

帯基礎の支持力問題を題材とした地盤解析における V&V の試行例

群馬大学 学生会員 ○久保田健太
群馬大学 正会員 若井明彦

1. はじめに

数値解析を実務に活用する利点として、実験をせずに安全性を定量的に予測できること、工期の短縮や費用を低減できることが挙げられる。近年、数値解析は原子力発電や自動車・航空機など様々な分野のものづくりに用いられている。しかし、数値解析を有効な手段として使うためには、解析結果の信頼性を保証しなければならない。そのため、解析結果に対して V&V を行い結果の信頼性を保証する必要がある。

本研究では、群馬大学地盤工学研究室が開発した有限要素解析プログラムである GA3D¹⁾ について、帯基礎の支持力を推定する問題を対象にして試行的に V&V を行う。

2. V&V の概要

V&V は、検証 (Verification) と妥当性の確認 (Validation) の二段階に分かれており、さらに検証はコード検証 (Code Verification) と解析検証 (Calculation Verification) の二段階に分けられる。コード検証は、理論解との比較を通じてプログラミングエラーがないことと格子収束性を確認する。解析検証では、理論解との比較ではなく対象とする問題における格子収束性の確認及び解析条件の検証を行う。妥当性の確認では、比較の客観性を確保するため実験条件や手順を決定した上で実験と解析を複数回実施し、結果を比較する。その時、予め設定した妥当性の確認の要求精度を満足するか判定する。²⁾ 本稿では、材料定数の変化を考慮したコード検証について報告する。

3. 解析条件

コード検証を行う解析モデルの条件は、境界条件を図 1(左)のように強制変位を加える部分と底面を xz 方向固定し、側面部分を z 方向にローラーする。また、図 1(右)のように強制変位の範囲を 0.5(m)とし最終沈下量を 0.05(m)とする。材料定数は、基本条件を表 1 のものを用いた。また、実際に解析する地盤の材料定数は多種多様であるため、材料定数の変化による正確性への影響を調べるために表 2 の材料定数を用いる。

4. 幾何学的なモデル化の誤差

半無限大に広がる地盤の範囲を有限のモデルにするために本稿では、有限にするための地盤の区切り方として図 2 の様に、地盤の深さ方向である z 軸方向の範囲限定するケース①、地盤の幅方向である x 軸方向の範囲限定するケース②を用いて、モデル化を行う。

ケース①は、解析範囲 0.5(m), 1.0(m), …, 10.0(m)について行う。本稿では、粘着力を変化させた場合の結果を極限支持力で 10.0(m)を基準として表すグラフを図 3 に示す。すべての材料定数において、誤差は 0.2% 以内に収まっていることを確認した。

ケース②は、解析範囲 1.5(m), 2.0(m), …, 10.0(m)について行う。同様に粘着力を変化させた場合の結果を極限支持力で 10.0(m)を基準としたグラフを図 4 に示す。その時、半無限大の範囲の場合に収束しており、全体の誤差も 0.1%以内に収まっていた。

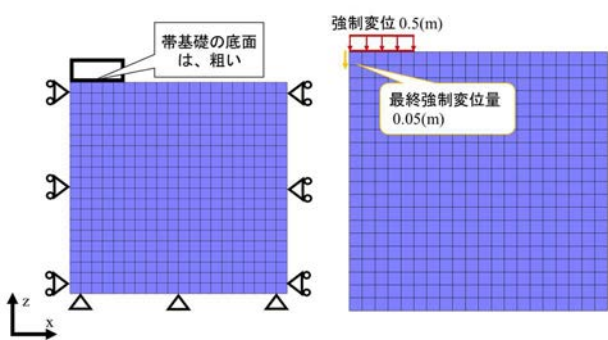


図 1 解析モデルの条件

表 2 材料定数の変化

	粘着力 (kPa)	ポアソン 比	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング率 (kPa)	静止土圧 係数
1	40	0.2	11	100000	0.3
2	60	0.25	13	150000	0.4
3	80	0.3	15	200000	0.5
4	100	0.35	17	250000	0.6

表 1 材料定数 (基本条件)

せん断抵抗角 φ (°)	ダイレイタンス角 ψ (°)	ヤング係数 E (kPa)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kPa)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	初期静止土圧係数 Ko
0	0	100000	0.3	100	15	0.5

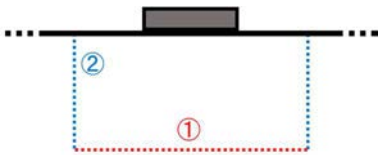


図 2 モデル化のケース

キーワード：V&V 有限要素法 弾塑性
連絡先 ：〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 ・ 0277-30-1622

5. 数値解析上の誤差

GA3D では、増分法と修正 Newton-Raphson 法の組み合わせが適応されるため、収束判定条件や 1 ステップあたりの強制変位量が数値解析解の精度に関与する。そのため、離散化した式の近似解の収束を確認する条件である収束判定条件と 1 ステップあたりの強制変位増分について検討を行う。

収束判定条件は、 $1.0\text{E-}4$ 、 $1.0\text{E-}5$ 、 $1.0\text{E-}6$ として行い、プラントルの支持力公式³⁾より求めた理論解を基準とした極限支持力との関係のグラフを図 5 に示す。すべての材料定数において、収束判定条件を小さくするにつれ、収束することを確認した。

1 ステップあたりの強制変位増分では、粘着力を変化により異なる極限支持力を比較するために $5.0\text{E-}6(\text{m})$ の時の極限支持力を基準としたグラフを図 6 に示す。 $2.0\text{E-}4(\text{m})$ 以上においては、それ以下に比べて異なる値が出た。よって、1 ステップあたりの強制変位増分が $1.0\text{E-}4(\text{m})$ 以上であると解析結果が安定しないことを確認した。

6. 要素幅による理論解への収束性

6 章までに述べたことを考慮し、要素幅が小さくなるにつれての理論解への収束性を確認する。理論解を基準とした極限支持力のグラフを図 7 に示す。極限支持力において、理論解に収束することを確認できる。よって、本稿の材料定数全てによって確認することができたため、本稿の材料定数においてプログラムは工学的に十分な計算精度を有していると推定される。

7. まとめ・今後の課題

今回、コード検証について幅広い材料定数において解析モデル作成過程から解析に沿って行い、それぞれでの誤差を示すことができた。また、理論解への収束性を確認することもできた。そのため今後、本稿で行っていない材料定数にて行うとともに、模型実験(図 8)において帯基礎の支持力問題について行い、解析検証・妥当性の確認を行うことで、地盤工学分野において試行的に V&V を行う。

参考文献

- 1) 地盤工学会 (2020) : 地盤技術者のための FEM シリーズ②「有限要素法をまなぶ」, pp. 91-108.
- 2) The American Society of Mechanical Engineers (2012): An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V10.1.
- 3) Prandtl, L. (1920) : Über die härte plastischer körper, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Vol.1920, pp.74-85, 1920.

謝辞

本研究では、「土木分野の数値解析における V&V に関する小委員会」の皆様にご指導いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

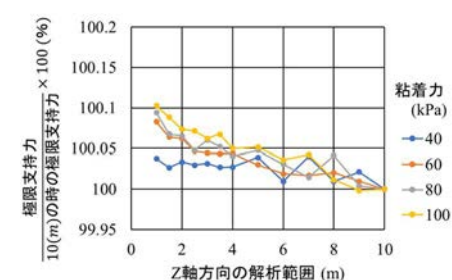


図 3 粘着力変化による z 軸方向の解析範囲の拡大

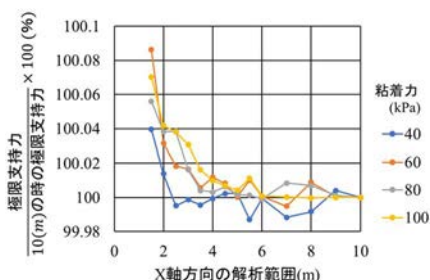


図 4 粘着力変化による x 軸方向の解析範囲の拡大

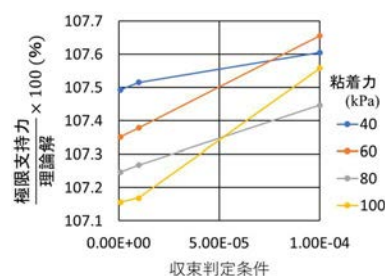


図 5 収束判定条件

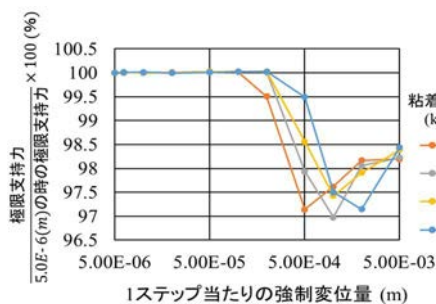


図 6 1 ステップあたりの強制変位量

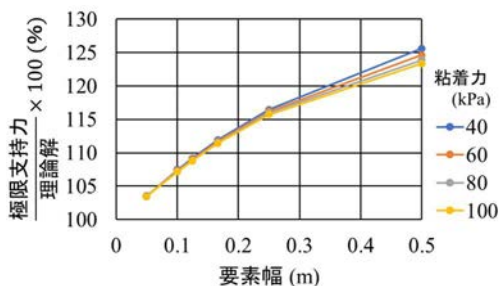


図 7 理論解への収束

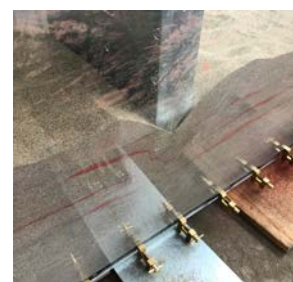


図 8 模型実験