

地盤基礎実験

地盤と基礎構造の地震時挙動を検証

兵庫耐震工学研究センター 主任研究員 田端憲太郎



はじめに

大規模な地震時には液状化による地盤変形やそれに伴う構造物被害が多く見られることから、構造物の耐震性向上のためには、地盤や基礎構造の地震時挙動を考慮する必要があります。1995年の兵庫県南部地震では、地盤の液状化や液状化地盤の側方流動による護岸崩壊と構造物の基礎破壊といった、地盤に関する被害が数多く発生しました。このような地盤液状化の引き起こす被害が研究課題の一つとして大きくクローズアップされるようになったことから、地盤と基礎構造の地震時挙動の解明へ向けて、被害調査や様々な実験、解析による検討が進められています。しかし、実際の地震時に地盤や基礎構造がどのようなプロセスを経て被害を受けたのかを記録した観測データがないために、調査や実験、解析による現象の十分な理解には

至っていません。

地盤や基礎構造の被害プロセスを再現するために、遠心载荷装置や振動台に載せた縮小規模地盤モデルに振動を加える実験が以前より行われていますが、実際の地盤の力学特性を縮小モデルへ完全にフィードバックすることができないことから、これらの実験結果を実挙動と直接的に比較し、解釈することは困難を伴います。そこで当研究所では、実現象が再現され得る地盤モデルの実験から実証データを取得することを目標として、構造物のある液状化地盤の実大規模モデルを土槽と呼ばれる容器内に作製し、それをE-ディフェンスの震動台に載せて地震動で揺らす震動実験を実施しました。地盤モデルに実現象を再現させるためには、実際と同様の大きなサイズのモデルが必要となり、それに伴い質量も非常に大きなものになります(写真1)。E-ディフェンスは、そのような大規模・大質量のモデルを三次元の地震動で揺らすこと



写真1 水平地盤実験の地盤モデルの震動台上への設置 (吊上げ時質量約750t)

表1 E-ディフェンスによる地盤基礎実験の種類

| 実験の種類 | 平成17年度 | 平成18年度 |
|--------|--|---|
| 側方流動実験 | <ul style="list-style-type: none"> 矢板護岸 杭基礎構造物 (鋼管杭6本) | <ul style="list-style-type: none"> ケーソン護岸 杭基礎構造物 (鋼管杭6本) |
| 水平地盤実験 | <ul style="list-style-type: none"> 非液状化地盤 (乾燥砂) 杭基礎構造物 (鋼管杭9本) | <ul style="list-style-type: none"> 液状化地盤 (飽和砂) 杭基礎構造物 (鋼管杭9本) |

ができる、世界で唯一の震動実験施設です。

地盤や基礎構造の地震時挙動解明に関して取り組むべき研究トピックは非常に多く存在しますが、特に地盤液状化に係る問題は、その影響が非常に広範囲にわたって発生件数も多いことから、国民的関心事となっています。この液状化問題の中でも「水平地盤における杭基礎の破壊」と「側方流動による護岸とその背後の杭基礎の破壊」のメカニズム解明は、とりわけ重要な課題です。そこでE-ディフェンスによる最初の地盤基礎実験として、これら2つの重要課題を対象とした震動実験（それぞれ「水平地盤実験」、「側方流動実験」と称します）をこの研究で取り組むこととし、平成17・18年度に4種類の実験を実施しました（表1）。本文では、側方流動実験のうち、ケーソン形式の護岸を有する液状化地盤モデルの実験について紹介します。

側方流動によるケーソン護岸とその背後の杭基礎の破壊実験

兵庫県南部地震では、臨海部の液状化に伴う地盤の側方流動により護岸が壊滅的な被害を受け、その背後にある杭基礎構造物も大きな被害を受けました。これら構造物の多くは物流拠点

であり、かつ災害発生時には救援や復旧に必要な物資集積の拠点となりますので、液状化に伴う側方流動による護岸とその背後にある杭基礎構造物の被害を軽減させることはきわめて重要です。そこで筆者らは、地盤液状化に伴う護岸の変形メカニズムと、護岸の背後にある杭基礎の破壊メカニズムを、実大規模地盤モデルで実験的に把握することを目的としたE-ディフェンスによる震動実験を実施しました。

この実験では、直方体形状の土槽（内部の長さ16m、幅4m、高さ5m）の中に、ケーソン護岸と杭基礎構造物が設置された液状化地盤を想定した地盤モデルを作製しました（図1、写真2）。液状化地盤は、相対密度が土槽底面から0.75mまでは90%の密な状態に、それより上層が60%のやや密な状態になるように、乾燥状態の砂を締固め、地盤が所定の高さに達した後に土槽底面から脱気水を注入することにより飽和させました。地盤はケーソン（質量21.6t、単位体積あたりの質量 2.1t/m^3 ）によって陸側と水側に地盤表面高低差2mで分けられ、地下水位面を陸側地盤表面から0.5m下（水側表面から1.5m上）としました。ケーソンの下には碎石によるマウンドを、背後には鋼管杭6

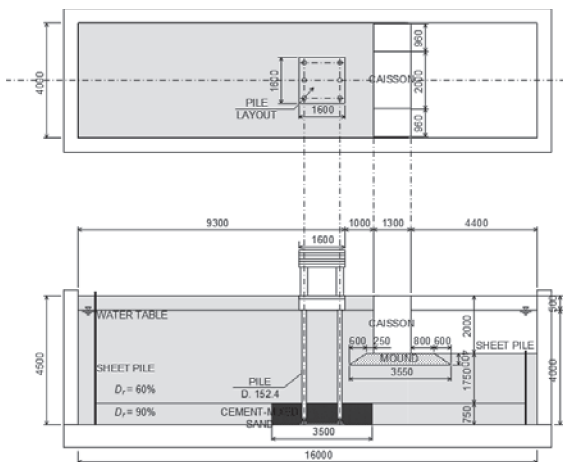


図1 地盤モデルの仕様（ケーソン護岸のモデル）

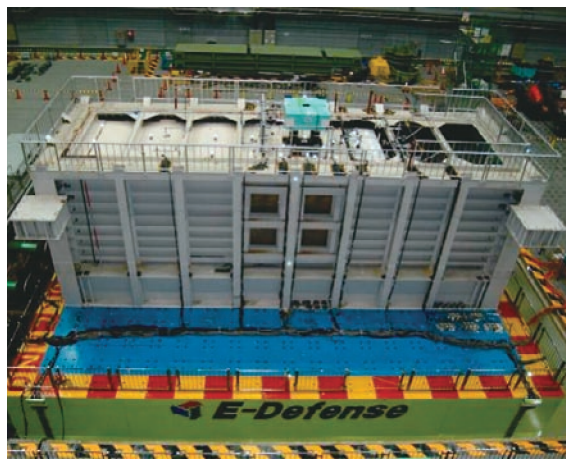


写真2 実験前の地盤モデル（ケーソン護岸のモデル）

本の基礎で支持された構造物（上部構造物の質量12t、フーチングの質量10t）を設置しました。この地盤モデルに、加速度計、変位計、水圧計、土圧計、ひずみゲージ他、約900チャンネル分のセンサを設置して、地盤や構造物の挙動を計測しました。また、このような大規模モデルでは、地盤や構造物に従来の変位計で計測できない水平・鉛直方向の動きを生じることが予想されたため、地盤表面やケーソン、構造物に取り付けた光反射マーカ（写真3の地盤や構造物表面で光っている球体）をデジタルカメラで捉えることによって移動量を算出する、三次元変位計測も併せて実施しました。

震動実験では、兵庫県南部地震で実際に観測された地震波を、80%の加速度レベルに調整して土槽長手（水平）・上下（鉛直）の2方向に入力（加振）しました。震動台の最大水平加速度 5.96m/s^2 、鉛直加速度 1.71m/s^2 の加振により、地盤全体が液状化しました。加振後の地盤モデルの状況と平面・断面図を、図2と写真4にそれぞれ示します。ケーソンは加振後から大きく水側へ水平方向に上部で約1.5m、下部で約1.0m移動し、その下にあるマウンドもケーソンの移動に伴って水側へ移動しました。しかし、ケーソン、マウンドとも、鉛直方向への移

動量はそれほど大きくありませんでした。ケーソン背後（構造物前面）の地盤では加振開始直後に沈下と亀裂を生じ、ケーソンやフーチングとの間隙から水を噴き出す状態となりました（写真5）。この状況から、少なくとも地盤表層付近では、ケーソン、フーチング、その間の地盤は一体ではなく、亀裂や隙間を生じて動いているようです。構造物は、ケーソンの移動とそれに伴う前面（ケーソン背後）地盤の流動により、水側へ傾斜しました。これは構造物の杭の破壊によって生じたもので、すべての杭でフーチング直下が提灯状に変形し、加えて水側の3本の杭がマウンドと同じレベルで折れ曲がっていました（写真6）。

加振中の地盤と構造物の動きについて、水平方向移動量を図3に示します。ケーソンは

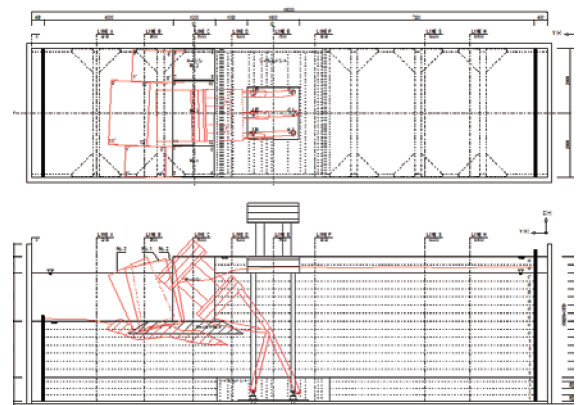


図2 加振後の地盤・構造物の状況

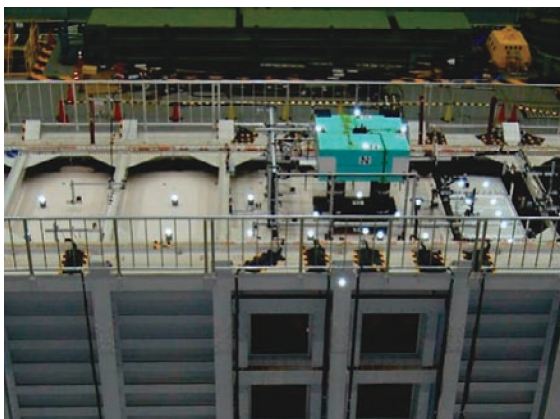


写真3 三次元変位計測の光反射マーカ



写真4 加振後の地盤モデル

加振直後から水側と陸側に大きく揺れ、経過時間 10.5 秒頃に水側へ転倒しました。転倒までの間、背後地盤と構造物の移動量はケーソンよりも小さく、ケーソン転倒にそれほど影響を与えていないことがわかります。しかしケーソンが転倒すると、背後地盤と構造物が同じように水側へ大きく動き、最終的に背後地盤は流出し、構造物は杭が破壊して転倒します。次に、加振中の地盤と構造物の加速度の変化を図 4 に示します。ケーソンの加速度が経過時間 10 秒頃に大きく変化していることから、その転倒が加速度、つまり慣性力が大きく変化することにより引き起こされたものと考えられます。一方、地盤と構造物の加速度は、ケーソン転倒前後でそれほど変化が見られないことから、構造物の転倒は前面（ケーソン背後）地盤の流出がトリガ

となって生じたと思われます。

おわりに

このような実大規模地盤モデルの震動実験を行うことにより、実際の地震時に観測されていなかった地盤と構造物の動きや加速度変化などのデータを収録し、同時に地盤や構造物の震動時の映像も収録することができました。また、本文で紹介した実験結果のように、構造物への地盤変形や慣性力の影響など、挙動評価のための情報を得ることができました。E-ディフェンスによる震動実験のデータや知見は実大規模地盤モデルから得られたものですので、実際に起こりうる現象の再現から得られたものであると言えます。この実験研究で得られた結果は、従来手法による実験結果の解釈や数値解析手法の開発や評価のベンチマークとして不可欠なものであるために需要が高く、今後の利活用が期待されています。



写真5 加振開始直後のケーソン背後地盤



写真6 折れ曲がった杭

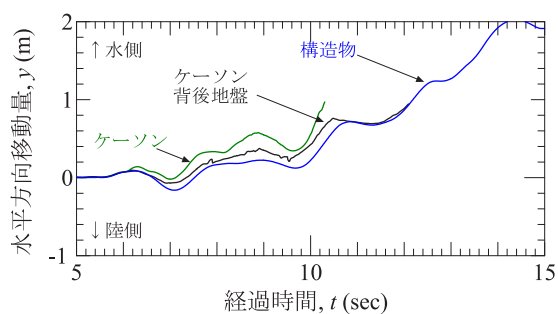


図3 水平方向の移動量の変化

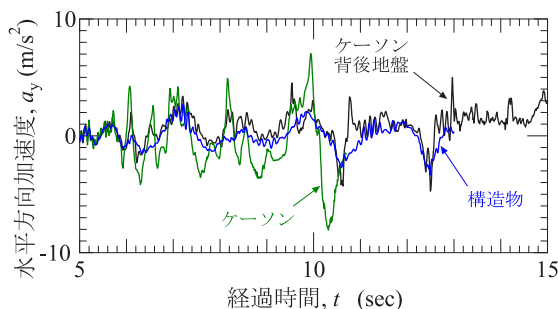


図4 水平方向の加速度の変化