

非関連流れ則を用いた地盤材料の弾塑性解析

技術基幹ユニット 後藤 有志

1. はじめに

地盤の弾塑性解析を行う場合、解析コードの問題や解析コスト等の理由により、関連流れ則を用いる場合が多い。

しかし、関連流れ則を用いた場合、塑性化した要素の体積塑性ひずみが大きく生じることにより、地盤材料が想定以上に膨張することがある。

また、地盤構造物が破壊する場合には、図-1¹⁾に示すように、せん断ひずみが局所的に発生しせん断帯が生じることが多い。この現象を数値解析でシミュレートするには、大変形理論の適用に適した有限差分解析コードFLACが有効であるとされている²⁾。

ここでは3軸圧縮試験および支持力問題をシミュレートすることにより、関連流れ則を用いた場合と非関連流れ則を用いた場合の違いと、微小変形理論と大変形理論を用いた場合の違いを有限要素法解析コード(MIDAS社製GTSNX)を用いて比較した。

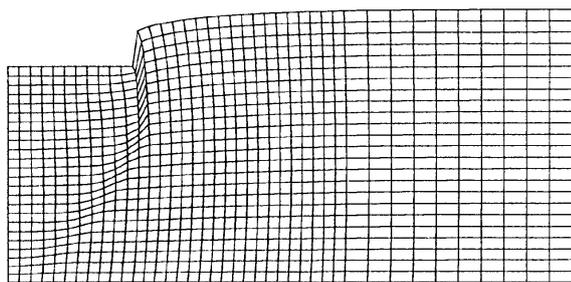


図-1 大変形理論を用いた支持力解析の例¹⁾

2. 関連流れ則と非関連流れ則

塑性論では、式(1)のように塑性ひずみ増分は塑性ポテンシャル関数 g の外向きの法線ベクトルで与えられる。この塑性ポテンシャル関数 g と降伏関数 f が同じ場合を関連流れ則と呼び、異なる場合を非関連流れ則と呼ぶ。一般に地盤材料の弾塑性解析では、この g と f に同じ Mohr-Coulomb モデルを用い、関連流れ則とする場合が多い。

$$d\epsilon^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (1)$$

しかし、この場合、図-2に示すよう塑性ひずみの体積成分 $d\epsilon_v^p$ が大きく、塑性した要素が実挙動よりも過大に膨張することが多い³⁾。

この現象を避けるため、塑性ポテンシャル関数 g に内部摩擦角 ϕ の代わりに内部摩擦角 ϕ より小さいダイレイタンシー角 ψ を適用し、体積膨張を小さくする(図-3)。なお、 $\phi=0$ とすると、塑性ひずみ増分はせん断方向のみとなる。これは、Trezca モデルを用いた関連流れ則と同じになり、また、 $\phi=0$ とした粘性土の場合と同じ形になる。

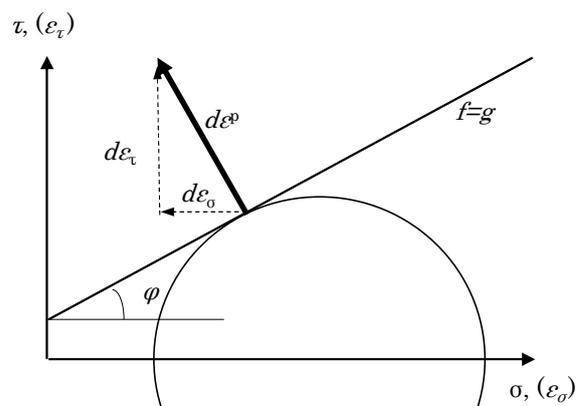


図-2 関連流れ則の場合の塑性ひずみ増分

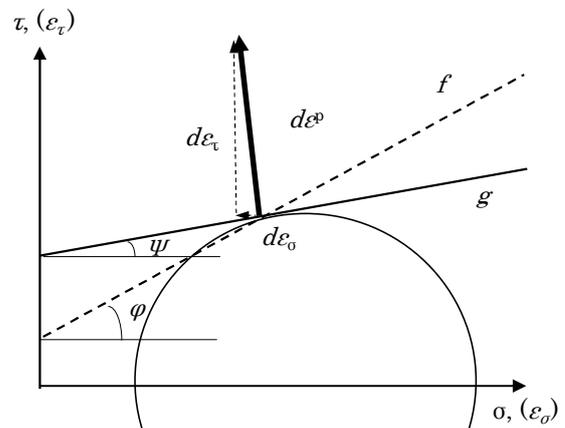


図-3 非関連流れ則の場合の塑性ひずみ増分

3. 3軸圧縮試験のシミュレーション

3.1 解析概要

通常の土質試験で行われる供試体（ $\phi 50 \times 100$ ）の1/8モデル（図-4(a)）を用いて、表-1に示すケースの比較解析を行った。

解析条件は下記のようにした。また、等質なモデルではすべての要素が一度に塑性化するため、ここでは、初期欠損としてメッシュの1要素を除去した（図-4(c)）。

【解析条件】

境界条件：下面の鉛直方向を拘束

ZX面、ZY面は面に垂直方向を拘束
（図-4(b)）

拘束圧：軸方向荷重載荷前に上面と曲面に
100kN/m²の圧力を載荷（図-4(c)）

軸方向荷重：上面鉛直方向に強制変位を0.5mm
まで載荷
（対称性より軸変位としては1.0mm）

表-1 解析ケース

ケース名	流れ則	変形理論
関-小	関連	微小変形
関-大		大変形
非-小	非関連	微小変形
非-大		大変形

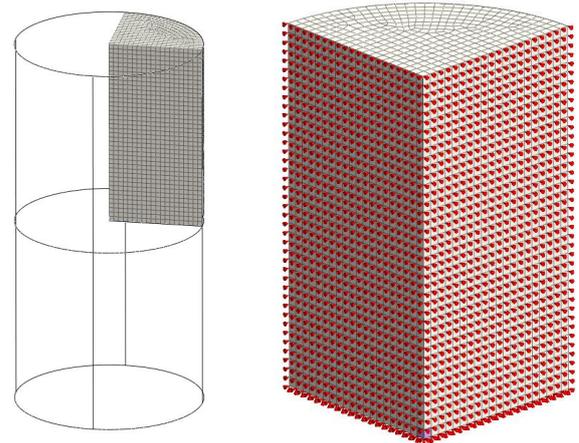
表-2 解析物性値

単位体積重量 γ (kN/m ³)	変形係数 E(kN/m ²)	ポアソン比 ν
20	50000	0.3
粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	ダイレイタンス角 ψ (°)
5	30	0

3.2 解析結果

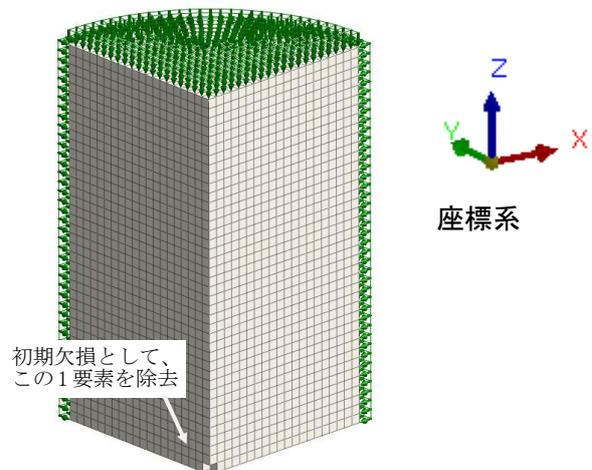
(1) 変形

各解析ケースにおいて、最終ステップ（強制変位を0.5mm載荷、軸ひずみ0.01%時）におけるZX面における変形図を図-5に示す。(a)(b)の関連流れ則では、ほぼ一様に水平方向に変形しておりその違いはほとんどない。(c)(d)の非関連流れ則では、局所的にせん断帯が生じたように変形が生じている。ここで、両者のせん断帯が生じる角度が異なっているように見えるが、「(2)最大せん断ひずみ」で説明するように、ZY面の変形がを考慮すると、やや角度が異なっているものの大きな差異は無い。



(a) メッシュ

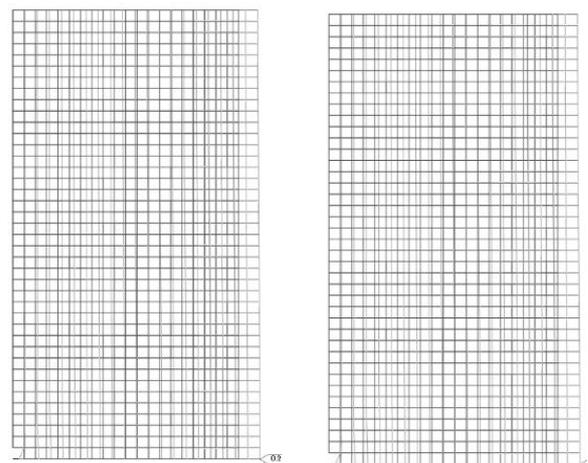
(b) 境界条件



初期欠損として、この1要素を除去

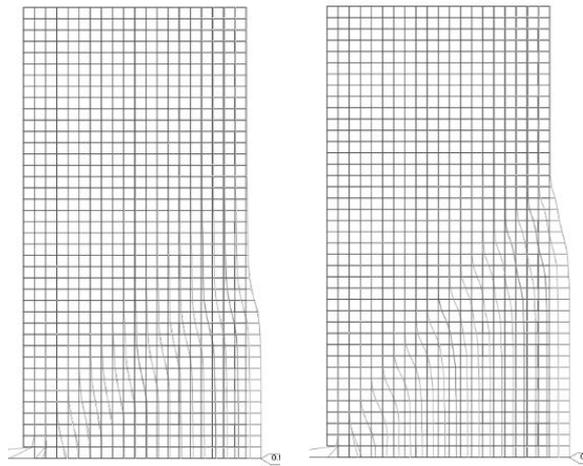
(c) 拘束圧

図-4 解析条件



(a) 関連-微小

(b) 関連-大変形



(c) 非関連-微小 (d) 非関連-大変形

図-5 変形図

(2) 最大せん断ひずみ

同様に、最大ひずみ分布図を図-6に示す。ここで、最大せん断ひずみのレンジ幅は、最大せん断ひずみが集中して発生している箇所がわかりやすいように調整してある。

図を見ると、(a) (b)の関連流れ則では、どちらもほぼ同様の発生状況で、明瞭なせん断帯は生じていない。これに対して、(c) (d)の非関連流れ則では、明瞭なせん断帯が生じている。ただ、せん断帯の生じる角度は非対称であり、また、大きな角度が生じる箇所が異なる。これは、メッシュ分割が非対称であることによると考えられる。

(3) 塑性領域

図-7に塑性領域図を示す。(a) (b) (c)は図-6の向かって左側(ZY面)、(d)は向かって右側(ZX面)の要素である。(a) (b)の関連流れ則では、すべての要素が塑性化(赤印)している。それに対し(c) (d)の非関連流れ則では、せん断帯付近より上部の要素は塑性化しておらず、せん断帯が生じている付近で、降伏状態から非降伏状態に戻った箇所(青印)が見られる。

(4) 応力—ひずみ曲線

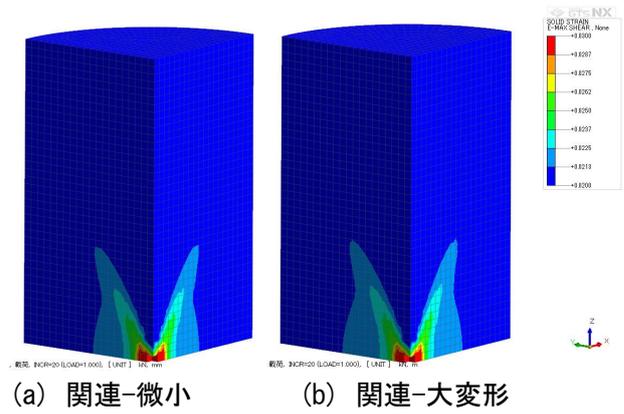
図-8に荷重変位曲線を示す。ここで、各値は以下のように求めている。

$\sigma 1$: 制変位载荷面の反力 / 载荷面の面積

$\sigma 3$: 拘束圧 (100kN/m²)

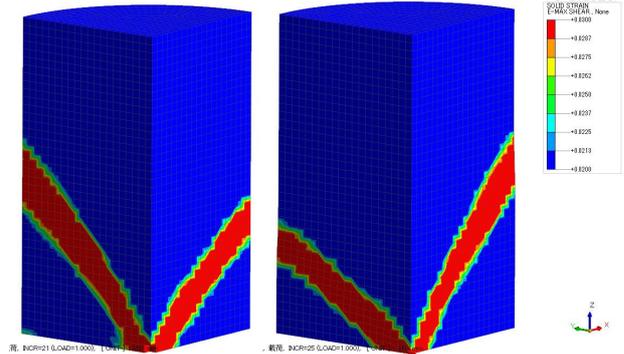
$\epsilon 1$: 強制変位量 × 2 / 供試体高さ (100mm)

図-8を見ると、微小変形理論、大変形理論にかかわらず、関連流れ則、非関連流れ則の両者の挙動はほぼ同じであり、関連流れ則の最大値は、非関連流れ則の最大値より少し大きい。また、軟



(a) 関連-微小

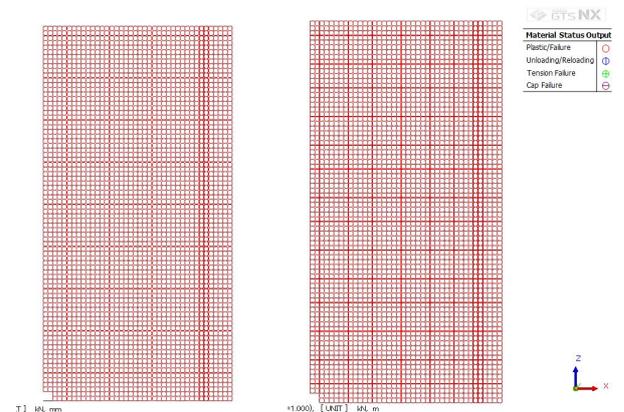
(b) 関連-大変形



(c) 非関連-微小

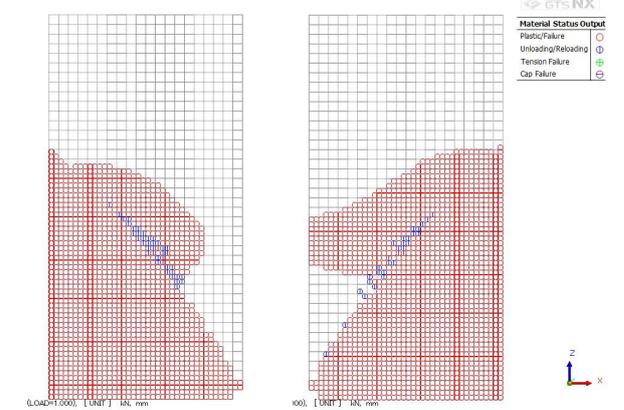
(d) 非関連-大変形

図-6 最大せん断ひずみ図



(a) 関連-微小

(b) 関連-大変形



(c) 非関連-微小

(d) 非関連-大変形

図-7 塑性領域図

化を考慮しない弾完全塑性モデルにもかかわらず、ピーク後に荷重が減少する軟化傾向を示している。それに対し、要素内の軸ひずみと軸応力の関係は、弾完全塑性となっており相違がある。この原因は検討する必要がある。

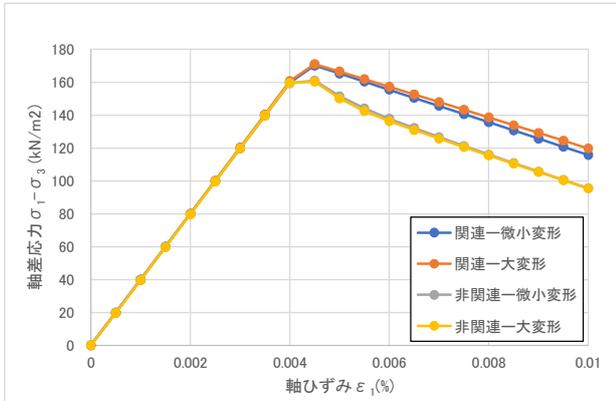
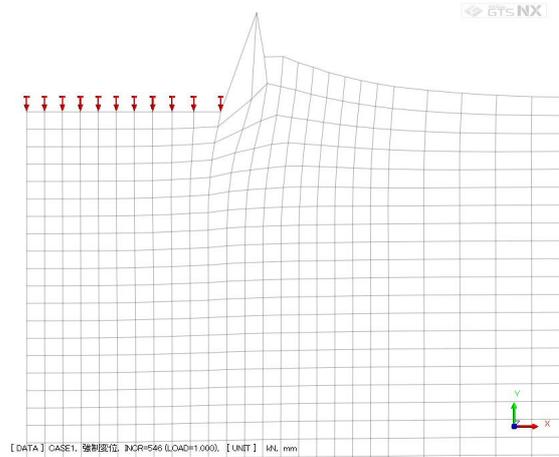


図-8 応力—ひずみ曲線

面横の地表面が大きく隆起しているのに対して、非関連流れ則ではほとんど隆起していない。これは、関連流れ則では大きな塑性体積ひずみが発生するのに対して、非関連流れ則では塑性体積ひずみが全く発生しないことによると考えられる。



(a) 関連—微小

4. 支持力問題のシミュレーション

4.1 解析概要

2次元平面ひずみモデルにおいて、地表面に強制変位を载荷した。図-9にメッシュ図を示す。解析ケースおよび解析物性値は、先に示した3軸圧縮試験における表-1, 2と同様である。

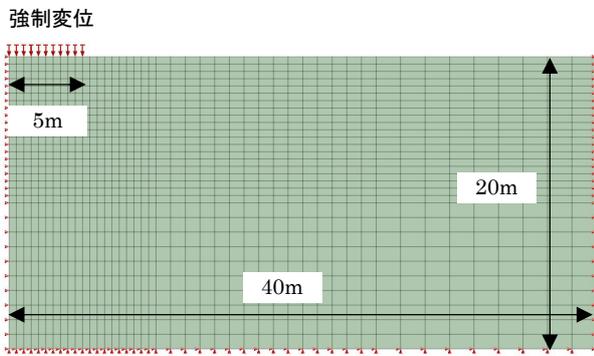
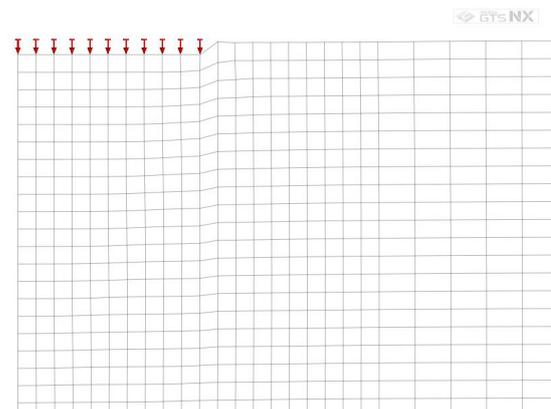


図-9 解析条件



(b) 非関連—微小

図-10 変形図

4.2 解析結果

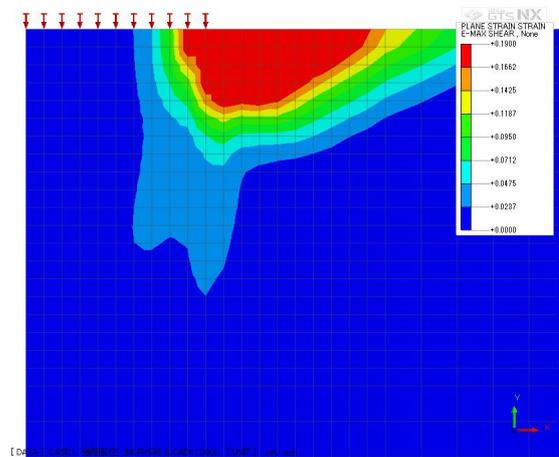
以下に解析結果を示す。ただし、3軸試験の解析と同様に微小変形と大変形の解析結果の間に大きな差異が無かった。そのため、結果図に関しては微小変形の結果のみを示す。また、各図は各ケースの最大沈下量は異なるが、ここでは比較がしやすいように強制変位を200mm 载荷した際の図とした。

(1) 変形

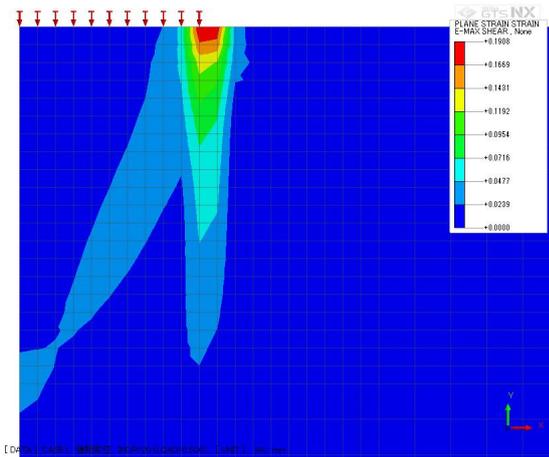
変形図を図-10に示す。関連流れ則では、载荷

(2) 最大せん断ひずみ

最大せん断ひずみ図を図-11に示す。最大せん



(a) 関連—微小



(b) 非関連—微小

図-11 最大せん断ひずみ図 (拡大)

断ひずみが、関連流れ則では広い範囲にが生じているが、非関連流れ則では荷重面端の直下に集中して生じており、比較的せん断面が出来ているように見える。

(3) 塑性領域

塑性領域図を図-12に示す。非関連流れ則では強制変位荷重位置横に引張破壊が生じているが、関連流れ則では生じていない。この原因は、図-10の変形図から説明できる。

(4) 荷重変位曲線

大変形解析を含む全ケースの結果を含めた荷重—変位曲線を図-13に示す。ここで鉛直反力Pは荷重節点における反力の総和である。

図を見ると、非関連流れ則の場合のほうが非線形性が強く、最大沈下量も大きい。

なお、関連流れ則の2つのケースは200mmの強制変位で収束の限界になっているに対し、非関連流れ則のケースに関しては200mm以上の強制変位でも収束しており、大変形では270mm、微小変形では360mmまで解析できている。また、このケースでは収束条件や荷重ステップを調整すれば、これ以上の沈下量の解析が出来る可能性がある。

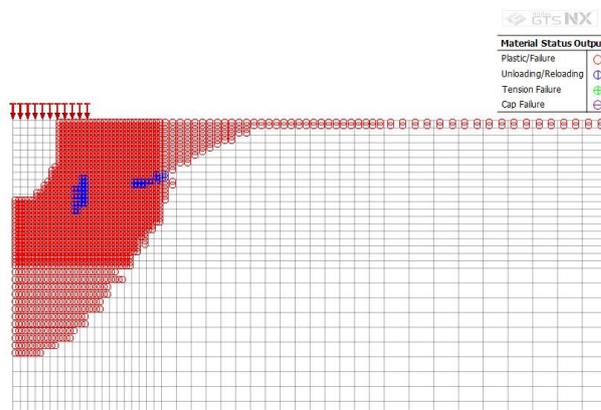
5. おわりに

関連流れ則と非関連流れ則、および微小変形理論と大変形理論を用いた解析を行い、その結果を比較した。その結果、下記のような結果を得た。

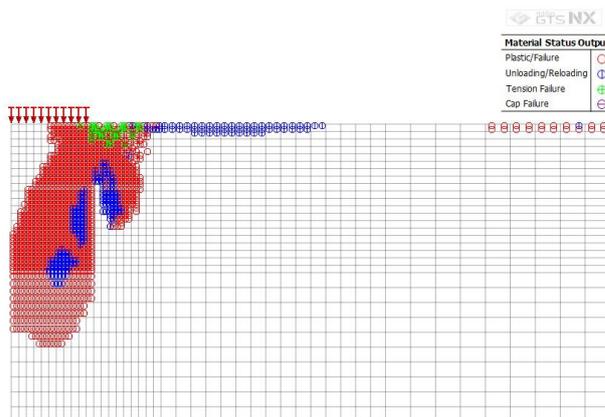
- ・微小変形理論と大変形理論を用いた結果に大きな相違はなかった。
- ・一般に、変形の局所化は大変形理論を用いた場

合に発生する言われているが、今回の解析では、非関連流れ則を用いた場合に発生した。

- ・支持力問題の解析では、関連流れ則を使用すると荷重面周辺で過度な膨張が発生する。



(a) 関連—微小



(b) 非関連—微小
図-12 塑性領域図

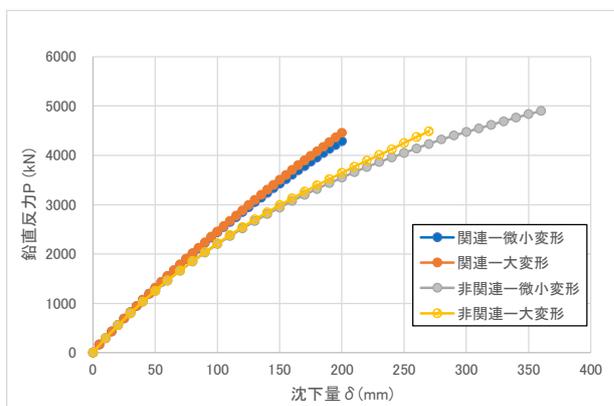


図-13 荷重変位曲線

ただし、これらの結果は、有限要素法解析コード（MIDAS 社製 GTSNX）を用いて得られたものである。解析コードの持つ特殊性は原因であることも考えられる。結論付けるには注意が必要である。

参考文献

- 1) 伊東 孝：変形局所化理論を適用とした岩盤構造物の安定解析に関する基礎的研究、名古屋大学学位論文、1994
- 2) 中川光雄、蔣 宇静、江崎哲郎：大変形理論の岩盤挙動および安定性の評価への適用、土木学会論文集 No. 575/Ⅲ-40, 93-104, 1997