

# 慣性力と断層変位を同時に作用させた 鋼製ラーメン模型の挙動の再現解析

小野寺 周<sup>1</sup>・坂井 公俊<sup>2</sup>・豊岡 亮洋<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 修（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター  
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

<sup>2</sup>正会員 博（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター  
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

<sup>3</sup>正会員 博（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター  
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

## 1. はじめに

内陸活断層による地震では、強震動による慣性力の影響だけでなく、地表に現れる断層変位の影響によって構造物が躯体損傷や落橋等の甚大な被害を受ける場合がある。また、これらが同時に構造物に作用したことが損傷要因と推察される被害事例も報告されている<sup>1)3)</sup>。こうした被害を鑑みると、耐震設計上は第一に断層変位の影響を極力小さくするよう構造計画の段階から配慮することが望ましい<sup>4)</sup>が、仮にその影響を避けられない場合、慣性力と断層変位の両者の影響を考慮して地震応答値を算定し、必要に応じて対策を講じることが重要である。

著者らは、慣性力と断層変位の影響を同時に考慮した解析手法により、横ずれ断層を跨ぐ鉄道高架橋の地震時挙動を評価している<sup>5)</sup>。その結果、両者が同時に作用した場合、それらが個別に作用した場合よりも応答が増大し、部材の損傷がより進展する可能性があることを明らかにしている。ただし、この解析手法によって実験や実被害等の実現象は再現しておらず、今後解析的な検討を深度化させるためには解析手法の妥当性を検証する必要がある。

ここで、著者らは鋼製ラーメン模型に対して慣性力と断層変位を同時に作用させた振動台実験を実施している<sup>6)</sup>。その結果、振動台加振による慣性力とジャッキ载荷による強制変位が同時に作用した場合、両者が個別に作用した場合よりも模型応答が増大することを確認している。これは既往の解析的検討<sup>5)</sup>で得られた傾向と同様である。

以上を踏まえ本検討では、既往の振動台実験<sup>6)</sup>を対象として、慣性力と断層変位の影響を同時に考慮した解析手法の妥当性を検証することを目的とした再現解析を実施した。

## 2. 慣性力と断層変位の影響を同時に考慮可能な解析手法の概要

著者らは、慣性力と断層変位の影響を同時に考慮するために、ラージマスを用いた多点同時入力による解析手法を用いている<sup>5)</sup>。図-1には構造物と地盤

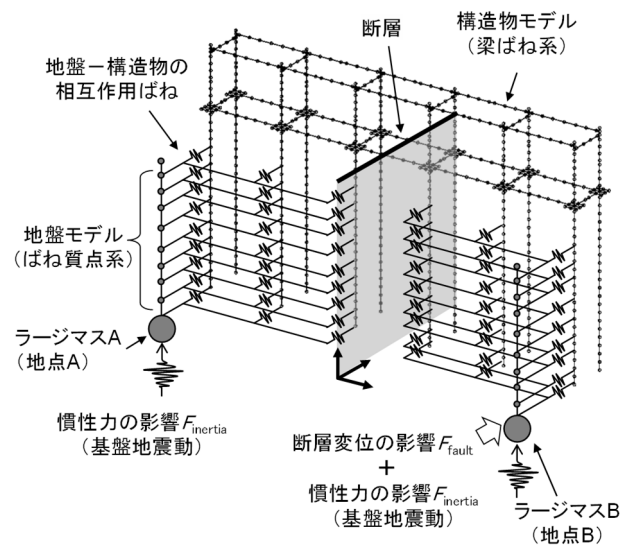


図-1 解析手法の概要

を一体でモデル化した場合における解析手法の概要を示す。

断層を跨ぐ2地点(地点A, 地点B)間で異なる地盤挙動を示すと仮定し, 各地点の基盤をラージマス A, B によってモデル化する. ラージマスはその上に存在する表層地盤や構造物の影響を受けないよう, それらの質量に対して10<sup>9</sup>倍程度の大質量  $M$  を設定する. ラージマス上に地点ごとの表層地盤モデルを構築するとともに, ラージマスを跨ぐように構造物モデルを構築し, 各地点で地盤と構造物を相互作用ばねにより接続する.

ラージマスに節点力  $F$  を入力した場合, ラージマスは運動方程式  $Ma=F$  により加速度  $a$  で応答する. これが基盤位置での地震作用となる. よって, 慣性力の影響として基盤地震動を考慮し, 断層変位の影響は地点Aに対する地点Bの相対変位とみなすと, 両者の影響はそれぞれ次式(1), (2)に示す節点力  $F_{inertia}$ ,  $F_{fault}$  によって考慮することができる.

$$F_{inertia} = M \cdot a_{inertia} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{fault} = M \cdot \frac{d^2}{dt^2} D(t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに,  $a_{inertia}$ : 基盤地震動,  $D$ : 地点Aに対する地点Bの相対変位である.

以上より, ラージマスAに対して  $F_{inertia}$ , ラージマスBに  $F_{inertia} + F_{fault}$  となる節点力を同時に入力することで, 慣性力と断層変位の影響を同時に考慮した解析が可能となる.

なお, 図-1に示す相互作用ばねに関しては, 通常の耐震設計で用いられる非線形特性<sup>7)</sup>を設定することで, 断層変位を受ける地盤-構造物の相互作用を考慮できることを確認している<sup>8)</sup>. ただし, 3章で述べる振動台実験では地盤-構造物の相互作用を考慮しないモデルとしているため, 再現解析でも相互作用ばねはモデル化していない.

### 3. 慣性力と断層変位を同時に作用させた振動台実験の概要<sup>6)</sup>

著者らは柱と梁からなる鋼製ラーメン模型を製作し, 振動台による正弦波加振中に, 模型の片側だけに油圧ジャッキによる強制変位を載荷する実験を実施している<sup>6)</sup>. ここでは既往実験の概要について述べる.

模型の諸元を図-2, 表-1に示す. また, 実験時の構成を図-3に示す. 模型は加振方向に1径間, 加振

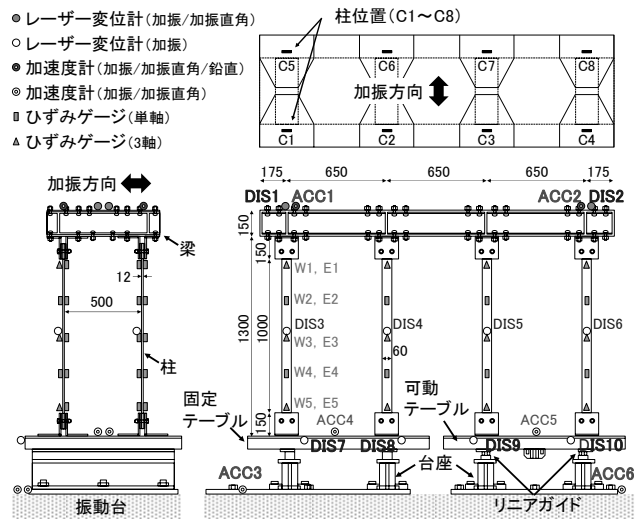


図-2 鋼製ラーメン模型の概要 (単位: mm)

表-1 柱の諸元

断面寸法 (mm)	12×60
部材長 (mm)	1000
上載荷重 (kg)	1本あたり 81.3
使用鋼材	SM490
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	384
降伏ひずみ (μ)	1829

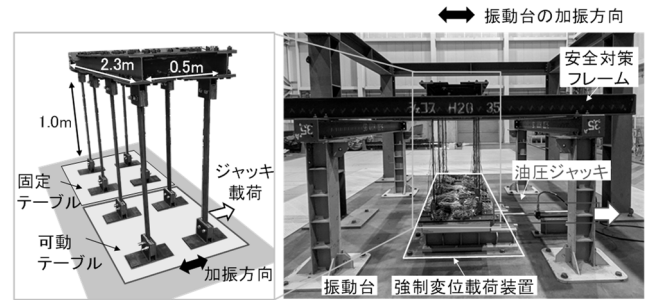


図-3 実験の構成

表-2 実験ケースと加振条件

ケース	加振条件
Case1	振動台加振のみ
Case2	ジャッキ載荷のみ
Case3	振動台加振中にジャッキ載荷

直角方向に3径間のラーメン構造である. 図-3に示すように, 振動台上に固定・可動テーブルと油圧ジャッキから構成される強制変位載荷装置を設置し, 模型中心で両テーブルを跨ぐように模型を設置している. 油圧ジャッキによって可動テーブルのみに強制変位を作用させることができる.

実験ケースを表-2に示す. 振動台加振のみ行うCase1, ジャッキ載荷のみ行うCase2, 振動台加振中にジャッキ載荷を行うCase3の3ケースを実施している. 各ケースの詳細は文献6)に譲るが, Case3の一

例として、試番3-2（振動台加速度203gal＋強制変位62mm）における振動台の加速度波形および固定・可動テーブルの変位波形を図-4に示す。また、このときの模型天端における加速度波形を図-5に示す。図-5には振動台加速度が同じCase1，強制変位量が同じCase2の応答を合わせて示している。図-5より、Case3ではCase1より応答加速度が2.5倍程度増加し、Case1，Case2の応答値の単純な重ね合わせよりも大きな応答を示している。この要因については、図-6に示す加振前後の振動台～模型天端のフーリエ振幅比から読み取れるように、強制変位による模型の大変形に伴って加振方向に対する見かけの剛性が変化し、模型の振動数と加振振動数（2.6Hz）が加振中に近づいて共振が励起されたためと考えられる。同様の傾向はCase3の他の試番でも確認された。

本検討では、図-4～図-6に示した試番3-2を対象として、実験の再現解析を行うこととする。

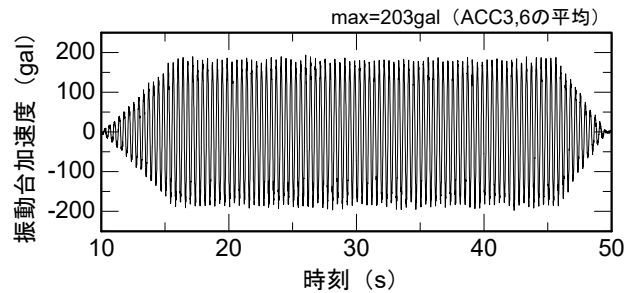
#### 4. 再現解析

##### (1) 解析モデル

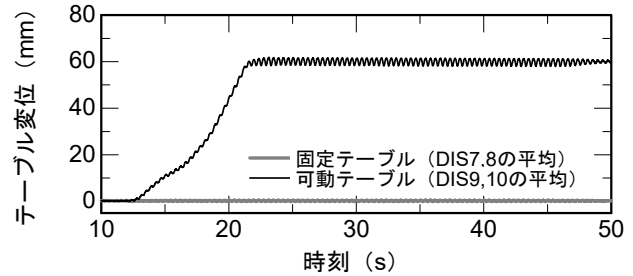
鋼製ラーメン模型および固定・可動テーブルからなるフレームモデルを構築した。モデル図を図-7に示す。柱直上の節点には表-1に示す上載荷重に相当する集中荷重を設定した。また、2章で述べた解析手法を用いて慣性力と断層変位を同時に作用させるために、各テーブルを模型に対して $10^9$ 倍程度の質量を持つラージマスA（固定テーブル）、ラージマスB（可動テーブル）でそれぞれモデル化した。

ここで、試番3-2では柱の最大ひずみは降伏ひずみを若干超過した程度であったため、柱および梁はすべて線形でモデル化した。梁部材は実験と同様に変形が生じないように、柱に対して十分剛な梁要素でモデル化した。柱部材は実験で得られた振動特性に基づき、初期の曲げ剛性 $K_M$ 、軸剛性 $K_A$ 、ねじれ剛性 $K_t$ をそれぞれ設定した。以下に各剛性の設定方法を示す。

柱の曲げ剛性 $K_M$ について、Case3の加振前の状態における振動台～模型天端のフーリエ振幅比をもとに、実験と固有値解析から得られる固有振動数が一致するよう値を同定した。 $K_M$ の同定後の固有値解析結果として、1次および2次のモード形状を図-8に示す。図より、1次モードは模型天端が並進する形状であり、このときの固有振動数は2.23Hzである。図-6に示すフーリエ振幅比から得られた振動数は2.24Hzであり、解析と実験でほぼ一致している。また、2次モードとしてねじれ変形するモードが現れ



(a) 振動台の加速度波形



(b) 固定・可動テーブルの変位波形

図-4 加振条件 (Case3 試番3-2)

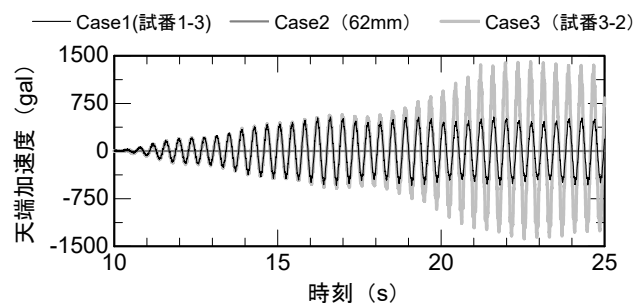


図-5 実験結果 (Case3 試番3-2)

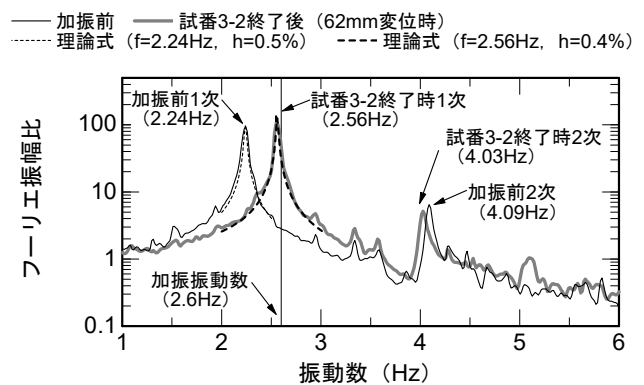


図-6 フーリエ振幅比の変化 (Case3)

ており、このときの固有振動数は4.33Hzである。実験でも図-6に示すように、4.09Hzにピークが確認でき、これが2次モードに対応していると考えられる。

柱の軸剛性 $K_A$ について、模型が大変形した場合、図-9に示すように曲げ以外に部材軸方向の圧縮力および引張力も有意に生じるため、加振方向への見かけの剛性が変化する。そこで、大変形時の幾何剛性

を考慮するために、まず試番3-2終了後に得られた振動台～模型天端のフーリエ振幅比から固有振動数を算定した。続いて、解析モデルに対して、幾何学的非線形を考慮した上で、62mmの強制変位を载荷した状態で固有値解析を実施し、実験の固有振動数と概ね等しくなる軸剛性 $K_A$ を同定した。

同定後の固有値解析から得られた1次モードの固有振動数は2.47Hzであった。これに対し、実験での固有振動数は2.56Hzであり、両者は概ね一致する結果となった。なお、同定後の2次モードの固有振動数は4.34Hzであり、軸剛性の変化によるねじれモードへの影響は些少であった。図-6に示すフーリエ振幅比からも、4Hz付近の2次モードのピークは加振前後でほとんど変化していないことが確認できる。

柱のねじれ剛性 $K_J$ については、加振時の様子からねじれの影響は限定的であると考えられたため、柱の断面諸元をもとにSaint-Venantのねじり定数を用いて算定した。最終的に設定した柱の部材剛性に関するパラメータを表-3にまとめる。同定前の剛性は一般的なヤング率や断面寸法を用いて算定したものである。曲げ剛性 $K_M$ は同定前の1.14倍、軸剛性 $K_A$ は0.15倍することで加振前後の振動特性を再現することができた。

## (2) 解析条件

2章で述べた解析手法を用いることで、図-4に示す振動台での加速度波形および可動テーブルの変位波形を入力した再現解析を行う。固定テーブルのラージマスAには振動台加振を考慮するための節点力 $F_{inertia}$ 、可動テーブルのラージマスBには振動台加振とテーブル変位を考慮するための節点力 $F_{inertia}+F_{fault}$ を同時に入力する。ここで、 $F_{inertia}$ は振動台の加速度波形(図-4(a))に対して、 $F_{dis}$ は可動テーブルの変位波形(図-4(b))を2回微分した加速度波形に対して、それぞれラージマスの質量を掛けたものである。

入力条件の違いによる再現性を確認するために、表-4に示す3ケースを設定した。CaseAは振動台加振と強制変位を同時に作用させた条件で、実験と同条件である。CaseBは振動台加振のみ作用させた条件、CaseCは強制変位を作用させた後に振動台加振を作用させた条件である。

応答値算定には数値積分法としてNewmark $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )を用い、時間刻みは0.001秒とした。減衰マトリクスには、加振前のフーリエ振幅比より2.24Hzで減衰定数が0.5%となる剛性比例型減衰を設定した。また、大変形による時々刻々の見かけの剛性変化を考慮するために幾何学的非線形を設定した。

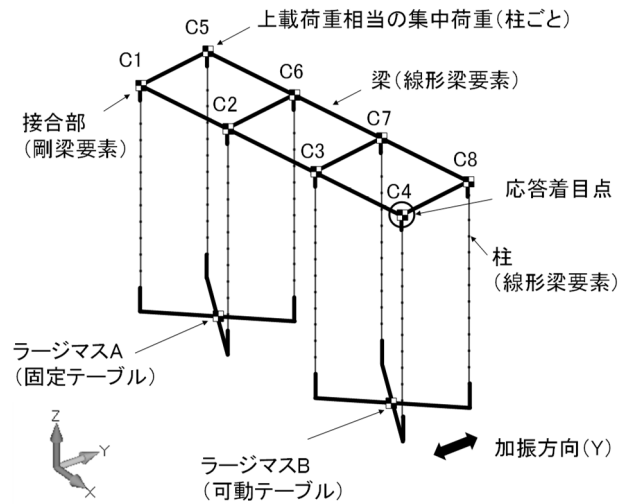
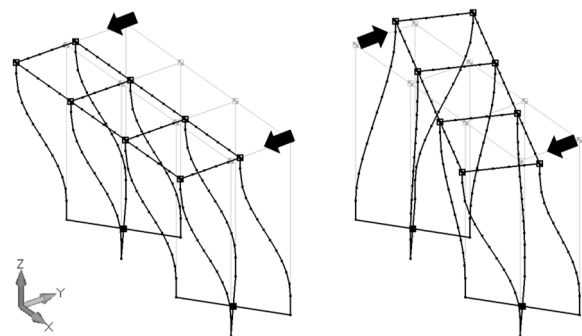
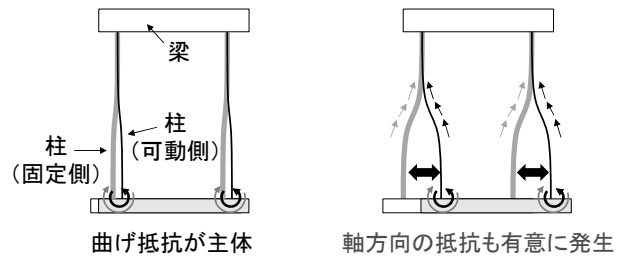


図-7 解析モデル



(a) 1次モード (2.23Hz) (b) 2次モード (4.33Hz)

図-8 固有値解析結果(曲げ剛性 $K_M$ の同定後)



(a) 強制変位が小さい場合 (b) 強制変位が大きい場合

図-9 大変形による抵抗特性の変化のイメージ<sup>6)</sup>

表-3 同定した柱の剛性

剛性	曲げ剛性 $K_M$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )	軸剛性 $K_A$ ( $\text{kN/m}$ )	ねじれ剛性 $K_J^*$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )
同定前	1.78	$1.68 \times 10^5$	2.72
同定後	2.02	$2.53 \times 10^4$	2.72
修正倍率	1.14	0.15	1.00

※ねじれ剛性 $K_J$ は実験結果による同定をしていない

## (3) 解析結果

解析結果として、図-7に示す応答着目点(C4柱直上の天端位置)における加速度波形を図-10に示し、変位波形を図-11に示す。図には実験結果を比較の

ため示している。

図-10(a)より、実験と同条件で振動台加振とテーブル変位を同時に作用させたCaseAでは、全時刻で実験結果と良好に応答が一致している。最大加速度は相対誤差5%の精度で再現することができた。一方、図-10(b)より、CaseBでは、テーブル変位が小さい15秒程度までは実験結果と整合するが、以降では実験での応答増幅を表現できていない。また、CaseCでは加振初期の応答を過大評価している。

図-11に示す応答変位についても同様に、CaseAでは全時刻で実験と良好に一致しており、最大変位は相対誤差8%で再現できている。一方、CaseB、CaseCでは実験結果を再現できなかった。

以上より、慣性力と断層変位の影響を同時に考慮可能な解析手法を用いることで、振動台実験における模型の動的な挙動を良好に再現可能であり、解析手法の妥当性を確認することができた。さらに、慣性力と断層変位を同時に考慮しない場合には実験結果を再現できなかったことから、両者の影響を受ける構造物の地震応答値を適切に算定するためには、それらを同時に考慮する必要があることが示唆された。

## 5. まとめ

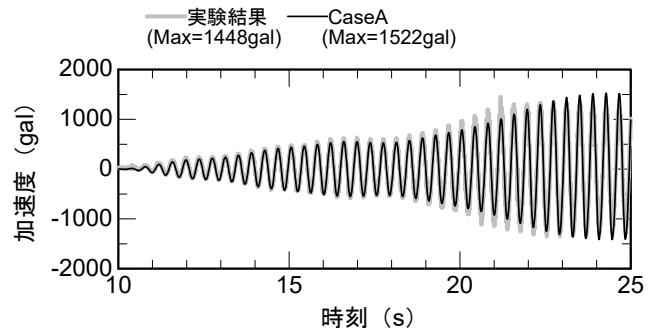
本検討では、著者らが既往検討<sup>5)</sup>で用いている慣性力と断層変位を同時に考慮した解析手法の妥当性を検証することを目的として、振動台加振中にジャッキによる強制変位を載荷した鋼製ラーメン模型の振動台実験<sup>6)</sup>の再現解析を実施した。以下に本検討で得られた知見を示す。

- (1) 実験結果に基づき、解析モデルにおける柱の剛性を同定した。その結果、加振前後の模型の固有振動数に整合するように曲げ剛性と軸剛性を同定することで、解析でも模型の大変形に伴う振動特性の変化を再現することができた。
- (2) 同定したモデルに対して、振動台の加速度波形とジャッキによるテーブルの変位波形を同時に入力した応答解析を実施した。その結果、模型天端の応答加速度および応答変位を全時刻において良好に再現することができた。一方、初期状態として変位を与えてから加速度波形を入力しても、模型の応答を再現することはできないことを確認した。

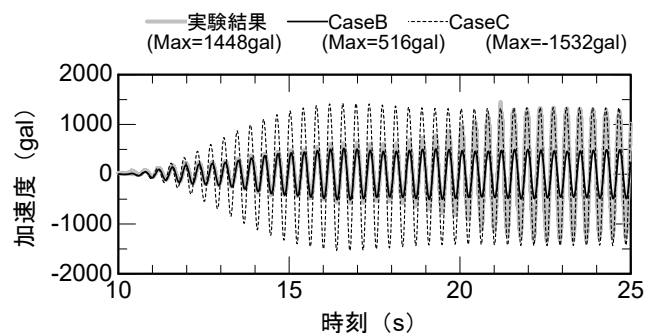
以上より、既往検討<sup>5)</sup>と同様の解析手法を用いることで、慣性力と断層変位の影響を考慮した地震応答値を適切に算定可能なことが確認できた。今後は

表-4 解析ケース

ケース	入力条件
CaseA	振動台加振とテーブル変位を同時に作用 (実験と同条件)
CaseB	振動台加振のみ
CaseC	テーブル変位の後に振動台加振

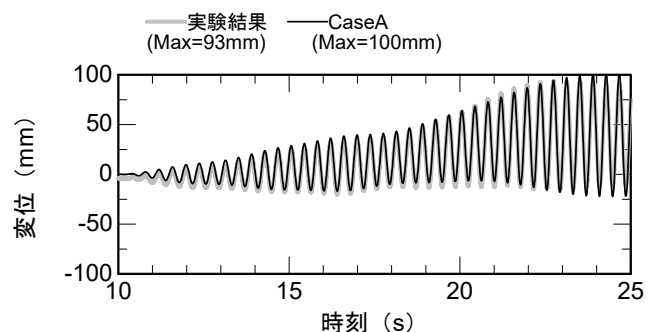


(a) 実験と CaseA の比較

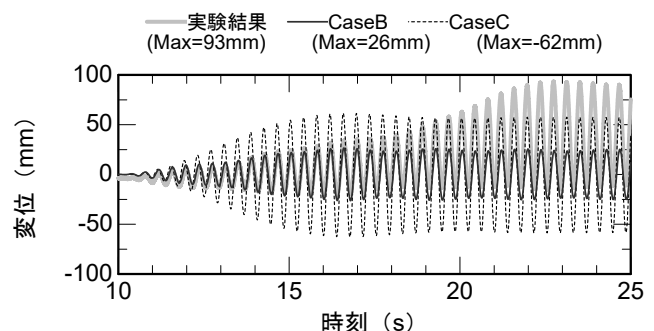


(b) 実験と CaseB, CaseC の比較

図-10 模型天端の応答加速度



(a) 実験と CaseA の比較



(b) 実験と CaseB, CaseC の比較

図-11 模型天端の応答変位

同様の手法を用いて、断層直上の鉄道構造物を対象とした地震時挙動を評価する予定である。

#### 参考文献

- 1) 川島一彦，庄司学，岩田秀治：1999年集集地震（台湾）における卑豊橋・烏溪橋の被害と被災メカニズム，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 433-440，1999.
- 2) 幸左賢二，山口栄輝，永瀬英生，廣岡明彦：台湾大地震によるRC橋脚被害調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 1，2000.
- 3) 小長井一男：地震・地盤災害のデータ・アーカイブス構築のために，砂防・地すべり技術センター機関紙SABO，Vol. 99，pp. 2-5，2009.
- 4) （公財）鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計，丸善，2012.
- 5) 小野寺周，坂井公俊，豊岡亮洋：横ずれ断層直上に位置する鉄道高架橋の地震時挙動に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 68A，pp. 182-191，2022.
- 6) 小野寺周，坂井公俊，豊岡亮洋：慣性力と断層変位を同時に作用させた振動台実験による鋼製ラーメン模型の挙動評価，第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，2022.（投稿中）
- 7) （公財）鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，基礎構造物，丸善，2012.
- 8) 小野寺周，坂井公俊，豊岡亮洋：断層変位を受ける地盤－構造物の相互作用解明のための解析的検討，第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 191-194，2021.