

Mohr-Coulomb 弾塑性構成則を用いた重錘衝突実験の有限要素解析

(株)大林組

正会員 ○秋元 理仁 松本 優資 遠藤 学

JIP テクノサイエンス(株) 正会員 戸田 圭彦 佐藤 一樹 田中 克弘

日本原子力発電(株)

奥谷 哲也 小川 勤

1. はじめに

近年、地盤構造物の衝突・貫入・削剥などを表現可能な数値解析技術の重要性が日に日に高まってきている。しかし現在においても確立した地盤衝突現象の数値解析技術は存在せず、ケースバイケースで技術者が対応する必要がある。特に衝突・貫入を受ける地盤材料の構成則に関する知見が少なく、技術者にとっては解析条件を決定しづらい点の一つである。また地盤材料の構成モデルは日々進歩しているが、端的に言って複雑化している。一方、現場で得られる地盤の情報は限られていることから、少ない強度定数で十分な精度を担保できる構成モデルが望まれている。

そこで本研究では地盤材料の破壊を表現する構成則の中でも、最も基本的かつ普及していると考えられる Mohr-Coulomb 降伏条件を使用して重錘衝突実験の再現解析を実施した。本研究では地盤に重錘が衝突してせん断降伏域（滑り線）が形成された時の滑り線と塑性ひずみ増分方向との関係が、特に衝撃力および貫入量に影響を与えるものと考えた。そこで、降伏時に生じる塑性ひずみ増分の向きを規定するダイレイタンシー角の設定方法に着目した検討を行った。

2. 重錘衝突実験の有限要素解析モデル

本研究では Mohr-Coulomb モデルを用いた衝突解析の妥当性を検証するために、山口ら¹⁾の重錘衝突試験を対象に有限要素法解析を実施した。本実験は、5m 四方の厚さ 500mm の RC 版の上に厚さ 500mm の緩衝材（砂あるいは碎石）を敷き詰めた供試体に対して、金属製の 5t の重錘を高さ 5m から落下させ、その衝撃力および重水の貫入量を計測している。対象とした実験ケースを表-1 に、解析モデル（1/4 対称モデル）を図-1 に示す。緩衝材には Mohr-Coulomb 弾塑性性を適用しその他は弾性体とする。解析に使用したプログラムは LS-DYNA9.0 である。

3. 材料構成則のパラメータ選定に関する考察

Mohr-Coulomb の降伏関数 f は主応力表示すると次式で表される。ここでは圧縮応力を正とする。

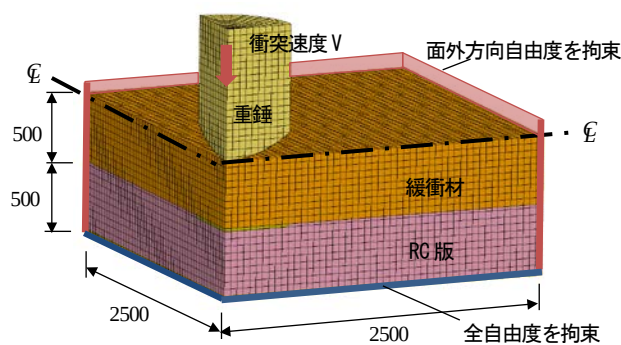


図-1 解析モデル (単位 mm)

表-1 対象とした実験ケース

case	緩衝材厚さ (cm)	落下高さ(m)	入力エネルギー (kJ)	締固め厚さ (cm)
碎石	50	5	245.2	25+25
砂	50	5	245.2	25+25

$$f = \tau - c - \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi \quad (2)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi \quad (3)$$

ここに、 ϕ は内部摩擦角、 τ はせん断応力、 c は粘着力、 σ_n はせん断応力の作用する面における垂直応力、 σ_1, σ_3 はそれぞれ最大主応力および最小主応力である。

解析対象は N 値および ϕ のいずれも明らかになっていないため、消防法で定められている砂質土および碎石の ϕ の値を仮定し、砂質土は 35° 、碎石は 45° とした。さらに、日本建築学会建築基礎構造設計指針²⁾を参考に、 ϕ の値をもとに N 値を求め、 N 値から弾性係数 E を決定した。

$$N = \frac{(\phi - 20)^2}{20} \quad (\phi \text{ の単位は degree}) \quad (4)$$

$$E = 2.8 N \text{ (kN / m}^2\text{)} \quad (5)$$

またポアソン比や粘着力は材質によって代表的な値はある程度明らかになっており、砂質土でポアソン比 0.3 程度、粘着力は無視できる程度に小さくほぼ 0 とした。

ダイレイタンシー角 ψ は単純せん断において滑り線と塑性ひずみ増分ベクトルの成す角を表している。地盤の破壊現象において、塑性変形は滑り線とほぼ平行方向に生じ、体積変化は小さいと考えられるため、非関連流動則とする

キーワード 有限要素法, 衝突解析, 弾塑性, Mohr-Coulomb

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 インターシティ B 棟 (株)大林組 原子力本部 TEL 03-5769-2736

のが望ましいと考えられる。

塑性ポテンシャル g はダイレイタンシー角 ψ を用いて次式で表される。

$$g = \tau - c - \sigma_n \tan \psi \quad (6)$$

本研究では、既往の研究の三軸圧縮試験結果から、式に従って ψ を計算し、 ψ の取り得る範囲について調査を行った。その結果を表-2に示す。

$$\psi = \sin^{-1} \left(\frac{\beta}{-2 + \beta} \right), \quad \beta = \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} \quad (7)$$

ここに、 ε_v は体積ひずみ、 ε_a は軸ひずみである。ただし、平均的なダイレイタンシー特性に着目し、本来 ψ は変化するところを定数として整理した。

本研究の調査では、砂質土や岩質材において ψ は $5^\circ \sim 15^\circ$ 程度となるようである。これは、地盤や岩においても金属材料などと同様に滑り線にはほぼ平行に塑性ひずみ増分が生じることを示しているものと考えられる。これらの検討より、ダイレイタンシー角は一律 10° を仮定した。

表-2 ψ に関する文献調査

文献	試料	ψ の取り得る範囲 (degree)
山内ら ³⁾	砂質土	2.7~13.3
高橋ら ⁴⁾	岩	6.7~13.3
中川 ⁵⁾	岩	7.5~15.0
P.A. Vermeer ⁶⁾	砂質土	15
	岩	12.0~20

4. Mohr-Coulomb パラメータの決定および解析結果

解析に使用したパラメータおよび条件を表-3にまとめた。解析は重錘の衝突直前から100msec実施した。図-2および図-3に解析結果を示す。いずれの結果も衝撃力をやや過大に評価するものの、重錘貫入量に関しては実験の傾向を概ね捉えられている。

比較のために関連流動則を用いた結果も図中に併記した。さらに50msec時点における砂質土モデルの変形図を図-4に示す。関連流動則は衝撃力、重錘貫入量ともに現象を正しく捉えられていない。特に、本来は重錘が深く貫入するはずのところ、関連流動則は浅い深度で重錘が跳ね返るような結果が得られており、危険側の設計となりがねない。

5. まとめ

本研究ではMohr-Coulomb降伏条件の特にダイレイタンシー角の設定方法に着目した検討を行った。その結果地盤材料のダイレイタンシー角は概ね 10° 程度であった。ダイレイタンシー角 10° を用いた重錘落下実験の再現解析は、既往の実験の傾向を概ね捉えることができた。

表-3 解析条件

		砂質土FEMモデル	砕石FEMモデル
	緩衝材	砂質土	砕石
緩衝材	ϕ (degree)	35.0	45.0
	弾性係数 (MN/m ²)	31.5	87.5
	ポアソン比	0.3	0.3
	ψ (degree)	10	10
	c (kN/m ²)	0.0	0.0
	密度 (t/m ³)	1.6	2.2
RC版	弾性係数 (MN/m ²)	20000	
	ポアソン比	0.167	
	密度 (t/m ³)	1.96	
鋼材	弾性係数 (MN/m ²)	206000	
	ポアソン比	0.3	
	密度 (t/m ³)	7.85	
重錘-緩衝材間		ペナルティ法による接触定義、摩擦係数0	
緩衝材-RC版間		節点共有による剛結	
重錘の初速度 (m/sec)		鉛直下方に9.90285 (5mの高さから落下相当)	
重錘の質量 (t)		5.0 (ただし1/4モデルのため1.25t)	

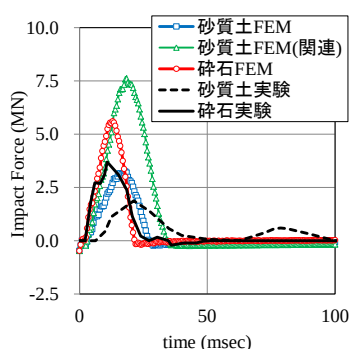


図-2 衝撃力波形

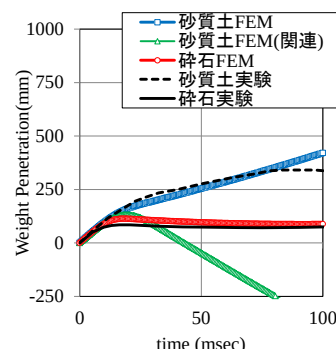
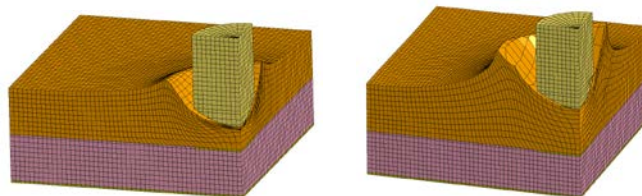


図-3 重錘貫入量



(a) $\psi = 10^\circ$ (非関連)

(b) $\psi = 35^\circ$ (関連)

図-4 砂質土モデルの変形図 (倍率1.0倍, 50msec時点)

参考文献

- 山口ら：敷砂あるいは砕石緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol. 60A, pp. 98-3-995, 2014.
- 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，日本建築学会，2001.10.
- 山内ら：三軸的圧縮および伸張試験による砂質土のせん断特性について，九州大学工学集報，第42巻，第5号，1969.
- 高橋ら：中硬岩地盤の急傾斜地における深礎の水平支持力特性に関する中規模載荷実験と数値解析，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol. 70, No. 1, pp. 150-169, 2014.
- 中川：トンネル掘削解析における実用的なひずみ軟化モデルの提案と適用，土木学会論文集F1, Vol. 70, No. 2, pp. 67-81, 2014.
- P.A. Vermeer, Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Physics of Dry Granular Media, Cargese, France, 15-26, 1997.