

(74) 地中構造物の液状化対策工法に関する研究

－排水パイプ工法に関する模型振動実験と数値シミュレーション－

中部電力(株)電力技術研究所 杉本忠男
 ” 早川誠
 ” 河村精一
 (株)大林組技術研究所 鳥井原誠
 ” ○伊藤浩二

1. まえがき

緩い砂地盤にある軽量地中構造物は、地震時の液状化によって浮き上がりが生じる場合がある。そこで、浮き上がりを抑える一対策工法として有効性が確認されている排水パイプ工法¹⁾について、大型せん断土槽(4.35m×2.85m×2.0m)をもちいた模型振動実験を実施し、その効果に関する報告²⁾は既におこなっている。したがって本報では、実験結果に対する数値シミュレーションからその効果の検証をおこない、解析的な面から本工法の有効性の確認をおこなう。

2. 模型振動実験

排水パイプ工法の概要を図-1に示す。

本工法は、地震時の液状化現象に対し、構造物底面から立ち上げたパイプから自由排水させることにより、過剰間隙水圧を速やかに消散し、底面に作用する揚圧力の低減ならびに側壁での摩擦抵抗力の減少を抑え、構造物の浮き上がりを抑える工法をいう。

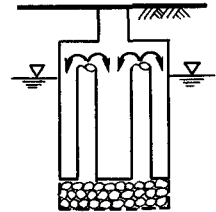


図-1 排水パイプ工法の概要

したがって本工法では、一般のドレーン系の液状化対策工法で定義する杭径比に相当する開口率 A/A_0 (A :パイプ開口部の全断面面積, A_0 :模型底面積)が重要なパラメータであり、模型底面の開口部を絞ることにより異なる開口率での実験をおこなっている。

①模型地盤と構造物模型

地盤、構造物模型の断面ならびに代表的な計器配置を図-2に示す。砂層部は岐阜砂をもちいており、相対密度、飽和单位体積重量はそれぞれ平均25%、1.81 tf/m^3 である。またパイプからの排水効果が十分期待できるように、栗石に相当する砕石層($h=100mm$, $D_{20}=11.8mm$)を模型底部に設置し、初期水位は模型上面から6.5cm下がった深度に設定している。

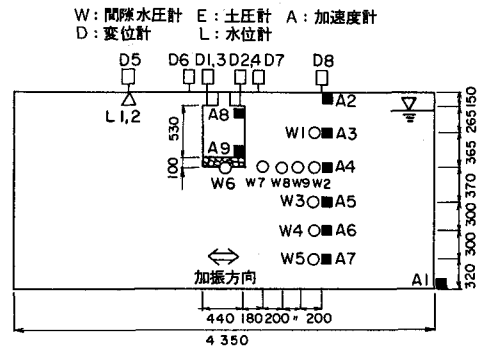


図-2 模型地盤の計器配置

次に主な計器として、模型の浮き上がりと地盤の沈下を測定する変位計D1~D4, D5~D8の他に、模型に作用する揚圧力を測定する間隙水圧計 W16~W18ならびに土圧計等を構造物模型に取り付けている。尚計器配置の詳細は、文献2)を参照とする。

②実験ケース

実験ケースを表-1に示す。CASE 1は

表-1 実験ケース

実験ケース	砕石層 (mm)	解析ケース DIANA-J	解析ケース GADFLA	開口率 A/A_0 (%)	パイプ径 ϕ' (mm)	有効径 d (mm)
CASE 1	----	CASE 1	CASE 1	----	----	----
CASE 2-1	100	----	CASE 2-1	0.033	5.0	0.072
CASE 2-2	100	----	CASE 2-2	0.106	9.0	0.232
CASE 2-3	100	----	CASE 2-3	0.814	25.0	1.791
----	100	----	CASE 2-1'	0.325	15.8	0.715
----	100	----	CASE 2-2'	1.055	28.5	2.328
----	100	CASE 2-3'	CASE 2-3'	8.143	79.1	17.932

模型を設置したのみの対策を実施しないケース、CASE 2-1~2-3 は、それぞれ異なる開口率での排水パイプ工法に関するケースである。以上各ケースでもちいた入力波は、振動数4 Hz、波数20波の正弦波であり、テーブル入力加速度は 50, 100, 200galである。

③実験結果

排水パイプ工法の効果の一例として、200gal入力における加振開始から30秒間での最大揚圧力(W16~W18の平均値)、最大浮き上がり量(D1~D4の平均値からD5, D8の平均値を引いた相対変位量)とパイプ開口率の関係を図-3に示す。このように、最大揚圧力は開口率の増加に伴ない減少するため、その結果最大浮き上がり量も小さくなっている。

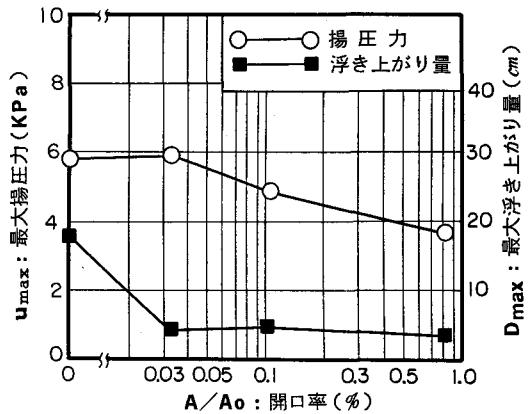


図-3 揚圧力と浮き上がり量

また、本工法における構造物の浮き上がりに関与する外力である浮上力と抵抗力(模型自重、側壁摩擦抵抗力、流入重量、土被り重量とせん断抵抗力)を各計器より算定した結果、開口率の増加に伴ない浮上力が減少しまた抵抗力の減少が抑えられるため、浮き上がり安全率 F_u (抵抗力/浮上力)が1.0となる時刻が遅くなることが確認されている。

3. 数値シミュレーション

①解析方法

模型振動実験のシミュレーションは、“有効応力解析”と“全応力解析”のそれぞれでおこなっている。すなわち前者では、二次元有効応力解析プログラム“DIANA-J”に、砂の構成則として“Multi-mechanism”モデルを user-routine の形で組み込み実施している。

次に後者では、等価線形化法による地盤-構造物系の地震応答解析プログラム“FLUSH”から液状化を生じさせる地震外力を算定し、その結果を過剰間隙水圧の発生・消散解析プログラム“GADFLEA”に入力している。

したがって“有効応力解析”に基づくシミュレーションでは、構造物模型の浮き上がりや地盤の沈下等の変形量についても厳密な算定が可能と考えられるが、本報では、主に排水パイプ工法における開口率の違いによる揚圧力の特性を模型振動実験と比較・検討する。

②解析モデル

“DIANA-J”、“GADFLEA”でもちいた解析モデルの一例を図-4, 5に示す。

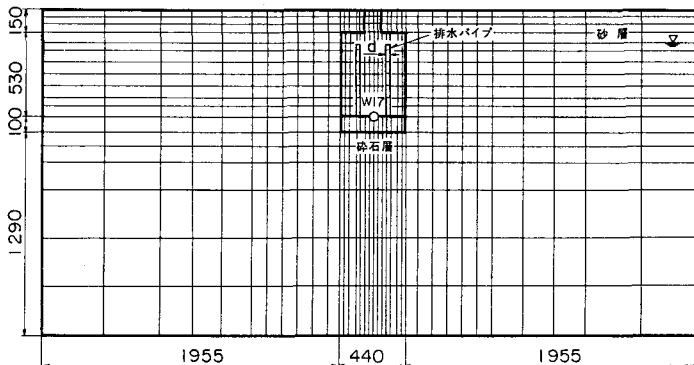


図-4 解析モデル (DIANA-J)

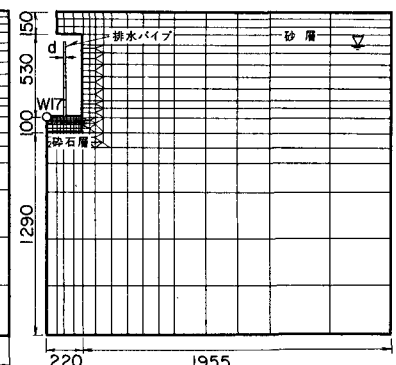


図-5 解析モデル (GADFLEA)

“DIANA-J”では、“FLUSH”と同様に砂層、碎石層、構造物模型をモデル化し、排水パイプについては、模型底面のパイプ開口部に相当する境界で自由排水する条件を設定している。また“GADFLEA”では砂層、碎石層、自由排水する排水パイプをモデル化し、構造物模型は境界条件で表現している。

ここで、解析でもちいたパイプ開口部の有効径 d は、開口率 A/A_0 、“GADFLEA”での構造物モデルの底辺長 $d_{rer}(=220\text{mm})$ をもちいて式(1)から算定しており、その結果を表-1中に示す。

$$d = (A/A_0) \times d_{rer}/100 \quad \text{-- (1)}$$

③解析ケース

表-1の実験ケースの内、“全応力解析”をおこなった解析ケース(解析時間30秒)はCASE 1~2-3の200gal入力の外に、ケース・スタディとしてそれぞれの開口率の10倍を想定したCASE 2-1'~2-3'の7ケースである。

次に“有効応力解析”をおこなった解析ケース(解析時間6秒)は、CASE 1とCASE 2-3'の50gal入力の2ケースである。ここで入力波は、CASE 1で計測されたテーブル加速度波形である。

④入力定数

“FLUSH”でもちいる砂層部の動的変形定数の G_0 、 h_{max} 、 γ_{rer} は、模型振動実験に相当する低拘束圧 σ'_c 条件での中空ねじりせん断試験から得られる G 、 h - γ 関係と、微小ひずみレベルのホワイトノイズ入力試験のシミュレーション結果を参考に決定している。

また、“GADFLEA”でもちいる砂層の過剰間隙水圧の発生パラメータを決定する $R-N_1$ 、 u/σ'_v - N/N_1 関係(R :せん断応力比、 u/σ'_v :間隙水圧比、 N :繰り返し回数、 N_1 :液状化までの繰り返し回数)は、図-6に示すように、4ケースの異なる R に対する液状化強度試験から決定している。尚 $R-N_1$ 関係については、 $K_0=0.5$ と仮定した上での補正曲線をもっている。

次に“Multi-mechanism”モデルのパラメータは、図-6の補正曲線上の代表的な液状化強度である $R=0.14$ 、 $N_1=20$ の条件に対し、非排水単純せん断試験の条件に相当する要素シミュレーション解析をおこない決定している。ここで初期有効拘束圧は、 $\sigma'_{x0}=147.0\text{KPa}$ 、 $\sigma'_{y0}=\sigma'_{z0}=73.5\text{KPa}$ とし、 $\tau_{xy,max}=13.72\text{KPa}$ の応力制御で解析しており、その結果決定したパラメータと有効応力経路 τ_{xy} - σ'_m 関係を表-2、図-7に示す。

⑤解析結果

“全応力解析”の一例としてCASE 2-1、CASE 2-3と“有効応力解析”のCASE 1、CASE 2-3'における模型底面に作用する揚圧力(W17)の経時変化を図-8、9に示す。

このように“全応力解析”では、開口率の違いにより発生する最大揚圧力は、実験値と解析値でよい対応を示しているが、経時変化については異なった結果となっている。一方“有効応力解析”では、CASE 1のように、実験値と解析値で経時変化についてもよい対応を示していることがわかる。

次に200gal入力における模型振動実験、ならびに両解析方法による最大揚圧力とパイプ開口率の関係を図-10に示す。このように“全応力解析”においても、浮き上がりの主たる要因である最大揚圧力が開口率の増加に伴ない減少する傾向は、開口率の広い範囲までほぼ対応していることが認められる。

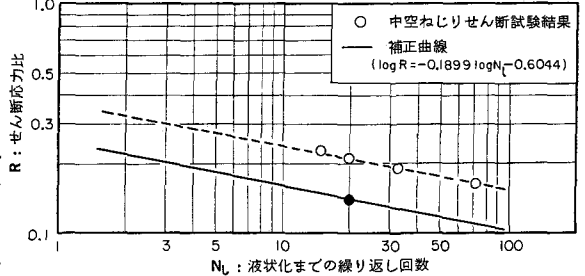


図-6 R-N₁関係

表-2 モデルパラメータ

クリティカル・ステイトパラメータ	$M = 1.20 (\phi' = 30^\circ)$
ダイレタンシー・パラメータ	$\mu_r = 1.15 (\phi_p' = 28.8^\circ)$ $S_c = 0.348$ $C = 0.0035$
ハードニング・パラメータ	$a_m = 0.000450$ $a_c = 0.000225$
初期せん断弾性定数 ポアソン比	$G_0 = 2770 \times \sigma'_{m0}{}^{0.5} \text{ (KPa)}$ $\nu = 0.33$

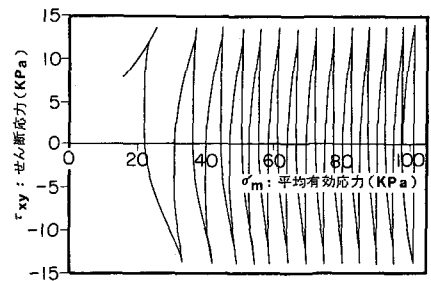


図-7 τ_{xy} - σ'_m 関係

一方“有効応力解析”については、図-10中の実験ケースならびに“全応力解析”でもちいた入力加速度と異なるため直接の比較はできないが、パイプ開口率に対し、揚圧力が低減される効果は妥当な傾向を示しており、“全応力解析”と比較してより厳密な値を与えるものと考えられる。

次に“有効応力解析”によるCASE 1, CASE 2-3'における加振開始から6秒後の過剰間隙水圧の平面分布を図-11に示す。

このようにCASE 2-3'では、CASE 1と比較して、模型底面ならびに側面の過剰間隙水圧量がかなり低減されており、その結果浮上力の減少、側壁での摩擦抵抗力の減少を抑える効果が解析的にも認められる。

4. まとめ

排水パイプ工法に関する模型振動実験とその数値シミュレーションより、本工法において、地中構造物の浮き上がりを生じさせる揚圧力を低減し、かつ側壁での摩擦抵抗力の減少を抑える効果が認められ、浮き上がりを抑える工法としての有効性が確認された。

また数値シミュレーションの結果より、“全応力解析”から本工法における最大揚圧力を推定することも可能と考えられるが、“有効応力解析”をおこなうことで、揚圧力等の外力の厳密な評価ならびに構造物の浮き上がりを低減する効果を予測することが可能と考えられる。

尚“DIANA-J”の“Multi-mechanism”モデルの主要ルーチンは、石原・吉田等により作成されたものをもっている。また“DIANA-J”による解析は、NEC.SX-1EAで実施している。

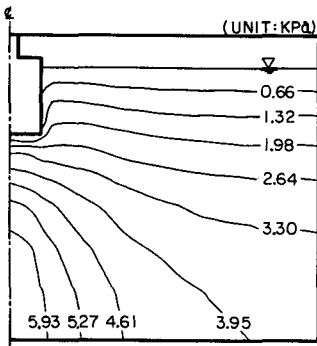


図-11 (a) 過剰間隙水圧の平面分布 (CASE 1)

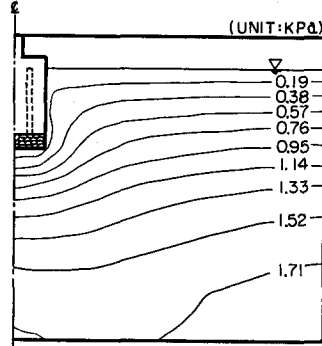


図-11 (b) 過剰間隙水圧の平面分布 (CASE 2-3')

参考文献

- 1) 土山他：液状化時の地中構造物の挙動に及ぼす各種工法の比較について，土木学会第43回年次学術講演会
- 2) 杉山他：地中構造物の液状化対策工法に関する研究，第24回土質工学研究発表会

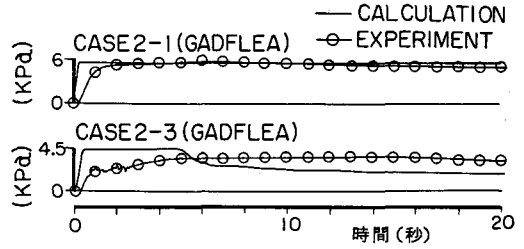


図-8 揚圧力の経時変化 (200gal 入力)

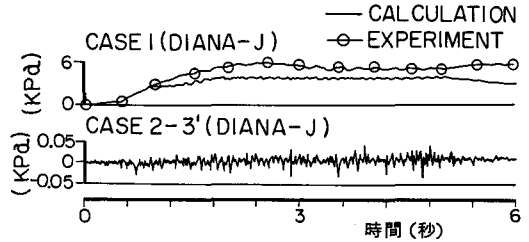


図-9 揚圧力の経時変化 (50gal 入力)

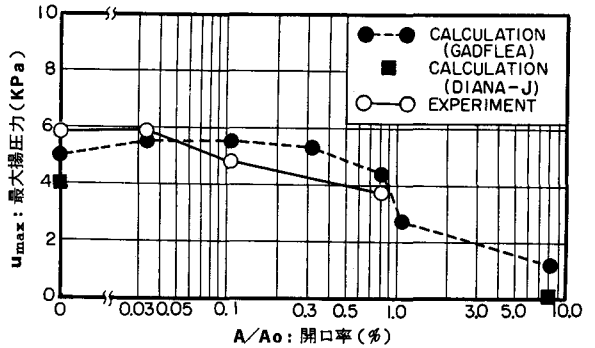


図-10 最大揚圧力とパイプ開口率の関係