階段型単純せん断柱実験ケース

ケース	礫種類	上載荷重	ケース	礫種類	上載荷重
CASE 1	単粒度碎石 6 号	なし	CASE 5	割栗石	なし
CASE 2	(10mm)	あり	CASE 6	(60mm)	あり
CASE 3	単粒度碎石 4 号	なし	CASE 7	玉砂利	なし
CASE 4	(25mm)	あり	CASE 8	(30mm)	あり

図より、式 (9) による推定式は実験値を良く表わしている。ただし、推定式はやや実験値よりも大きな礫圧を与えるが、このことは実構造の解析においては一般的に壁面部材に対して大きな荷重を強いることとなるので安全側の予測となる。

### 3. 階段型単純せん断柱実験

次に、実際の鋼製枠砂防構造物への適用を図るため、実構造をモデル化した階段型の単純せん断柱実験を行い、前述の矩形枠実験の場合と同様な測定を行った。

#### (1) 実験の概要

##### a) 実験装置および計測項目

実験装置は、図—17 に示すような幅 120 cm、高さ 100 cm、奥行き幅 30 cm の枠を縦横に 3 分割し階段状にしたものである。このサイズでは 1 つの区画の大きさが 33 cm × 40 cm となっており、標準的な実物の鋼製枠砂防構造物の 1 区画は 2.0 m × 2.4 m 程度であるのに対して約 1/6 の縮小モデルとなっている。各結合部はピン結合となっているため、各区画内の中詰材は枠全体の変形に応じて同じせん断変形をする。また、各はり柱部材は L 形鋼によって作られ十分な剛性を有するため、枠自体の変形は非常に小さなものとなっている。さらに、実物の構造に準拠して、中詰材の詰められた隣接する区画部は壁面を設けていないため、中詰材はその間を自由に移動できる構造となっている。

また、実物の枠ダムでは後背地に貯砂が貯って枠ダムに上載荷重として作用することの影響をみるために、図—17 に示すような 44 kgf および 88 kgf の上載荷重を載荷する場合の実験も行った。なお、この荷重の大きさはおおむねこの枠において空白となっている領域の中詰材

の自重値に等しくなっており、ちょうどこの部分に満砂状態の堆砂圧が作用することをモデル化している。

計測項目は、図—18 に示すように枠上端に作用する水平荷重  $P$  (中詰材のせん断抵抗力)、荷重作用点の水平変位  $\delta$ 、および前・後壁面に働く中詰材圧である。

##### b) 実験ケース

矩形枠実験のものと同じ 4 種類の中詰材を用い、上載荷重を載せる場合と載せない場合の組合せにより、表—3 に示す 8 ケースの実験を行った。

#### (2) 実験結果

##### a) 中詰材せん断抵抗力-変位関係

図—19 に単粒度碎石 4 号 (粒径 25 mm) のせん断抵抗力-変位関係を示す。各ケースごとの 2 つの実験値はよく一致しており、実験の再現性が確認されるとともに、矩形枠の場合と同様に、上載荷重を加えると抵抗力が増すことがわかる。また、この値を図—8 の上載荷重なしの場合における矩形枠のもの (粒径 25 mm) と比較すると、階段枠のものの方が明瞭に小さなせん断抵抗力となることがわかる (たとえば、変位 100 mm のとき矩形枠では約 250 kgf、階段枠では約 150 kgf)。

##### b) 中詰材せん断抵抗力の無次元化

図—20 に式 (1)、(2) による無次元化せん断抵抗力~せん断変形関係を示す。これより、階段枠においても式 (1)、(2) による無次元化は、上載荷重の影響をうまく標準化できていることがわかる。

図—21 には、矩形枠の場合と同様に各中詰材ごとに平均化した無次元化せん断抵抗力~せん断変形関係を比較図示する。これより、階段枠の場合には、矩形枠の場合ほどうまく 1 つの弾塑性挙動にまとめることはできないが、おおむねまとまった弾塑性挙動群になることが認

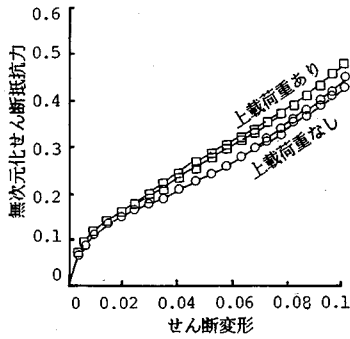


図-20 無次元化せん断抵抗力-せん断変形関係に及ぼす上載荷重の影響 (単粒度砕石4号, 粒径25mm)

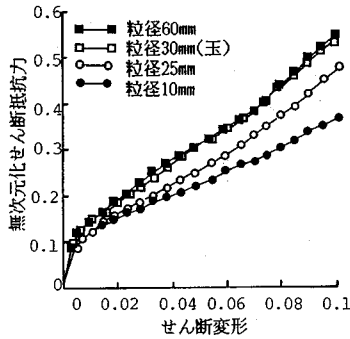


図-21 無次元化せん断抵抗力-せん断変形関係に及ぼす礫種類の影響 (段階型単純せん断枠)

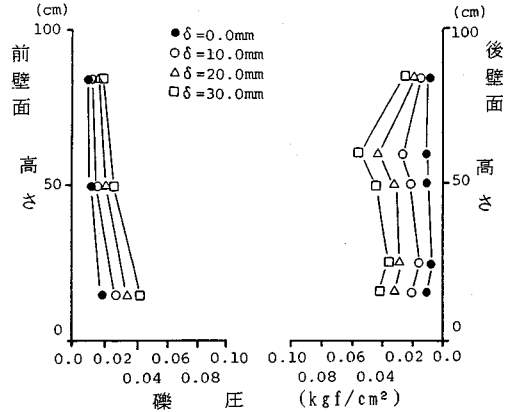


図-22 階段型枠内の礫圧分布 (単粒度砕石4号, 粒径25mm)

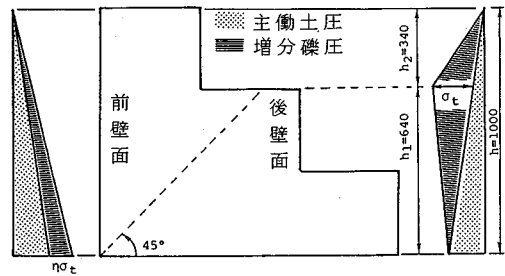


図-23 階段枠内の礫圧分布モデル

められる。

c) せん断変形に伴う礫圧分布の変化

図-22は、階段枠の場合の礫圧分布を示したもので、階段枠の場合は前壁面の傾向はほぼ矩形枠の場合と同じであるが、後壁面においてはその形状が矩形枠の場合と異なり、礫圧の明瞭な増加を得られる高さがおおむね第2段目の後壁面までであり、最上段の枠における後壁面の礫圧の増加はやや小さくなっていることがわかる。また、各変位ごとの前壁面と後壁面の礫圧の差が生ずることは、矩形枠の場合と同じ傾向であるが、その大きさは矩形枠の場合に比べ小さい。すなわち、このことが前述の階段枠のせん断抵抗力が矩形枠のものより小さくなることと対応しているものと思われる。

4. 階段型枠内の礫圧分布およびそのせん断抵抗力の推定法

(1) 礫圧分布のモデル化

実験結果の観察と矩形枠内の礫圧分布の機構モデルを考慮して、階段枠内の礫圧分布のモデルを図-23に示すように仮定する。すなわち、まず第一に中詰された直後は前・後壁面に主働土圧分布が付き合った状態で生じるものとする。

続いて、せん断変形が生じると増分礫圧が生ずるがそ

の形状は以下になるものと仮定する。図中に示すように前壁面下部から45°に延びる線と後壁面が交わるまでの高さを $h_1$ とすると、これまでの高さにおける中詰材は図-15(b)に示したブレース機構による力の伝達が可能であるので矩形枠の推定法によって求められる礫圧分布が形成されるものとする。また、これより上側の後壁面および前壁面においては、それぞれ基準値 $\sigma_t$ および $\eta\sigma_t$ を底辺とする三角形とした。このような仮定に基づくと、まず礫圧増分の基準値 $\sigma_t$ は矩形枠と同様に次式によって求められる。

$$\sigma_t = 3\bar{M} \cdot \sigma_v \tan\phi / (1 - \eta/2) \dots \dots \dots (12)$$

ただし、段階枠の場合 $\sigma_v$ は空白部分の礫材自重が重なるため矩形枠のものよりも小さな値となる。続いて基準値 $\sigma_t$ が求めれば、前・後壁面の分布形状を当てはめることによってそれぞれの礫圧が求められる。

(2) せん断抵抗力-変位関係の推定法

またこの増分礫圧分布によるモーメント $M_i$ は次のようになる。

$$M_i = (h_1^2 + 1.5h_1h_2 + 0.5h_2^2 - 0.5\eta h^2) \times \bar{M} \cdot \sigma_v \tan\phi / (1 - \eta/2) \dots \dots \dots (13)$$

式(5)、(8)と連立して解いて階段枠のせん断抵抗力



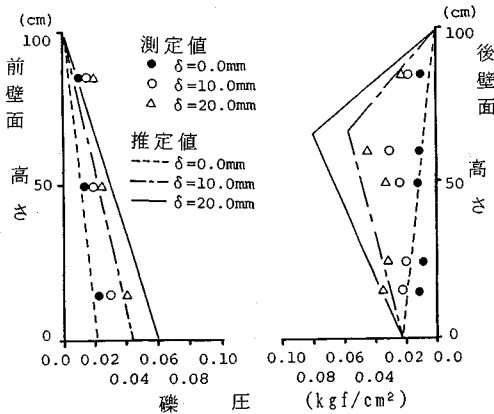


図-24 階段枠の礫圧分布の推定値と実験値の比較

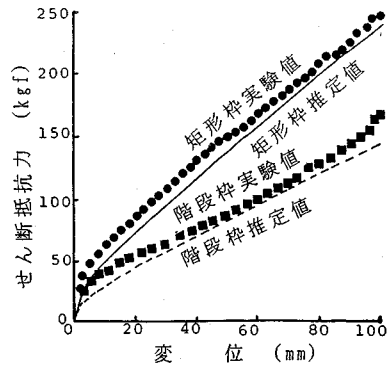


図-25 階段枠のせん断抵抗力-変位関係の推定値と実験値の比較

$P$  を求めると次式が得られる。

$$P = (h_1^2 + 1.5h_1h_2 + 0.5h_2^2 - 0.5\eta h^2) \cdot B \times \bar{M} \cdot \sigma_v \tan \phi / \{(1 - \eta/2) \cdot h\} \dots (14)$$

図-24 に式 (13) を用いて推定した礫圧分布と図-22 で示した実験値とを比較して示す。これより、式 (12) の推定値は後壁面においてかなりの過大推定値を与えるが、一般的にその傾向を良く把握しているものと思われる。また、矩形枠の場合と同様にここで過大評価することは安全側の推定であることを考慮すると、この差は実用上問題はないと考える。

図-25 には、式 (14) によって推定したせん断抵抗力-変位関係と実験値とを比較して示す。また参考のためこの礫材 (単粒度砕石 4号) に対する矩形枠の実験値と推定値も示す。これより図-24 で示した礫材圧に対応して得られる階段枠のせん断抵抗力-変位関係は、実験値よりやや小さな安全側の推定値を示すことがわかる。またこの差異は、この中詰材の場合矩形枠においてもほぼ同程度の差異が生じていることもわかる。

### 5. 結 言

本研究は、鋼製枠砂防構造物の中詰材と鋼製骨組との相互作用を考慮した解析を行うため、中詰材のせん断抵抗力～変位関係および礫圧分布の推定法を確立することを目的とした。このため矩形枠および階段型の単純せん断枠に礫中詰材を詰めたせん断抵抗実験を行い、その結果得られたせん断抵抗力～変位関係および礫圧分布に対する簡易なモデル化によって得られた推定法を提案し、その適用性について検討したものである。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

(1) 矩形枠の中詰材のせん断抵抗力-変位関係は、変形硬化型の弾塑性挙動を示し、その抵抗力は中詰材自重および上載荷重が大きくなるにつれて増加する。また、中詰材の礫種類においては、礫径の増加につれて大きく

なる。

(2) 階段枠の中詰材のせん断抵抗力-変位関係も矩形枠と同じ変形硬化型の弾塑性挙動を示す。

(3) 矩形枠における中詰材の弾塑性挙動は、式 (1)、(2) の無次元化式を用いて整理すると、矩形枠、階段枠ごとにほぼ 1 つの弾塑性挙動に標準化することができる。

(4) 標準化された弾塑性挙動は、式 (4) による実験式によって、無次元化せん断抵抗力-せん断変形関係の関数式として表わすことができる。

(5) 矩形枠内の礫圧分布は、図-15 に示したような簡易なモデル化によって表わすと実験結果を良く推定できる。

(6) 階段型の枠内の礫圧分布形状は、図-23 のように矩形枠の礫圧分布を応用したモデルを用いることによってほぼ実験値を推定できる。また、その結果得られるせん断抵抗力-変位関係も実験値をほぼ推定できる。

(7) 以上より、本研究で提案した推定式は、鋼製骨組の解析と組み合わせることによって、中詰材のせん断抵抗力を同時に考慮した解析手法が可能になるものと考えられる。

(8) なお、式 (4) は実験式であるので、実験式を用いずに推定する手法を得るためには、今後、実物実験や別の解析手法などのより詳細な研究が必要と思われる。

謝 辞：本研究の実験にあたり、加瀬典文君 (当時本校学生) の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

### 参 考 文 献

- 1) 佐野常昭・鈴木 宏：鋼製治山砂防施設の歴史と現状、新砂防、Vol. 41, No. 1, pp. 84~91, 昭和 63 年 6 月。
- 2) 砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物研究会：鋼製砂防構造物設計便覧、昭和 62 年 10 月。
- 3) 北島昭一：岩盤上のセル構造の破壊について、土と基礎

- Vol. 10, No. 8, pp. 25~33, 1962年10月.
- 4) 北島昭一：セル岩盤の安定性に関する研究，運輸省港湾技術研究所報告，Vol. 12, No. 3, 1962年.
  - 5) 北島昭一・野田節男・中山種清：根入れ鋼板セルの静的挙動，港湾技研資料，No. 375, 1981年6月.
  - 6) 鯉淵芳伸・香月 智・石川信隆・鈴木 宏：鋼製砂防構造物の中詰材のせん断抵抗力に関する実験的研究，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，I-27, pp. 108~109, 昭和63年10月.
  - 7) 香月 智・石川信隆・大平至徳・鈴木 宏：鋼製枠骨組と中詰材との共同作用に関する実験的研究，新砂防，Vol. 42, No. 6 (167), pp. 18~23, 1990年3月.
  - 8) 香月 智・石川信隆・大平至徳・鈴木 宏：円筒要素モデルを用いた中詰材のせん断抵抗力に関する基礎的研究，土木学会論文集，第410号/I-12, pp. 359~368, 1989年10月.
  - 9) 香月 智・石川信隆・大平至徳・鈴木 宏：Rowe理論を応用した中詰材のせん断抵抗力の評価式に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 36A, pp. 1337~1346, 1990年3月.
  - 10) 三浦明夫・香月 智・石川信隆：最適化手法を用いた中詰材モデルのせん断抵抗解析，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第1部，I-157, pp. 366~367, 平成元年10月.
  - 11) 蓑谷千鳳彦：回帰分析のはなし，東京図書，1988年4月. (1990.5.24・受付)

## AN ESTIMATION METHOD OF SHEAR RESISTANCE FORCE AND EARTH PRESSURE OF FILL MATERIALS IN THE STEEL MADE SABO STRUCTURE

Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA,  
Yoshinori OHIRA and Hiroshi SUZUKI

This paper presents an estimation method of the shear resistance force and the earth pressure of the fill materials in the steel made Sabo structure by experimental approaches. The experiments have been carried out by applying the horizontal load to the top of the simple shear steel frame of rectangular type and bench type with four kinds of fill materials, respectively. An experimental estimation equation has been proposed for the shear resistance force and earth pressure of fill materials in the rectangular type shear test. By using this equation, the shear resistance force and earth pressure of fill materials in the bench type shear test have been estimated and compared with experimental values. It is found that the proposed estimation method is good agreements with experiments and, as such, it can apply to the design of the steel made Sabo structure such as bench type with fill materials.