

III-B 359 軟化過程を考慮したCSGの力学モデルと基礎的解析

建設省土木研究所 ○正会員 川口昌尚

正会員 豊田光雄

中村 昭

正会員 山本裕之

1. はじめに

フィルダムで用いられる粗粒材料は塑性体として扱われ、そのせん断強度は変形量に関係なく一定と見なされる。CSG (Cemented Sand and Gravel)は、河床砂礫等の現地発生材にセメントを添加混合することにより強度増加を図った改良フィルダム材料として位置付けられ、せん断破壊強度に達した後は緩やかに強度を低下させながら変形が進行（軟化過程）し、やがて一般の粗粒材料と同じ強度特性を示すようになる。

本論文は、CSGを使用した構造物の安定性を検討するため、このような軟化過程を考慮した力学モデル化と基礎的解析結果について報告するものである。

2. CSGの強度変形特性

ひずみ制御の三軸圧縮試験により得られたCSGの応力～ひずみ曲線の一例を図-1に示す。軸ひずみが約1.5%前後で最大主応力差を示した後、緩やかに強度が低下し軸ひずみが5%前後ではほぼ一定の強度（以後、残留強度と呼ぶ）となる。ピーク強度および残留強度は拘束圧に依存しMohr-Coulomb型の破壊基準が適用される。

軸ひずみ5%までの静的繰返し三軸圧縮試験から得られた応力～ひずみ曲線の一例を図-2に示す。ピーク強度に至るまでの弾性係数はほぼ一定であるが、軟化過程に入ると主応力差の減少とともに弾性係数も減少する。

一軸圧縮試験と同時に実施した直接引張試験の結果¹⁾から、CSGの引張強度は一軸圧縮強度の約1/20と推測される。また引張領域における弾性係数も圧縮領域とほぼ同じである。

3. 解析モデル

3.1 応力～ひずみ曲線

図-1をモデル化した応力～ひずみ曲線を図-3に示す。ピーク強度に至るまでは単純な線形弾性とし、ピーク強度から主ひずみ5%までの間を線形の軟化過程とした。それ以後はせん断強度一定の完全塑性とした。軟化過程のせん断強度は、ピーク強度と残留強度から主ひずみ量をパラメーターとして中央内挿により決定される。この時ピーク強度、残留強度およびピーク時軸ひずみは側圧に相当する最小主応力の関数として決定される。このせん断強度を越える応力は周囲の要素に再配分される。また軟化過程と完全塑性の境界は主ひずみが5%とする上記以外の方法として、軟化過程の見かけ上の負の弾性係数を常に一定と

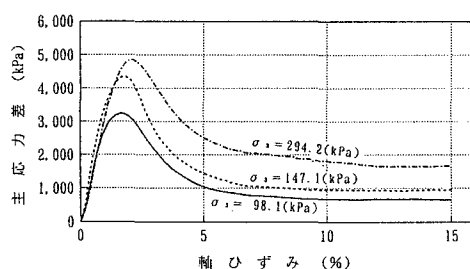


図-1 応力～ひずみ曲線

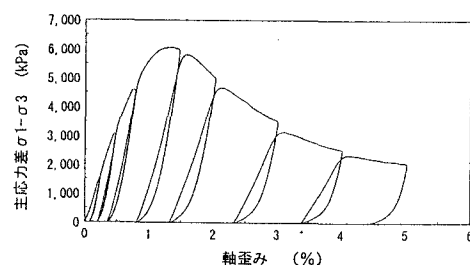


図-2 応力～ひずみ曲線（静的繰返し試験）

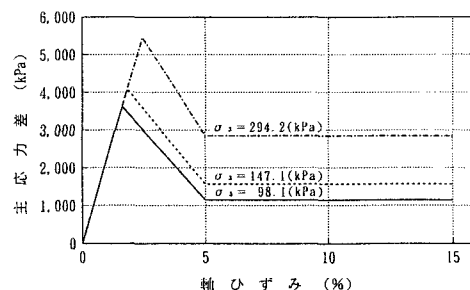
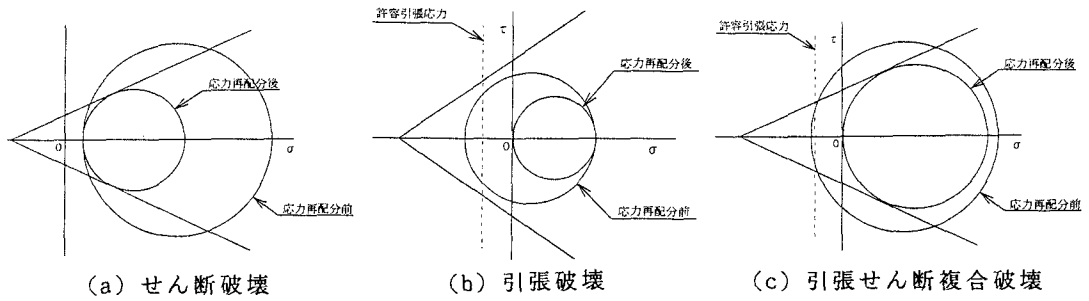


図-3 モデル化応力～ひずみ曲線



図－4 応力再配分

し、せん断強度が残留強度と等しくなった点を境界とする方法²⁾のどちらかを選択できるものとした。

3.2 強度変形特性

ピーク時および残留強度時のせん断強度は三軸圧縮試験から得られるピーク強度時および軸ひずみ5%時の粘着力、内部摩擦角を用いたMohr-Coulombの降伏基準に従うものとした。

前述のとおり引張強度と一軸圧縮強度の関係は試験により確かめられているが、ここでは三軸試験のみですべての強度条件を決定するため、一軸圧縮強度も三軸試験の結果から推定することにした。これにより引張強度(σ_{at})もピーク強度時の粘着力Cと内部摩擦角 ϕ の関数として以下の通り定式化できる。

$$\sigma_{at} = \frac{1}{20} \times \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

ピーク強度までの弾性係数は三軸圧縮試験におけるピーク強度と原点を結ぶ割線弾性係数を用いた。

3.3 応力再配分について

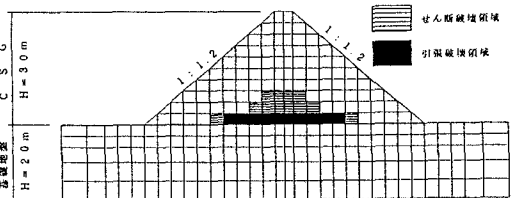
せん断破壊、引張破壊および引張せん断複合破壊を起こした場合の各ケースについて、応力再配分前後の応力状態を図－4に示す。せん断破壊の場合(図－4(a))は最小主応力を一定として破壊包絡線に接する応力円となるよう最大主応力を調整する。引張破壊の場合(図－4(b))は最小主応力を0とする。両者の複合破壊を生じている場合(図－4(c))は、最小主応力を0とした後に最大主応力を調整する。なお応力再配分においては簡単のため初期弾性法を用いたが、軟化過程において剛性マトリックスの計算に用いる弾性係数をせん断強度の低下とともに変化させることも可能である。

4. 計算事例

変形性の大きい基礎地盤上に仮締切堤をCSGにより築造した場合を想定し自重作用下での解析結果の一例を図－5に示す。解析に用いた物性値を表－1に示す。図には引張破壊した要素とせん断破壊を生じ軟化過程に入った要素を示している。CSGの底部中心付近に引張破壊を生じさらにその周辺にせん断破壊を生じる様子が観察される。CSG以上の弾性係数を有する基礎地盤ではこれらの破壊領域は生じなかった。

表－1 解析に用いた物理定数

破 壊 基 準			
		粘 着 力 (kPa)	内 部 摩 擦 角 (°)
C S G	せん断強度	147.1	50
	ピーク強度時 残留強度	49.0	46
	引 張 強 度 (kPa)	80.8	
	残留引張強度 (kPa)	0	
基 礎	せん断強度	0	44
変 形 特 性			
		弾 性 係 数 (kPa)	ポアソン比
C S G	初期弾性域	411.879	0.2
	軟 化 域	411.879	0.2
	完全塑性域	166.713	0.35
基 礎	破 壊	147.100	0.4



図－5 破壊領域図

¹⁾ 山本裕之、川口昌尚、豊田光雄、中村昭；“CSGの引張強度に関する実験的検討” 土木学会 第23回関東支部技術研究発表会：1996.3

²⁾ 本島睦；“揚水発電所地下空洞掘削時挙動の数値解析的検討” 電力中央研究所 研究報告：U93012, 1993.7