

【解析事例の紹介】

3次元弾塑性構成式による 杭の水平繰返し载荷試験の再現解析

2020年11月24日（火）

清水建設(株) 杉山 博一

SHMZ

背景・目的

- 水平繰返し荷重を受ける杭と周辺地盤の挙動を評価する手法の必要性が増大
- 繰返し载荷による地盤剛性の変化、ひずみの蓄積を評価できる構成則としてsubloading tijモデルに着目
- 中井先生、JIPテクノサイエンス殿にPLAXIS用ユーザー定義モデルの開発を委託
 - 繰返し対応の地盤構成則→中井先生にご相談
 - ユーザー定義モデル作成、再現解析（検証）→JIPテクノサイエンス殿に委託
- 本発表では再現解析（検証）の結果について報告

SHMZ

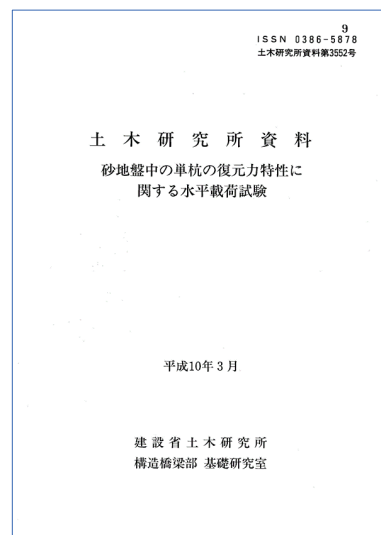
1

再現解析の対象とした実験

- 建設省土木研究所；砂地盤中の単杭の復元力特性に関する水平载荷試験、土木研究所資料第3552号、1998年3月

選定した理由

- 一方向水平载荷（片振り）、正負交番水平载荷（両振り）の実験が実施されている
- 実験データ（水平荷重、杭頭変位の数値データ）が掲載されている



SHMZ

2

実験概要

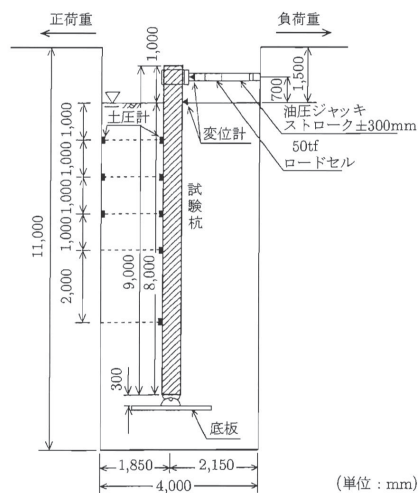


図-2-1 試験概要

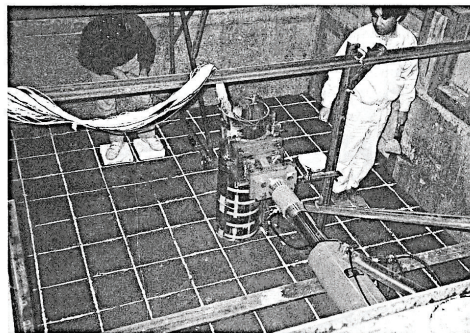


写真-2-1 試験前状況

●杭

- 鋼管(STK400)
- D=318.5mm, t=6mm

SHMZ

3

再現解析の対象とした試験ケース

表-2-1 試験ケース

ケース	杭種	杭径 (mm)	杭の仕様	載荷方法
1			STK490, t = 10.3mm	正負交番水平載荷
2	鋼管杭	318.5	STK400, t = 6 mm	
3			一方向水平載荷	
4	P H C 杭	300	$\sigma_{ca}=800\text{kgf/cm}^2$ B 種 (有効7' レストレス 80kgf/cm ²) PC 鋼線 12-φ 7 スパイラル筋 SD295A D6@50	正負交番水平載荷
5	鉄筋コンクリート杭	300	$\sigma_{ca}=210\text{kgf/cm}^2$ 主 筋 SD295A 16-D10 帯鉄筋 SD295A D4@40	

SHMZ

4

地盤（鹿島砂）の物性

表-2-2 室内土質試験結果一覧表

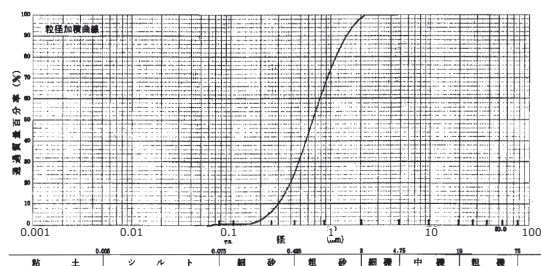


図-2-2 地盤材料の粒度分布

試験項目		相対密度 Dr		
		30%	40%	50%
物理 性 質	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.644		
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.789		
	最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.459		
	礫分含有率 (%)	1.8		
	砂分含有率 (%)	97.4		
	シルト分含有率 (%)	0.8		
	粘土分含有率 (%)	0		
	均等係数 U_c	2.66		
	平均粒径 D_{50} (mm)	0.67		
	初期剛性 G_0 (kgf/cm ²)	850	1000	1000
力学	せん断抵抗角 ϕ' (°)	31.4	32.8	32.9
	粘着力 c' (kgf/cm ²)	0.114	0.092	0.115

→Mohr-Coulomb用(後述)

SHMZ

5

実験地盤の密度

- 地盤作成；水中落下法（落下高さ；水面上50cm, 水位；GL+1m）
- 密度計測；コアカッター法

表-4-1 コアカッター法による密度管理一覧表

試料	No.	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)					湿密度 ρ_w (g/cm ³)					含水率 (%)				
		北	東	南	西	平均	北	東	南	西	平均	北	東	南	西	平均
1	6	1.491	1.501	1.505	1.500	1.500	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	11	11	11	11	11
	4	1.501	1.502	1.500	1.492	1.500	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	17	16	17	16	16
	2	1.511	1.508	1.510	1.512	1.510	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	19	18	19	18	19
	0	1.501	1.504	1.504	1.511	1.505	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	27	26	27	26	26
	0	1.511	1.523	1.496	1.489	1.487	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	19	23	13	9	14
2	6	1.527	1.539	1.480	1.505	1.513	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	24	28	8	17	19
	4	1.565	1.480	1.507	1.483	1.509	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	37	8	17	9	18
	2	1.496	1.542	1.548	1.459	1.511	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	13	29	31	0	18
	0	1.503	1.483	1.501	1.501	1.497	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	16	9	15	15	14
	0	1.522	1.459	1.459	1.539	1.495	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	22	0	0	28	13
3	6	1.520	1.491	1.528	1.497	1.509	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	22	12	24	14	18
	4	1.510	1.506	1.459	1.466	1.485	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	18	17	0	3	9
	2	1.503	1.483	1.501	1.501	1.497	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	16	9	15	15	14
	0	1.522	1.459	1.459	1.539	1.495	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	22	0	0	28	13
	0	1.520	1.491	1.528	1.497	1.509	1.51	1.51	1.51	1.51	1.505	22	12	24	14	18

採取深度 (m)	乾燥密度 平均値					相対密度 平均値				
	6	4	2	0	0	19	23	13	0	14
2	1.511	1.523	1.496	1.459	1.497	19	23	13	0	14
	1.527	1.539	1.480	1.505	1.513	24	28	8	17	19
	1.565	1.480	1.507	1.483	1.509	37	8	17	9	18
	1.496	1.542	1.548	1.459	1.511	13	29	31	0	18
	1.503	1.483	1.501	1.501	1.497	16	9	15	15	14
3	1.522	1.459	1.459	1.539	1.495	22	0	0	28	13
	1.520	1.491	1.528	1.497	1.509	22	12	24	14	18
	1.510	1.506	1.459	1.466	1.485	18	17	0	3	9
	1.503	1.483	1.501	1.501	1.497	16	9	15	15	14
	1.522	1.459	1.459	1.539	1.495	22	0	0	28	13

SHMZ

6

地盤のパラメータ

鹿島砂の諸物性

		試験時	Dr30%
土粒子の密度 ρ_s	g/cm ³	2.644	
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm ³	1.789	
最小乾燥密度 ρ_{dmin}	g/cm ³	1.459	
試料の密度 ρ_d (平均値)	g/cm ³	1.51	—
相対密度 Dr	%	17.3	30
初期せん断剛性 G_0	kgf/cm ²	—	850
せん断抵抗角 ϕ'	deg	—	31.4
粘着力 c'	kgf/cm ²	—	0.114

Interface要素
(Mohr-Coulomb)
用の物性として利用

構成式用パラメータ

λ	0.025
κ	0.0025
Rcs	3.0
N	1.5
β	1.6
e_0	0.8
a	60
k_a	12
a_{cyc}	2.0
$k_m(cyc)$	5.0
$k_n(cyc)$	2.0

豊浦砂をベースに調整

SHMZ

7

荷重載荷方法と実験結果

● 一方向水平載荷

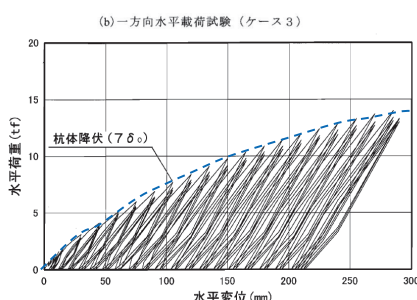


図-4-3 水平荷重～水平変位履歴曲線 (ケース3)

● 正負交番水平載荷

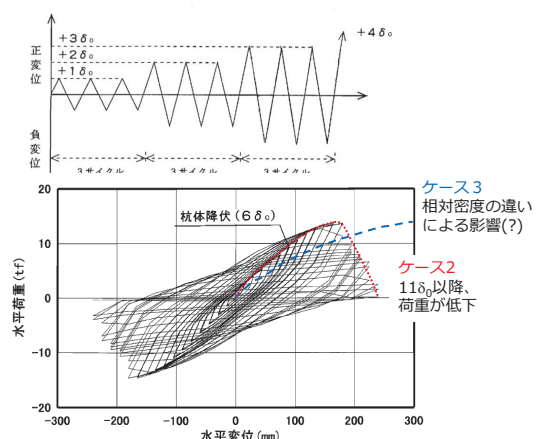
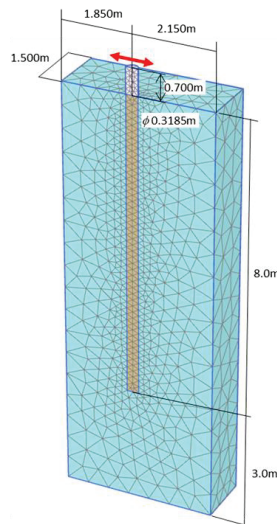


図-4-2 水平荷重～水平変位履歴曲線 (ケース2)

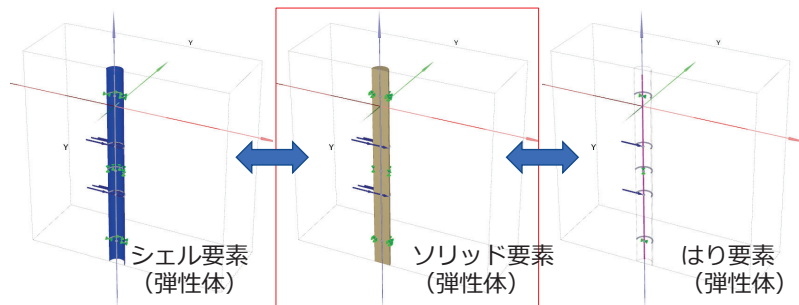
SHMZ

8

解析モデル



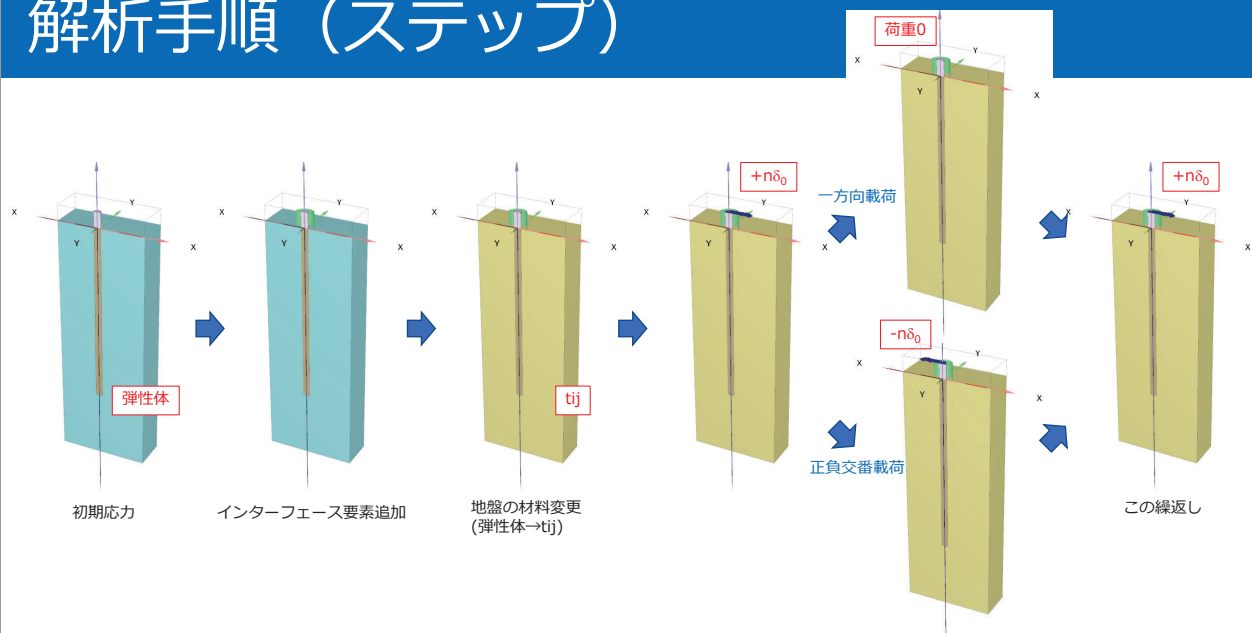
- 実験土槽と同じ領域（ハーフモデル）
- 杭は、土と等価な重量と曲げ剛性をもつソリッド要素でモデル化



SHMZ

9

解析手順（ステップ）

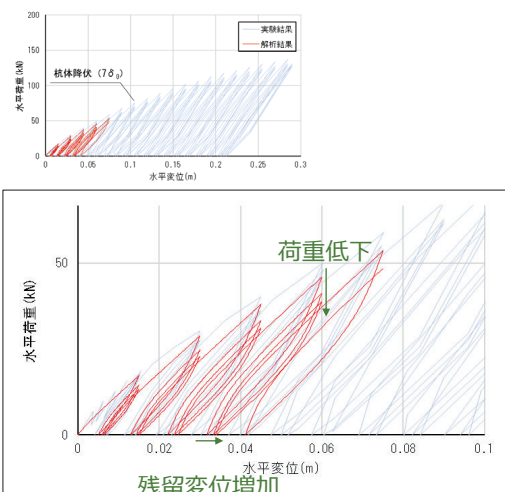


SHMZ

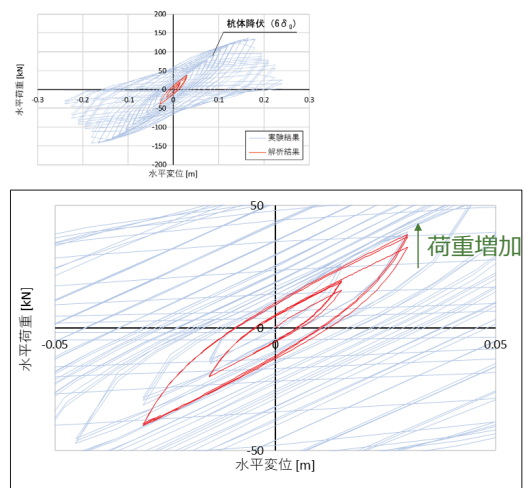
10

実験結果との比較

● 一方向水平載荷



● 正負交番水平載荷



SHMZ

11

まとめと今後の課題

- 繰返し載荷時の地盤挙動を説明できる地盤構成則により、杭の水平繰返し載荷実験の荷重～変位関係を再現できることを確認した。
- 課題
 - 地盤パラメータが明確な実験の再現解析→信頼性向上
 - 解析がまだ不安定（途中で発散）
 - 陽解法のため解析時間が長い→陰解法に期待