

砂地盤の支持力模型試験による剛塑性有限変形解析の適用性に関する研究

環境防災研究室 佐川洋亮

指導教官 大塚 悟

1. はじめに

砂質地盤では、せん断変形に対するダイレンタンシー特性から、ひずみ軟化による進行性破壊が生じることがある。進行性破壊を評価する手法として、弾塑性変形解析が期待されるが多くの定数を必要とする課題がある。そこで本研究では、進行性破壊による影響を簡易的に評価したひずみ軟化モデルを適用した剛塑性変形解析を提案する。また、提案する手法の妥当性を明らかにするために、砂質土斜面模型を用いた支持力実験を行い、提案手法による再現解析を実施することで、実験結果との比較検証を実施した。

2. ひずみ軟化モデル

剛塑性変形解析では平面ひずみ条件下で変形問題を解くため、ひずみ軟化モデルの構築には定圧一面せん断試験を採用し、東北硅砂6号を用いた試験(相対密度60%, 80%)を実施した。当試験で得られるせん断変位-せん断応力関係を、せん断変位-等価ひずみ関係に展開し、等価ひずみの一定間隔ごとのせん断応力と垂直応力からせん断強度(せん断抵抗角, 粘着力)を求め、せん断強度-等価ひずみ関係を構築する。当試験で得られた相対密度60%時のせん断強度-等価ひずみ関係を図-1に示す。せん断抵抗角はひずみ硬化後にひずみ軟化を示し、残留強度になる傾向を示したのに対し、粘着力はバラつきのある傾向を示し、ひずみ軟化の傾向を適切に表現した結果が得られなかった。そこで本稿では、粘着力もせん断抵抗角と同様のひずみ軟化を示すものと仮定した。また、進行性破壊はひずみ軟化によるものであるため、本研究ではひずみ軟化を示すまでは常にピーク強度である仮定した。

相対密度60%時の最終的なひずみ軟化モデルを図-2に示す。また、ひずみ軟化モデルを評価する近似曲線としてロジスティック曲線式に基づく式(1)を用いた。ここで、 S_p はピーク強度、 S_r は残留強度、

係数 d_1 , d_2 は材料定数、 e は等価ひずみである。

図-2に示すように、各相対密度のひずみ軟化パラメータをひずみ軟化モデルに対応するように決定した(表-1)。

$$\phi = \frac{S_p - S_r}{1 + d_1 \exp(-d_2 e)} + S_r \quad (1)$$

3. 砂質土斜面の支持力模型試験と再現解析

砂質土斜面模型に対して、法肩での荷重載荷試験を実施した。斜面傾斜角 60° および 40° の斜面模型を38.5 mmを共通とし、底面幅は傾斜角 60° は195 mm、

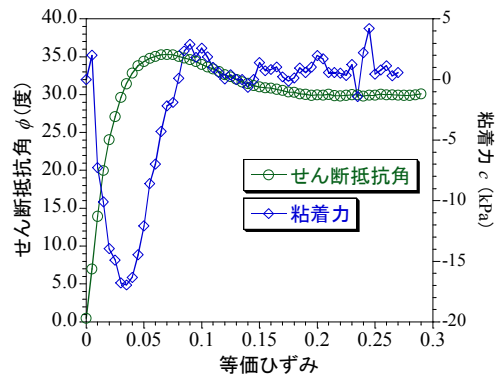


図-1 せん断強度-等価ひずみ関係：相対密度60%

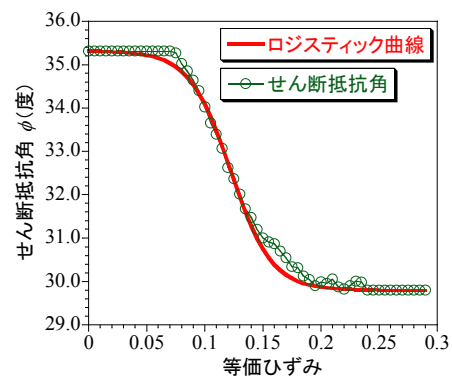


図-2 ひずみ軟化モデル：相対密度60%

表-1 ひずみ軟化パラメータ

相対密度	せん断強度	ピーク強度	残留強度	d_1	d_2
60%	せん断抵抗角 ϕ ($^\circ$)	35.4	29.9	0.0005	-80.0
	粘着力 c (kPa)	3.3	0.1	0.0005	-80.0
80%	せん断抵抗角 ϕ ($^\circ$)	36.7	29.8	0.0067	-50.0
	粘着力 c (kPa)	4.2	0.1	0.0067	-50.0

対象とし、高さ 160 mm、天端幅 100 mm、奥行き傾斜角 40° は 290 mm の斜面模型を作製した。載荷位置は模型地盤の天端法肩部とし、長さ 50 mm の剛な載荷板を介して載荷を行う。模型地盤の材料には東北珪砂 6 号を使用した。実験ケースは相対密度 (60%, 80%) と斜面勾配 (40° , 60°) を変更した, Case1 (60% , 60°), Case2 (80% , 60°), Case3 (60% , 40°), Case4 (80% , 40°) の 4 ケースを実施した。

図-3に各ケースで得られた荷重-変位関係を示す。斜面勾配が緩い (Case3, Case4) 場合に支持力が大きくなり、同じ斜面勾配でも相対密度が大きい (Case2, Case4) 方が、支持力が大きくなる結果が得られた。また、斜面勾配 60° の場合は残留強度時の荷重が一定値に落ち着くが、斜面勾配 40° の場合は残留強度時の荷重に差が生じる結果が得られた。

砂質土斜面模型の載荷実験に対して、提案するひずみ軟化モデルを適用した剛塑性変形解析による再現解析を実施した。ひずみ軟化パラメータは表-1で示したパラメータを用いる。解析ケースは模型実験と同様の計 4 ケースを実施したが、相対密度が異なるケースにおいては、結果に大きな差異が確認されず、斜面勾配が異なるケースにて異なる傾向が得られたことから、本稿では斜面勾配が異なる Case1 と Case3 のみの比較を行うものとした。模型実験結果と剛塑性変形解析結果を図-4に示す。また、比較対象は変形発生 (黒点線箇所) から残留変形までを対象とした。両ケースともにピーク強度時の荷重値がほぼ一致する結果が得られた。また、斜面勾配が急な Case1 ではひずみ軟化時の荷重の低下傾向に差が見られるが、残留時の荷重が一致する結果が得られた。これは模型実験では斜面勾配が急な場合は支持力が小さく、せん断変形時の拘束圧が小さかったことが原因と考えられる。提案するひずみ軟化モデルはせん断強度の低下を等価ひずみによって評価し、模型実験のようなせん断変形時の応力状態を考慮していないため、荷重の低下傾向が模型実験結果と異なる結果を示したと考えられる。対して、斜面勾配が緩い Case3 ではひずみ軟化時の荷重の低下傾

向が一致するが、残留時の荷重に大きな差が得られた。緩い斜面は急な斜面に比べてせん断変形時の拘束圧が大きいため、荷重の低下傾向が一致したと考えられる。残留時の荷重に大きな差が見られた原因は、現時点での模型実験結果からでは明確にすることが出来ないため、今後の研究にて明確にする。

以上の考察から、ひずみ軟化モデルを適用した剛塑性変形解析を用いることで、ひずみ軟化挙動を表現できることが示されたが、せん断変形時の応力状態によっては適切に表現することが困難であることが示され、今後、適用性の向上を図る予定である。

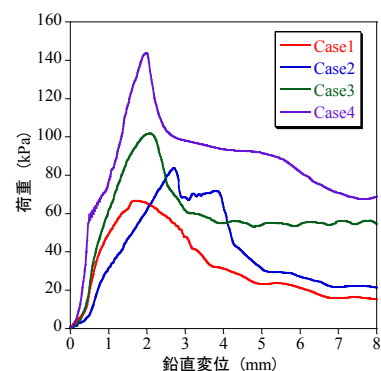


図-3 荷重-変位関係 (実験)

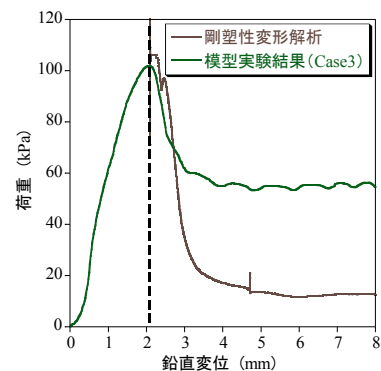
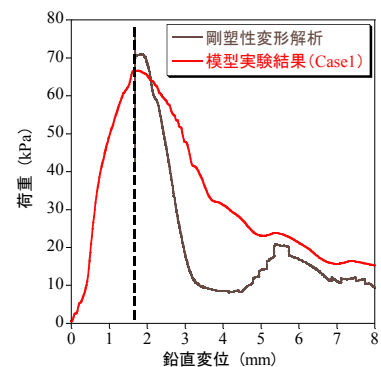


図-4 模型実験結果と剛塑性変形解析の比較