

◆ 特集：動的実験施設を活用した研究開発 ◆

地中構造物変化部の耐震性に関する動的遠心模型実験

田中 弘* 李 黎明**

1. 動的遠心模型実験活用の背景

地震国であるわが国では、社会資本が高密度に集積する都市部における合理的な耐震施策が重要な課題として挙げられる。特に、地中構造物の場合は、地上構造物と比較して地震時挙動が容易に観察できないことに加え、周辺地盤との動的相互作用に関する技術課題を含んでいる。従来では、地震被害による教訓を踏まえて逐次知見を蓄積して耐震対策の内容を改善してきたが、レベル2地震動対応のより合理的な耐震施策を早期に構築していくには、地震観測などの待ちの姿勢に加えて、模型実験および数値シミュレーションを有効活用した積極姿勢が不可欠である。

地盤工学における模型実験の中で、遠心载荷模型実験は現象の破壊や終局状態に至るまでの全ての過程において相似性が満足される(模型から得られた現象が直接実物へ外挿できる)唯一の実験手法として広く一般に認識されている。特に、設計手法が確立していない構造物や対策工に係わる技術課題や施工管理上のより実地的な現場挙動に関して有効な検討手法および検証手法の一つとなる。

筆者等は今回、地中構造物変化部の地震時挙動および耐震方策の検討を目的として、都市部地中構造物の典型である立坑とシールド管渠の取付け部や、河川横断部の伏せ越し管渠と立坑との接合部に着目した3次元モデルによる動的遠心模型実験を行った。

本文では、実験装置の仕様ならびに地盤条件、模型設置条件および耐震対策工法を変化させた場合の立坑とシールド管渠の取付け部の地震時挙動の相違に関する代表的な実験結果を示すとともに、地盤と構造物の動的相互作用問題に関するモデル化と模型製作を含む遠心模型実験上の工夫について報告する。

Dynamic Centrifuge Model Test on Seismic Performance of the Change Points of Underground Structures

2. 実験概要

2.1 動的遠心载荷装置

遠心载荷装置と加振装置の配置状況を図-1に、遠心载荷装置の仕様を表-1に示す(本誌グラビア、写真-7参照)。

遠心载荷装置は、有効半径 $R=2.6\text{m}$ 、最大遠心加速度 250G 、容量約 $981\text{G}\cdot\text{kN}$ の中型装置であり、プログラマブルコントローラによる集中制御システムを採用しているため、実験のパターンに応じてスムーズな回転制御が可能である。計測システムは、動ひずみアンプとチャージアンプによる同時サンプリングが可能であり、非接触型光

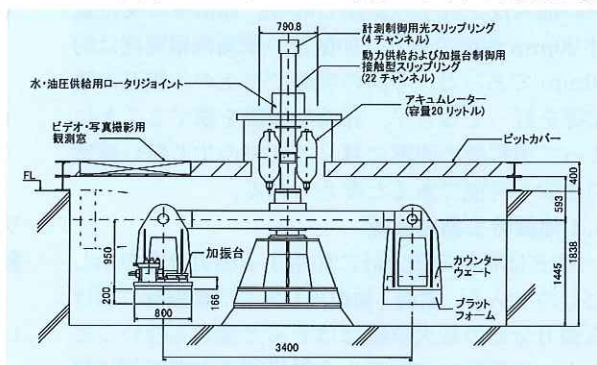


図-1 遠心载荷装置と加振装置

表-1 遠心载荷装置仕様

型式	ビーム型遠心载荷装置 (スイングアップ式)
回転半径	2,600mm(プラットフォームまで)
最大遠心加速度	250G(静的実験)、100G(動的実験)
最大搭載質量	1,000kg
遠心装置容量	約981(G・kN)
プラットフォーム	幅1,000mm×奥行800mm×高さ900mm
駆動モーター	AC200V、90kW
スリッピング	計測用：非接触型光スリッピング(4極) 動力用：接触型スリッピングAC300V、15A(6極) 制御用：接触型スリッピングAC300V、3.5A(16極)
ロータリージョイント	5極(油圧2極：耐圧20.6MPa、 空気圧2極：耐圧0.98MPa、水圧1極：耐圧9.81MPa)
観測装置	連続映像：マイクロCCDカメラをプラットフォームに搭載し外部でVTR記録、静止画像：60mm×60mmカメラ写真撮影、写真解析
計測装置	チャンネル数：30ch(動ひずみ30ch、電圧18ch) サンプリング形式：同時サンプリング サンプリング速度：最大20kHz(50μsec)

表-2 加振装置の仕様

項目	仕様	
	模型	実物換算 (1/50模型)
加振装置性能	最大速度	40kine
	最大振幅	±3.0mm
	最大加速度	25G(1G=9.8m/s ²)
	最大周波数	10~400Hz
	最大加振力	118kN
	加振台寸法	(L)700mm×(W)400mm
	最大搭載重量	2.45kN (模型土槽+試料)
制御機能	制御方式	電気油圧サーボ制御方式
	制御モード	加速度または変位
	加振波形	正弦波、実地震波、ランダム波

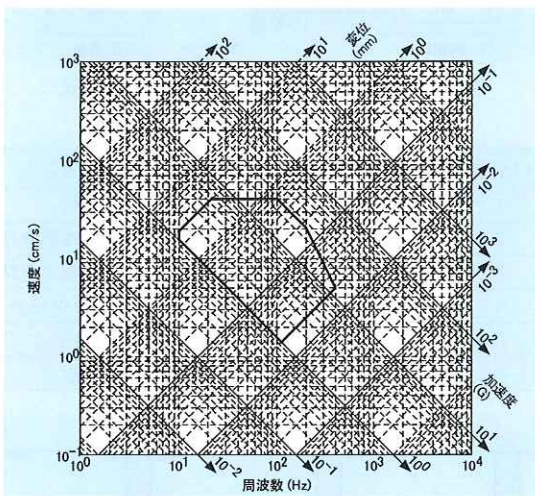


図-2 加振装置の特性曲線

スリッピングによるデータ転送の採用によりノイズフリーの計測データ採集を実現している。また、加振装置を搭載するため、遠心载荷装置の回転アーム上に、高圧配管系、油圧アキュムレータおよび制御用電気回路を取り付けている。

加振装置は電気油圧サーボ制御方式で、油圧源からの加振用高圧油は、ロータリージョイントを介してアキュムレータに蓄積し、加振テーブルに連結した一対のアクチュエータにより起振力を発生せさせる機構となっている。加振制御は、コンピュータ制御サーボコントローラーより行っている。加振装置の仕様および加振限界特性曲線を表-2、図-2に示す。

本加振装置は以下の特徴を持つ。

(1) 連続加振機能

本加振装置は、外部油圧供給方式により、加振による油圧の低下が瞬時に回復されてた

だちに再加振の準備ができる。また、コンピュータ制御による波形発生装置を用いて、異なる波形による連続加振機能を持っている。

(2) 補正加振機能

通常、加振制御コンピュータから加振装置へ目標波形を送ると、加振テーブル上に設置した模型の質量分布および剛性等の影響を受けたその系が持つ固有振動数の関係で、加振テーブルが目標波形とは異なった応答波形を示す。本加振装置は補正加振機能を持っており、目標波形と応答波形の違いの比較・修正を繰り返し行うことにより、それぞれの模型に対して目標波形に近い応答波形を得るための指令波形を作成することが可能である。加振装置の制御機能を表す目標波形と応答波形の一例を図-3に示す。図に示す応答波形は所定の模型に対して補正加振より得られたものである。同図によると、0~5Hzの主要周波数範囲において、目標波形とよく一致した模型の応答波形が得られていることが検証される。

(3) 目的に応じた波形の入力機能

加振装置は、規則正弦波ならびに不規則波の実地震記録波とランダム波の3種類が入力可能で、目的に応じた入力波形設定が可能である。

2.2 実験条件の設定

前述したように、今回の3次元モデルによる動的遠心模型実験は、地中構造物変位部の地震時挙動の把握と耐震対策の策定を目的として実施した。ここでは、立坑とシールド管渠の取付け部に着目した実験例をもとに、モデル化などの実験方法と結果の概要について記述する。

対象とする立坑とシールド管渠の構造諸元を図-4に、実験条件一覧を表-3示す。本実験では、計6ケースの加振実験により、地盤液状化の有無、管渠取付け深度の相違による影響および耐震対策工の効果について調べた。

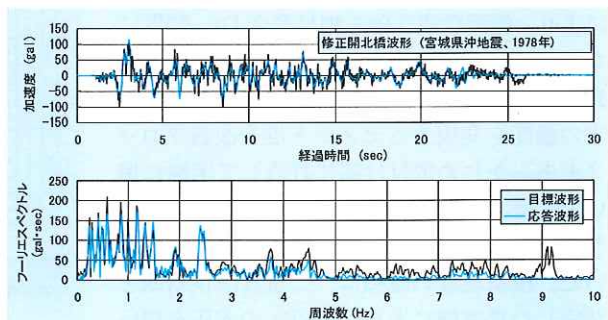


図-3 加振装置の応答特性

耐震対策工としては、立坑とシールド管渠取付け部周辺の地盤改良による補強工法と、可とう性接合による柔構造化を考慮した。なお、地盤改良は実際の施工性を考慮して、管渠上部半断面のみ改良と管渠全断面改良における対策工効果の相違を比較した(図-5 参照)。

2.3 実験方法

2.3.1 実験模型

実験模型の概要を図-6に示す。模型は縮尺 1/70 で作製し、70 G の遠心加速度場において加振実験を行った。想定した実物は 15m×15m×深さ 21m の立坑と外径 6m、長さ 30m のシールド管渠である。立坑は剛体構造として、実物と重量が相似となるようなアルミ製模型とした。シールド管渠については、軸方向の等価剛性が圧縮に比べて引張り側のほうがはるかに小さいことから、軸引張りが発生する状態での挙動を重要と考え、等価引張り軸剛性の相似率に合わせて、塩化ビニル製の一樣な断面を持つ模型管とした。この場合、模型管断面方向の曲げ剛性が極端に小さくなり、地盤の上載荷重により大きくたわむことが想定される。このような変形を抑え、更に管渠の重量に関する相似則を満足させるため、塩化ビニル模型管の内径にあわせて相似重量を持つアルミ管を挿入した二重管形式のシールド管渠模型とした。なお、二重管の間の摩擦抵抗を除去するため、肉厚 0.5mm のテフロンシートを挿入した。

取付け部の可とう性接合条件は、模型立坑壁面両側に厚さ 3mm のゴムワッシャを挟むことによりモデル化した。図-6 に示す模型配置は管渠の取付け深度が 15m の場合のものであり、取付け深度が 6m の場合は、模型を上下逆にして設置して実験を行った。

2.3.2 模型地盤の作成

模型地盤は落下高さが調節可能な特製ホッパーにより、乾燥豊浦珪砂を相対密度 $Dr=55\%$ になるように空中落下させて作成した。地盤改良モデルは改良範囲を 5m とし、7 日養生で所定の強度を発現するセメント混合改良ブロックをあらかじめ取付け部に打設して実験に用いた。液状化地盤の場合は、間隙流体に水より 70 倍高い粘性を持つシリコンオイルを用いた。模型地盤の飽和は、二重負圧供給系を装備した真空槽により、10kPa の差圧を用いて模型地盤の下部から行った。

2.3.3 入力地震波および計測項目

加振実験の入力地震波は、修正開北橋波形(図-3)を最大振幅 350gal に調整して使用した。計測は図-6 に示す項目について行った。

3. 実験結果

3.1 耐震対策による管渠発生軸力の低減効果

図-7 に、地震時管渠に発生する最大引張り軸力の分布を示す。可とう性接合による柔構造化の

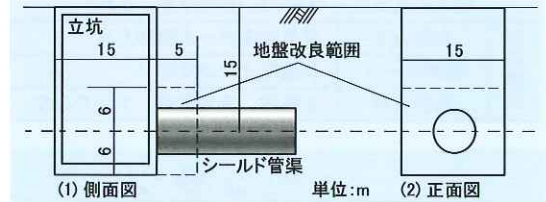


図-4 立坑とシールド管渠取付け部の構造諸元

表-3 実験条件一覧

CASE	管渠取付深度	地盤条件	耐震対策工
1	15m	乾燥砂、 $Dr=55\%$	無し
2	"	"	半断面地盤改良
3	"	"	全断面地盤改良
4	"	"	可とう性接合
5	6m	乾燥砂、 $Dr=55\%$	無し
6	"	液状化地盤	無し

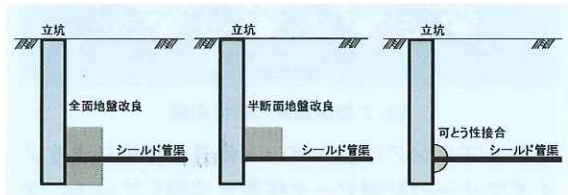


図-5 耐震対策工の模式図

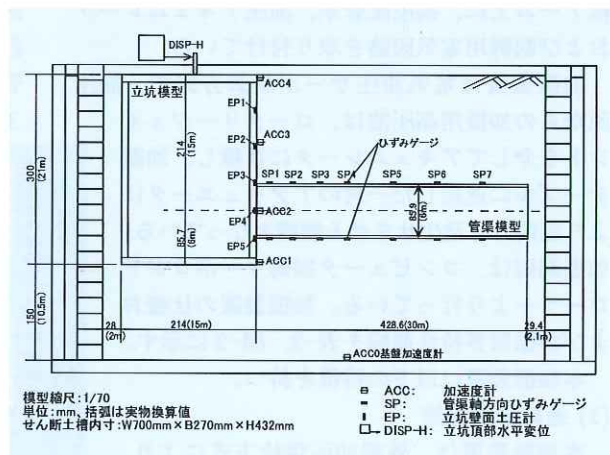


図-6 実験模型の概要

場合は、取付け端部での発生軸力の低減効果が明瞭である。一方、地盤改良による取付け部の剛構造化の場合は、改良範囲内での発生軸力の低減効果があるものの、軸力のピークが地山側へシフトする傾向が伺える。したがって、取付け部の地盤改良による剛構造化は、根本的耐震対策工法になり得ないことが分かる。

3.2 立坑の動的挙動 (ロッキング現象)

図-8 に、立坑壁面の作用土圧の経時変化を示す。振動中の立坑上部と下部の作用土圧の符号がきれいに逆転しており、剛な立坑は中央付近を軸に、いわゆるロッキング現象が発生していることがわかる。これは、立坑と地盤の剛性の相違およ

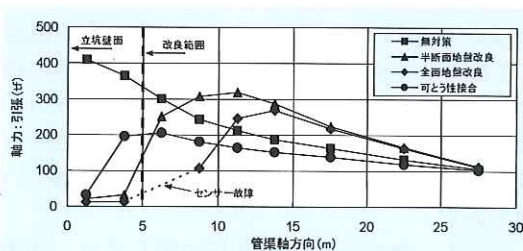


図-7 地震時管渠に発生する最大引張り軸力の分布

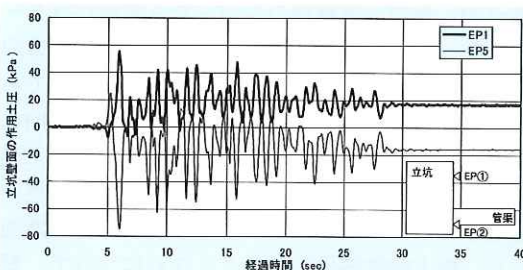


図-8 立坑壁面の作用土圧の経時変化

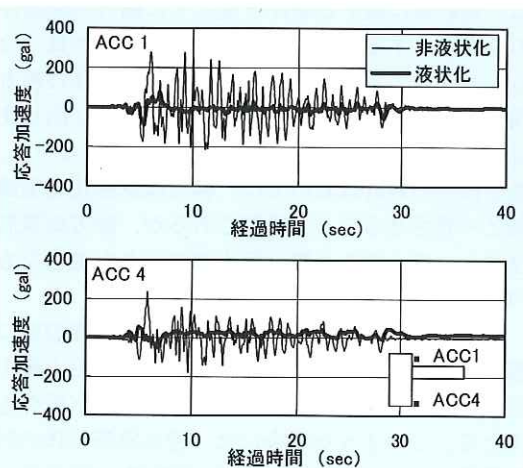


図-9 地盤液化の有無による立坑応答加速度の相違

び地盤振動の深度方向の増幅によるものと考えられ、管渠取付け端部に大きな断面力をもたらした要因の一つと推定される。

3.3 地盤液化化による立坑の応答特性の変化

図-9 に液化化と非液化化地盤における立坑の応答加速度の経時変化の一例を示す。非液化化地盤では当然のことながら、立坑が入力地震波と似た揺れを示すのに対して、液化化地盤では、主要動以外の応答加速度がほとんど 0 に収束していることが分かる。したがって、液化化地盤では、地震応答よりも立坑周辺支持力の低減や浮上が支配的な問題であると考えられる。

4. まとめ

地中構造物変化部の地震時挙動および耐震方策の検討を目的とした 3 次元モデルによる動的遠心模型実験を例示して、合理的な耐震施策を検討する際の動的遠心模型実験の有効性を示すとともに、地盤と構造物の動的相互作用問題に関するモデル化と模型製作を含む実験上の工夫について報告した。本実験から得た知見をまとめると以下のとおりになる。

- (1) 地中構造物変化部に対する耐震対策として、柔構造化による効果を明示できたのに対して、周辺地盤改良補強は、構造物変化部以外の構造部位に対する耐震対策が必要となる。
- (2) 剛な立坑構造物の地震時挙動はロッキング現象に近い。
- (3) 周辺地盤に液化化を生じると地震応答よりも立坑周辺地盤の支持力や浮力が支配的な問題となる。

今後の課題として、既設施設に対する施工性にも配慮した耐震補強策法の確立が急務であり、そのための動的遠心載荷模型実験の有効な活用法を多めに図っていくべきと考える。

田中 弘*

李 黎明**



日本工営株式会社中央研究所総合技術開発部長
Hiroshi TANAKA

同 総合技術開発部地盤・材料グループリーダー、工博
Dr. Liming LI