

第10回「PLAXIS+ti」モデル」プログラムセミナー
2025年 11月 6日（木）

繰返し載荷時におけるジオシンセティックス敷設による補強効果

株式会社IMAGEi Consultant 磯部有作
大成ロテック株式会社 秋光萌生
福岡大学 佐藤研一
福岡大学 三隅稜太

1. 研究背景

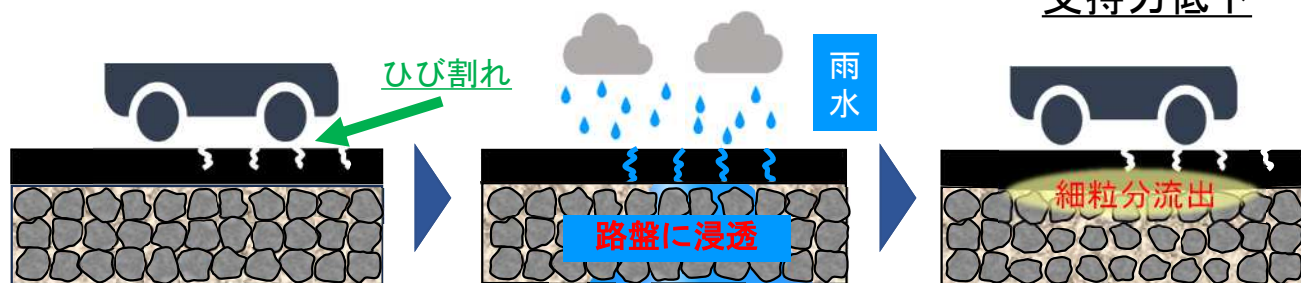
1.1 道路舗装について

早期劣化メカニズム

表層ひび割れ発生

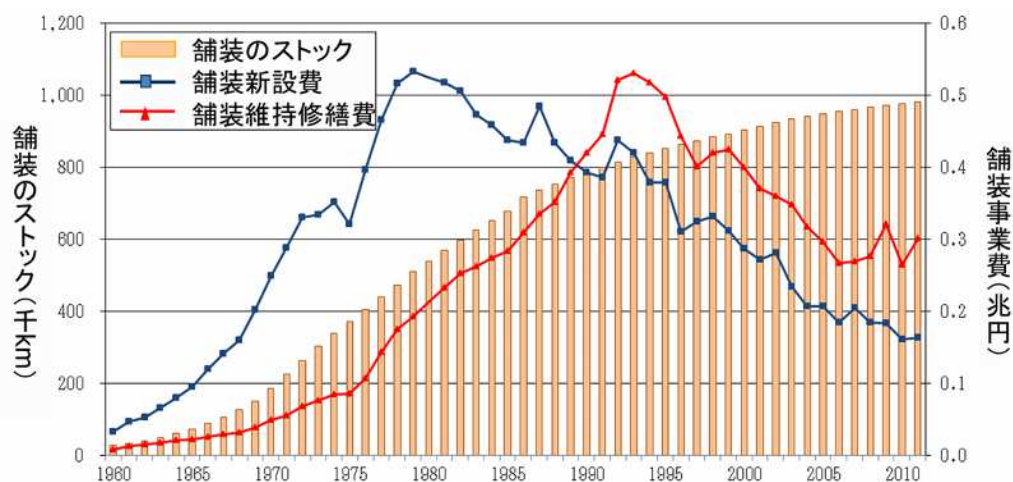
ひび割れから雨水浸透

ポンピングが起こり
支持力低下



このポンピング現象により
アスファルト舗装版と路盤との間に
空洞が出来ていく

空洞が出来た状態で交通荷重が
かかるとアスファルト舗装版の破壊が
進み表面が亀甲状にひび割れる



舗装ストックと事業費の推移

問題点

- As舗装の構造設計における耐用年数より早期劣化する道路が多発
- 道路の舗装事業費が減少しており、維持管理費の負担が増加している

道路舗装を長寿命化できる工法が必要

1. 研究背景

1.2 本研究の着眼点—ジオシンセティックスを用いた路盤補強

■ ジオシンセティックス：土木用途の高分子材料（繊維、プラスチック、ゴムなど）を用いた製品の総称



特徴

- ① **引張に対する強度**がある
- ② 伸びが大きく、**たわみ性**がある
- ③ **透水性**や止水性を持たせる
- ④ 軽くて薄く、**施工しやすい**



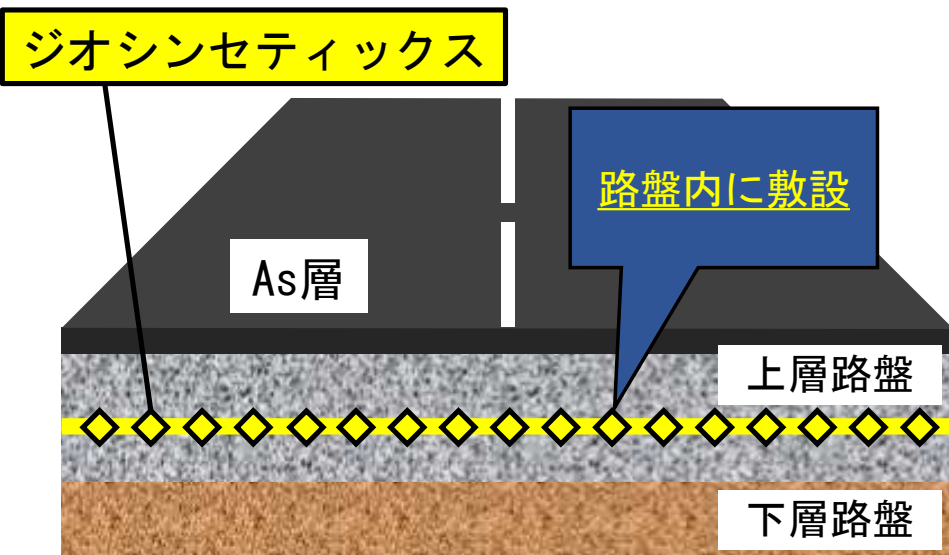
ジオグリッド



ジオネット

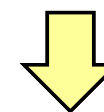


織布



施工例

盛土や土擁壁では補強材、道路舗装では軟弱地盤上の舗装構築の際の分離材としての例は存在するが、
路盤補強材として実際に使用される例は少ない



路盤内へのジオシンセティックス敷設の検討

1. 研究背景

道路舗装の長寿命化の現状と課題の把握

早期劣化の現状と課題とそのメカニズム

試験施工現場 における検討

- ・ 大成ロテック(株)技術研究所構内で試験施工
- ・ ジオシンセティックスを用いた路盤強化工法の検討, 土木学会第79回年次学術講演会
- ・ ジオシンセティックスを用いた路盤強化工法の検討(その2), 土木学会第80回年次学術講演会

小型土槽における変形抑制効果の検討

- ・ 補強材有無による単調載荷と繰返し載荷での現象の把握
- ・ ジオシンセティックスの変形抑制効果の把握

FEM解析における変形抑制効果の検討

- ・ 補強材有無による単調載荷と繰返し載荷での現象の把握
- ・ ジオシンセティックスの変形抑制効果の把握
- ・ ひずみ、応力の観点からの路盤支持力効果の把握

繰返し載荷時におけるジオシンセティックスの補強効果の評価

1. 研究背景

本研究の検討

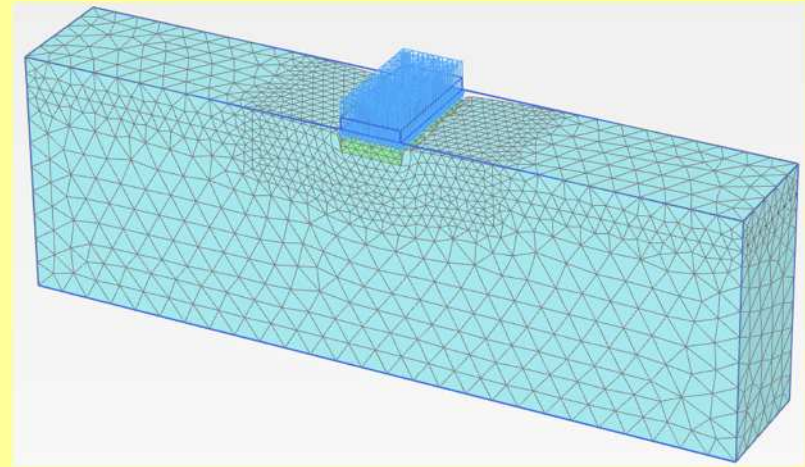
本研究室では支持力強度の把握を主に検討していたが、
現場では確認できない繰返し载荷をともしう場合のジオシンセティックスの補強効果を
室内実験・FEM解析で検証行った

小型土槽を用いた繰返し载荷試験



- ✓ 土槽内に路盤を模擬し、その路盤に繰返し圧力をかけていくことで路盤がどのような変形をするか、どれほど沈下するのかを確認する

FEM解析を用いた繰返し载荷試験



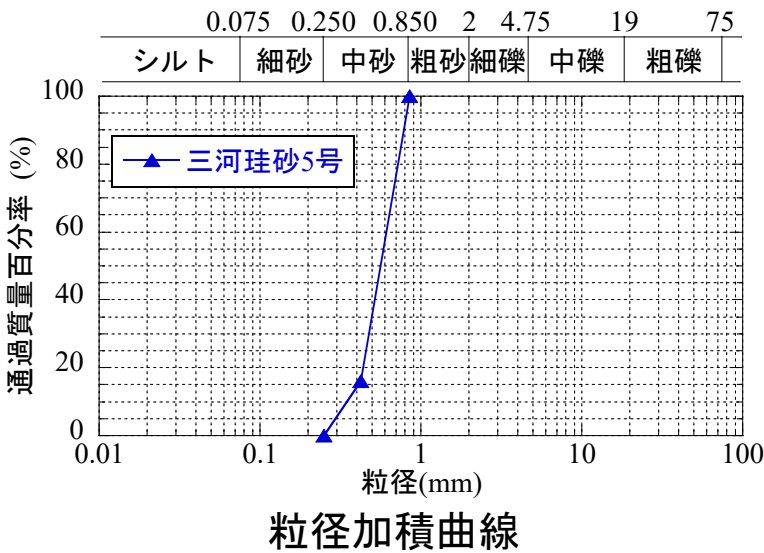
- ✓ 小型土槽をモデル化した模型をFEM解析し、土槽実験では判別できない応力やひずみの分布図から路盤支持力を確認する

本研究では**土槽実験・解析**の2つの手法によりまずは**ジオシンセティックスそのものの補強効果**を把握する

2.1 実験試料・手順

試料の物理特性

試料	三河珪砂5号
写真	
土粒子の密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.655
最大間隙比	1.139
最小間隙比	0.723
均等係数	1.766
曲率係数	1.052



補強材の概要

補強材	ジオグリッド
写真	
引張強さ (kN/m)	10
目合い (mm)	46

作製手順

①



試料計量

②



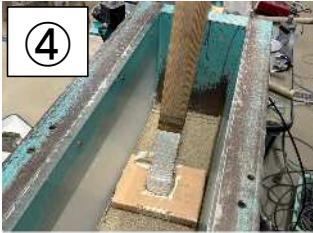
含水比調整

③



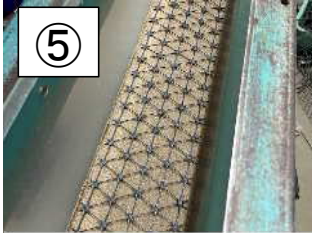
試料投入

④



締固め

⑤



敷設

⑥



締固め

2. 実験概要 (繰返し載荷試験) ～小型土槽における変形抑制効果の検討～

2.2 実験条件

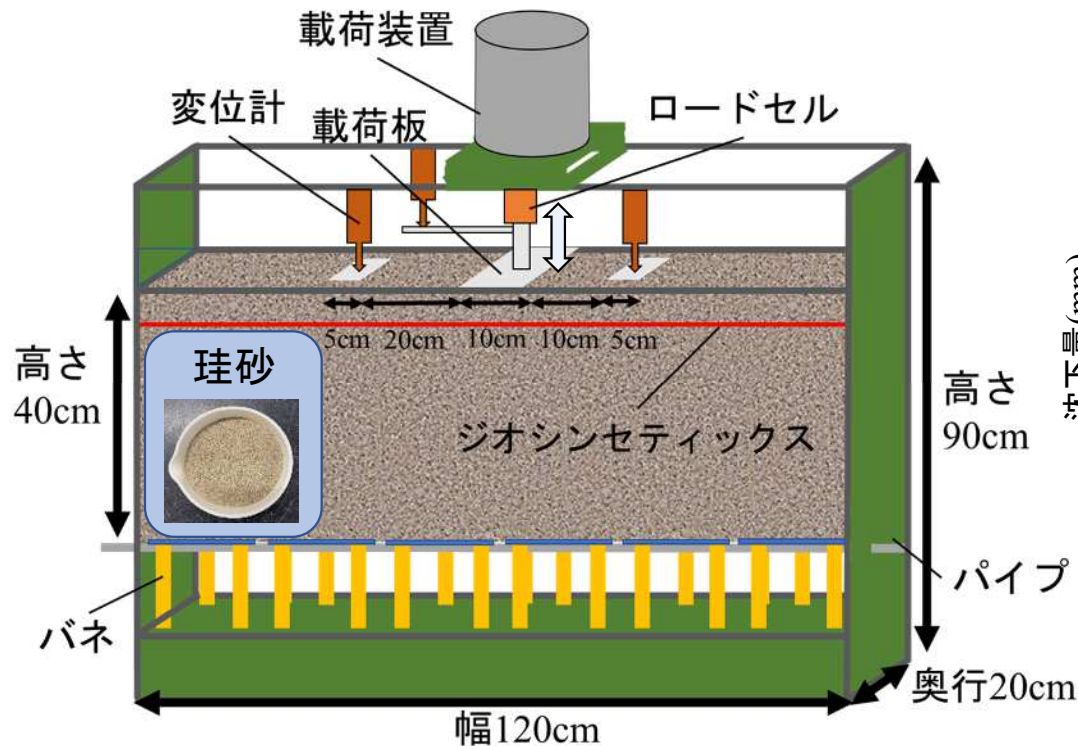
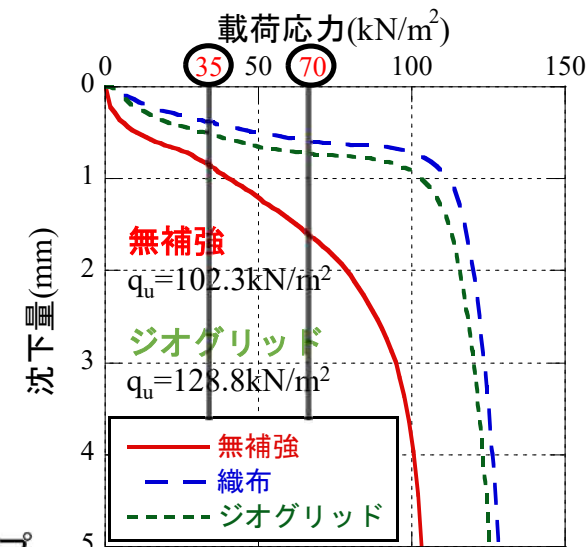
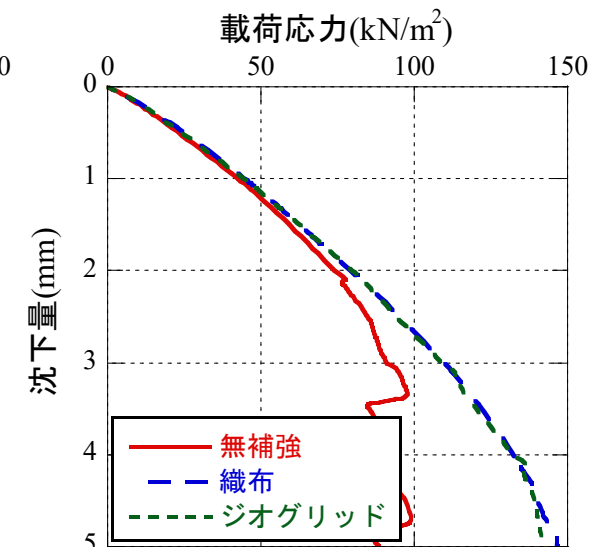


図 小型土槽の模型



(I) 土槽実験



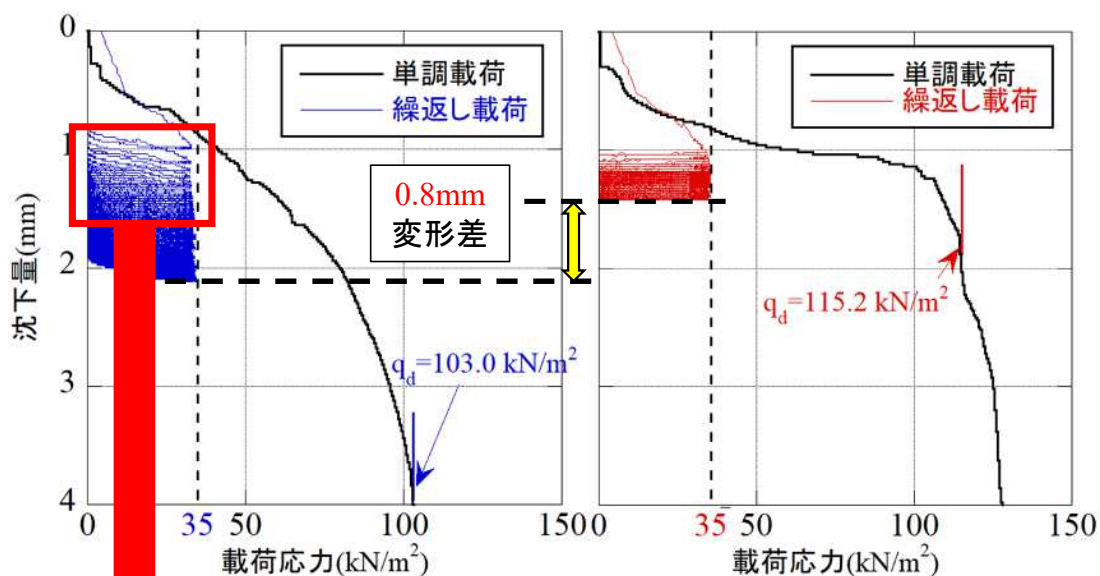
(II) 解析

載荷応力2パターン35kN/m², 70kN/m²をそれぞれ720回載荷除荷を繰り返した

表 実験条件

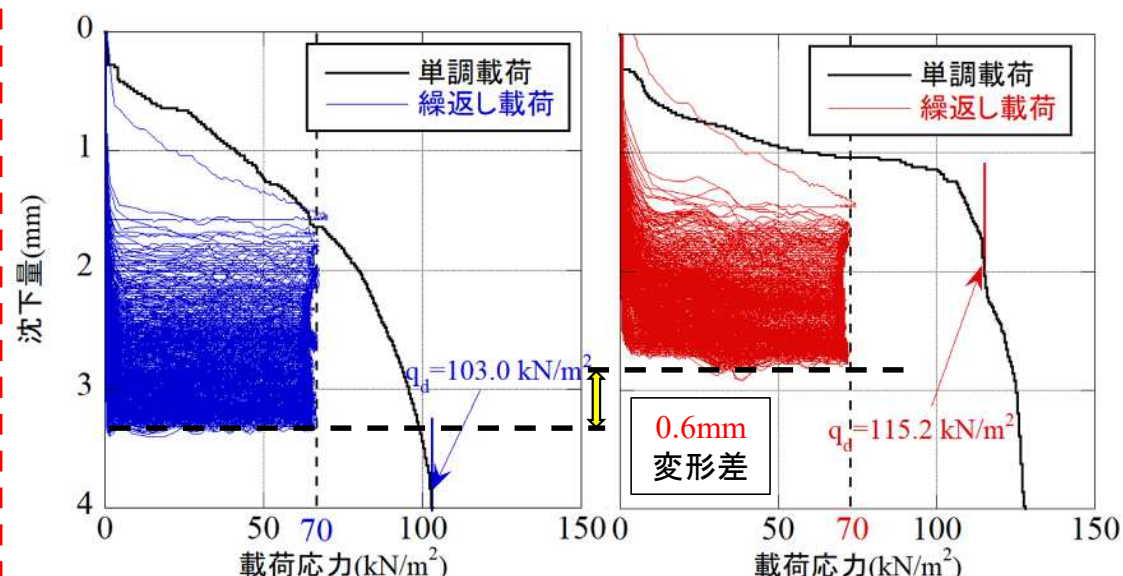
土試料	含水比 w(%)	相対密度 Dr(%)	補強材	敷設長さ (cm)	敷設深さ (cm)	繰返し載荷応力 (kN/m ²)	繰返し載荷回数 (回)
珪砂	5	80	無補強	-	-	35	720
			ジオグリッド	120	5	70	

2.3 実験結果 (繰返し载荷試験) ～小型土槽における変形抑制効果の検討～



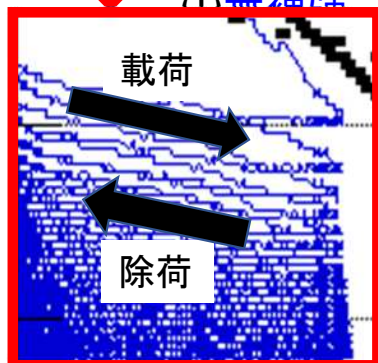
(I) 無補強

(II) ジオグリッド

と沈下量(载荷応力 35 kN/m^2)

(I) 無補強

(II) ジオグリッド

図 载荷応力と沈下量(载荷応力 70 kN/m^2)

除荷時に元の状態に戻らないことから
塑性ひずみが生じていることが確認

その結果から

繰返し载荷時では無補強とジオグリッド敷設の場合ともに極限支持力に達していなくとも除荷時に変形が戻らず**疲労破壊的**な現象を確認

3. 解析概要

3.1 検討内容

■使用コード：PLAXIS 3D および PLAXIS+tij

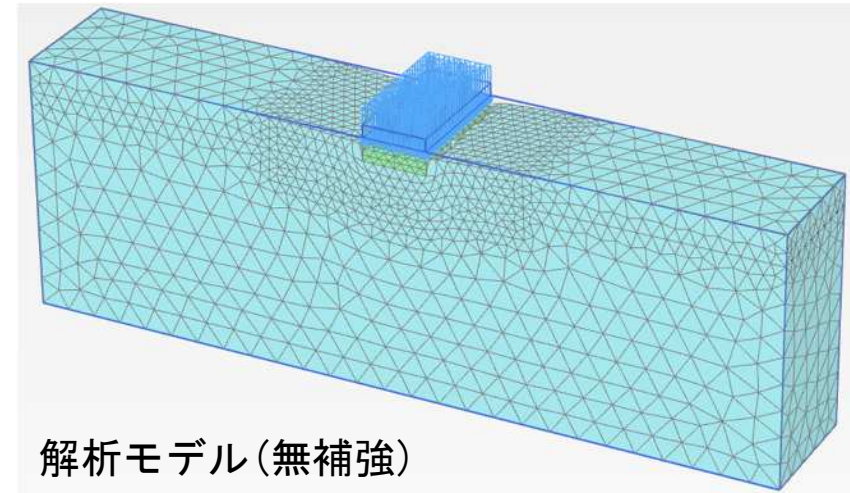


■単調载荷の検討

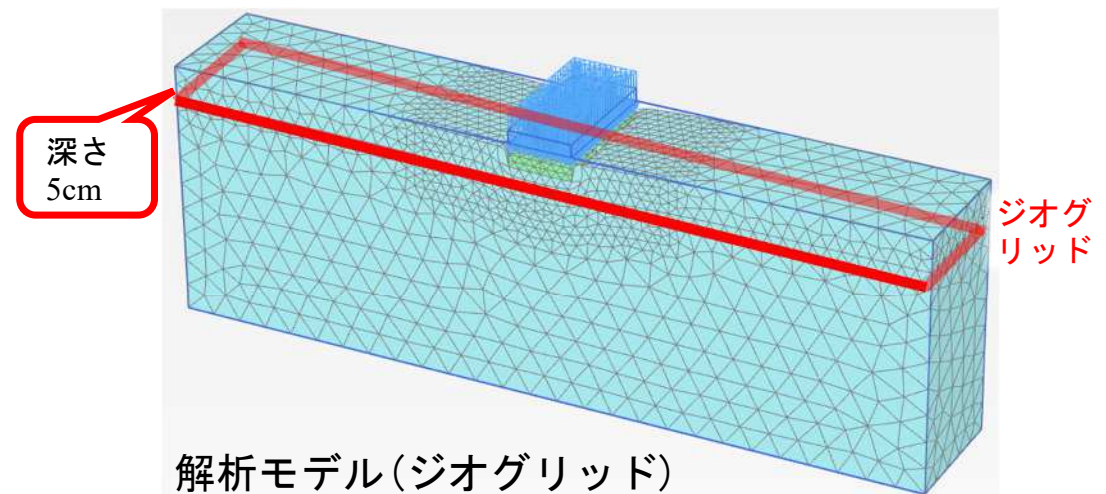
- ・ モール・クーロン
- ・ Subloading t_{ij}

■繰返し载荷の検討

- ・ Subloading t_{ij}



解析モデル(無補強)



解析モデル(ジオグリッド)

3. 解析概要

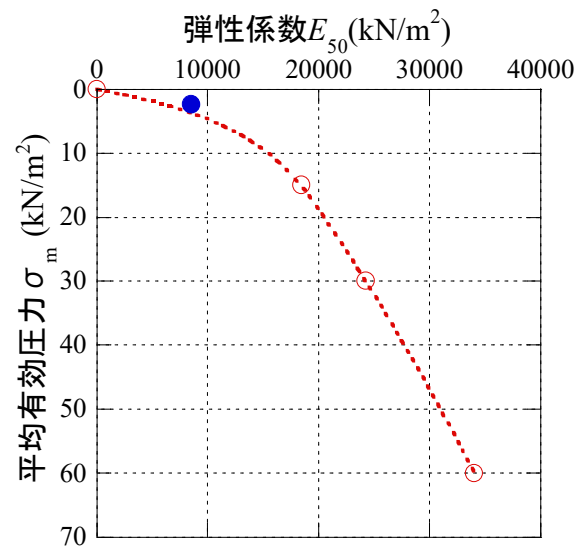
3.2 解析物性値 モール・クーロン

地盤の物性値

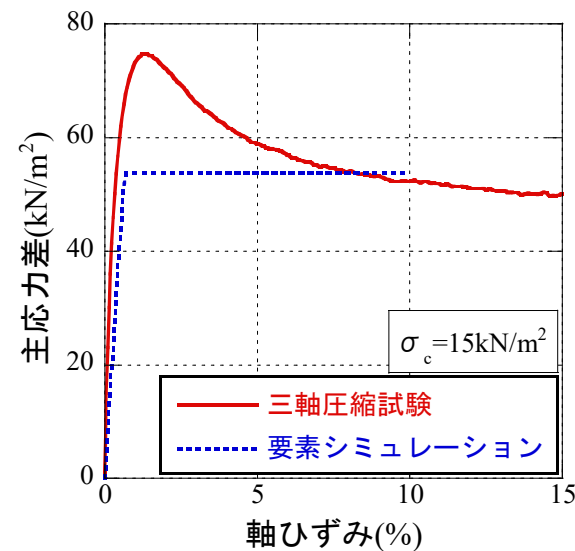
モデル	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)	ダイレイタンシー角 ψ (°)	弾性係数 E_{50} (kN/m ²)	ポアソン比 ν
モール・クーロン	18.0	0.10	39.8	12.0	8500	0.33

土層実験レベルの応力（土層厚40cmの中央位置）

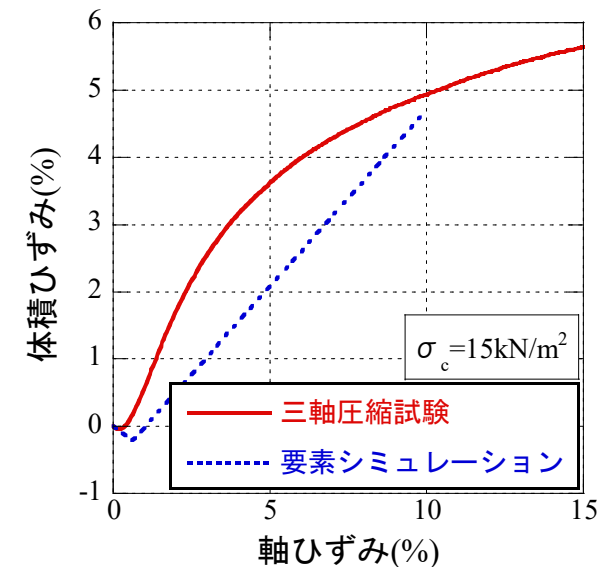
単位体積重量 γ (kN/m ³)	深さ(m)	鉛直応力(kN/m ²)	平均有効応力 ($K_0=0.5$ を仮定) (kN/m ²)
18.0	0.2	3.6	2.4



弾性係数と平均有効応力



軸ひずみと主応力差



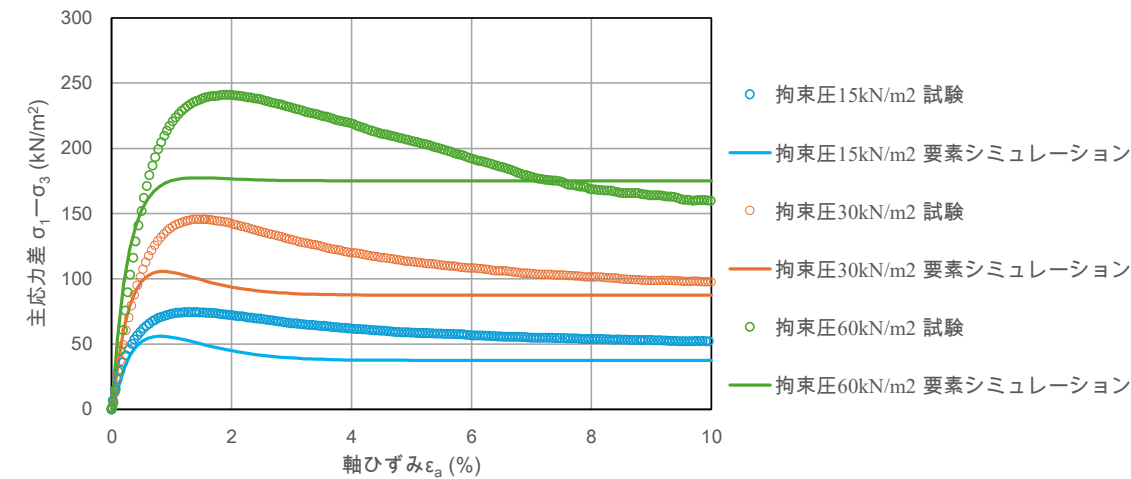
軸ひずみと体積ひずみ

3. 解析概要

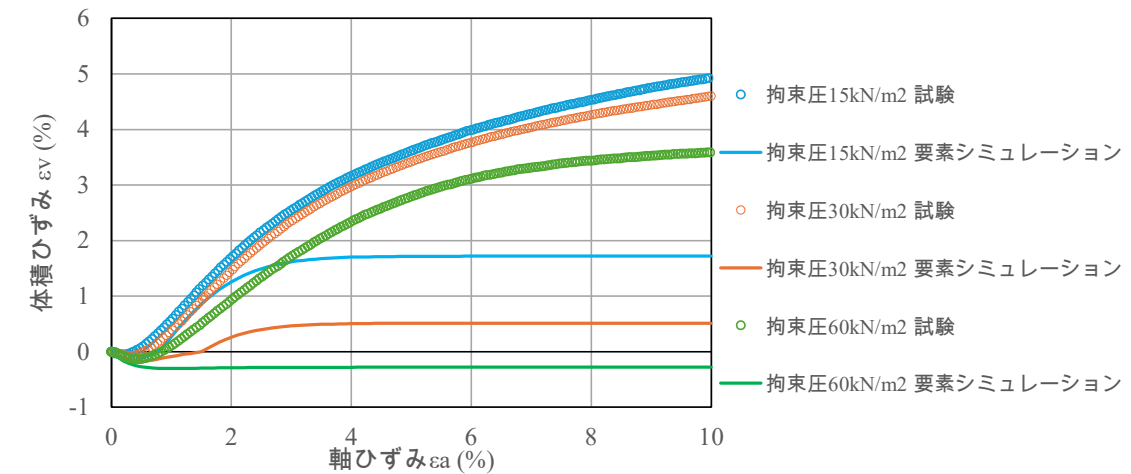
3.2 解析物性値

Subloading t_{ij}

圧縮指数	λ	0.010
膨潤指数	κ	0.004
限界状態線(CSL)の三軸圧縮時主応力比	R_{cs}	3.50
大気圧(=98kPa)でのNCLの間隙比	$N=e_{NC}$	0.80
弾性成分のポアソン比	ν_e	0.20
降伏曲面の形を決めるパラメータ	β	2.00
初期間隙比	e_0	0.80
密度と拘束圧の関係に影響を及ぼすのパラメータ	a	1000
密度と拘束圧の関係に影響を及ぼすのパラメータ	k_a	10.0
大気圧の単位(kPa)	P_a	98.0
(IC)成分の割合を決めるパラメータ	$wgt^{(IC)}$	1.0
(IC)成分の割合を決めるパラメータ	$powerIC$	2.0



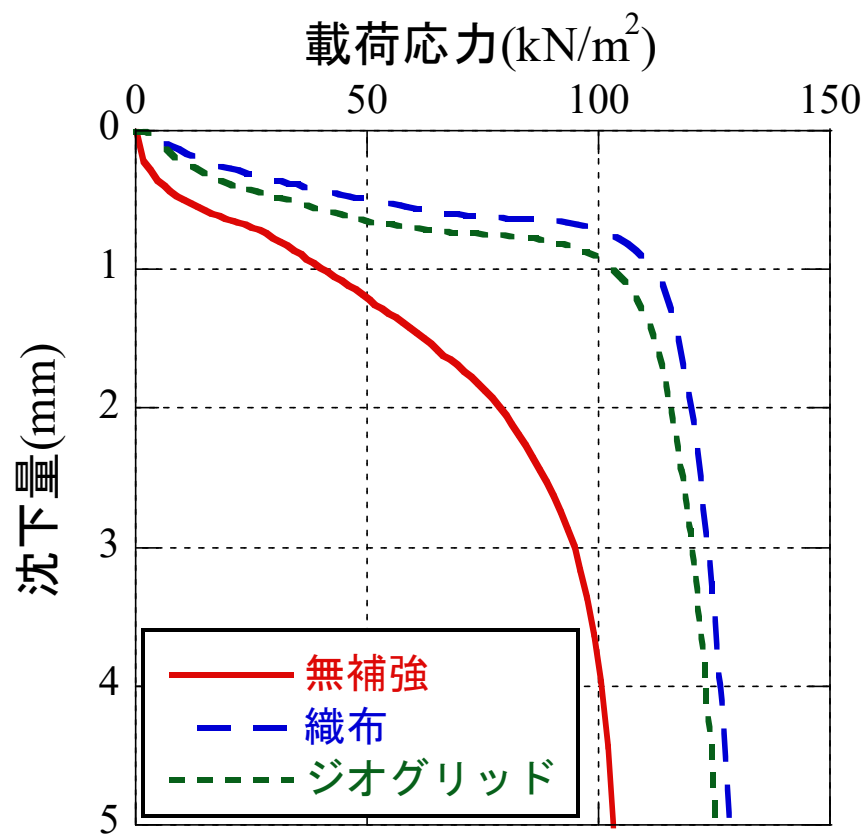
軸ひずみ主応力差



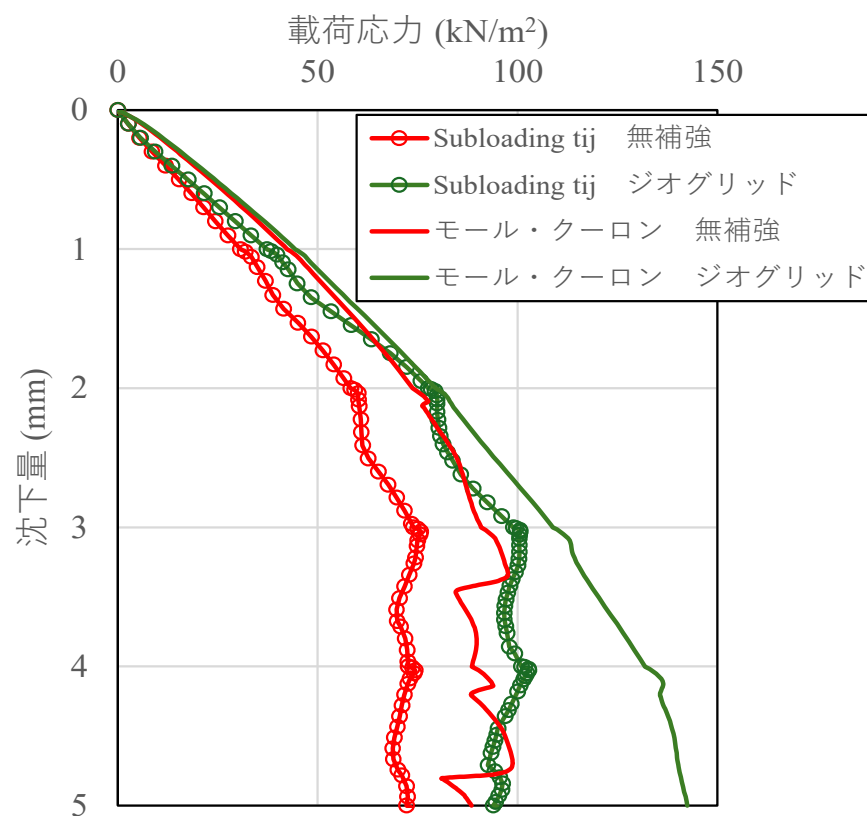
軸ひずみ-体積ひずみ

3.3 解析結果(単調載荷試験)

■ 荷重－変位関係



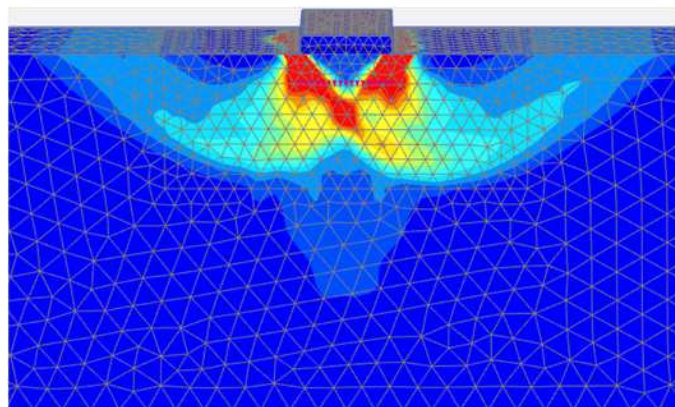
載荷応力と沈下量（実験）



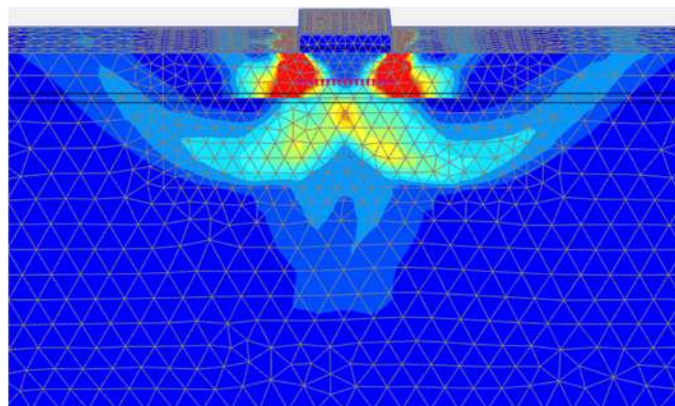
載荷応力と沈下量（解析）

3.3 解析結果(単調載荷試験)

■ フーチング5mm沈下したときの軸差ひずみ分布結果 ($\varepsilon_1 - \varepsilon_3$)/2

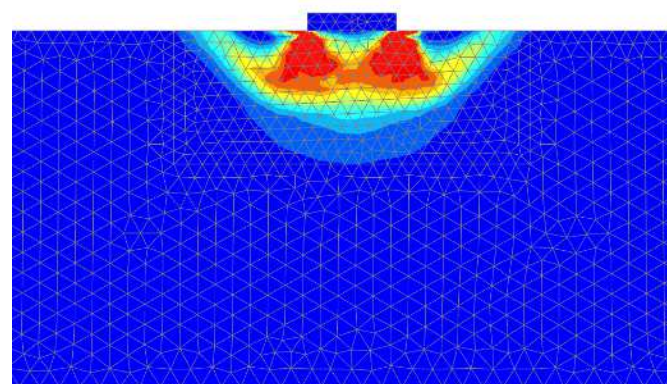


無補強

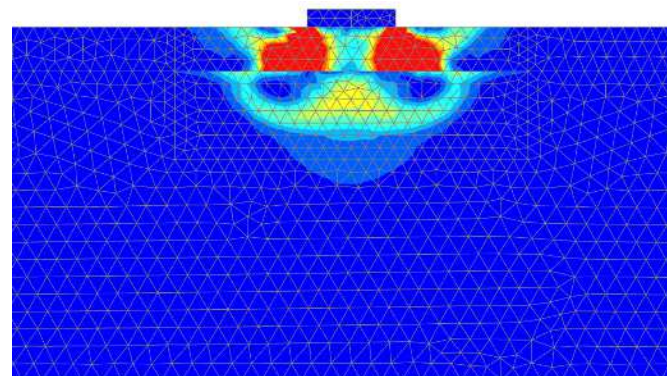


ジオグリッド

モール・クーロンモデルの結果

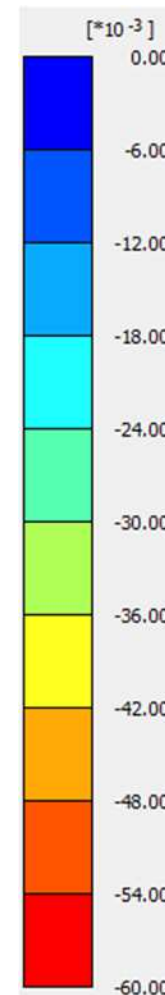


無補強

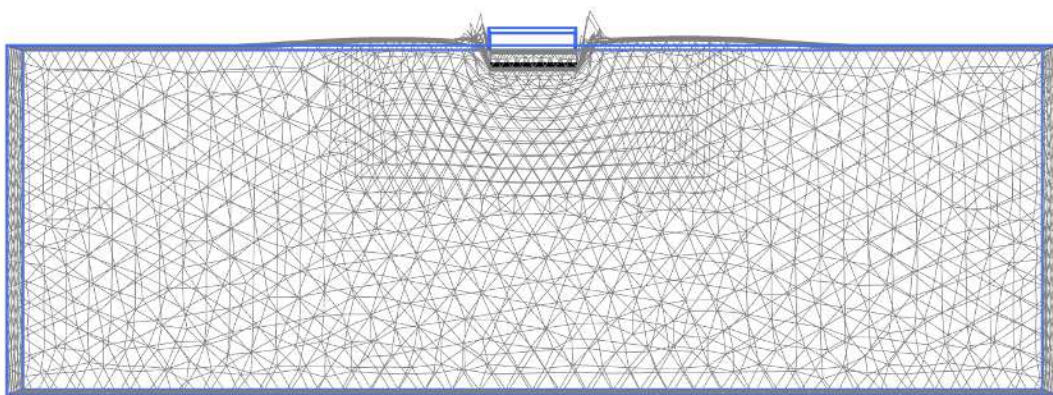


ジオグリッド

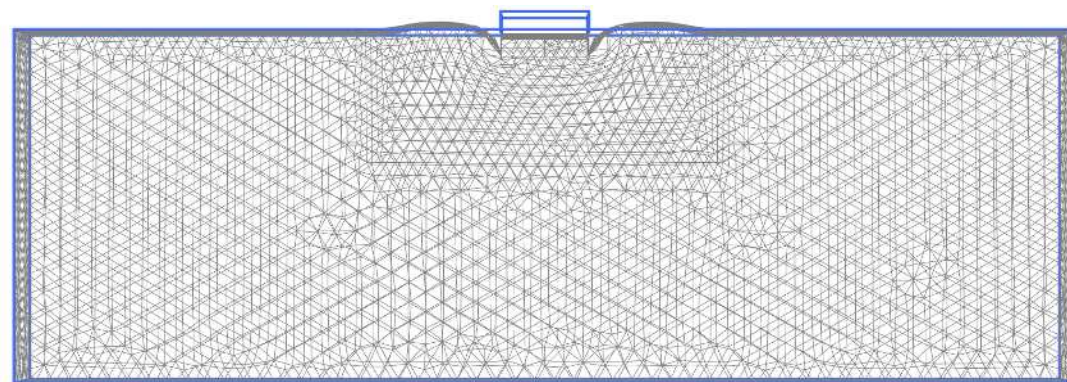
Subloading t_{ij} モデルの結果



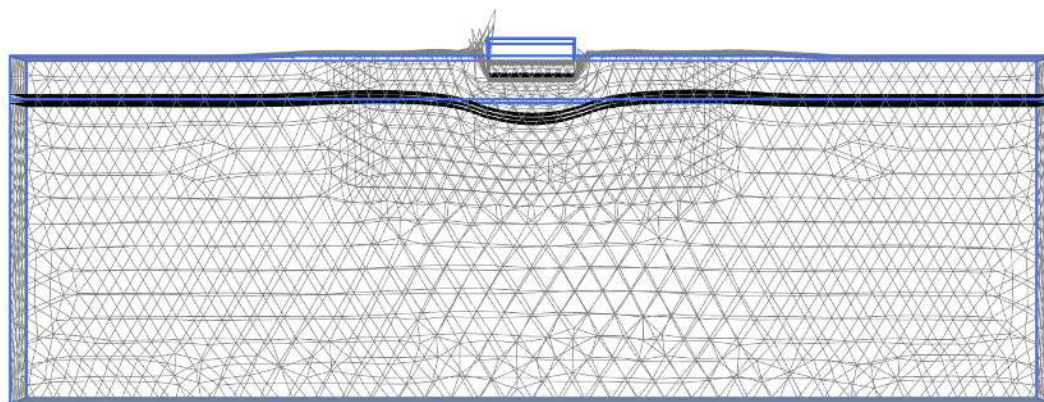
■フーチング5mm沈下したときの変形図 (5倍表示)



無補強

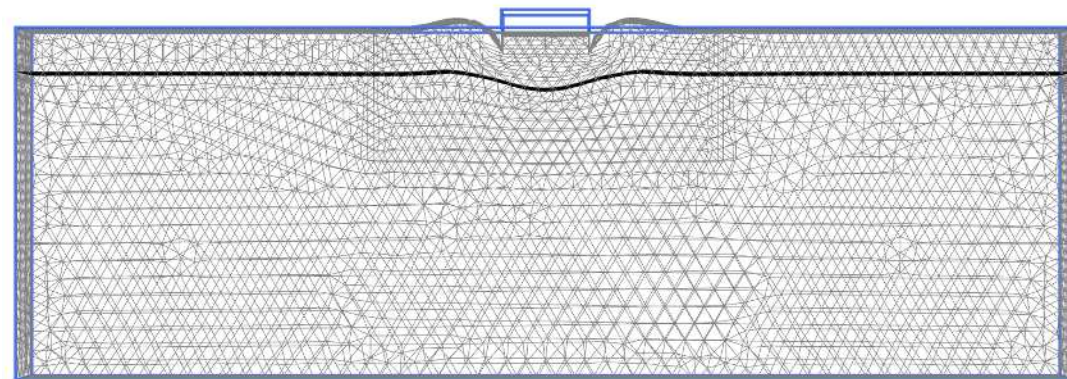


無補強



ジオグリッド

モール・クーロンモデルの結果

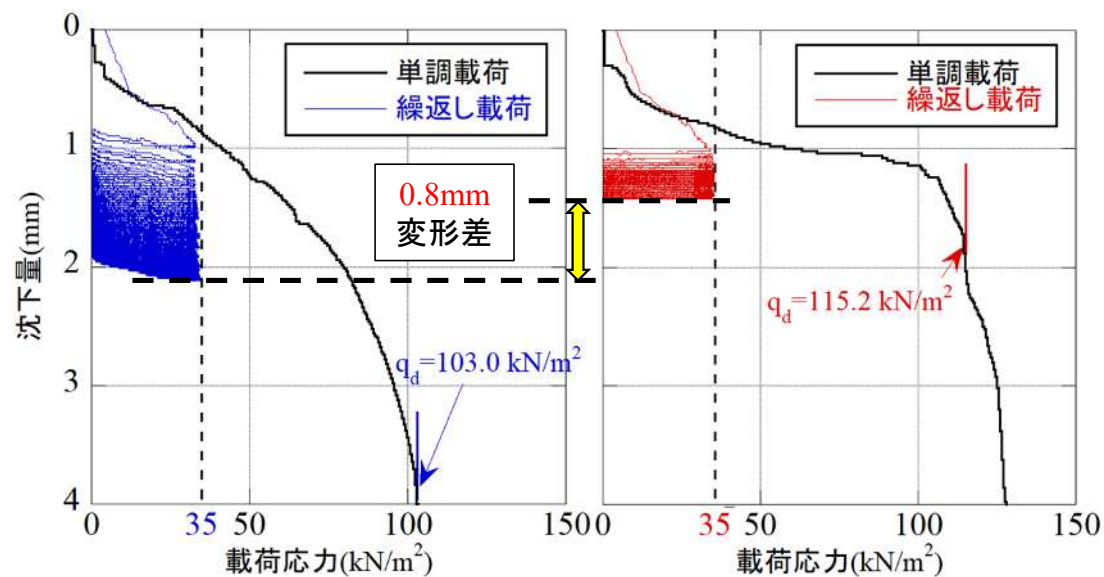


ジオグリッド

Subloading t_{ij} モデルの結果

3.3 解析結果 (繰返し载荷試験、载荷応力 35kN/m^2)

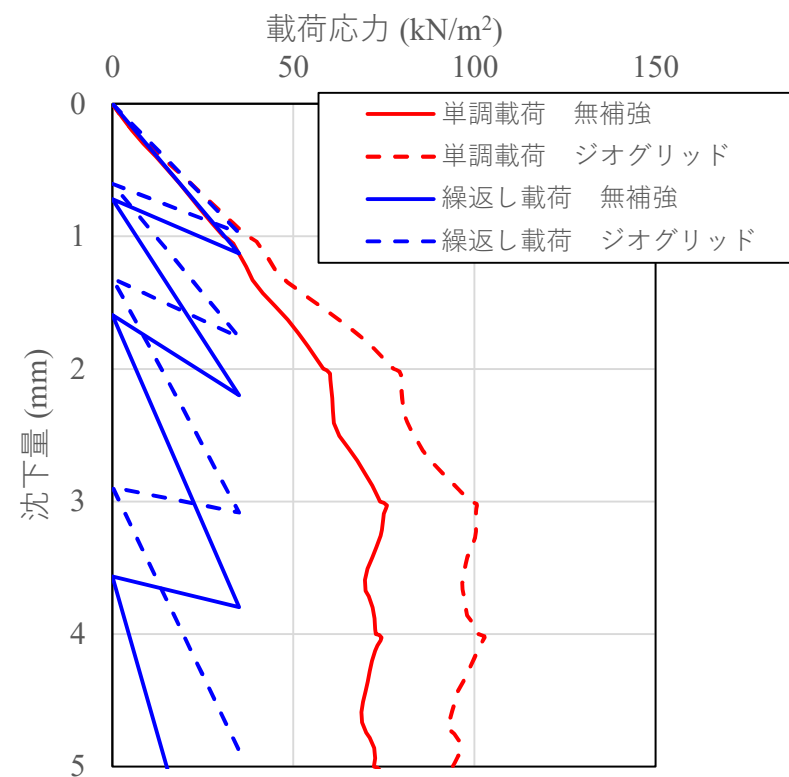
■ 荷重－変位関係



無補強

ジオグリッド

载荷応力と沈下量 (実験)

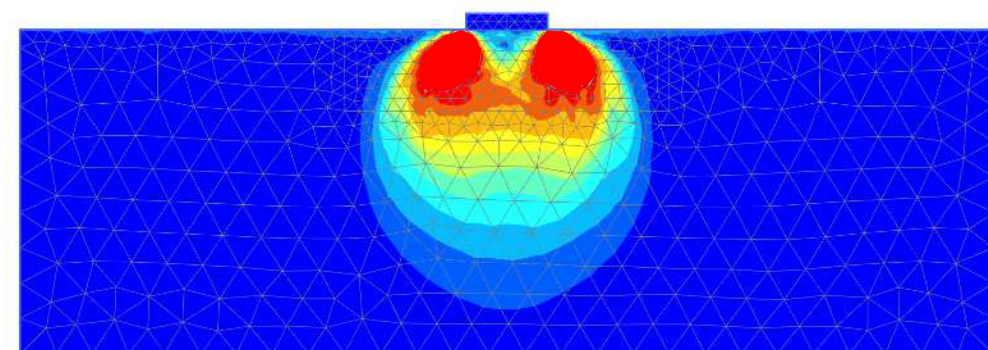


载荷応力と沈下量 (解析)

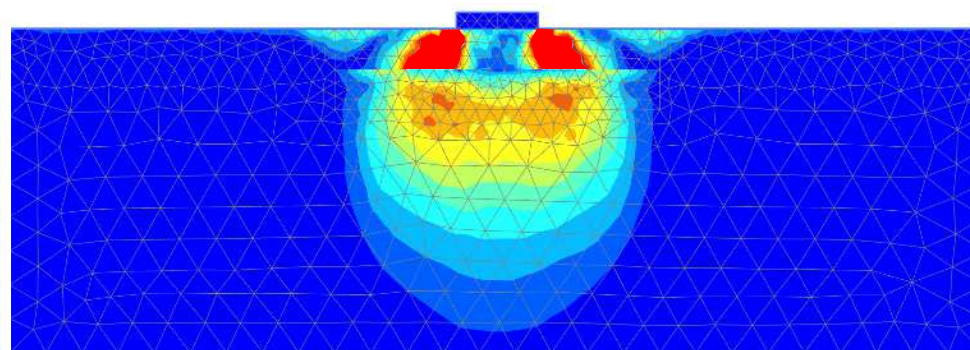
3.3 解析結果 (繰返し載荷試験、載荷応力 35kN/m^2)

16

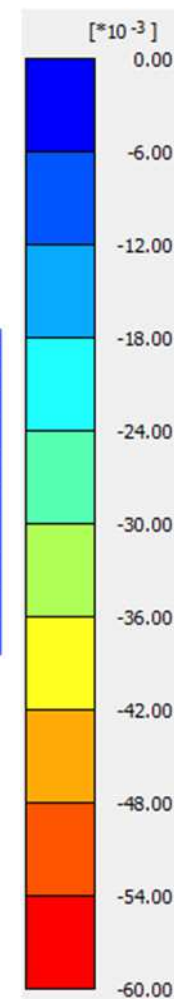
■ フーチング5mm沈下したときの軸差ひずみ分布結果 ($\varepsilon_1 - \varepsilon_3$)/2



無補強



ジオグリッド

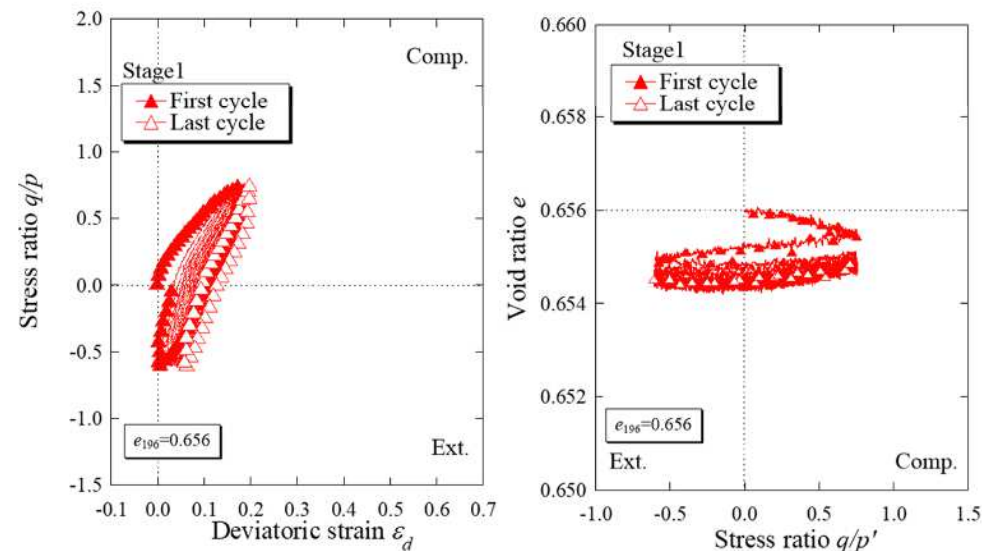


4 Subloading t_{ij} の繰返し载荷時における挙動について

■ 繰返し試験における挙動について

排水繰返し载荷条件では、载荷とともに土の剛性は増大し体積ひずみ（圧縮）は小さくなる特性を持っている（浅野ら，2014）。これまで用いてきた subloading t_{ij} modelでも繰返し载荷挙動を説明できるが、2サイクル以後のひずみを過大評価している。

有効主応力比振幅($R = \sigma_1'/\sigma_3' = (\sigma_1 - u)/(\sigma_3 - u)$)を2.0で繰返しせん断試験を排水条件下で試験行っている（浅野，2014）



4 Subloading t_{ij} の繰返し載荷時における挙動について

2014年

■ 構成式の修正

オリジナルのsubloading t_{ij} model

$$f = \ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \zeta_{(X)} - \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} = \ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \zeta_{(X)} - \left(\ln \frac{t_{N1e}}{t_{N0}} - \ln \frac{t_{N1e}}{t_{N1}} \right) = 0$$

$$\text{関連流動則: } d\epsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \quad \Lambda^{(AF)} = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{id}} d\sigma_{id} - \frac{1}{t_{N1}} \langle dt_N \rangle}{\frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial f}{\partial t_{mm}} + \frac{G(\rho)}{t_N} \right)}$$

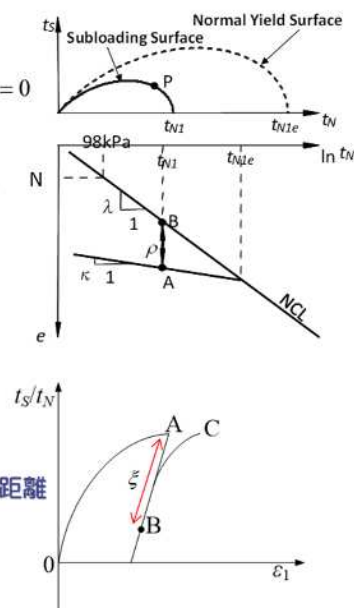
修正した点

$$\Lambda^{(AF)} = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{id}} d\sigma_{id} - \frac{1}{t_{N1}} \langle dt_N \rangle}{H_{fact} * \frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial f}{\partial t_{mm}} + \frac{G(\rho)}{t_N} \right)}$$

$$H_{fact} = c \xi \quad c: \text{材料パラメータ}$$

$$\xi = \left(x_{ij}^m - x_{ij} \right)$$

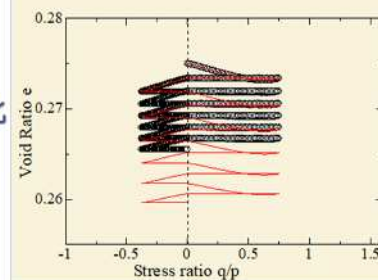
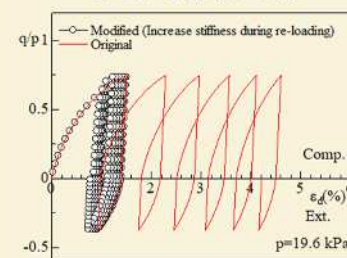
AB間の距離



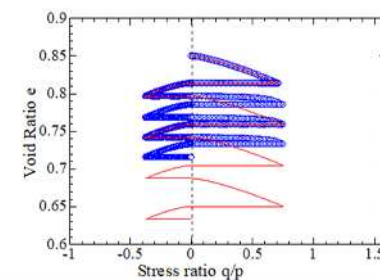
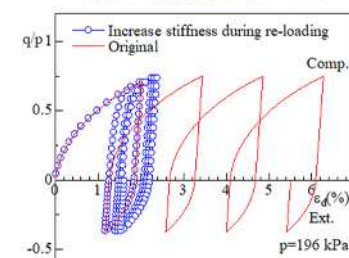
応力-ひずみ
関係

応力比-空隙比
関係

アルミ棒 (c=70)



藤ノ森粘土 (c=60)



5 低拘束圧下における解析・極限問題

■ 難しさ

- ・ 補強材の効果の程度は表現することが出来なかった。
- ・ 要素試験から設定した物性値が境界値問題にマッチしているか？
- ・ モデル実験のスケールも大きいわけではないため、物性値の反映は適正か？

■ 研究の現状

- ・ バラストの沈下検討：公益財団法人鉄道総合技術研究所
繰返し荷重条件、FEMは弾性解析（下負荷面を用いた解析も見受けられる）
- ・ バラストの沈下検討：新潟大学 紅露一寛教授
バラスト道床沈下挙動の数値モデル化・定量予測とその軌道管理への応用
繰返し荷重条件、下負荷面モデル
- ・ 送電鉄塔の基礎の安定：東電設計株式会社
逆T型基礎、根入れがある、単調載荷

アルミ棒の実験では定性的に表現してきた

