

電力洞道の人孔部液状化対策工に関する実験を主とした検討

中部電力(株) 電力技術研究所

○河村 精一

早川 誠

土山 茂希

杉本 忠男

(株)大林組 技術研究所

鳥井原 誠

1. はじめに

ゆるい砂地盤中に埋設された人孔を始めとする軽量地中埋設物は、地震時の液状化現象による土中間隙水圧の上昇で、浮上などの被害が生じることがある。そのための対策工法として表-1に示す各種工法について、中型せん断土槽(2.5×1.5×2.0m)を用いた比較実験を行ってきた。その詳細は既報¹⁾に述べたが、そのなかで原理的にはグラベルドレーンと同様であり、かつ、その浮上抑制効果も同程度のものが期待される排水パイプ工法を取り上げ、大型せん断土槽(4.35×2.85×2.0m)をもちいた模型振動実験と数値シミュレーションを行なった。

2. 排水パイプ工法の概要

排水パイプ工法は、図-1に示すように地中構造物の下部にれき層を設け、そこから構造物内に達する管を設けるもので、液状化時に隙水をれき層で集めてその水を管で構造物内に導くことにより、隙水圧の上昇を防ぐとともに、構造物内に導かれた水で構造物の見掛けの重量を増し、液状化による被害を軽減しようとするものである。このように隙水を管で排水することから、目詰まりの恐れも少なく、長期信頼性にも優れている。

3. 実験方法

表-1 各種対策工法・比較実験ケース

①実験装置

振動台システム構成図を図-3に示す。実験装置は振動台テーブル、水噴射装置、せん断土槽の三部分より構成されている。水噴射装置とは底部より圧力水を噴射して土槽内の地盤を強制的にボイリングさせ、その後自然沈降させることによって一様な飽和地盤を作成するための装置である。

対策工法	原理
重量化工法	見掛け比重の増大による浮上防止
グラベルドレーン工法	過剰隙水圧の消散
排水パイプ工法	過剰隙水圧の消散
連続地中矢板工法	重量化と地盤の変形抑制
アースアンカー工法	定着力による浮上防止

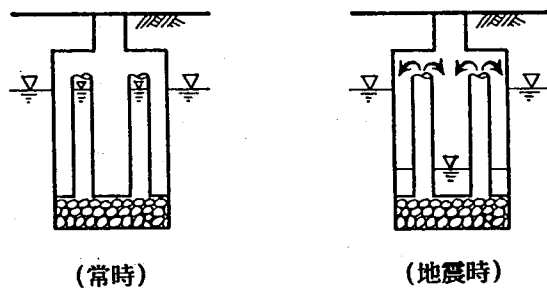


図-1 排水パイプ工法の概要

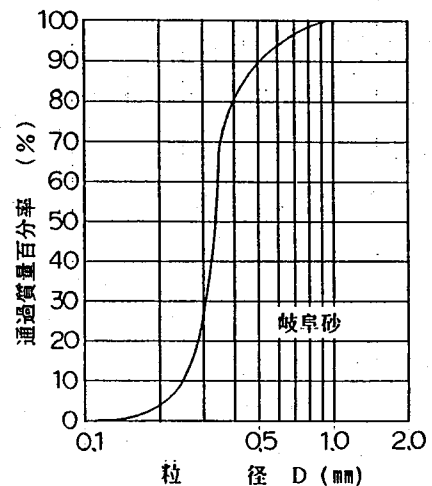


図-2 粒度分布

AN EXPERIMENTAL STUDY ON PREVENTING MEASURES FOR UPLIFT OF MANHOLE OF UNDERGROUND TRANSMISSION LINE DUE TO LIQUEFACTION; S. KOMURA, H. HAYAKAWA, S. TUCHIYAMA, T. SUGIMOTO(CHUBU ELECTRIC POWER COMPANY), H. TORIHARA(OHBAYASHI CORPORATION)

②模型地盤

地盤及び構造物模型の断面並びに代表的な計器配置を図-4に示す。砂層部は図-2に示す粒度分布を有する岐阜砂を用いており、相対密度、飽和単位体積重量はそれぞれ平均25%、 1.81 t/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、栗石に相当する碎石層 ($h = 100 \text{ mm}$, $D_{20} = 11.8 \text{ mm}$) を模型底部に設置した。主な計器は模型の浮き上がりや地盤の沈下を測定する変位計D1~D8と水位変動を測定する水位計L1~L2などであり、そのほか、砂層中に加速度計、間隙水圧計を埋設している。

③構造物模型

模型の概要と計器配置を図-5に示す。模型上部に首部 ($\phi = 11 \text{ cm}$, $h = 15 \text{ cm}$) を取り付けた $L = 137 \text{ cm}$, $B = 44 \text{ cm}$, $H = 53 \text{ cm}$, $t = 1.4 \text{ cm}$ の鋼製の函体で、模型の見掛けの比重は1.017である。排水パイプは内径5.4 cm のアルミ製で、模型底面より10本立ち上げている。また、排水パイプ工法では、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 : パイプ全断面積, A_0 : 模型底面積) が重要なパラメータであり、パイプの底面積を絞ることにより所定の開口率を設定している。実験中の模型に作用する外力を測定するために、間隙水圧計W10~W18と土圧計E1~E9を両側面と底面に、上載土の抵抗力を測定する土圧計E10~E11を上面に、パイプからの流入量を測定する間隙水圧計W19~W22を内部に、それぞれ取り付けている。

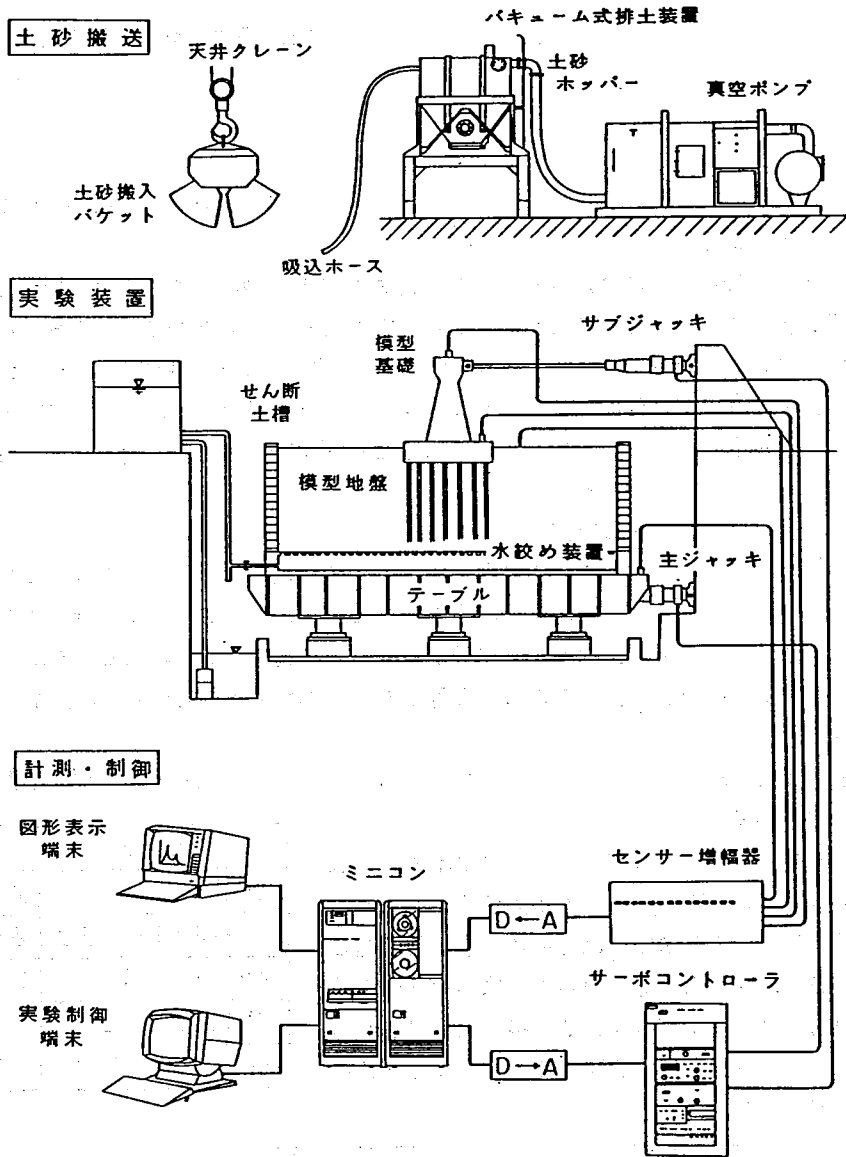


図-3 実験装置の概要

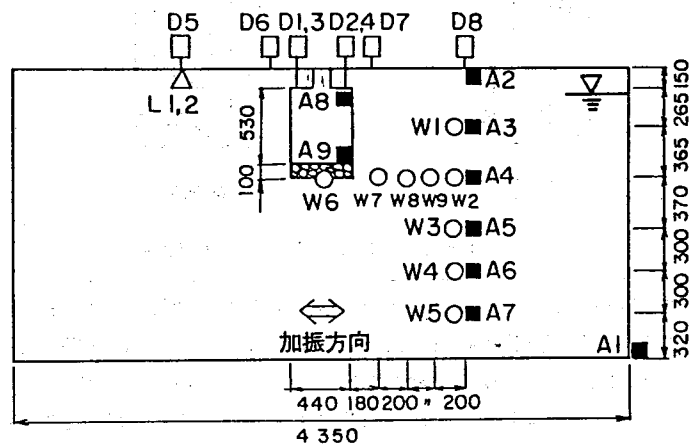


図-4 模型地盤の計器配置

④実験ケース

実験ケースを表-2 に示す。CASE1 は模型を設置したのみの無対策のケースである。各ケースで用いた入力波は、振動数4Hz、波数20波の正弦波であり、入力加速度は50、100、200gal である。(解析ケース、有効径については後述する)

4. 実験結果

排水パイプ工法における構造物の浮き上がりに関与する外力は、浮上力としては構造物底面に作用する揚圧力、抵抗力としては構造物の重量、側壁に作用する摩擦力、さらに排水パイプから構造物内に流入する水の重量、上載土の重量及びせん断抵抗力などが考えられる。そこで、以上の外力を模型に取り付けた間隙水圧計、土圧計などの測定値をもとに算定し、構造物に作用する外力と浮き上がり量の経時変化の関係を検討することにより、排水パイプ工法における地震外力の評価方法について検討を行なった。それぞれの外

W: 間隙水圧計 E: 土圧計 A: 加速度計
D: 変位計 L: 水位計

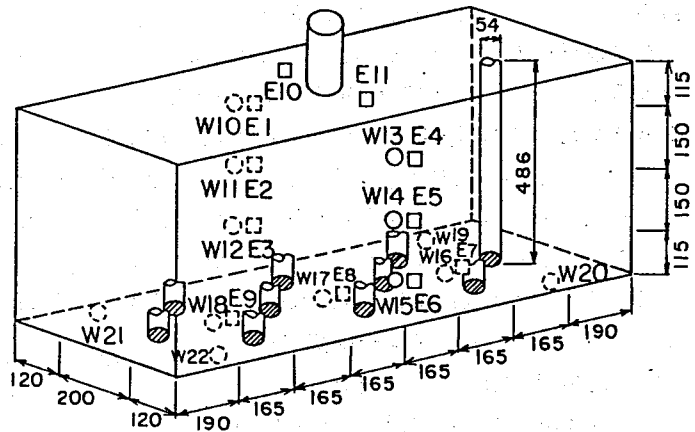


図-5 構造物模型の計器配置

表-2 実験ケース

実験ケース	碎石層 (mm)	解析ケース	開口率 A/Ao (%)	パイプ径 ϕ' (mm)	有効径 d (mm)
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'	8.143	79.1	17.932

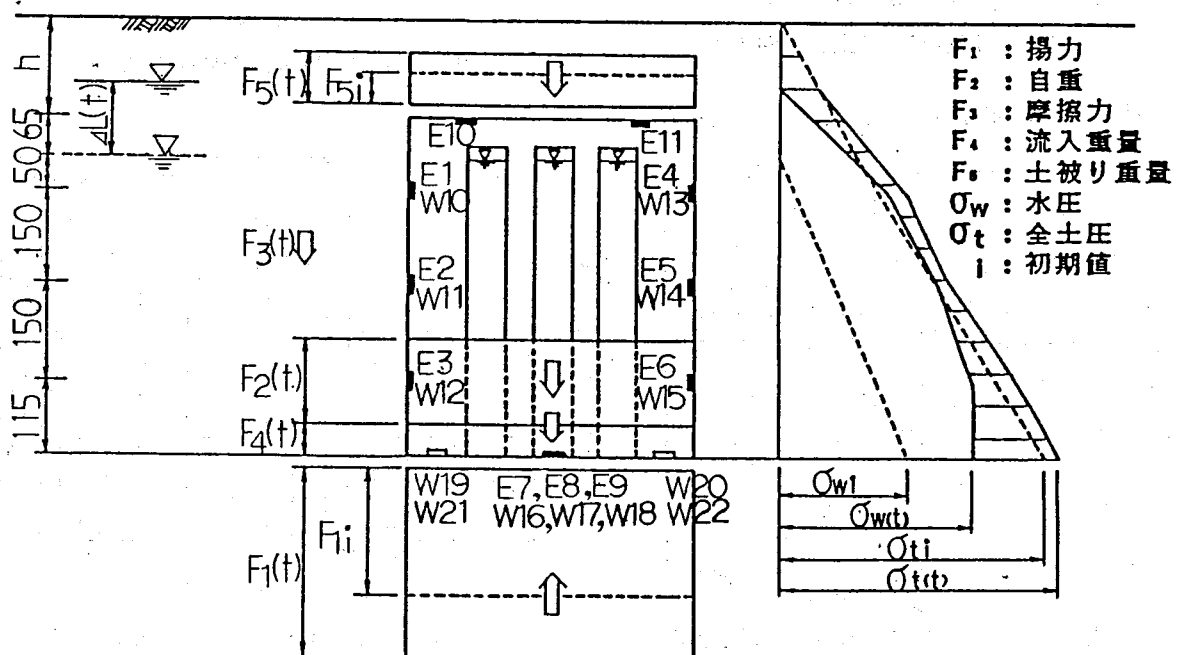


図-6 構造物模型に作用する外力

力を図-6に模式的に示すが、浮上力は式-(1)、抵抗力は式-(2)~(5)の和で算定することができる。

$$\text{浮上力} : F_1 = (F_{11} + (W16 + W17 + W18)/3) \times (L \times B) \quad \text{--- (1)}$$

$$\text{自重} : F_2 = \gamma_m \times (L \times B \times H) \quad \text{--- (2)}$$

$$\text{側壁摩擦抵抗力} : F_3 = \{ \sigma'_{h1} \cdot \tan \delta dz \times L + \{ \sigma'_{h2} \cdot \tan \delta dz \times L + \{ \sigma'_{h3} \cdot \tan \delta dz \times B \times 2 \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{流入重量} : F_4 = (W19 + W20 + W21 + W22)/4 \quad \text{--- (4)}$$

$$\text{土被り重量とせん断抵抗力} : F_5 = (F_{51} + (E10 + E11)/2) \times (L \times B) \quad \text{--- (5)}$$

ここで、添字*i*は初期値(静水圧等)、 γ_m は模型の見掛け比重、 δ は壁面摩擦角(20°と仮定)である。 $\sigma'_{h1} \sim \sigma'_{h3}$ は水平有効土圧であり、土圧計E1~E6、間隙水圧計W10~W15の測定値から全土圧と水圧の差として図-6のように求めることができる。

図-7は今回の実験で得られたCASE2-3の50, 100, 200gal入力における最大化剰間隙水圧の深度分布を示したものである。図中の実線は初期水位を考慮した初期有効土かぶり圧である。

図-8は以上の手法で得られた200gal入力時の浮上力と抵抗力の経時変化を示したものである。ただし、これらの値は模型底面積(L*B)で除した値である。同図から、開口率の増加に伴ない、浮上力が減少し、かつ、間隙水圧の低下によって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っていることがわかる。浮上力のうち間隙水圧計の測定値からとまる最大揚圧力(W16~W18の平均)と開口率の関係を図-15に示しているが、最大揚圧力は開口率の増加とともに明らかに低下してきている。つぎに、排水パイプ工法の効果が

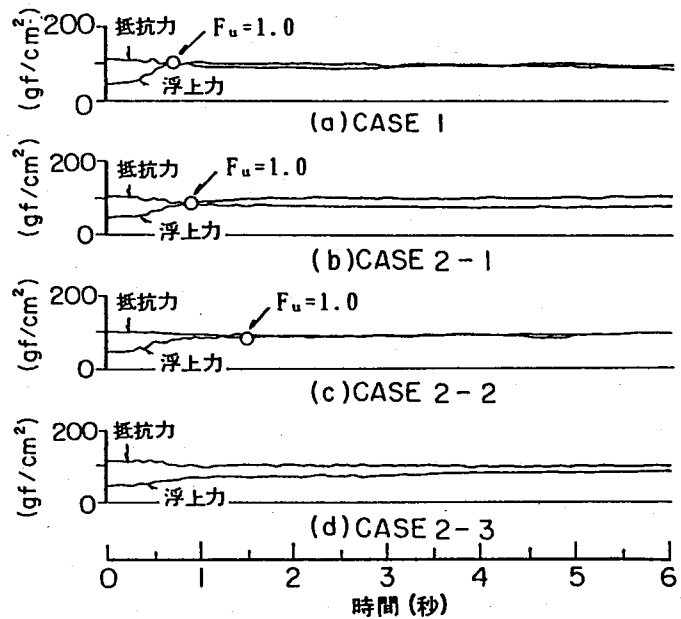


図-8 浮上力と抵抗力の経時変化

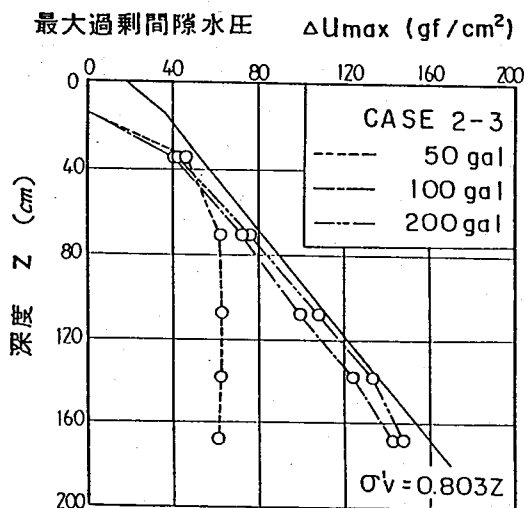


図-7 最大過剰間隙水圧の深度分布

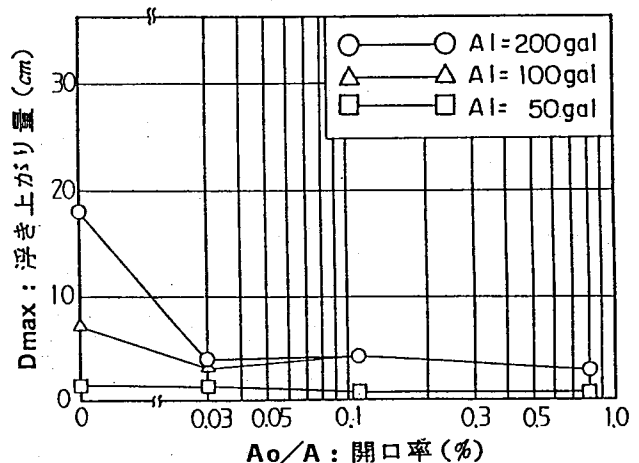


図-9 浮き上がり量と開口率の関係

最も端的に現われる最大浮き上がり量と開口率の間係をまとめたのが図-9である。

無対策時の200gal入力で18cm程度も浮き上がったものが、対策工の実施によって極端に低下している様子が明らかである。

5. 数値シミュレーション

①解析方法

今回の実験のシミュレーションは、一般的な解析手法である“全応解析”で行なっている。即ち、等価線形化法を用いた地盤-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、その結果を加刺間隙水圧の発生・消散解析プログラム“GADFLA”に入力している。“GADFLA”で用いた解析モデルの一例を図-10に示す。簡単のために、排水パイプは一本と考え、その有効径 d を次式で算定している。

$$d = (A/A_0) * d_{ref} / 100 \quad \text{--- (6)}$$

d_{ref} : 構造物の底辺長 (220mm)

②解析ケース

表-2に示すように、CASE 1~2-3の200gal入力のほかに、CASE 2-1~3の開口率の10倍を想定したCASE 2-1'~3'を追加している。なお、全ケースで“FLUSH”の入力波はCASE1で計測されたテーブル加速度波形である。

③入力定数

“FLUSH”で用いる砂層部の動的変形定数は、模型振動実験に対応した低拘束圧条件下での動的中空ねじりせん断試験から得られる G 、 h - γ 関係(図-11にその一例を示す)と、予め行なった微小ひずみレベルのホワイトノイズ振動実験のシミュレーション結果を参考に決定している。

また、“GADFLA”で用いる過刺間隙水圧の発生に関するパラメータは図-12、13に示す液状化試験結果から決定している。図-12はせん断応力比 R と液状化までの繰り返し回数 N_L の関係であり、図-13は過刺間隙水圧比 u/σ'_v と液状化に到るまでの繰り返し

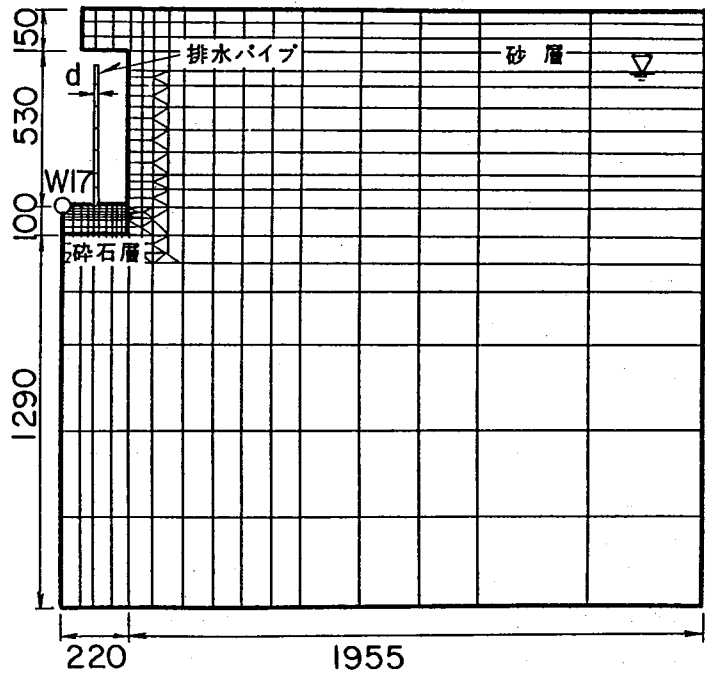


図-10 解析モデル (GADFLA)

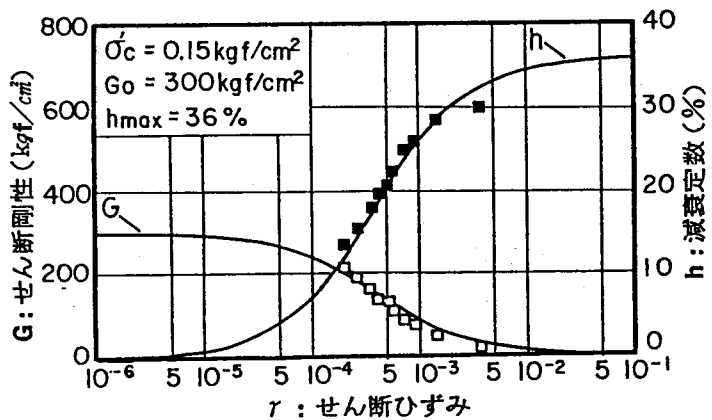


図-11 岐阜砂の G 、 h - γ 関係

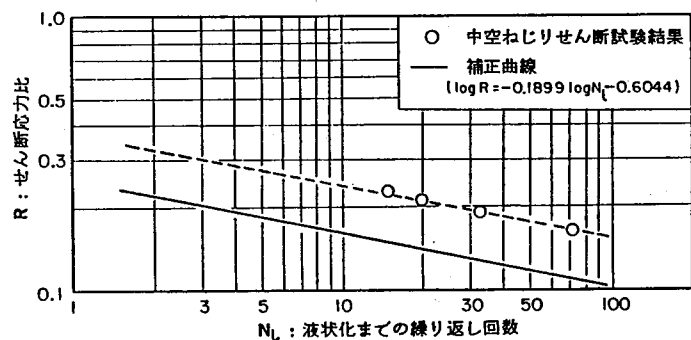


図-12 液状化強度曲線

回数比 N/N_1 の関係である。図-1.3にはSeedらの提案曲線も併せて示しているが、今回の試験結果はこれらのうち $\theta = 0.7$ の曲線とほぼ一致しているようである。

④解析結果

模型底面に作用する揚圧力($W17$)の経時変化の一例を図-1.4に示す。実験値と解析値ではその上昇過程に若干の差異はみられるが、最大値はほぼ良い対応を示しており、特に開口率が大きくなるほど最大揚圧力が小さくなる傾向は明確である。

図-1.5は、最大揚圧力と開口率の関係を示したものである。解析値は実験値と良く対応しており、開口率の増加とともに最大揚圧力が減少する傾向が明瞭である。この関係は本工法の設計をするうえで重要なものである。

6. まとめ

今回、新たに考案した排水パイプ工法に関する模型振動実験から以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 本工法は液状化時の地中構造物の浮き上がり防止にきわめて有用である。
- (2) 液状化による浮き上がり現象は地震時に作用する外力成分の厳密な釣り合い関係でほぼ表現することができる。
- (3) したがって、本工法の設計を行なうためには最大揚圧力と開口率の関係を求めておくことが重要である。

謝辞

今回の検討を行うにあたっては、豊橋技術科学大学・栗林教授、河邑助教授ならびに、電力中央研究所・当麻、田中両主査研究員、大友研究員に貴重な助言を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土山, 杉本, 鳥井原, 伊藤: 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, 第43回土木学会(1988)

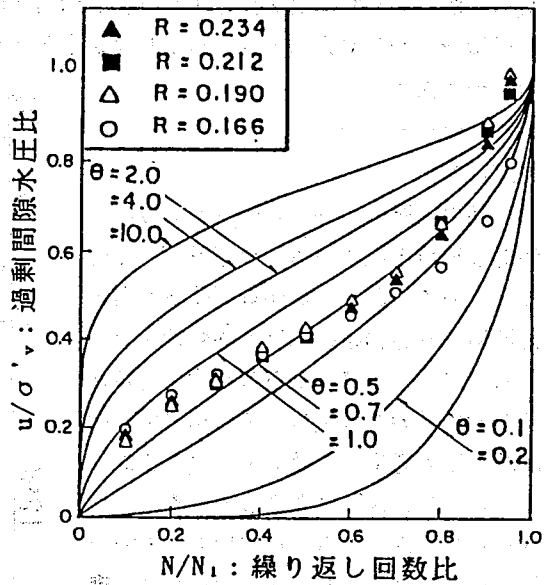


図-1.3 $u/\sigma'v \sim N/N_1$ 関係

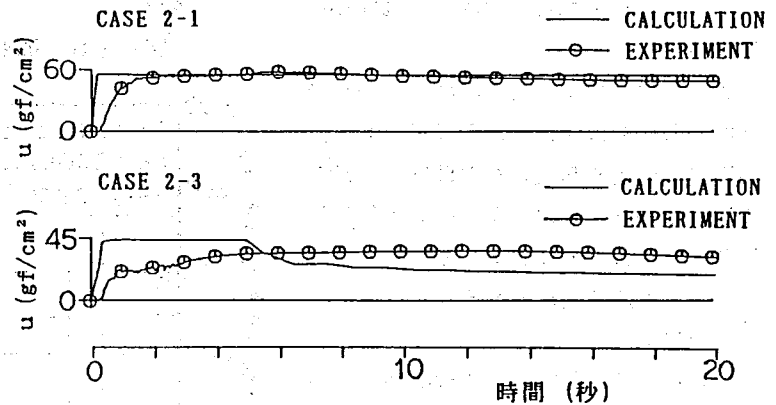


図-1.4 揚圧力の経時変化

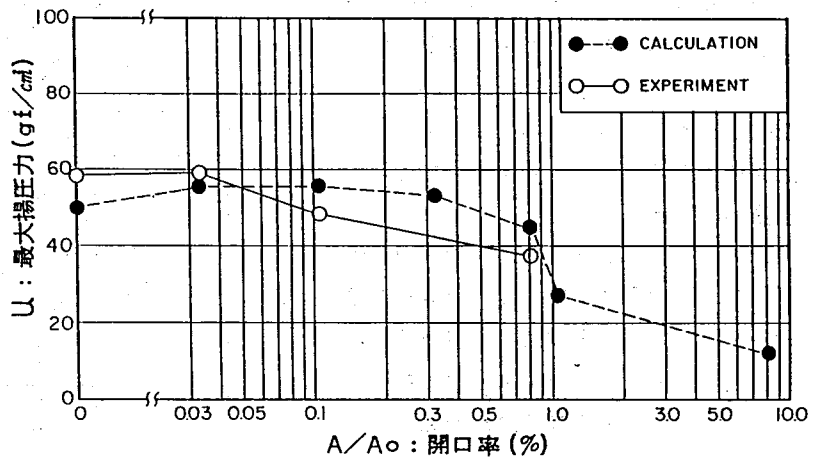


図-1.5 最大揚圧力と開口率の関係