

(28) 液状化層内の地中構造物の浮き上がり に対する上載土の影響

(株)熊谷組技術研究所 ○濱田 尚人
建設省北陸地方建設局 常田 賢一
建設省土木研究所 二宮 嘉朗

1. はじめに

地盤の液状化による地中構造物の浮き上がりは共同溝設計指針¹⁾等において考慮されているが、ここで過剰間隙水圧や上載土の抵抗などは液状化抵抗率 F_L 等によって推定して求めている。これらの推定値はたいがい正しいと判断されるが、合理的な設計を行うためには、実験により合理的な評価法を検討する必要がある。本報告においては、液状化による地中構造物の浮き上がりに関して、構造物の断面形状、土被り深さ、過剰間隙水圧比をパラメータに取って、上載土の浮き上がり抵抗力を検討した。

2. 実験方法

図-1に実験装置の概要図を示す。実験砂には豊浦砂を用いた。地盤作成法は土槽底部に設置したドレーン層に送水し、地盤を一様な密度とするため全層液状化の状態になるようボイリングさせた後、地盤面及び水位を所定の高さに調整した。砂層厚は75cm、各実験ケースの地盤の相対密度は27.1~37.4%となっている。

地中構造物の浮き上がり抵抗力は地盤中の模型をリニアモータにより2.6mm/secの一定速度で5秒、もしくは8秒間引き上げ、リニアモータと模型をつなぐワイヤに働く張力をロードセルにより計測し、これを浮き上がり抵抗力とした。

表-1に地中構造物模型の概要を示す。模型の形状は矩形断面中空アルミ製、高さ15cm、奥行き59cm、幅は模型1が15cm、模型2が45cmとなっている。これらの模型上下面には間隙水圧計が取り付けられている。実験時には構造物内に鉛玉を入れ比重を調整した。構造物の埋設土被り厚は各実験モデルについて10、20、30cmを設定し実験を行った。また土槽前後はアクリル壁でこれと地中構造物模型の間には摩擦の低減を図るためスポンジが入れられている。

入力には振り子式鋼製ハンマーの打撃により衝撃力を与える方法とし、ハンマー落下高さを変える事で入力加速度を調整した。目標とした入力加速度は45、67、92、108、115galである。

実験ケースを表-2にまとめる。模型種類が2通り、入力条件が5通り、模型土被り厚が3通り、また各ケース2回の実験を行い、合計60ケースの実験を行った。

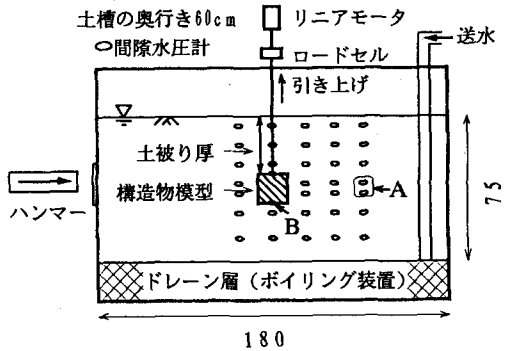


図-1 実験装置の概要

表-1 地中構造物模型の概要

実験模型	形状 (cm)	重量 (kg)	密度 (g/cm ³)	土被り厚 (cm)
1	正方形 15×15×59	23.2	1.74	10, 20, 30
2	長方形 15×45×59	66.6	1.60	

表-2 実験ケース

模型種類	入力加速度	模型土被り厚
1. 正方形 2. 長方形	45, 67, 92, 108, 115 gal	10, 20, 30cm

3. 過剰間隙水圧と模型浮き上がり抵抗力の関係

模型1（正方形型）及び模型2（長方形型）について、図-2に模型の浮き上がり抵抗力、図-3に模型下面に取り付けた間隙水圧計（図-1、Bの位置）の時刻歴の例を示す。実験条件は両モデルとも115gal入力、30cm土被り厚である。図-3より引き上げ中における過剰間隙水圧は若干の消散傾向にある。模型引き上げの過程で模型周りの過剰間隙水圧が減少すると模型浮き上がり抵抗力は増加する。模型引き上げ中の過剰間隙水圧の消散傾向と浮き上がり抵抗力のこのような関係は全実験ケースに当てはまる。

図-4に有効上載圧に対する過剰間隙水圧比と浮き上がり抵抗力の関係を構造物模型別に図示する。過剰間隙水圧は模型中央部の深さに対応する値であり、図-1に示すAの位置、模型より側方約40cm離れた間隙水圧計の記録の引き上げ時間中の平均値をプロットした。浮き上がり抵抗力は図-2に示すように引き上げ開始5秒後の引き上げ力を計測、ゼロ補正し、この値を模型上面の単位面積あたりに働く浮き上がり抵抗力として正規化した。図-4の正方形模型1、及び長方形模型2の図より過剰間隙水圧比が0.8以上の場合、浮き上がり抵抗力は全て 5gf/cm^2 以下と小さく、浮き上がり抵抗力の違いはほとんどない。しかし、0.8以下では過剰間隙水圧比が小さいほど浮き上がり抵抗力は大きくなる傾向がある。以上より、過剰間隙水圧比が1.0に近づき地盤がほぼ液状化の状態にある時、浮き上がり抵抗は期待できない。しかし、ある程度までの過剰間隙水圧比までの上昇（今回の実験では0.8以下）でとどまれば地中構造物の浮き上がり抵抗力が見込めることがわかった。

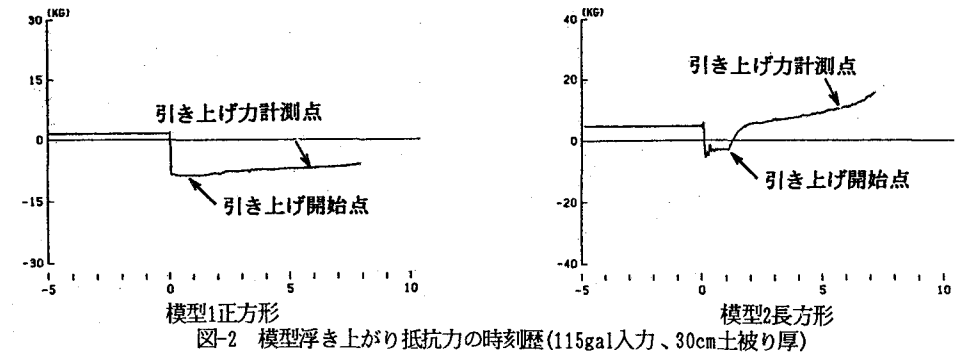


図-2 模型浮き上がり抵抗力の時刻歴(115gal入力、30cm土被り厚)

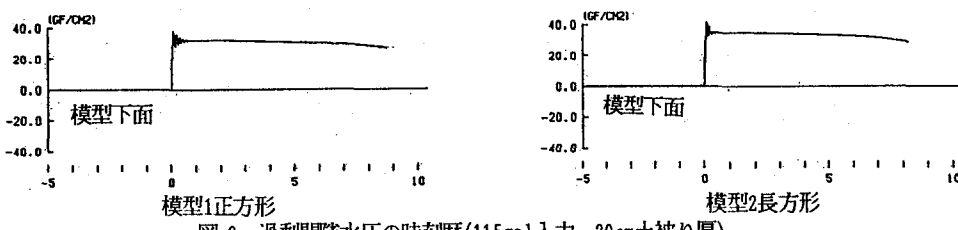


図-3 過剰間隙水圧の時刻歴(115gal入力、30cm土被り厚)

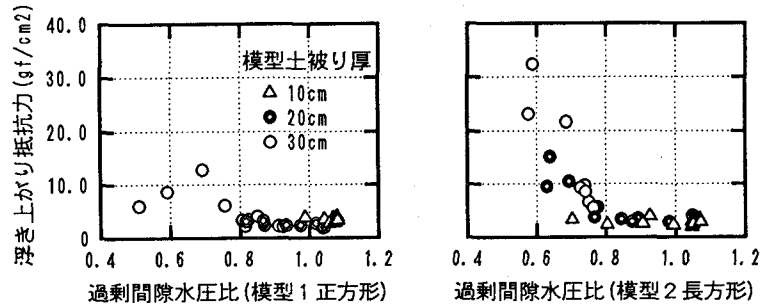


図-4 過剰間隙水圧比と浮き上がり抵抗力の関係

4. 安全率を指標とした浮き上がり抵抗力

図-5に共同溝設計指針¹⁾に示されている液状化時において共同溝に作用する力を参考にして、本実験において地中構造物模型に作用する力を図示した。また、地中構造物模型の浮き上がりに対する安全率を以下のように算出する。

$$F_S = \frac{W_S + W_B + Q_F}{U_S + U_D} \dots (1)$$

- W_S : 上載土の荷重
- W_B : 地中構造物模型の自重
- Q_F : 地中構造物模型と土槽側面とに働く摩擦力
- U_S : 地中構造物模型底面に作用する静水圧による揚圧力
- U_D : 地中構造物模型底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力

今回の実験で得られた結果について各ケースごとに安全率を算出し、そのケースでの正規化した浮き上がり抵抗力を図-6にプロットした。ここで、 U_D の値は模型下面に取り付けた過剰間隙水圧計の引き上げ時間中における計測値から算出した。また Q_F の値は、水中において構造物模型を引き上げ、地中構造物模型と土槽側面のアクリル壁とに働く摩擦力を求めたものである。なお、設計指針において考慮に入れられる、上載土のせん断抵抗と構造物側面にかかる摩擦抵抗はゼロとして算定している。

図-6は模型の土被り厚別にグラフ化したものである。これより実験においては、安全率が1.1未満の時、土被り厚が異なっても、また模型断面形状が異なっても、浮き上がり抵抗力は一樣に 5gf/cm^2 以下の値となっており、地中構造物は浮き上がる危険性が大きいと言える。

従って、過剰間隙水圧比が0.8程度までは安全性が高いと言える。ただし、今回の加振法が土槽側面からの衝撃によるため、液状化の程度の一様性には多少難があり、模型上面での過剰間隙水圧比は図-1、A点での計測値とは多少異なる。

このように矩形断面の地中構造物模型において、安全率の算定は地中構造物の浮き上がりは生じるかどうかの判定に上式(1)が有効であることがわかった。

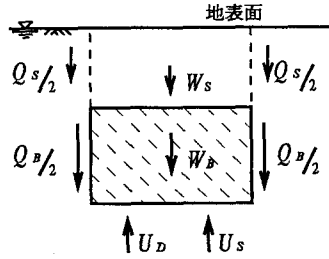


図-5 液状化時に地中構造物模型に作用する力

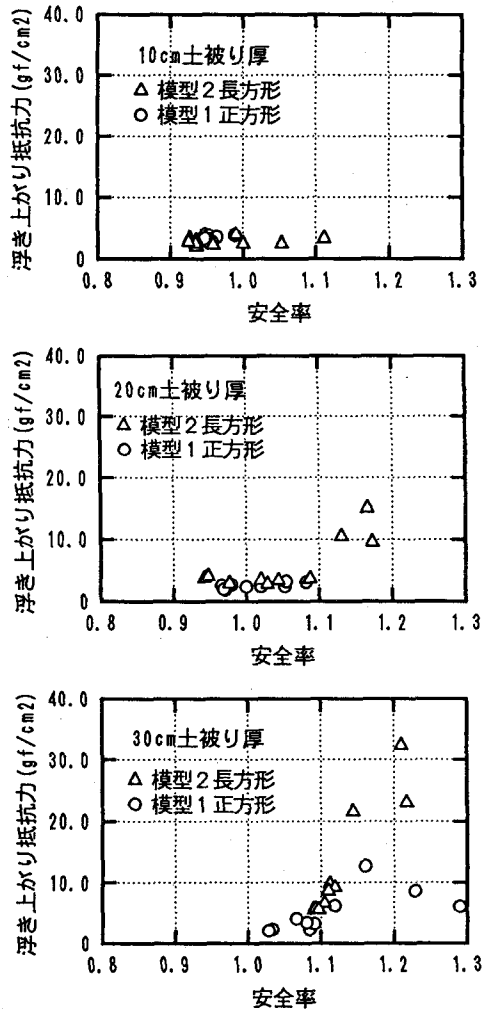


図-6 安全率と浮き上がり抵抗力の関係

5. 上載土荷重、上載土せん断抵抗、共同溝摩擦抵抗の検討

地中構造物の浮き上がりを低減する力として、上載土の荷重 W_S 、上載土のせん断抵抗 Q_S 、及び共同溝側面の摩擦抵抗 Q_B が考えられる。共同溝設計指針には上載土荷重 W_S を構造物上面にかかる全土圧として考慮し、また Q_S 、 Q_B は下の注釈のように算出している。これらの力の算出法が過剰間隙水圧比や土被り厚の条件、また浮き上がり抵抗の変化に対応しているか検討する。図-7に模型の土被り厚さ別に指針により算出される上載土荷重を点線として、実験の計測値から算出される荷重を丸印としてプロットする。なお、本図は長方形断面の模型2について示す。なお、上載土のせん断抵抗 W_S の算出法は以下のようにになっている。

$$W_S = F + U_S + U_D - (W_B + Q_S + Q_B + Q_F) \dots (2)$$

F : 模型全体にかかる浮き上がり抵抗力 (計測値)

U_S : 地中構造物模型底面に作用する静水圧による揚圧力

U_D : 地中構造物模型底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力 (計測値)

W_B : 地中構造物模型の自重

Q_S : 上載土のせん断抵抗 (過剰間隙水圧比 $Lu > 1.0$ の時0、 $Lu \leq 1.0$ の時 $2K_0 \sigma_{vj}' t_j \tan \phi$)

Q_B : 共同溝側面の摩擦抵抗 (過剰間隙水圧比 $Lu > 1.0$ の時0、 $Lu \leq 1.0$ の時 $2K_0 \sigma_{vj}' t_j \tan 2/3 \phi$)

Q_F : 地中構造物模型と土槽アクリル側面とに働く摩擦力 (計測値)

K_0 : 静止土圧係数 (0.5)

ϕ : 土のせん断抵抗角 (25度)

t_1 : 上載層の厚さ

t_j : 共同溝側面の厚さ

σ_{vj}' : 上載土中央での有効上載圧

σ_{vj}' : 共同溝側面中央での有効上載圧

Q_S 、 Q_B の値は過剰間隙水圧比1.0を境に変化する。また浮き上がり抵抗力 F も過剰間隙水圧比に応じて変化する。この図より、上式において算出される上載土の荷重 W_S はおおむね共同溝設計指針の計算手法において考慮される値に等しいと言える。すなわち、上載土の荷重 W_S 、及びせん断抵抗 Q_S 、地中構造物模型側面の摩擦抵抗 Q_B の評価法は、過剰間隙水圧、構造物の土被り厚などの影響の評価はほぼ妥当である。

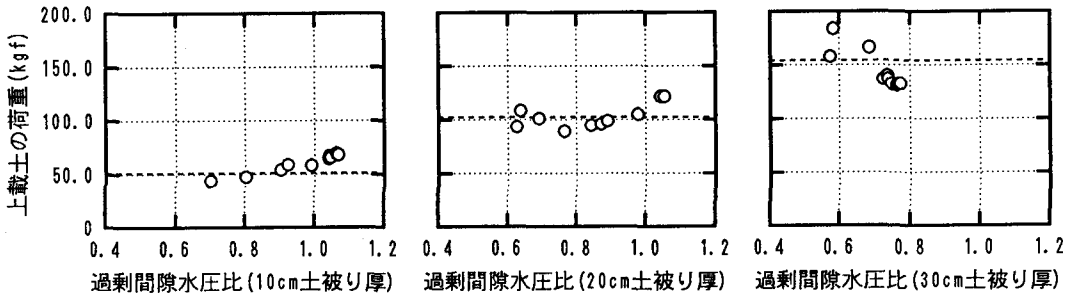


図-7 上載土荷重の実測値と計算値 (模型2)

6. 最後に

地中構造物模型の浮き上がり抵抗力は過剰間隙水圧比がある程度 (本実験では約0.8) 以上の場合小さく、構造物の断面形状や土被り厚の条件に関わらず構造物は浮き上がりやすい事がわかった。また、浮き上がりに対する安全率もまた過剰間隙水圧比によってほぼ決定される。さらに、共同溝設計指針に示される上載土荷重、上載土のせん断抵抗力、共同溝側面摩擦抵抗力の評価法はおおむね妥当である事がわかった。なお、本報は建設省土木研究所において実施された実験をまとめたものであり、共著者のうちの濱田は現在、土木研究所の部外研究員である。

【参考文献】 1) (社) 日本道路協会 : 共同溝設計指針、昭和61年3月