

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

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE SHEAR RESISTANCE FORCE OF FILL MATERIALS USING CYLINDRICAL ELEMENT MODEL

香月 智*・石川信隆**・大平至徳***・鈴木 宏****

By Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Yoshinori OHIRA and Hiroshi SUZUKI

This paper presents both experimental and analytical approaches for the shear resistance force of the fill materials in the steel made Sabo structure by using cylindrical concrete element model. At first, the experiments have been performed by applying the horizontal load to the top of the simple shear steel frame with cylindrical concrete elements. The effects of arrangement of fill materials are examined on the movement of an element and the shear resistance force~displacement relation. Then, the shear resistance analysis is performed by introducing the displacement incremental analysis into the distinct element method. By using the input data determined by the simple tests, it has been found that the computational results are in good agreements with the experimental ones.

Keywords: fill materials, shear resistance force, distinct element method

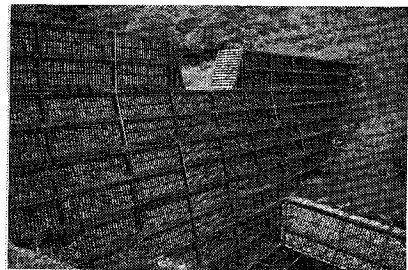
1. 緒 言

地すべり地域・土石流発生予想地区が広く存在するわが国においては、地すべり防止や土石流対策のために、また火山地区においては火山爆発の災害対策のために多数の砂防ダムが建設されている。鋼製枠砂防ダムは写真一1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。この鋼製枠砂防ダムの長所としては先の短期施工性に優れることに加え、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で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¹⁾。

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²⁾。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、部分的には複合化することによる相互作用力を正当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のみについては従来の構造計算手法を用いれば解析が可能であるが、中詰材の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



写真一1 鋼製枠砂防構造物の一例

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

** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室(同上)

*** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室(同上)

**** 正会員 農博 砂防・地すべり技術センター理事
(〒162 新宿区市谷砂土原町3-4)

いて行った北島の研究^{3)~5)}が見当たるとのみであり、現行設計においてもこの設計式を採用している²⁾。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、いまだ礫材を中詰材として用いた場合については検討が行われていない。そこで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、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⁶⁾。しかし、礫中詰材を用いた実験ではせん断抵抗力に及ぼす要因として、①礫材の形状、②礫材の寸法、③礫材の重量または単位体積重量、④礫材の表面の粗度、⑤礫材の強度（もろさ）、⑥礫材の剛性、⑦礫材の詰め込みの密度、⑧中詰材全体の形状、⑨各因子のばらつき等があり、実験結果の中からせん断抵抗力～変位関係に及ぼす重要な因子を特定することや、砂を用いる実験の標準砂のように代表的な中詰材として標準化できる礫中詰材を設定することが困難であり、モデル化等による基礎的な実験研究が必要である。

一方、理論的研究としては粒状体の運動を解く手法の1つとして、カンドル⁷⁾によって提案された個別要素法による解析法があり、木山⁸⁾は、この個別要素法に円形要素モデルを用いることにより、サイロ内に生ずる粉体圧を解析する手法を提案している。さらに吉田⁹⁾は、ロックシェッド上にある敷砂を円形要素にモデル化することにより、敷砂に落石が衝突する際の敷砂の衝撃応答を解析し、そのサンドクッション効果について検討している。またCasaverdeら¹⁰⁾は、岩なだれの現象について個別要素法を用いて解析している。著者らは上記の研究^{7)~9)}を応用して、円形要素モデルを用いた個別要素法による中詰材のせん断抵抗解析法を提案した¹¹⁾が、その解析法の定量的な適用性の検討は未解明なままであった。

そこで本研究は、上記のような問題点を解決するため、まずコンクリート円筒要素によって二次元モデル化された中詰材を用いて単純せん断枠に対する静的水平載荷実験を行い、単純せん断変形する中詰材のせん断抵抗力～変位関係および中詰材要素の挙動観察を行った。次に個別要素法を用いたせん断抵抗力解析法を提案して、せん断抵抗力～変位関係を算出するとともに、要素の移動軌跡とすべり面を数値計算により求めグラフ化し、実験結果と比較することにより本法の妥当性と適用性を検討した。さらに、解析によって得られた中詰材内部に発生する接触力分布から、その力の伝達機構についても考察を加えた。なお、個別要素法に用いる入力定数の一部は、簡易なばね定数決定試験および摩擦係数決定試験を行い、その値を修正して用いた。

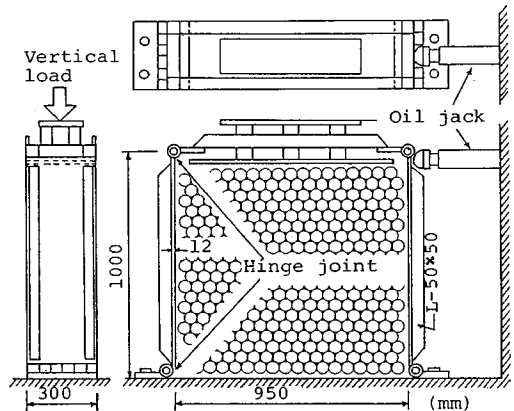
2. 実験方法の概要

(1) 実験装置および計測項目

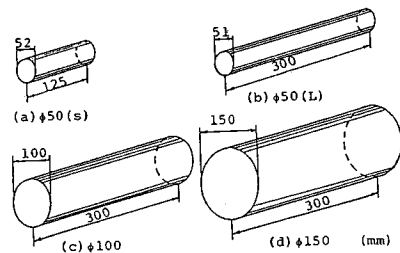
実験装置は、幅30 cmの鋼板を使用した単純せん断枠中にコンクリート円筒要素の中詰材を詰めて、図一1に示すように単純せん断変形中の荷重と変位を測定するものである。使用した鋼板は、厚さ12 mmのものであり、L型鋼のフランジを溶接することにより大きな剛性をもたせている。また上板は、中央部が開口した構造となっており、この中に上載荷重板を置き、これを通して中詰材上方から垂直方向の上載荷重が加えられるものとした。せん断荷重は、枠上端に油圧ジャッキを用いて水平に加えるものとした。計測項目は、このせん断荷重と荷重点の水平変位量である。なお、せん断変形に伴う中詰材の動きも各要素を色分けしてトレースした。

(2) 中詰材

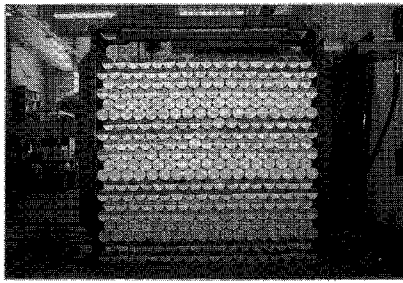
実際の中詰材は直径がおおよそ15 cm以上の礫材であるが、本実験では、図一2のように4種類のコンクリート円筒要素を用いた。これは、①中詰材の挙動を二次元モデル化できる。②二次元面外への中詰材の移動がないため、漏出を防止する側壁板との間に生ずる摩擦の影響を取り除くことができる。③中詰材の形状を単純化することにより、要素形状の影響を取り除くことができ、ま



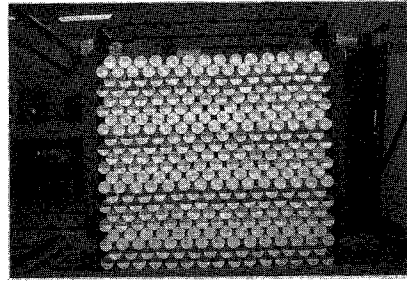
図一1 実験装置



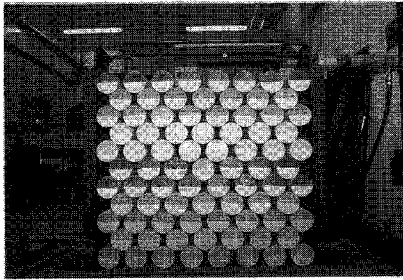
図一2 中詰材



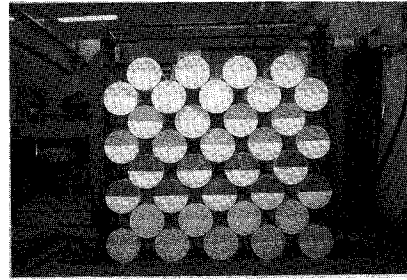
(a) $\phi 50$ (S) 密詰め



(b) $\phi 50$ (S) 緩詰め



(c) $\phi 100$ 緩詰め



(d) $\phi 150$ 緩詰め

写真—2 初期配列 (ただし, ϕ は直径 (mm), S は長さ 12.5 cm の要素を示す)

表—1 実験ケースと中詰材配列

Case No	中詰材		詰め方	配列要領 個、個、段	総数 (個)	総重量 (kgf)	間隙比	上載荷重 (kgf)		
	長さ(cm)	直径(cm)								
1	12.5 (S)	5.2 ($\phi 50$)	密詰め	18,17,20	350	203	0.16	0		
2								167		
3								299		
4			緩詰め	15,14,22	319	185	0.28	0		
5								167		
6								299		
7	30.0 (L)	5.1 ($\phi 50$)	密詰め	18,17,20	350	480	0.16	0		
8								167		
9								299		
10			緩詰め	15,14,22	319	438	0.30	0		
11								167		
12								299		
13				10.0 ($\phi 100$)	緩詰め	8, 7, 11	83	440	0.31	0
14				15.0 ($\phi 150$)	緩詰め	5, 4, 8	36	408	0.32	0

た移動軌跡を観察できる等の利点があるためである。中詰材の詰め方(配列方法)の種類としては、隣合う中詰材がほぼ接触するように、最も密に詰める密詰めの場合(間隙比 ≈ 0.16)と、隣合う要素の間隔があいている緩詰めの場合(間隙比 $\approx 0.28 \sim 0.32$)の2種類を組み合わせる実験を行った。すなわち、密詰めと緩詰めは、それぞれ水平方向での体積収縮(負のダイランシー)を許容しない場合と許容する場合のモデル化に相当するものである。一般的な詰め方のパターンは、混合粒径で不規則配列であると考えられるが、ここでは現象を明確に把握するため、等粒径で規則配列とした。表—1に実験ケース区分ごとの中詰材の諸元を示す。また、写真—2に case 1, 4, 13, 14 における中詰材の配列状態を示す。

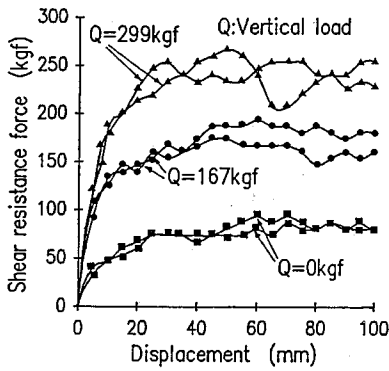
3. 実験結果と考察

(1) せん断抵抗力~変位関係に及ぼす詰め込み方の影響

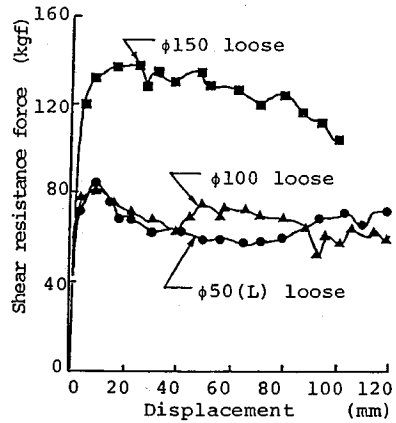
図—3および図—4は要素 $\phi 50$ (S)(Sは長さ12.5 cmの要素)を用いた密詰めの場合と緩詰めの場合におけるせん断抵抗力~変位関係を示したものである。これら全般を通じて、同一実験パラメータにおける結果は良く一致しており、コンクリート円筒要素を用いると中詰材要素の形状および配列が標準化され、実験の再現性が高まっていることがわかる。図—3と図—4を比較すると、密詰めの場合には、当初弾性的に抵抗力が増し変位20 mm付近を境にやや硬化型に近い弾塑性応答を示すが、緩詰めの場合には、変位量2 mm付近を境に抵抗力が徐々に低下する軟化型の弾塑性応答を示している。また同じ上載荷重ごとの最大せん断抵抗力を比べると、密詰めの場合の総重量は、緩詰めの場合の約1.1倍であるにもかかわらず、そのせん断抵抗力は、緩詰めの場合の約3倍の大きさに達している。これは同じ中詰材であってもその詰め方によって、せん断抵抗力に著しい違いが生じることを示している。

(2) せん断抵抗力~変位関係に及ぼす中詰材の要素径の影響

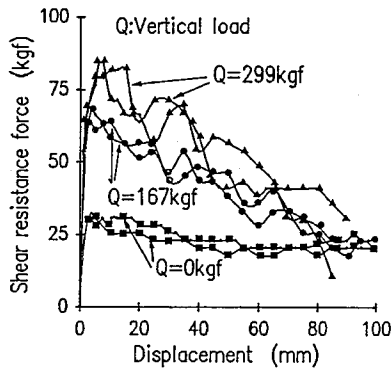
図—5は緩詰めで上載荷重のない場合におけるせん断抵抗力~変位関係を、要素径が5 cm, 10 cm, 15 cmの



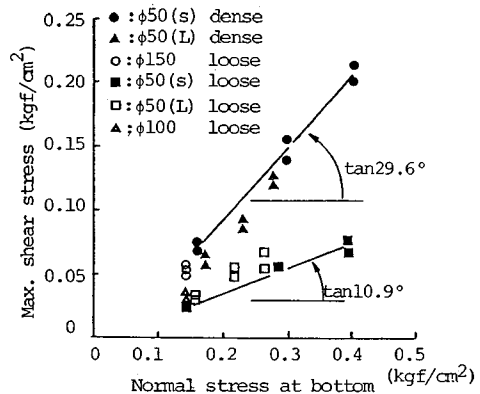
図—3 せん断抵抗力～変位関係 (φ50 (S), 密詰め)



図—5 せん断抵抗力～変位関係に及ぼす中詰材要素径の影響



図—4 せん断抵抗力～変位関係 (φ50 (S), 緩詰め)



図—6 最大せん断応力～底面応力関係

場合について示したものである。これより、要素径が5 cm, 10 cm の場合のせん断抵抗力～変位関係はほぼ一致するのに対し、要素径が15 cm の場合には、他の2つより著しく大きなせん断抵抗力が得られている。これは、後で考察するように中詰材の移動軌跡の形状が、他の2つと全く異なるためと考えられる。

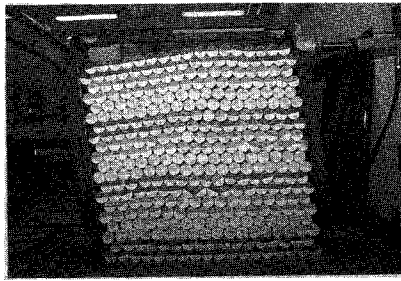
(3) 上載荷重の影響

図—3 および図—4 において、上載荷重 Q を増加させるに伴って、最大せん断抵抗力が増加していることが認められる。図—6 には、全実験における底面応力と最大せん断応力との関係を示した。ここで、底面応力とは、中詰材および上載荷重の全重量を中詰材の底面積で除したものであり、最大せん断応力とは、最大せん断抵抗力を同じく中詰材の底面積で除したものである。これより以下のことがわかる。①全般的に底面応力の増大に伴い最大せん断応力が増大する傾向にあるが、その割合は緩詰めの場合に比し密詰めの方が大きいことが認められる。これは、密詰めの方が上載荷重による影響が大きいことを意味している。②本実験で用いた単純せん断枠では、中詰材内部の自重分布がせん断抵抗力の主要因となっている。また、この枠内において主応力面と破壊面

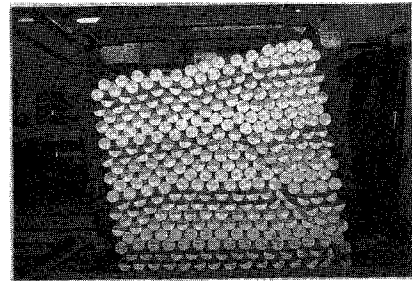
が制御されていないので、三軸圧縮試験や一面せん断試験によって得られる内部摩擦角は得られない。そこで、このグラフの傾きを見掛けの内部摩擦角 ϕ' とすると、要素 $\phi 50$ (S) を用いた密詰めの場合は $\phi' = 29.6^\circ$ 、緩詰めの場合は $\phi' = 10.9^\circ$ となっており、詰め方によって大きく異なるが、他の要素の場合にも密詰め緩詰めの場合に応じて、おおむねそれぞれの線上に近い値を示している。③これは、中詰材要素の大きさが変わっても、中詰材の移動軌跡の形状すなわちすべり面の形状が同じ場合にはその最大せん断応力は、ほぼ同じクーロンの破壊基準線の上ののることを示している。

(4) 要素の移動とすべり面

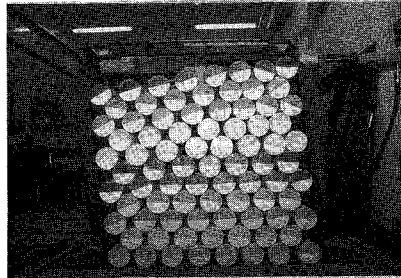
写真—3 にせん断変形中の要素の挙動を示す。写真—3 (a) の要素径 5 cm 中詰材の密詰めの場合には、全体的に初期の配列を乱さずに水平層状に変形している。一方、写真—3 (b) の緩詰めの場合には、後壁面下部から斜め方向に顕著に回転した要素が一行に並んでおり、この線に沿って中詰材内部にすべり面が形成されたことが認められる。さらに、写真—3 (c) の要素径 10 cm、



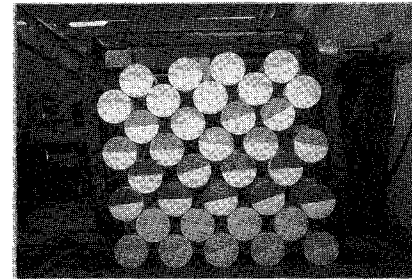
(a) $\phi 50$ (S) 密詰め



(b) $\phi 50$ (S) 緩詰め



(c) $\phi 100$ 緩詰め

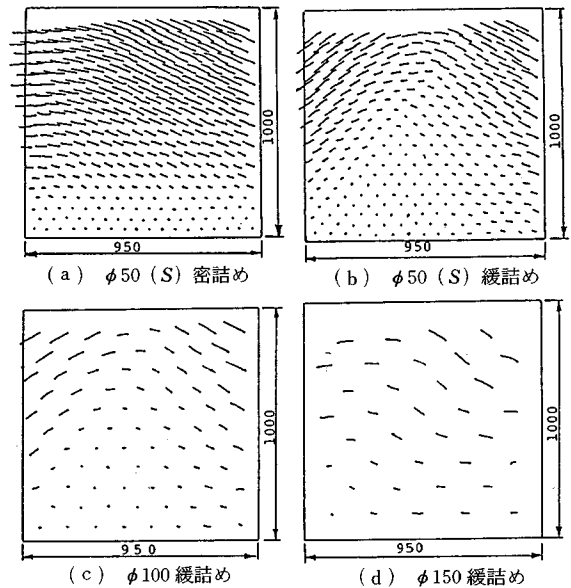


(d) $\phi 150$ 緩詰め

写真—3 上端変位 10 cm における中詰材要素の配列状態

写真—3 (d) の要素径 15 cm の場合において写真—3 (b) のようなすべり面は観察されないが、後壁面上部における配列の変化等は、写真—3 (b) とほぼ同じような挙動が現われている。

図—7 (a)~(d) には、それぞれ直径 5 cm 密詰め、5 cm 緩詰め、10 cm 緩詰め、15 cm 緩詰めにおける実験開始から上端せん断変位量 $\delta = 10$ cm までにおける、各中詰要素中心の移動軌跡図を示す。これより、①写真—3 (a) と図—7 (a) の密詰めの場合には水平層状にすべり面ができるのに対し、写真—3 (b) と図—7 (b) の緩詰めの場合には、底面下部に形成される三角形不動領域に沿って明瞭なすべり面が発生していることがわかる。②図—7 (c) より、要素径 10 cm の場合も要素径 5 cm の緩詰めの場合と良く似た移動軌跡であるが、図—7 (d) の要素径 15 cm の場合は、全体的にむしろ図—7 (a) の密詰めの場合に近い水平層状の傾向を示している。これは、枠全体の大きさと要素の大きさの相対的な関係によるものかと思われるが、詳細については今後の検討課題である。③以上の三角形すべり面を形成する場合とそうでない場合の分類は、先に述べたせん断抵抗力~変位関係の傾向に良く対応している。すなわち、せん断すべり面が山形の形状となる場合には、せん断抵抗力は比較的小さなものとなり、またせん断抵抗力~変位関係は軟化型となる。一方、せん断すべり面が水平層状となる場合には、せん断抵抗力は比較的大きなものが得られ、せん断抵抗力~変位関係は硬化型となる。



図—7 中詰材の移動軌跡 (実験結果)

4. 個別要素法によるせん断抵抗解析の概要

著者ら¹¹⁾の提案した個別要素法を用いた中詰材のせん断抵抗解析法は、まず図—8 に示すように中詰材を円形要素に形状モデル化 (本研究の場合には実験の形状と一致する) できるものと仮定している。次に、接触点に発生する接触力を表すために法線方向と接線方向に図—

8に示すばねおよびダッシュポットを挿入し、個々の要素ごとに時間によって差分近似された運動方程式を時刻歴ごとに解析するものである。

すなわち、個々の中詰材を解析するものとしたうえで、単純せん断変形する中詰材のせん断抵抗解析法は図-9に示すような計算手順に従うものとする。

① まず枠内の中詰材が自然堆積状態に至るまで計算する¹²⁾。つまり、枠の中に各要素間にわずかな間隙を有する状態に全要素を配列したうえで、要素にその自重を作用させ枠内にほぼ静止に至るまで堆積させるものである。なおこの間、枠は変形させない。

② ①の終了状態における各要素の配列および要素間接触力の状態をせん断変形開始の状態として改めて $t=0$ とする。

③ 解析時間増分 Δt ごとに枠上端の水平変位量 δ の増分変位量 $\Delta\delta$ を与え、枠全体を単純せん断変形させる。

④ この枠の増分変形間における中詰材の接触力およびその運動を先の解析法によって求める。

⑤ 図-10に示す中詰材の壁面に対する接触力 e_{ni} , e_{nj} を使って枠上端部におけるせん断抵抗力 P は、底面まわりのモーメントのつり合いから、次式によって算定できる。

$$P = \sum_i e_{ni} \frac{B_i}{A_i + B_i} - \sum_j e_{nj} \frac{B_j}{A_j + B_j} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 i : 後壁側 (砂防ダムの上流側) に接触している要素, j : 前壁側 (砂防ダムの下流側) に接触している要素である。

⑥ 所定のせん断変形量 δ_u になるまで、④、⑤を繰り返す。

5. 入力定数の決定について

上記の提案した個別要素法を用いた解析法においては、次の6つの入力定数を決定する必要がある。すなわち、①要素と要素の間の摩擦係数 μ_c 、②要素と壁面 (実験における鋼板) との摩擦係数 μ_s 、③法線方向ばね係数 k_n 、④法線方向減衰係数 η_n 、⑤接線方向ばね係数 k_s 、⑥接線方向減衰係数 η である。

この各係数については既往の研究^{8), 9), 13)}においてもいろいろな決定方法が提案されているが、本研究においては解析対象の要素が解析法の要素形状と同じ形をもつコンクリートの円筒要素であることから、まず法線方向ばね係数についてはアムスラーを用いた载荷実験によって、摩擦係数についてはすべり台を用いた実験によって求め、またその他の係数についてはこれらの実験で決定された値を既往の研究による式に代入して決定する方法を試みた。

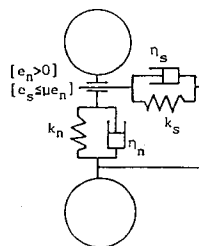


図-8 要素モデル

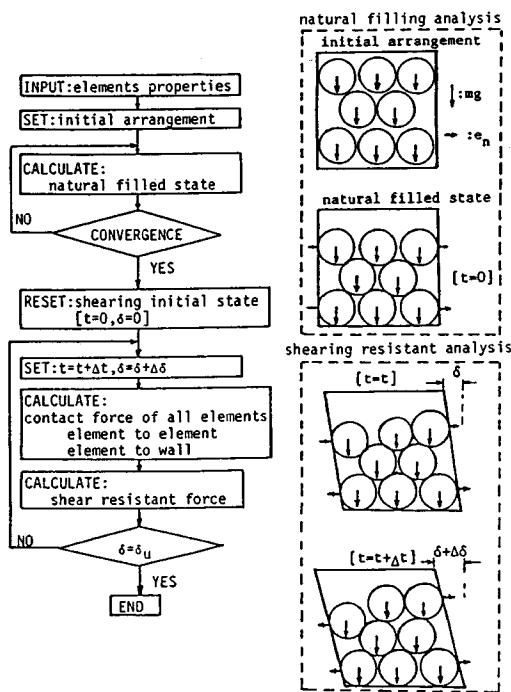


図-9 せん断抵抗力解析手順の概要

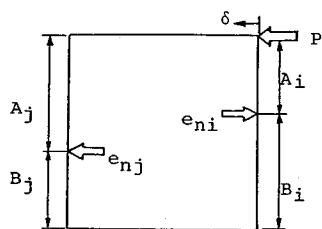


図-10 隣要素の接触力 e_n と中詰材のせん断抵抗力 P の関係

(1) 法線方向ばね係数 k_n 決定のための試験

法線方向ばね係数 k_n の意義は、図-11に示すように接触している2つの要素の中心点間距離の縮小量 δ に対する接触力の増分の割合を示す剛性であるが、これを実験的にそのまま求めることは困難であるので、図-12に示すような1つの要素の直径方向の縮小量 δ と荷重

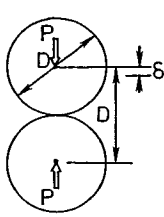


図-11 法線方向ばねの P~δ

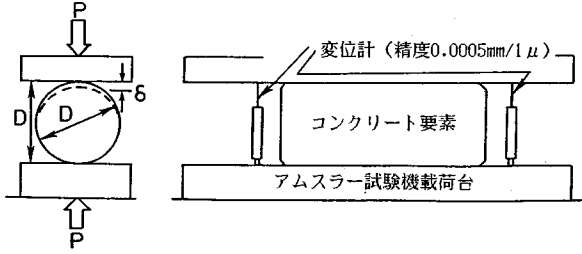


図-12 法線方向ばね係数決定のための試験

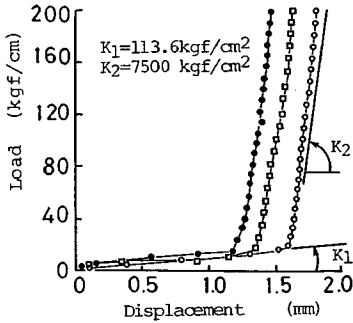


図-13 法線方向ばね係数決定のための試験結果

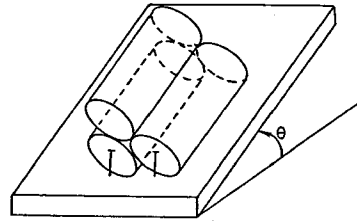


図-14 要素間の摩擦係数決定のための試験

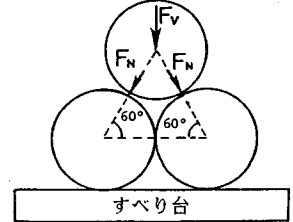


図-15 接触点の力のつり合い

P の関係から求められる剛性と等価と考えて、せん断抵抗力実験に用いたコンクリート円筒要素 φ50 (S) のばね係数を求めた。図-13 に得られた実験結果を示す。これより3つの供試体いずれの場合も縮小量 δ=約 1.5 mm までは単位長さ当たりの剛性 $k_1=113.6 \text{ kgf/cm}^2$ であるのに対し、δ=約 1.5 mm 付近を境に、 $k_2=7500 \text{ kgf/cm}^2$ と非常に大きな剛性に変わることがわかる。この2つの剛性のうち大きな剛性 $k_2=7500 \text{ kgf/cm}^2$ を計算に用いると、計算の増分時間 Δt を著しく小さくしなければならず、また実際計算してみるとほとんどの接触力は k_1 の剛性によって決定される範囲の接触力の値であることから、計算の入力値は k_1 を用いることとした。

(2) 要素間摩擦係数 μ_c の決定のための試験

要素間の摩擦係数は、図-14 に示すすべり台を用いて求められる静止摩擦係数を基準に決定することとした。ここで図-14 のように固定された2つの要素のうえをすべらせる場合には接触点に働く法線方向の接触力 F_N は図-15 に示すような力のつり合い関係になることから、静止摩擦係数 μ'_c は次式によって求めた。

$$\mu'_c = \tan \theta \cdot \sin 60^\circ \dots \dots \dots (2)$$

ところで、解析計算において微小な速度ではあるが連続してすべりが生じていることから、この静止摩擦係数に低減係数を乗じた摩擦係数を用いるものとした¹⁴⁾。この低減係数については実際の計算においてパラメトリックに検討すると 0.9 が実験を良くシミュレートすることから、この値を用いた。

表-3 入力定数

μ_c	0.561 ($\phi = 29.3^\circ$)
μ_s	0.488 ($\phi = 25.9^\circ$)
K_n	113.6 (kgf/cm)
η_n	$2\sqrt{m \cdot K_n}$
K_s	$K_n \cdot s$ ($s = 0.25$)
η_s	$\sqrt{s \cdot \eta_n}$
Δt	0.0002 (sec)
$\Delta \delta$	0.0002 (cm)

(3) 鋼板と要素間の摩擦係数 μ_s

鋼板と要素間の摩擦係数 μ_s は、要素間の摩擦係数と同様に図-14 に示す試験において下の2つの要素を鋼板との間ですべらせることによって求めた。この場合の静止摩擦係数 μ'_s は当然のことながら次式によって求められる。

$$\mu'_s = \tan \theta \dots \dots \dots (3)$$

この場合も解析においては要素間の摩擦係数 μ_c と同様に 0.9 の低減係数を乗じたものを用いた。

(4) その他の係数

実験によって求めることができなかった係数については、木山らの研究⁸⁾を参考にして次式によって求めるものとした。

接線方向ばね係数： $k_s = s \cdot k_n$

$$s = 0.25 \text{ (低減係数)} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{法線方向減衰係数：}\eta_n = 2\sqrt{m \cdot k_n} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{接線方向減衰係数：}\eta_s = \sqrt{s \cdot \eta_n} \dots \dots \dots (6)$$

また、数値計算の制御変数である時間増分 Δt はあらか

はじめ行った計算によって計算値が変動しない最大値である0.0002sとした。さらに枠上端の変形速度についてもパラメトリックに検討したうえで、せん断抵抗力の値が不必要に変動しない最大速度1.0cm/sを基準として $\Delta\delta=0.0002\text{cm}$ とした。以上の決定方法によって求められた入力定数を表一3に示す。

6. 計算結果と考察

本解析法の定量的な適用性を検討するために、 $\phi 50$ (S)の中詰材要素を用いた上載荷重を載せない場合の実験条件において、図一16に示すように密詰めの場合と緩詰めの場合について解析を行った。

(1) せん断抵抗力～変位関係

図一17に解析によって得られたせん断抵抗力(解析においては奥行き幅1cmについて計算しているため1cm当たりのせん断抵抗力を示す)～変位関係を実験値と比較して示す。まず、図一17(a)に示した密詰めの場合では、せん断変形初期の弾性領域においては計算値の方が剛性が小さく、そのため同じ変位量においては小さなせん断抵抗力を示している。しかしながら、上端変位2~4cmを境に降伏点に達すること、またその後の降伏域においてもわずかにせん断抵抗力の増加が得られる硬化型の弾塑性応答を示すこと、およびその降伏域のせん断抵抗力がほぼ同じ大きさを示すこと等は実験値とほぼ一致している。

一方、図一17(b)に示した緩詰めの場合においては、逆に降伏直後のせん断抵抗力が実験値よりも計算値の方

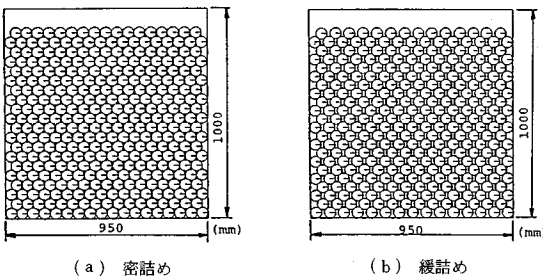
がやや大きなせん断抵抗力を示すが、やはり全体的には実験値を良くシミュレートしていることがわかる。中でも降伏変位が非常に小さな変位量であることや、降伏以降のせん断抵抗力が変位の増加につれて徐々に低下する軟化型の弾塑性応答を示す点は実験値と良く一致しており、解析上からも緩詰め型の配列では軟化型の弾塑性応答を示すことが確認された。ところで、この詰め方による弾塑性挙動の傾向は、通常の砂を用いたせん断試験(一面せん断試験、三軸圧縮試験)の傾向(緩詰めでは硬化型、密詰めでは軟化型)と逆の傾向を示している。この原因としては、①中詰材が等粒径・規則配列であること、②中詰材内部に異なるダイレイタンス挙動が分布して存在することなどが考えられるが、これについては今後さらに詳細な検討が必要である。

(2) 中詰材の移動軌跡とすべり面

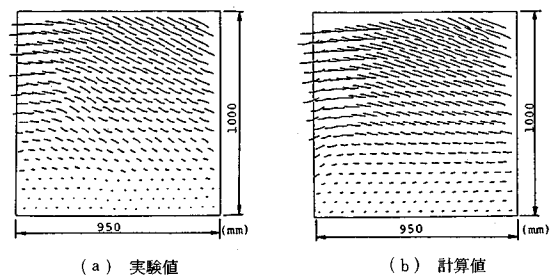
図一18は密詰めの場合($\phi 50$ (S))、図一19は緩詰めの場合($\phi 50$ (S))について、それぞれ実験と計算で得られた中詰材の移動軌跡を示す。これより、密詰め、緩詰めいずれの場合についても移動軌跡は実験結果と非常に良く一致しており、解析上からも先の実験結果と同様に中詰材内部に生ずるすべり面は、密詰めの場合には水平層状に、緩詰めの場合には山形のすべり面が形成されることが確認できる。

(3) 要素配列の変化

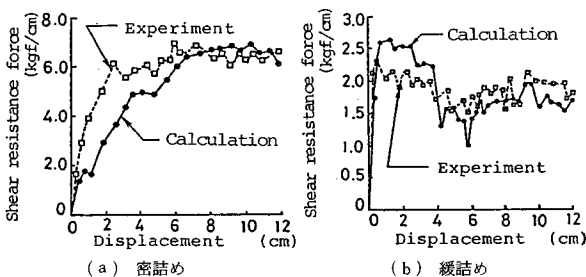
図一20に計算で得られた枠上端変位10cmにおける要素配列の状態($\phi 50$ (S)の場合)を示す。これを写真一3で示した実験結果と比較すると、まず密詰めの場合



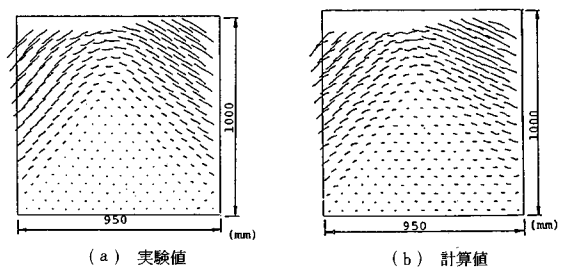
図一16 解析における初期配列



図一18 中詰材の移動軌跡(密詰め, $\phi 50$ (S))



図一17 せん断抵抗力～変位関係



図一19 中詰材の移動軌跡(緩詰め, $\phi 50$ (S))

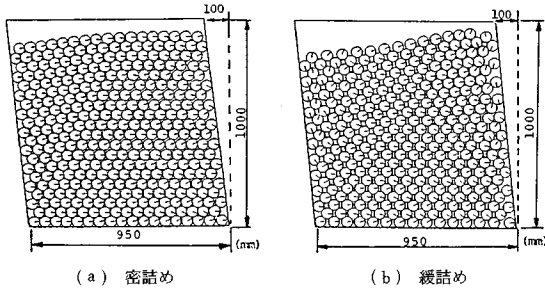


図-20 中詰材の配列変化

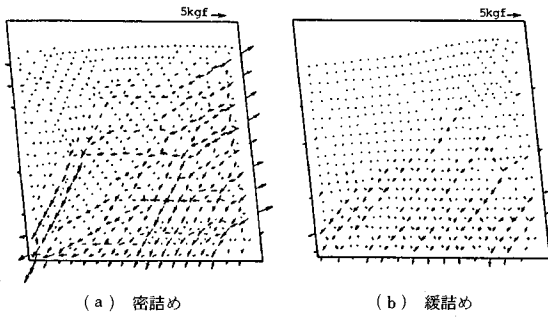


図-21 接触力分布 (枠上端変位 10 cm)

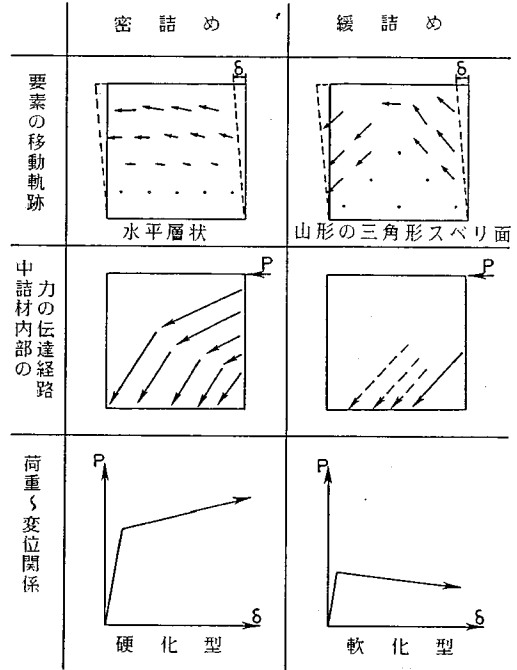


図-22 密詰めと緩詰めと比較

合には、実験に比べて計算値の方がやや各要素の回転量が大きい傾向を示すが、全体的に顕著な配列の乱れがなく初期の規則性も保たれており実験結果と良く一致している。緩詰めの場合には、計算値の方が底面下部の不動領域内の要素に回転変形が生じている点や、後壁面上部における要素が遊離した位置にあることなど実験結果との違いがみられるが、後壁面側上部の要素配列が最密充填型(密詰めの場合の配列型)に移行して、要素配列の再変換が行われていることは実験結果と一致している。

(4) 中詰材内部の接触力分布

図-21 に枠上端変位 10 cm における中詰材内部に生じている接触力の分布を示す。ここで、矢印は中詰材内部の場合には、上方にある要素が下方にある要素を押す力を、壁面においては中詰材要素が壁面を押す力をベクトル表示している。これより、図-21 (a) の密詰めの場合には図-21 (b) の緩詰めの場合に比べ全体的に非常に大きな接触力が発生しており、特に後壁面上部にも大きな接触力が生じていることがわかる。ところで、中詰材の移動はきわめてゆっくりとしたものであるので、中詰材内部において、力は静的にほぼ釣り合っている。しかし、壁面に働く力は水平方向にアンバランスな分布となっているが、これは式(1)のせん断抵抗力 P と釣り合っているためである。一方、緩詰めの場合には全体的に小さな接触力しか発生せず、特にその接触力が卓越する領域は底面下部の三角形の不動領域内であることが認

められる。また、先に述べた後壁面側上部において最密充填に移行している領域の接触力も小さい。これは、この領域で配列変換によって接触力を増すことはなく、枠全体のせん断変形に対応している作用があるためと考えられる。

以上のことを総合的に考察すると、図-22 に示すように密詰めの場合には、個々の要素のもつ接触点数が多く多方向から拘束されるため、枠の変形がそのまま中詰材の挙動に連係して水平層状の移動軌跡を形成する。そして、力の伝達経路はあたかもブレースのようになるため、そのせん断抵抗力は大きくなる。一方、緩詰めの場合には接触点が少なく個々の要素の移動の自由度が大きいため、力の伝達経路途中で体積が収縮する最密充填型への配列変換が発生する。よって、力の伝達経路は短くなり後壁下部に小さなブレースのように形成される。またせん断変形中に中詰材内部に生じる要素の配列変換は密詰めの場合には体積膨張の方向へ動くため、そのせん断抵抗力～変位関係は硬化型の弾塑性挙動を示すのに対し、緩詰めの場合には体積収縮の方向へ変化するため、軟化型の弾塑性挙動を示すものと考えられる。

7. 結 言

本研究は、コンクリート円筒要素によって二次元モデル化された中詰材要素を用いて、実験的に中詰材のせん断抵抗力～変位関係および中詰材要素の挙動について基

礎的に考察するとともに、個別要素法を用いた解析によってそのシミュレーションを行い解析法の適用性についても考察したものである。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

(1) せん断変形に伴って、密詰めの場合には中詰材内部に水平層状のせん断すべり面が形成され、緩詰めの場合には山形のせん断すべり面が形成されることが認められた。

(2) 中詰材のせん断抵抗力～変位関係は、せん断すべり面が水平層状を示す密詰めの場合は硬化型の弾塑性挙動を示し、その最大せん断抵抗力はかなり大きな値を得るが、山形のすべり面を示す緩詰めの場合には、軟化型の弾塑性挙動を示し、その最大せん断抵抗力は小さくなる。

(3) せん断抵抗力～変位関係が軟化型の場合には降伏変位が1～2%であったのに対し、軟化型の場合には0.2%程度のきわめて小さい変位で降伏することが認められた。

(4) 水平層状のせん断すべり面を形成する場合の見掛けの内部摩擦角は、山形のすべり面を形成する場合の約3倍の大きくなり、このため水平層状の場合の最大せん断抵抗力も山形のすべり面を形成する場合の約3倍となった。

(5) 要素径の大きさが変化することの影響は、間接的にすべり面形状が変わった場合にのみ現われ、三角形すべり面を形成する場合にはほぼ同じせん断抵抗力～変位関係を示すことが認められた。

(6) 個別要素法を用いたせん断抵抗力解析法は、要素のもつ摩擦係数を簡易な摩擦実験により適切に決定して入力することにより、実験値をよくシミュレートすることができる。

(7) 中詰材内部に発生する力の伝達機構はあたかもブレースのように作用することが認められたが、その効果は密詰めの方が大きく、緩詰めの場合には経路途中に配列変換が行われるため、長い力のパスを形成することが困難であることがわかった。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京工業大学 大町達夫教授から有益なご指導・ご助言を得た。また実験

については奥田将樹君、数値計算については小坂元一君の援助を受けた。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、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、港湾技術資料、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) Cundall, P. A. : A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock System, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol. 2, pp. 129～136, 1971.
- 8) 木山英郎・藤村 尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質流状体の重力流動の解析、土木学会論文報告集、pp. 137～146, 1983年5月。
- 9) 吉田 博・榎谷 浩・今井和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析、土木学会論文集、第392号/I-9, pp. 297～306, 1988.4.
- 10) Lusia Casaverde M., Iwashita, K., Tarumi, Y. and Hakuno, M. : Distinct Element Analysis for Rock Avalanche, JSCE, No. 404/I-11, pp. 153～162, April 1989.
- 11) 香月 智・石川信隆・大平至徳・鈴木 宏：鋼製砂防構造物における中詰材のせん断抵抗解析に関する一考察、構造工学論文集、Vol. 35 A, pp. 1309～1318, 1989年3月。
- 12) 香月 智・梶元大介・石川信隆：楕円形モデルを用いた個別要素法による中詰材圧解析、構造工学における数値計算法シンポジウム論文集、第12巻、pp. 515～520, 昭和63年7月。
- 13) 大町達夫・荒井靖博：個別要素法で用いる要素定数の決め方について、構造工学論文集、Vol. 21 A, pp. 715～723, 1986.3.
- 14) 大町達夫・荒井靖博：円形粒子の規則的配列をもつロックフィルダム模型の動的破壊機構、土木学会論文集、第388号/III-8, pp. 197～206, 1987年12月。

(1989. 4. 26・受付)