

汎用 FEM による礫中詰効果解析法に関する基礎的検討

防衛大学校 ○香月 智 金子 智成 森 雅美
日鐵住金建材株式会社 田附 正文

1 緒 言

形鋼の骨組構造の枠の中に礫を詰めて作られる鋼製枠ダムの現行設計¹⁾では、鋼製枠に生じるせん断変形に対する抵抗（以下、せん断抵抗力と記す）は、鋼製枠か中詰材どちらか一方のせん断抵抗力のみを評価している。そこで本研究は、鋼製枠と中詰材の一体型 FEM 解析モデルについて検討し、鋼製枠と中詰材の共同作用を適切に評価する手法を提案するものである。

2 FEM 解析モデルの検討

解析には、汎用ソフト MSC.MARC2001²⁾を用い、まず、香月・伊藤の単純せん断枠実験^{3), 4)}を用いて、パラメータ決定法について検討する。

2.1 解析条件

降伏条件には、静水圧に依存する Drucker-Prager の降伏関数を用い、関連流れ則と等方硬化則を仮定した。

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (3)$$

ここで、定数 α および $\bar{\sigma}$ は、平面ひずみ場において粘着力 c および内部摩擦角 ϕ' に対し、次式で関係づけられる。

$$\alpha = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi'}} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{3\sqrt{3}c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi'}} \quad (5)$$

よって、要素の挙動を決定づける際の入力パラメータは、定数 α および定数 $\bar{\sigma}$ とヤング率 E 、ポアソン比 ν の 4 つとなり、 α および $\bar{\sigma}$ については、 c と ϕ' を与える。

2.2 解析モデル

図-1 に示すように鋼製枠は、上面および下面に 1 節点 3 自由度の 3 次元トラス要素を、側壁面に 1 節点 6 自由度の 3 次元梁要素を用いてモデル化する。また、図-2 に示すように中詰材を詰めた場合は、1 節点 2 自

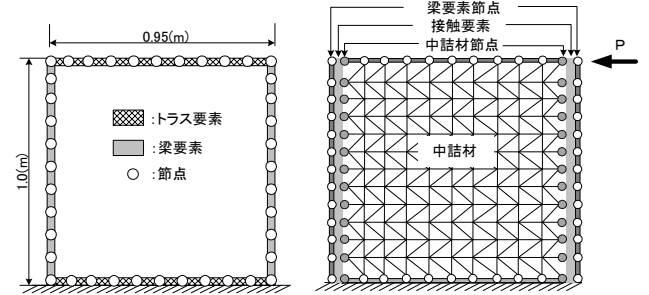


図-1 伊藤・香月実験検討モデル

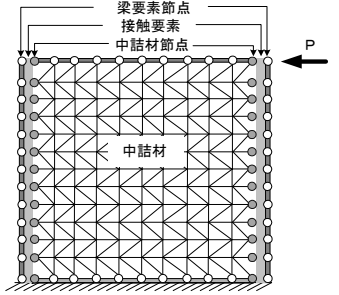


図-2 解析検討モデル

表-1 最適パラメータ

実験区分		実験値			解析値	
		e	$\phi (^{\circ})$	$\gamma (\text{kN/m}^3)$	β	$E (\text{N/mm}^2)$
ケイ砂	緩詰め	1.00	30	13.0	0.52	3
	密詰め	0.74	40	15.0	0.85	40
砕石4号	緩詰め	0.93	44	13.5	0.45	2
	密詰め	0.73	50	15.0	0.80	45
割栗石	緩詰め	0.86	51	13.7	0.50	6
	密詰め	0.74	52	14.7	0.75	40

由度の三角形平面ひずみ要素によってモデル化する。中詰材要素には、重力加速度に基づく自重を与え、前・後壁面の梁要素と三角形要素との節点間には接触要素を導入した。

2.3 同定結果

4 つのパラメータのうち、ポアソン比 ν については、解析結果にあまり有意な影響が見られないので $\nu = 0.2$ に、粘着力 c については、零の近似値である $c = 1.0 \times 10^{-4} (\text{N/mm}^2)$ と固定した。そのうえで、ヤング率と内部摩擦角の補正を行うことにより実験ケースの同定解析を行うと、最適パラメータは表-1 のようになった。

表-1 の最適パラメータを用いたせん断抵抗力～変位関係は、図-3 の破線のようになる。ケイ砂、砕石 4 号、割栗石と粒径の異なる材料においても、変位 30mm まではどのケースも良く実験結果と一致している。ちなみに、この変位 30mm とは、実構造（高さ 15m 程度）のせん断変形が堤体頂部で 45cm も水平移動している状態に相当するため、実用上十分な適合範囲と考える。ここで、既往の研究より中詰材のせん断抵抗力に及ぼす影響は粒径に比して間隙比が大きいとの研究成果が得られていることから、同定値と中詰材間隙比の関係を図-4, 5 に示す。この関係を近似式にすると、図中に実線で示す次式となる。

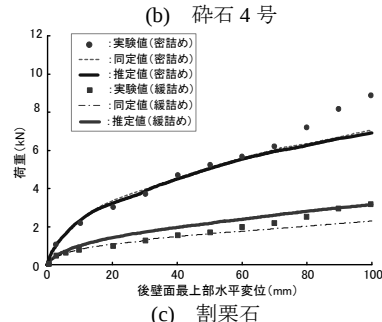
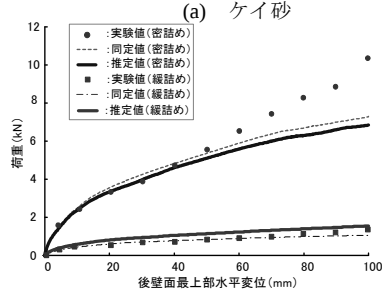
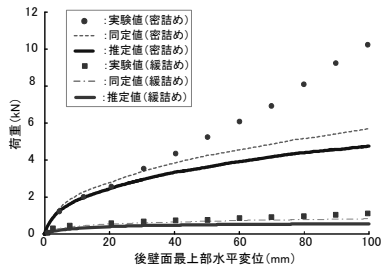


図-3 荷重～変位関係（単純せん断実験）

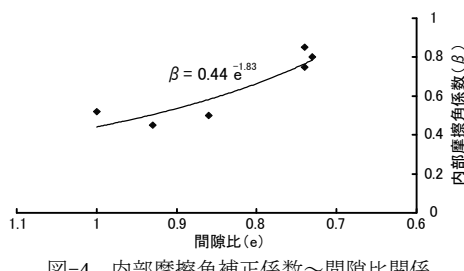


図-4 内部摩擦角補正係数～間隙比関係

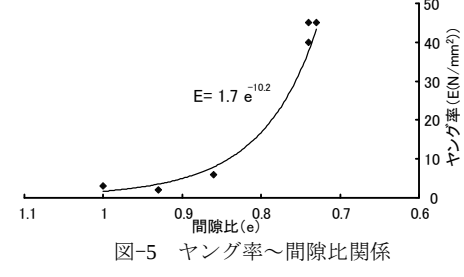


図-5 ヤング率～間隙比関係

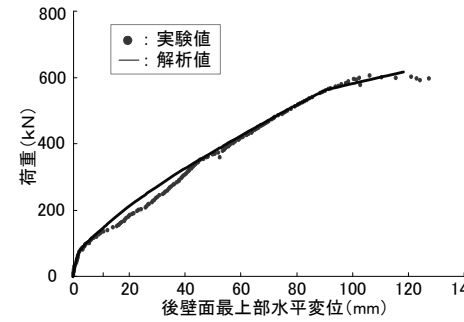


図-6 荷重～変位関係（鋼製柱のみ）

表-2 中詰材諸元(準実物大実験)		
種類	項目	数値
単粒度1号砕石	単位体積重量(kN/m³)	13.7
	間隙比 (e)	0.90
	内部摩擦角 (φ (°))	45

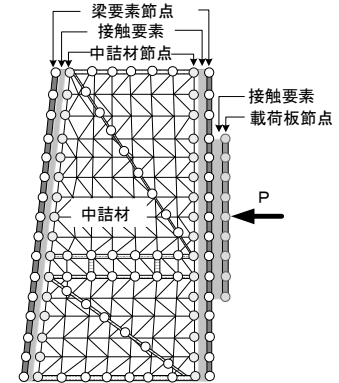


図-7 解析モデル（中詰材有り）

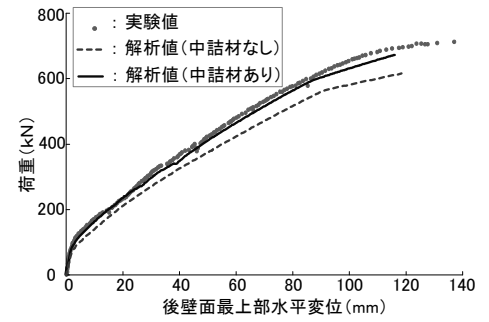


図-8 荷重～変位関係（中詰材がある場合）

$$\phi' = \beta \phi \quad (6)$$

$$\beta = 0.44 \times e^{-1.83} \quad (7)$$

$$E = 1.7 \times e^{-10.2} \quad (8)$$

ここで、 β ：内部摩擦角補正係数、 ϕ ：実験データの内部摩擦角、 e ：実験データの間隙比、 E ：ヤング率。

式(7)、(8)によりパラメータ決定された中詰材要素を用いた推定値は、図-3の実線のようになり、概ね実験結果を推定できている。

3 準実物大実験への適用

続いて、同定した中詰材要素のパラメータ決定法を既往の準実物大実験⁵⁾に適用させ検証する。その鋼材要素は、実験の鋼材諸元を有し、その材料構成則は硬化型バイリニアモデルとし、鋼製柱の弾塑性挙動を実験結果と適合させるために、ボルト結合箇所の剛性を調整した。鋼製柱のみの荷重～変位関係を、図-6に実験結果と比較して示す。解析結果は実験の弾塑性挙動を良く表現できていることがわかる。

中詰材を詰めた場合には、図-7に示すように中詰材の三角形要素を用いて離散モデル化する。中詰材の入力パラメータは、式(7)、(8)を用い、その際表-2に示す

基本パラメータを用いた。

解析により得られた荷重～変位関係を、図-8に実験結果と比較して示す。解析結果は、実験値よりやや小さな荷重となっているが、実験結果の弾塑性挙動を良く表現できている。

4 結言

FEM解析の三角形要素に、Drucker-Pragerの降伏条件式を用いた手法であるFEM解析モデルを提案し、準実物大実験の弾塑性挙動の荷重～変位関係をよく表現できることを示した。

参考文献

- 1) 砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，平成13年版，2001。
- 2) MSC Software Corp.：MARC2001 ユーザーズマニュアル，2001。
- 3) 香月智，石川信隆，太平至徳，鈴木宏：鋼製柱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，土木学会論文集，No.428/I-15，pp.97-106，1991。
- 4) 伊藤一雄，香月智，石川信隆，阿部宗平：締め固め効果を考慮した礫中詰材のせん断抵抗力推定法と砂防ダム設計への応用，土木学会論文集，Vol.570/I-40，pp.187-201，1997。
- 5) 金子智成，森雅美，香月智，田附正文，射場茂夫：鋼製治山ダムの中詰材効果に関する準実物大実験，構造工学論文集，Vol.54A，pp.124-133，2008。