

# 地震動と地表断層変位の影響を同時に受ける 鋼製ラーメン模型の振動台実験と再現解析

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 (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)

E-mail: onodera.meguru.58@rtri.or.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 (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)

E-mail: sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 (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)

E-mail: toyooka.akihiro.58@rtri.or.jp

内陸活断層による地震では、強震動による慣性力とともに、地表に現れる断層変位が同時に構造物に作用する場合がある。しかしながら、慣性力と地表断層変位の影響を同時に受ける構造物の地震時挙動には未解明な部分が多い。そこで本検討では、鋼製のフレーム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、同時作用下における構造物の挙動を把握した。さらに、著者らがこれまで検討してきた慣性力と断層変位の影響を同時に考慮可能な構造物の地震時挙動評価手法を用いて、実験の再現解析を実施した。その結果、断層変位が構造物の動的応答に及ぼす影響は無視できない可能性があること、上述した解析手法によって慣性力と断層変位が同時に作用した構造物の地震応答値を適切に算定可能であることを明らかにした。

**Key Words:** *shaking table test, reproduction analysis, fault displacement, inertial force, frame model*

## 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（以降、断層変位）の影響によっても構造物が被害を受ける場合がある。1999年のトルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震では、断層変位による構造部材の損傷や落橋等の被害が発生した<sup>1)</sup>。さらに、慣性力と断層変位が一体的に影響したと推察される被害も報告されている<sup>2)</sup>。こうした被害の甚大さを鑑みると、構造物を設計する際は可能な限り断層変位の影響を避けることが望ましい。鉄道の設計標準<sup>3)</sup>では断層変位を地震随件事象と捉え、構造計画の段階からその影響を極力小さくするように配慮することを求めている。

しかしながら、鉄道は線状構造物であり、土地利用や列車走行性の観点から線形に制約がある。そのため建設地点において断層変位の影響を完全に避けることが困難

な場合も考えられる。このような構造物の地震対策を講じるためには、断層変位の影響を考慮した地震応答値の算定、性能の評価を行うことが必要となる。

断層変位に対する構造物の応答評価に関しては、その影響を静的な強制変位とみなして地盤や構造物に作用させる手法が一般に用いられている。橋りょうやダム、原子力施設等の多様な構造形式に対して解析的な検討<sup>例えば 5)</sup>が行われているほか、実験的に構造物の挙動や地盤との相互作用について検討した事例<sup>例えば 9),10)</sup>もある。さらに、鉄道分野では同様の静的解析手法を用いることで、断層変位の影響を受けにくい構造形式<sup>11)</sup>が提案されているほか、断層と交差する新幹線高架橋の性能照査事例<sup>12)</sup>、断層変位の影響を緩和する施工事例<sup>13)</sup>も報告されている。構造物の安全性をより向上させるためには、断層変位に対する応答評価手法を確立し、設計に実装していくことが重要である。

一方、前述した被害事例のように、断層直上の構造物

では断層変位だけではなく強震動による慣性力も一体的に作用する可能性がある。大塚ら<sup>14)</sup>は鋼斜張橋を対象として、地震記録から推定した断層変位波形を用いることで慣性力と断層変位の影響を同時に考慮した応答解析を行っている。その結果、どちらか一方の影響のみ考慮した静的解析では、両者の影響が含まれる動的解析と比較して応答を過小評価する傾向があることを明らかにしている。著者ら<sup>15)</sup>も断層を跨ぐ鉄道高架橋を対象として、2地点に異なる地震波を入力することで慣性力と断層変位の動的な影響を同時に考慮した挙動評価を行っている。その結果、両者が個別に作用した場合よりも応答が増大する可能性があることを示している。

これらの既往検討を踏まえ、慣性力と断層変位の影響が想定される場合には、それらの影響を適切に考慮して地震応答値を算定する必要がある。しかしながら、両者の影響を受ける構造物の地震時挙動は解析的な検討に限られており、未解明な部分が多い。両者の影響を考慮可能な応答評価手法を設計に実装していくためには、慣性力と断層変位を同時に受ける構造物の実挙動を適切に把握するとともに、解析的な検証を積み重ねることで、手法の高度化に向けた知見を蓄積していく必要がある。

以上の背景を踏まえ、本検討では慣性力と断層変位が同時に作用した構造物の挙動把握を目的とした振動台実験を行う。さらに、実験の再現解析を行うことで両者の影響を考慮した解析手法の妥当性について検討する。具体的には、2章および3章において、慣性力と横ずれ方向の断層変位を同時に作用させることが可能な装置を製作するとともに、鋼製のラーメン模型を対象とした振動台実験を実施することで両者の影響を受ける模型の挙動を把握する。さらに4章では、著者らが用いている慣性力と断層変位の影響を同時に考慮可能な解析手法<sup>15)</sup>を用いて振動台実験の再現を試みることで、解析手法の妥当性を確認する。

## 2. 振動台実験の条件

慣性力と断層変位を同時に受ける構造物の挙動を把握するために、振動台による加振中に断層変位を模擬したジャッキ载荷が可能な強制変位载荷装置、柱と梁からなる鋼製のラーメン模型をそれぞれ製作した。これらを振動台上に構築することで、加振による慣性力とジャッキ载荷による断層変位をラーメン模型に同時に作用させる実験を実施した。

### (1) 強制変位载荷装置の製作

大型振動台による加振中に断層変位を模擬したジャッキ载荷を行うために、振動方向への固定・可動条件が異

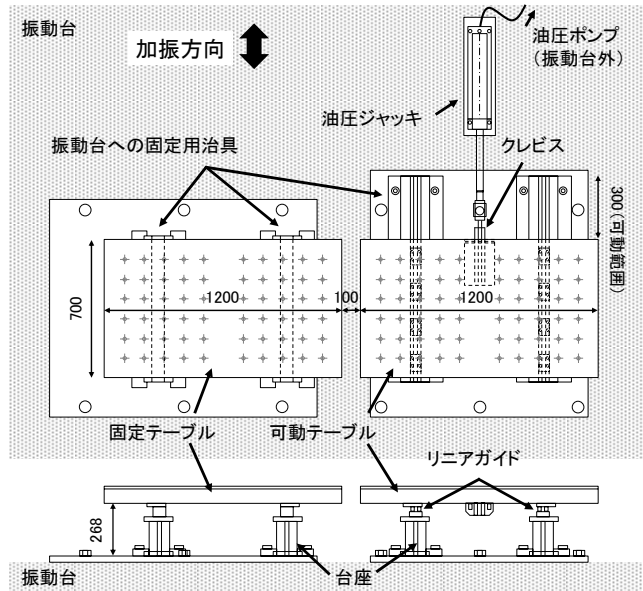


図-1 強制変位载荷装置の概要 (単位: mm)

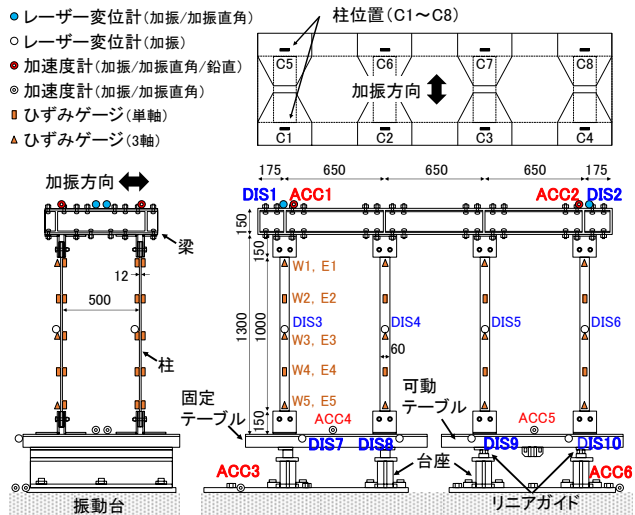


図-2 鋼製ラーメン模型および計測器の設置箇所 (単位: mm)

なる2つのテーブル(固定テーブル, 可動テーブル)と油圧ジャッキを組み合わせた強制変位载荷装置を製作した。装置を図-1に示す。可動テーブルの台座にはストローク長さが300mmのリニアガイドを取り付け、可動テーブルが加振方向に変位可能となっている。一方、固定テーブルと台座はボルト結合して変位を拘束している。油圧ジャッキはクレビスを介して可動テーブルと接続して振動台上に固定した。振動台外の油圧ポンプを操作することで、加振中に可動テーブルに強制変位を与えることができる。

### (2) 実験に用いるラーメン模型の概要

柱と梁部材からなる鋼製のラーメン模型を設計・製作した。設計に際して、主に柱部分が変形すること、柱は座屈せずに曲げ変形すること、一般的な鉄道構造物と同

程度の固有周期を有することを基本条件とした。また、振動台や油圧ジャッキの性能を踏まえ、模型の損傷が十分進展するまで載荷可能な諸元を検討した。

決定した模型の諸元ならびに計測器の設置箇所の概要を図-2および表-1に示す。表中の降伏ひずみ(1829 $\mu$ )はミルシートから得られた値である。これをもとに、事前解析により柱基部が降伏ひずみに達するときの水平震度および強制変位量を算定した。部材断面力は設計標準<sup>16)</sup>を参考に算定している。その結果、曲げのみを受けると仮定した場合、照査限界(曲げ降伏)に達するときの水平震度は1.16、強制変位量は145mmであった。また、実験前に実施したホワイトノイズ加振から得られた模型の固有振動数は、後述する全ケース(Case1~Case3)で約2.2Hz(0.45秒)となった。

製作した模型は加振直角方向の中心位置で固定・可動テーブルを跨ぐように設置し、柱上端と梁、柱基部と強制変位載荷装置をそれぞれアンクル材を介してボルト結合した。実験時の強制変位載荷装置および模型の構成を図-3に示す。なお、柱はすべて(3)で後述する実験ケースごとに交換することとした。

### (3) 実験ケースおよび加振条件

作用条件の違いによる模型挙動の変化を把握するために、表-2に示す3つの実験ケース(Case1~Case3)を設定した。Case1は慣性力の作用のみ、Case2は断層変位の作用のみ、Case3は慣性力と断層変位の作用を模擬した実験ケースである。具体的な加振条件を以下に示す。

#### a) Case1(慣性力のみ作用)

慣性力のみ作用する条件(Case1)として、可動テーブルの変位を治具で拘束した状態で振動台による正弦波加振を行った。表-3に示す試番のように、振動台の最大加速度を試番ごとに漸増させた。加振振動数について、模型の減衰が小さいことが想定されたため、模型の振動数(2.2Hz)との共振を避けるために2.6Hzとした。この条件で小振幅による予備加振を行った結果、模型の加速度応答倍率は3倍程度となった。

加振条件の一例として、試番1-3における振動台の加速度波形を図-4に示す。模型の過渡応答を抑制するために、加振最初の10波分および最後の5波分にはテーパを設けた。また、振動台の性能上、最大加速度と加振時間にはトレードオフの関係があるため、最大加速度が大きい試番では加振時間を短くした。なお、実験前と各試番の終了時には模型の振動特性を把握するため、微小振幅のホワイトノイズ加振を実施した。

#### b) Case2(断層変位のみ作用)

断層変位のみ作用する条件(Case2)として、油圧ジャッキによって可動テーブルに強制変位を与えた。ジャッキの載荷速度は模型に有意な振動が生じないように十分

表-1 柱の諸元

断面寸法 (mm)	12×60
部材長 (mm)	1000
上載質量 (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 ( $\mu$ )	1829

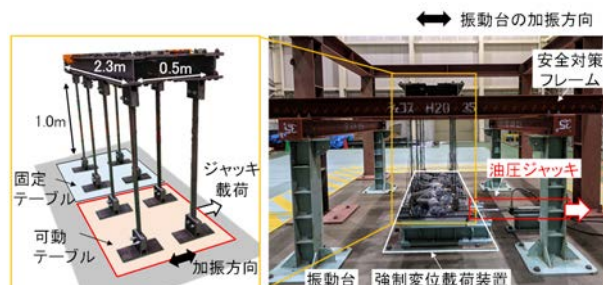


図-3 実験の構成

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

表-3 Case1, Case3の試番

Case1 試番	Case3 試番	振動数 (Hz)	最大 加速度 (gal)	加振時間 (s)	Case3 強制変位 (mm)
1-1	—	2.6	63	50	—
1-2	3-2	2.6	133	50	50
1-3	3-3	2.6	203	50	62
1-4	3-4	2.6	274	50	76
1-5	3-5	2.6	365	50	103
1-6	—	2.6	411	50	—
1-7	3-7	2.6	452	30	128
1-8	—	2.6	502	30	—
1-9	3-9	2.6	554	30	157
1-10	—	2.6	603	25	—
1-11	3-11	2.6	663	20	122
1-12	3-12	2.6	772	20	213
1-13	3-13	2.6	893	20	232

※各試番の後にホワイトノイズ加振を実施

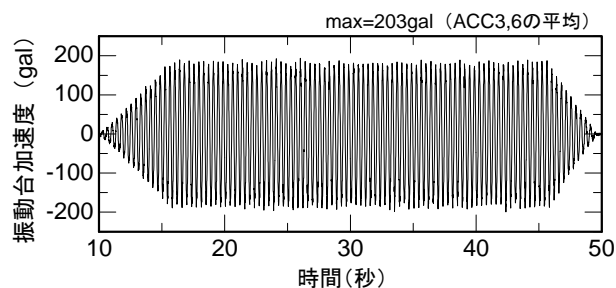


図-4 振動台の加速度波形(試番1-3)

低速 (1mm/s 程度) とし, 柱の変形が十分に進展するまで断続的に荷重した. 最終的に可動テーブルのストローク限界付近である 260mm まで荷重した. 実験前と 260mm の荷重直後には微小振幅のホワイトノイズ加振を行った.

#### c) Case3 (慣性力と断層変位を同時に作用)

慣性力と断層変位が同時に作用する条件 (Case3) として, Case1 と同一の入力波形を用いて振動台加振し, 同時に油圧ジャッキによる強制変位を与えた. Case3 の試番および強制変位量もまとめて表-3 に示している. 強制変位量は Case2 の実験結果から, 柱基部のひずみが Case1 での応答と概ね同程度となったときの値を設定した. 油圧ジャッキは加振開始と同時に荷重を開始し, 荷重速度は模型が定常応答を示す時間内に所定の変位量に到達するよう調整した. また, 各試番の加振後は可動テーブルの変位を維持した状態で微小振幅のホワイトノイズ加振を行った. その後の試番は可動テーブルを初期位置 (0mm) に戻し, 柱は交換せずに加振した.

加振条件の一例として, 試番 3-3 における固定・可動テーブルの変位波形を図-5 に示す. 振動台の加速度波形は図-4 (Case1 の試番 1-3) と同一である. 図-5 より, 可動テーブルのみが加振中に 62mm の変位を生じていることが確認できる. このときの可動テーブルの平均速度は 7mm/s 程度であった. なお, 模型の揺り戻しによって油圧ジャッキが伸縮したことで, 可動テーブルの変位波形には多少の周期的な振動も見られる. ただし, 各テーブルと振動台の加速度波形から算定した加速度応答スペクトルを図-6 に示すが, 加振振動数付近ではいずれの応答加速度も概ね等しく, ジャッキ伸縮が模型の応答に及ぼす影響は些少と判断できる.

#### (4) 計測条件

模型挙動を把握するために, 固定・可動テーブルおよび模型にレーザー変位計と加速度計を設置した. 変位計は模型天端位置 (図-2 の DIS1, DIS2) では加振方向・加振直角方向の 2 方向, テーブルおよび柱中央 (DIS3~DIS10) では加振方向のみ計測した. 変位計の計測値はすべて振動台に対する相対変位である. 加速度計は模型天端位置 (ACC1~ACC2) では鉛直を含む 3 方向, その他 (ACC3~ACC6) では鉛直以外の 2 方向を計測した. また, 柱の損傷状態を把握するために, 単軸もしくは 3 軸のひずみゲージを各柱の両面に 5 箇所ずつ貼付した. Case1~Case3 で計測条件は同一とした. 計測機器の設置箇所および名称は図-2 に併記している.

サンプリング周波数は振動台加振を行う Case1 と Case3 では 1000Hz, ジャッキ荷重のみ行う Case2 では 100Hz とした. なお, Case1, Case3 では計測開始から 10 秒後に加振を開始したため, 以降で応答波形を示す場合は 10 秒

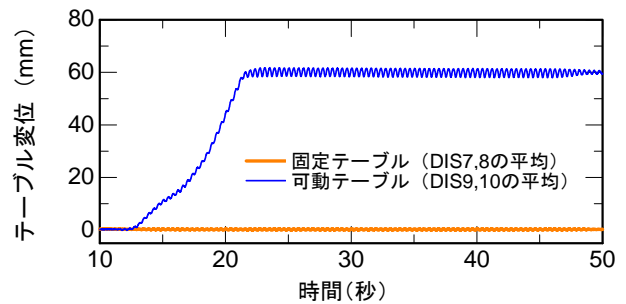


図-5 固定・可動テーブルの変位波形 (試番 3-3)

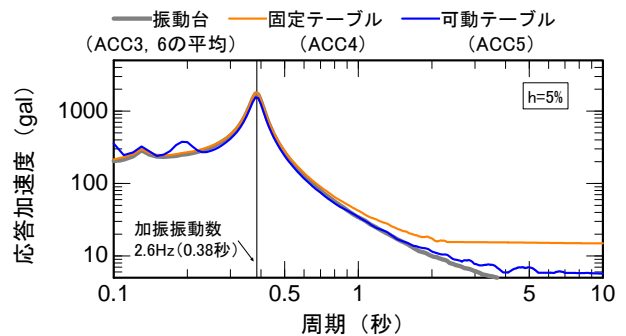


図-6 テーブルの加速度応答スペクトル (試番 3-3)

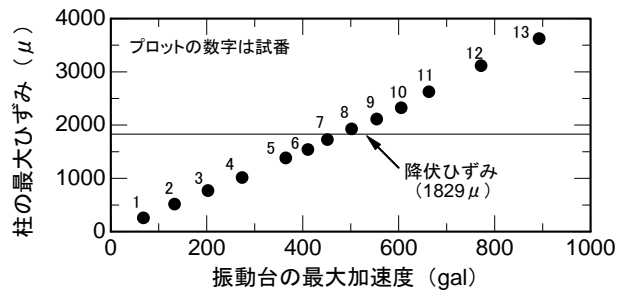


図-7 振動台加速度と柱の最大ひずみの関係 (Case1)

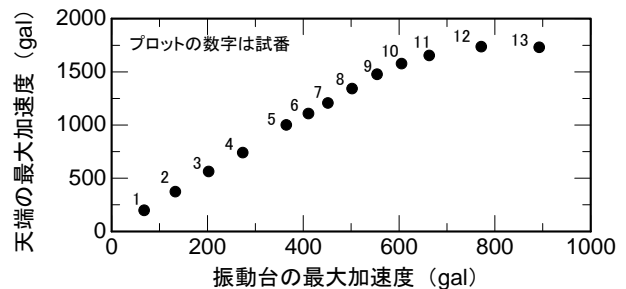


図-8 振動台加速度と天端の最大加速度の関係 (Case1)

以降の応答を示している.

### 3. 振動台実験の結果

#### (1) Case1 (慣性力のみ作用)

各試番における振動台の最大加速度と柱基部の最大ひずみ, 模型天端の最大加速度の関係を図-7, 図-8 に示す. 柱基部の最大ひずみは図-2 に示す柱両面に貼付したひずみゲージ (W5, E5) を用いて算定し, 振動台の最大加

速度は ACC3, ACC6 の平均を用いて算定した。なお、模型を一樣に加振するため、当然ながら各柱でのひずみの最大値は同程度である。

図-7より、試番1-8（振動台の最大加速度502gal）において柱は降伏ひずみを超過する応答を示した。このときの模型天端の最大加速度は図-8より1389galであり、事前の照査結果（降伏震度1.16）と概ね整合する結果となっている。試番1-9以降は模型天端の最大加速度が頭打ちになる傾向が確認できる。これは、柱の降伏により模型が長周期化することで、加振振動数（2.6Hz）との乖離が大きくなり共振しにくくなったためと考えられる。全試番での最大ひずみは3624 $\mu$ であり、降伏ひずみ（1829 $\mu$ ）との比から得られる塑性率は2.0程度であった。

柱の降伏前後における模型挙動の変化を把握するために、試番1-3、初降伏時の試番1-8、最終試番1-13における模型天端の加速度—柱のひずみ関係を図-9に示す。図より、試番1-8まではほぼ線形状態であることが確認できる。試番1-13では降伏ひずみを超過した領域から傾きが多少低下しており、塑性化による部材剛性の低下が見て取れる。

続いて、模型の振動特性の変化を把握する。そこで、実験前、試番1-8後、最終試番1-13後のホワイトノイズ加振から得られた振動台の加速度と模型天端の応答加速度のフーリエ振幅比のスペクトル（以下、フーリエ振幅比）を図-10に示す。得られたフーリエ振幅比に対して、ピーク付近（1.0Hz～3.0Hz）でのカーブフィッティングによって模型の固有振動数および減衰定数を同定した。その結果、実験前では振動数が2.23Hz、減衰定数は0.5%であった。一方、最終試番1-13後でも振動数は2.22Hz、減衰定数は0.5%であり、微小加振時の振動特性はほとんど変化しなかった。

以上より、鋼製ラーメン模型に慣性力のみが作用した場合、いずれの柱も概ね同程度の応答を示し、振動台の最大加速度が500gal程度で柱基部が降伏すること、加振のみでは振動特性はほとんど変化しないことを確認した。

## (2) Case2（断層変位のみ作用）

油圧ジャッキによる可動テーブルの変位と模型天端の応答変位との関係を図-11に示す。応答変位は振動台からの相対変位である。可動テーブルの変位は図-2に示すDIS9, DIS10の平均としている。模型天端の応答変位は固定テーブル上のDIS1、可動テーブル上のDIS2をそれぞれ示している。なお、模型天端での加速度は载荷中はほとんど生じておらず、静的に载荷できていることを確認している。

図-11より、可動テーブル側の模型天端の方が固定テーブル側よりも応答変位が大きい。また、模型天端の変位は常に可動テーブルの変位よりも小さい。これは模型

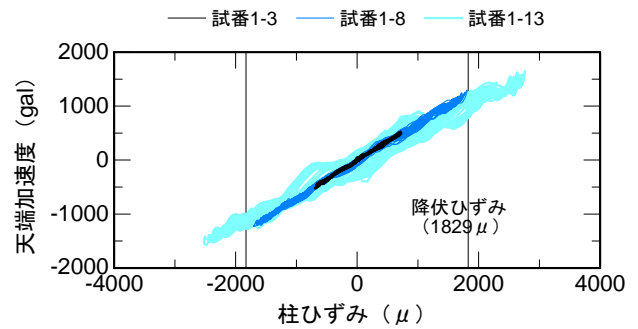


図-9 天端加速度—柱ひずみの関係 (Case1)

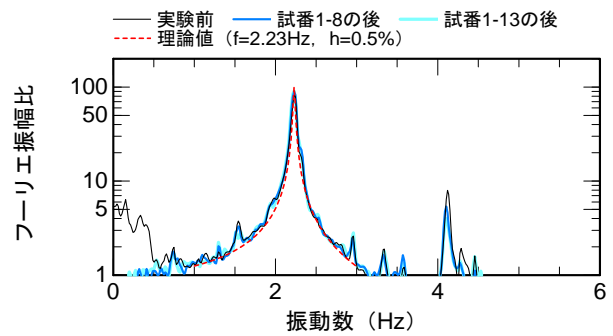


図-10 フーリエ振幅比の変化 (Case1)

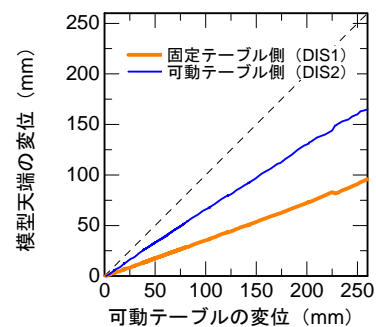


図-11 可動テーブル変位と天端変位の関係 (Case2)

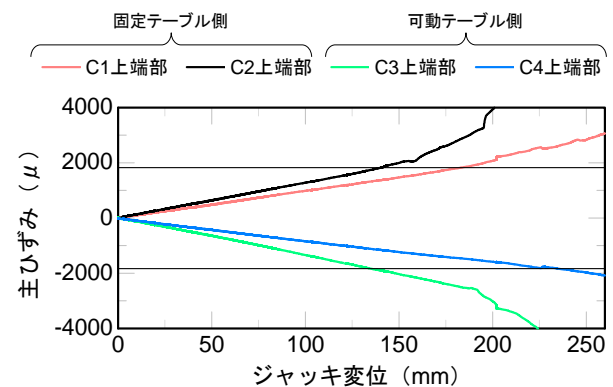


図-12 可動テーブル変位と柱ひずみの関係 (Case2)

が固定・可動テーブルを跨いでいることで、模型天端は両テーブルの間に位置するためである。

可動テーブルの変位と柱上端部のひずみの関係を図-12に示す。図にはC1～C4の応答のみ示すが、C5～C8も同列の柱とほぼ同程度の応答となっている。図より、端部柱のC1とC4、中間柱のC2とC3はそれぞれ正負対称的な応答を示している。また、中間柱（C2, C3）の方

が端部柱 (C1, C4) よりもひずみは大きい. その結果, C2 と C3 がほぼ同じタイミングで先行して降伏ひずみに達する. このときの強制変位量は 137mm であり, 事前の照査結果 (145mm) と概ね等しい.

図-11 に示した固定・可動テーブルの応答変位の大小関係, 図-12 に示した列ごとの柱ひずみの大小関係に関して, 図-13 に示す模型の平面形状の概略図から考察する. 図より, 模型天端が並進しながら平面的に反時計回りに回転することで, 可動テーブル側の天端変位が固定テーブル側より大きく, かつ中間柱の変形が端部柱より大きくなることを説明できる.

また, 回転挙動によって柱に生じるねじれの程度を把握するために, 3 軸ひずみゲージの計測値から主ひずみの方向を算出した. その結果, 図-14 に示すように, 主ひずみの方向は強制変位が 10mm 程度以降では概ね 0 度 (柱の軸方向) に漸近しており, ねじれの影響は限定的であることが分かった. 強制変位 10mm 程度までの領域で変動が大きい, これは模型部材をボルト結合する際のガタツキによる影響と考えられる.

強制変位による振動特性の変化を確認するために, 実験前と 260mm 載荷時のホワイトノイズ加振より得られた振動台と模型天端でのフーリエ振幅比を図-15 に示す. カーブフィッティングにより同定された実験前の模型の振動数は 2.25Hz, 減衰定数は 0.4% であり, Case1 とほぼ同等であった. 一方, 260mm 載荷時の振動数は 4.42Hz となり, 柱が塑性化しているにもかかわらず初期状態よりも 2 倍程度高い振動数となっている. 一方, 減衰定数は 0.6% であり初期状態と概ね同程度である.

模型の高振動数化の要因について, 柱の変形量に応じた部材の抵抗特性の概略図を図-16 に示す. 強制変位量が小さい場合, 柱の変形も小さく, 柱には曲げ抵抗のみが有意に生じる. 一方, 強制変位量大きい場合, 柱が大変形を生じるため, 曲げ抵抗だけでなく部材軸方向の抵抗も有意に生じる. その結果, 模型の加振方向における見かけの剛性が増加したことで, 高振動数にシフトしたと考えられる.

以上より, 断層変位を模擬した強制変位を鋼製ラーメン模型に作用させた場合, 模型は並進挙動と平面的な回転挙動を生じることが分かった. その結果, 中間柱において変形が相対的に大きくなり, 先行して降伏ひずみに達した. このときの強制変位量は 137mm であった. また, 模型の大変形によって水平方向の見かけの剛性が増加することで, 模型の振動数は高くなることが分かった.

### (3) Case3 (慣性力と断層変位を同時に作用)

#### a) 試番ごとの応答の比較

Case3 では Case1 と同じ条件で加振し, 同時に Case1 と同程度の柱ひずみが生じる強制変位を載荷した. 試番 3-

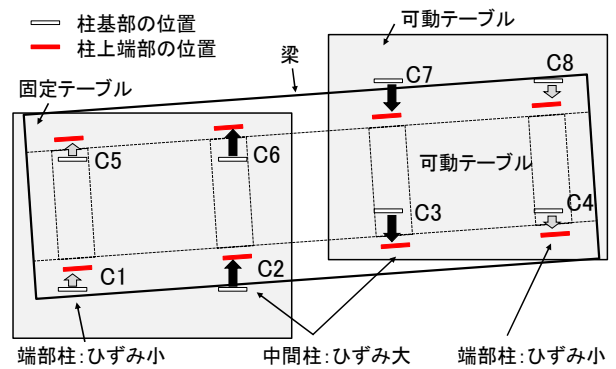


図-13 模型の平面形状とひずみの大小関係

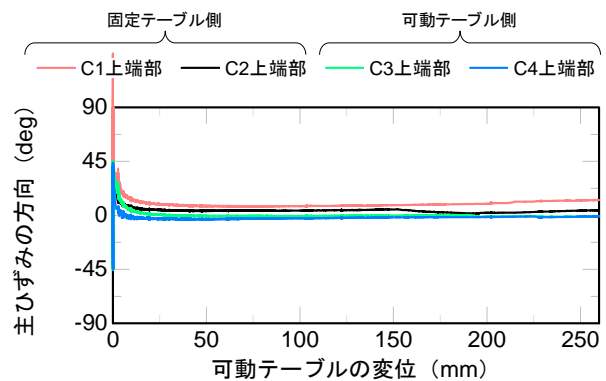


図-14 主ひずみの方向の履歴

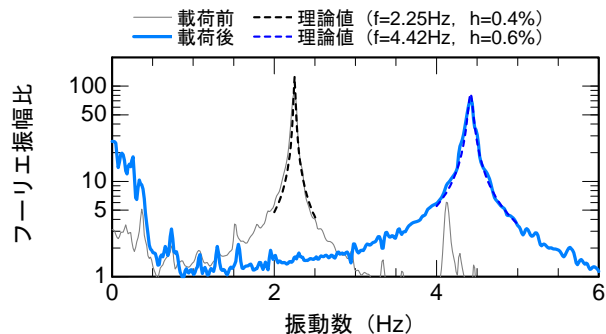


図-15 フーリエ振幅比の変化 (Case2)

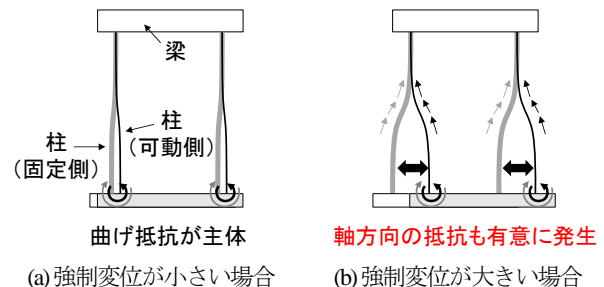


図-16 大変形による抵抗特性の変化のイメージ

3 (振動台の最大加速度 203gal+強制変位 62mm), 試番 3-7 (452gal+128mm), 試番 3-13 (893gal+232mm) における模型天端の加速度と柱ひずみの関係を図-17 に示す. 模型天端の加速度は図-2 の ACC1, 柱のひずみは Case2

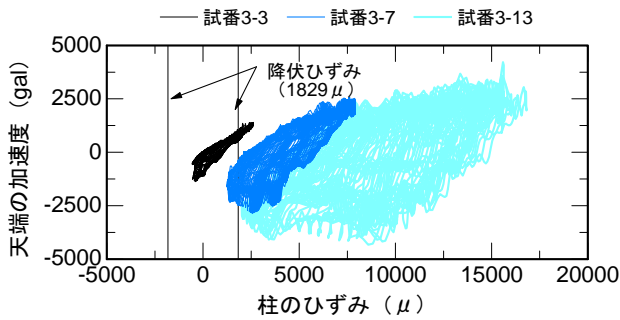


図-17 天端加速度—柱ひずみの関係 (Case3)

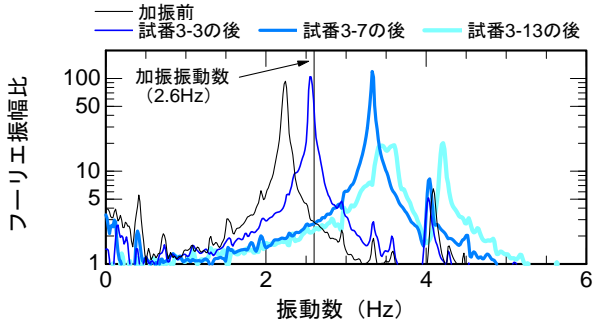


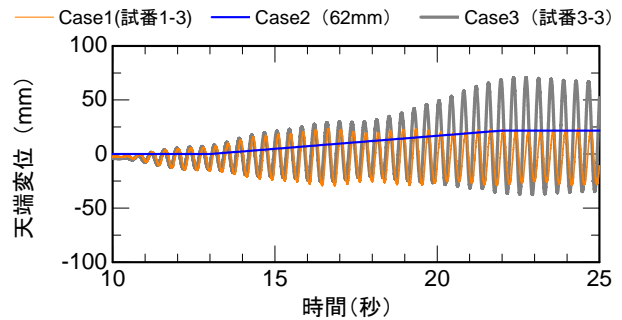
図-18 フーリエ振幅比の変化 (Case3)

で応答が大きかった中間柱 C2 の値を図示している。なお、試番 3-3 と同じ加振条件である Case1 の試番 1-3、Case2 の 62mm 載荷時では、それぞれ柱のひずみは降伏ひずみの 4 割程度の応答に留まっており、これらの応答値を単純に重ね合わせただけでは降伏ひずみには達しない条件となっている。

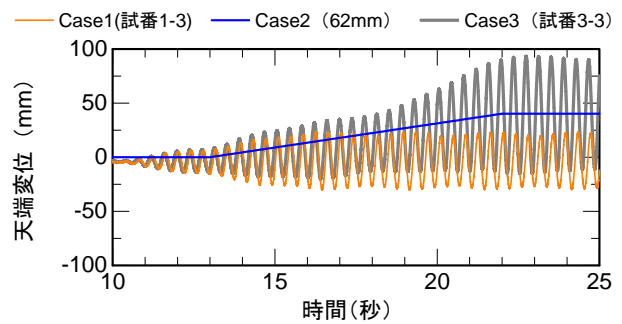
図-17 より、強制変位によって可動テーブルが一方方向に変位しているため、柱ひずみはいずれの試番でも正側に累積する非対称な応答を示している。さらに、試番 3-3 においても降伏ひずみ (1829 $\mu$ ) を超過しており、Case1 と Case2 の応答の重ね合わせが成り立っていないことが分かる。これについて、模型の動的な振動特性の変化に着目して考察する。図-18 には、各試番後のホワイトノイズ加振から得られた振動台～模型天端のフーリエ振幅比を示す。図より、強制変位の増加に伴って模型が高振動数化していることが確認できる。これは Case2 と同じ傾向であり、図-16 に示した大変形時の抵抗特性の変化によって説明できる。すなわち、強制変位によって模型の振動数が加振中に時々刻々と変化し、加振振動数 (2.6Hz) に漸近した結果、Case1 (慣性力のみ) と Case2 (断層変位のみ) の応答の重ね合わせ以上に動的応答が増大したと考えられる。

#### b) ケースごとの応答の比較

慣性力と断層変位が同時に作用した場合と、それぞれが個別に作用した場合の挙動の相違を把握するために、Case3 の応答に対し、これと同じ大きさの慣性力、強制変位がそれぞれ作用した Case1、Case2 の応答を比較する。ここではひずみレベルから部材が概ね線形とみなせる試



(a) 固定テーブル側



(b) 可動テーブル側

図-19 模型天端の変位波形の比較

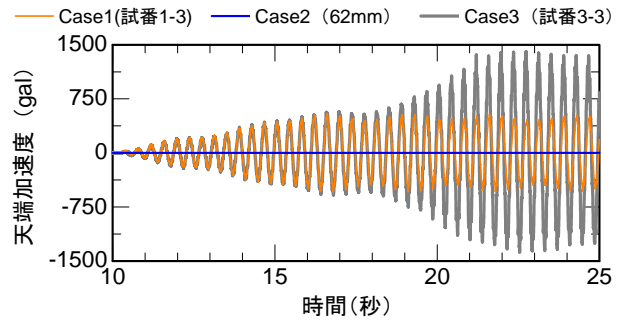


図-20 模型天端の加速度波形の比較

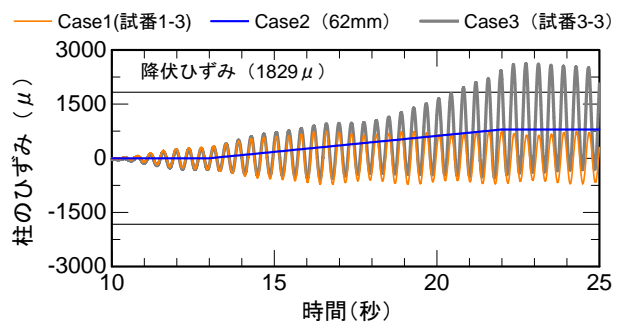


図-21 柱のひずみ波形の比較

番 3-3 (203gal+62mm) に着目して、Case1 の試番 1-3 (203gal)、Case2 の 62mm 載荷時の応答に着目する。試番 3-3 における振動台の加速度波形および可動テーブルの変位波形は図-4 および図-5 に示すとおりである。

各ケースにおける模型天端の変位波形、加速度波形、中間柱 (C2) の上端部のひずみ波形を図-19～図-21 に示す。なお、静的載荷をした Case2 については、便宜上

62mm 載荷時の応答値をもとに、Case3 のジャッキ載荷時間である 13 秒～22 秒の間を結ぶ直線で示している。図より、18 秒付近までは Case3 と Case1 は概ね同程度の応答を示している。18 秒以降は両ケースで乖離が大きくなり、Case3 の最大加速度は Case1 と比較して 2.5 倍程度、最大ひずみは 2.6 倍程度まで進展し、柱が降伏する応答を示した。結果として、Case3 では Case1、Case2 で柱が降伏した条件 (502gal, 137mm) の 0.5 倍以下の作用によって柱が降伏した。

以上より、鋼製ラーメン模型に慣性力と断層変位が同時に作用した場合、両者が個別に作用した場合とは挙動が異なることが分かった。具体的には、断層変位に伴う大変形によって加振方向の見かけの剛性が変化し、模型の振動数は高振動数側に時々刻々と変化した。その結果、動的な慣性力の作用下で加振振動数により近づくことで共振が励起され、慣性力のみを受ける場合よりも動的応答が増大した。

ここで、実験で用いた鋼製ラーメン模型の高さは 1.5m 程度であり、試番 3-13 における 232mm の強制変位は、高さ 10m の実構造物のスケールに換算すると 1.5m 程度の断層変位に相当する。この程度の大きな断層変位の作用が想定される場合には、大変形による水平方向の見かけの剛性変化が無視できない可能性があるため、その影響を適切に考慮して応答値を算定する必要があると言える。

#### 4. 振動台実験の再現解析

##### (1) 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、複数のラージマスを用いた多点入力による解析手法を用いている<sup>15)</sup>。ここではその概要について述べる。

図-22 には構造物と地盤を一体でモデル化した場合の解析イメージを示す。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十分大きな質量  $M$  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

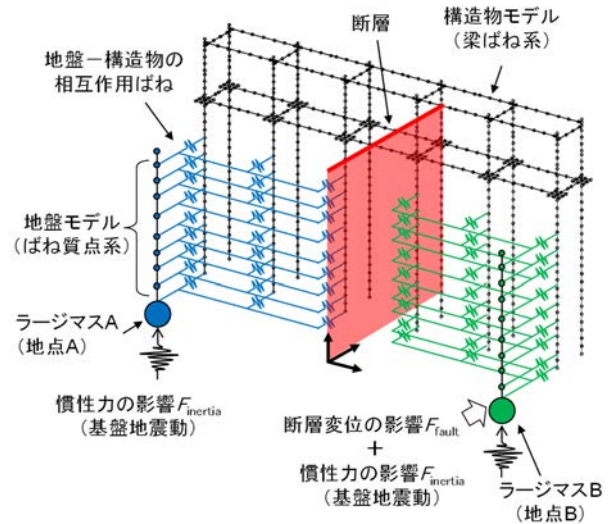


図-22 解析手法の概要

る地点 B の相対変位とみなした場合、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-22 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>17)</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解析的に確認している<sup>18)</sup>。ただし、2, 3 章の振動台実験では地盤-構造物の相互作用を考慮しない模型としているため、本章の再現解析でも相互作用ばねはモデル化しない。

##### (2) 解析対象および解析モデル

3 章で結果を示した試番 3-3 を対象として再現解析を実施する。そこで、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-23 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、(1)の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。

なお、試番 3-3 において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、柱および梁をすべて線形でモデル化した。梁部材は実験と同様に变形が生じないよう、柱に対して十分剛な梁要素とした。柱部材は実験で得られた振動特性に基づき、曲げ剛性  $K_M$ 、軸剛性  $K_A$ 、ねじれ剛性  $K_I$  をそれぞれ以下に示す方法で設定した。

曲げ剛性  $K_M$  について、Case3の実験前における振動台～模型天端のフーリエ振幅比をもとに、実験と固有値解析での固有振動数が一致するような値を同定した。

軸剛性  $K_A$  について、大変形時は図-16に示したように軸剛性が加振方向の見かけの剛性に及ぼす影響が無視できないため、大変形時の軸剛性を設定することとした。そこで、まず試番 3-3 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、可動テーブル側のラージマスAを62mm変位させ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。

ねじれ剛性  $K_I$  について、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。

同定した柱の部材剛性を表-4に示す。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。同定後の曲げ剛性  $K_M$  は同定前の1.14倍、軸剛性  $K_A$  は0.15倍となった。

同定したモデルに対する固有値解析の結果を表-5および図-24に示す。図には初期状態でのモード形状のみ示しているが、62mm変位した状態のモード形状もこれとほぼ変わらない。図-24より、1次は模型天端が並進するモード形状である。このときの固有振動数は初期状態で2.23Hz、62mm変位時で2.47Hzであり、実験で確認された高振動数化が良好に再現できている。また、2次はねじれ変形するモード形状であり、固有振動数は初期状態で4.33Hz、62mm変位時でも4.34Hzとなり模型の变形による変化はほぼ無い。実験でも図-18に示すように、4Hz付近のピークは加振前後でほとんど変化していないことから、ジャッキ载荷によるねじれ挙動への影響は些少と言える。以上より、加振前後の固有振動数が適切に表現されたモデルとなっていることが確認できた。

### (3) 解析条件

(1)で述べた解析手法を用いることで、試番 3-3 に対する再現解析を行う。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)に対して、 $F_{fault}$  は可動テーブルの変位波形(図-5)を2回微分した加速度波形に

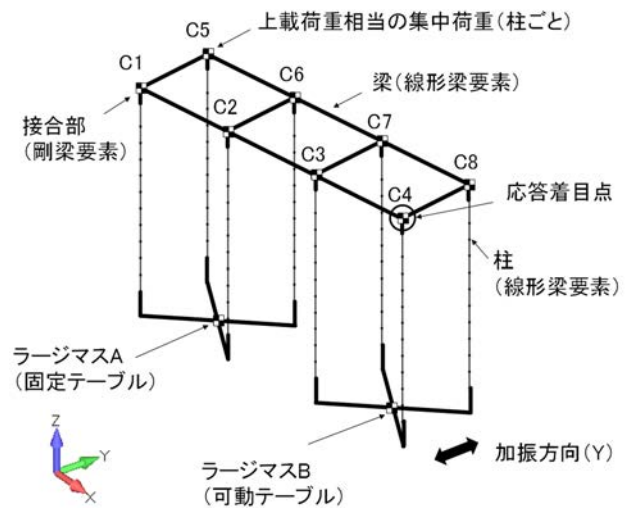


図-23 解析モデル

表-4 最終的に設定した柱の剛性

剛性	曲げ剛性 $K_M$ ( $kN \cdot m^2$ )	軸剛性 $K_A$ ( $kN/m$ )	ねじれ剛性 $K_I$ ( $kN \cdot m^2$ )
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

表-5 固有値解析結果

次数	固有振動数(Hz)		有効質量比				変形モード
	初期状態	62mm変位	初期状態		62mm変位		
			X	Y	X	Y	
1	2.23	2.47	0.000	1.000	0.000	0.999	加振方向
2	4.33	4.34	0.000	0.000	0.000	0.000	ねじれ
3	11.1	11.0	1.000	0.000	0.999	0.001	直角方向

X: 加振直角方向, Y: 加振方向

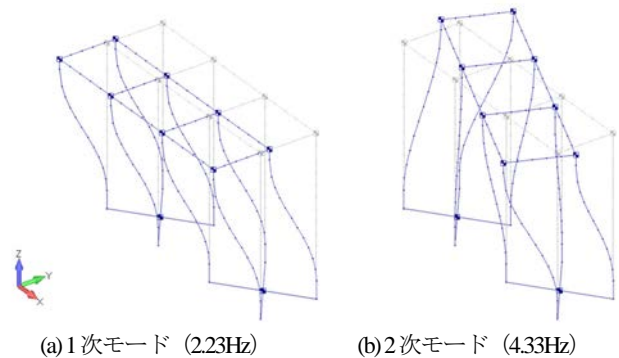


図-24 固有値解析結果 (初期状態)

表-6 解析ケース

ケース	入力条件
Case3-3a	振動台加振と強制変位を同時に作用 (実験と同条件)
Case3-3b	強制変位の後に振動台加振
Case1-3	振動台加振のみ

対して、それぞれラージマスの質量を掛けたものである。ここで、入力条件の違いによる再現性を確認するために、表-6に示す3ケースを設定した。Case3-3aは振動台

加振と強制変位を同時に作用させた条件で、実験と同一条件である。Case3-3b 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、Case1-3 は振動台加振のみ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 Newmak  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を用い、時間刻みは 0.001 秒とした。減衰は、実験前の模型の振動数である 2.24Hz で 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。

#### (4) 解析結果

解析結果として、図-23 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-25 に示し、変位波形を図-26 に示す。図には実験結果を比較のため示している。

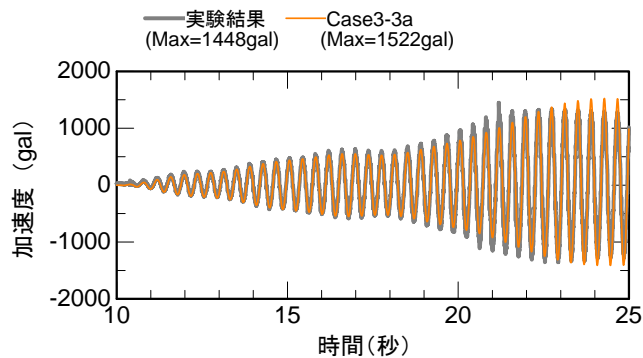
図-25(a)より、実験と同条件で振動台加振とテーブル変位を同時に作用させた Case3-3a では、全時刻で実験結果と良好に応答が一致している。最大加速度は相対誤差 5% の精度で再現することができた。一方、図-25(b)より、変位載荷後に加振した Case3-3b では、最大応答は実験結果と概ね整合するが、加振初期の応答を過大評価している。また、加振のみの Case1-3 では強制変位量が小さい 15 秒程度までは実験と整合するが、以降の応答増幅を表現できていない。

図-26 に示す応答変位についても同様に、Case3-3a 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、Case3-3b、Case1-3 では実験結果を再現できなかった。

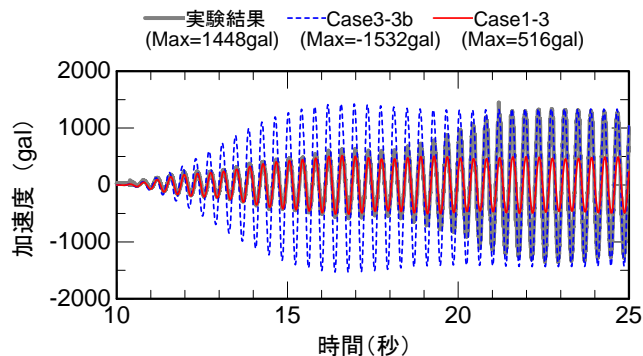
以上より、慣性力と断層変位の影響を同時に考慮可能な解析手法を用いることで、振動台実験における模型の動的な挙動を良好に再現可能であり、解析手法の妥当性を確認することができた。さらに、慣性力と断層変位を同時に考慮しない場合には実験結果を再現できないことが分かった。これは断層変位による模型の振動特性の動的な変化を考慮していないためであり、両者の影響を受ける構造物の動的な地震応答値を適切に算定するためには、それらを同時に考慮する必要がある可能性が示唆された。

#### 5. まとめ

慣性力と断層変位が同時に作用した構造物の挙動の解明を目的として、鋼製のラーメン模型に対して慣性力と横ずれ方向の断層変位を同時に作用させる振動台実験を実施した。さらに、著者らが既往検討<sup>15)</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を用いて振動台実験の再現解析を行い、手法の妥当性について検討し

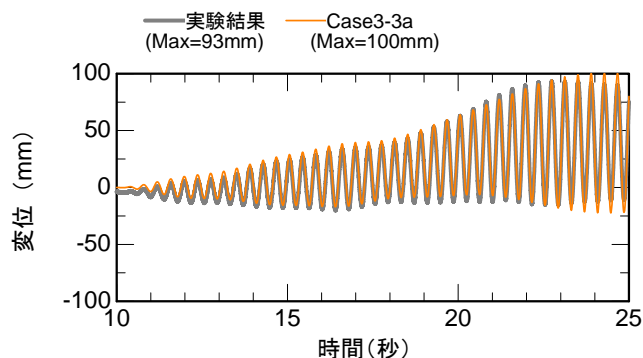


(a) 実験と Case3-3a の比較

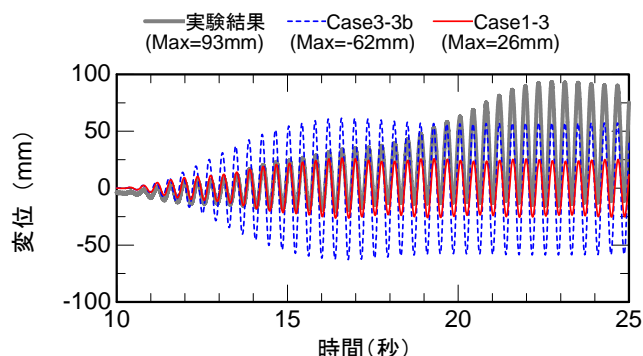


(b) 実験と Case3-3b, Case1-3 の比較

図-25 模型天端の応答加速度



(a) 実験と Case3-3a の比較



(b) 実験と Case3-3b, Case1-3 の比較

図-26 模型天端の応答変位

た。以下に本検討で得られた知見を示す。

- 1) 振動台実験において、鋼製ラーメン模型に断層変

位のみが作用した場合、模型は並進挙動と平面的な回転挙動を生じ、柱の位置によって基部に生じるひずみは異なることが分かった。また、柱部材の大変形に伴って水平方向の見かけの剛性が増加し、模型の振動数がより高振動数へと変化する挙動を示した。

- 2) 慣性力と断層変位を同時に作用させた加振実験の結果、模型天端の加速度および変位は、同じ大きさの慣性力のみ作用した場合と、同じ断層変位のみ作用した場合の応答の線形和よりも増大した。これは、1)に述べたように断層変位によって模型の振動数が時々刻々と変化した結果、共振が励起されたためである。実験での模型と断層変位量のスケールを単純に実構造に置き換えると、1.5m程度の断層変位が作用する場合には構造物の振動特性の変化が無視できない可能性があるため、その影響を適切に考慮して応答値を算定する必要がある。
- 3) 実験結果に基づき部材剛性を同定した梁ばね系の解析モデルを構築し、振動台の加速度波形と油圧ジャッキによる強制変位波形を同時に入力した再現解析を実施した。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できることを確認した。
- 4) 一方、加速度波形と変位波形を同時に作用させない場合は模型応答を再現できない場合があることが分かった。その場合、慣性力と断層変位を同時に考慮することで適切に地震応答値を算定できる可能性がある。

以上より、断層変位が構造物の動的応答に及ぼす影響は無視できない可能性があること、著者らが用いている解析手法を用いることで慣性力と断層変位の影響を同時に考慮した地震応答値が算定可能であることを明らかにした。

## REFERENCES

- 1) 川島一彦, 橋本隆雄, 鈴木猛康: トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要, 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. 409-416, 1999. [Kawashima, K., Hashimoto, T. and Suzuki, T.: Damage of Transportation Facilities in the Kocaeli Turkey Earthquake, Proceedings of the 3rd Symposium on Ductility Design Method for Bridges, pp. 409-416, 1999.]
- 2) 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. [Kawashima, K., Shoji, G. and Iwata, H.: Seismic Damage Mechanism of Bei-Fong Bridge and Wu-Shi

- Bridge in the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake, Proceedings of the 3rd Symposium on Ductility Design Method for Bridges, pp. 43309-440, 1999.]
- 3) 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, pp. 559-564, 2000. [Kosa, K., Yamaguchi, E., Nagase, H. and Hirooka, A.: Investigation of Damaged RC Piers due to The 1999 Ji-Ji Earthquake, Concrete Research and Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 559-564, 2000.]
- 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. [Railway Techniacl Research Institute: Design Standards for Railway Structures (Aseismic Design Standard), 2012.]
- 5) 松永昭吾, 大塚久哲: 断層変位を受けるコンクリートアーチ橋の耐震特性, 土木学会論文集A1, Vol. 65, No. 1, pp. 417-425, 2009. [Matsunaga, S. and Otsuka, H.: Seismic Peformance of a RC Arch Bridge Subjected to Fault Displacement, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 417-425, 2009.]
- 6) 有賀義明: 断層変位に対するコンクリートダム挙動の解析法に関する基礎的研究, 地震工学論文集, Vol. 29, pp. 690-697, 2007. [Ariga, Y.: Fundamental Study on Analysis Method for Behavior of Concrete Dam Against Fault Displacement, *Proceedings of the JSCE Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 29, pp. 690-697, 2009.]
- 7) 土木学会原子力土木委員会: 断層変位評価小委員会研究報告書, 2015. [The Nuclear Civil Engineering Committee of the JSCE: Research Report of the Subcommittee on Fault Displacement Evaluation, 2015.]
- 8) Gazetas, G., Pecker, A., Faccioli, E., Paolucci, R. and Anastasopoulos, I.: Preliminary design recommendations for dip-slipfault-foundation interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 677-687, 2008.
- 9) 押田直之, 月岡桂吾, 川西智浩, 日野篤志, 室野剛隆, 谷山尚: 鉄道構造物基礎の影響を受ける縦ずれ断層変位に関する模型実験, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 154-163, 2019. [Oshida, N., Tsukioka, K., Kawanishi, T., Atsushi, H., Muro, Y. and Taniyama, H.: Model test on dip slip fault displacement affected by railway structure foundation, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 65A, pp. 154-163, 2019.]
- 10) 川添千華, 山村彩華, 杉野未奈, 柏尚稔, 林康裕: 杭基礎に対する断層変位の影響評価に関する模型実験, 日本地震工学論文集, Vol. 18, No. 1, pp.122-133, 2018. [Kawazoe, C., Yamamura, A., Sugino, M., Kashiwa, H. and Hayashi, Y.: Model Test on the Behavior Evaluation of Pile Foundation Subjected to Fault Rupture, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp.122-133, 2018.]
- 11) 日野篤志, 室野剛隆: 縦ずれ断層の影響を受けにくい新しいラーメン高架橋形式の提案, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 7, pp. 47-52, 2017. [Hino, A. and Muro, Y.: Proposal of a New Type of Rigid Frame Viaduct Insusceptible to a Reverse Fault, RTRI Report, Vol. 31, No. 7, pp. 47-52, 2017.]
- 12) 今井啓文, 池端文哉: 撓曲帯における断層変位を考慮した高架橋の設計, 土木学会第77回年次学術講演

- 会講演概要集, III-393, 2022. [Imai, T. and Ikehata, B.: Design of Viaducts Considering Fault Displacement in Flexure Zone, *JSCE Annual Meeting Proceedings*, III-393, 2022.]
- 13) 池田俊雄：活断層と新神戸駅の基礎，応用地質，Vol. 12, No. 2, pp. 77-82, 1971. [Ikeda, T.: Active Fault and Foundation Design for Shin Kobe Railway Station Structures, *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, Vol. 12, No. 2, pp. 77-82, 1971.]
- 14) 大塚久哲，中村壯，古川愛子：断層変位を受ける鋼斜張橋の耐震安全性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 55A, pp. 593-604, 2009. [Otsuka, H., Nakamura, T. and Furukawa, A.: *Journal of Structural Engineering*, Vol. 55A, pp. 593-604, 2009.]
- 15) 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. [Onodera, M., Sakai, K. and Toyooka, A.: A study on seismic response analysis for a railway viaduct near the strike-slip fault, *Journal of structural engineering*, Vol. 68A, pp. 182-191, 2022.]
- 16) (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，鋼・合成構造物，丸善，2009. [Railway Techniacl Research Institute: Design Standards for Railway Structures (Steel Composite Structure), 2009.]
- 17) (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. [Railway Techniacl Research Institute: Design Standards for Railway Structures (Foundation Structure), 2012.]
- 18) 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. [Onodera, M., Sakai, K. and Toyooka, A.: Analytical study for soil-structure interaction under fault displacement, *Proceedings of the 25th Symposium on Bridge Earthquake Engineering*, pp. 191-194, 2021.]

## SHAKING TABLE TEST AND REPRODUCTION ANALYSIS OF A FRAME MODEL SUBJECTED TO INERTIAL FORCE AND FAULT DISPLACEMENT

Meguru ONODERA, Kimitoshi SAKAI and Akihiro TOYOOKA

In earthquakes caused by active inland faults, fault displacement that appears on the ground surface and inertial force may affect to seismic behavior of structures at the same time. However, the seismic behavior of structures affected by inertial force and fault displacement is unexplained. In this study, shaking table test was conducted on a steel frame model subjected to inertial force and fault displacement were applied simultaneously to understand the behavior of the model under the simultaneous action of inertial force and fault displacement. As a result, it was clarified that the influence of fault displacement on the dynamic response of structures may not be negligible. Furthermore, a reproduction analysis of shaking table test was conducted, and validity of the analytical method that can consider to the effects of inertial force and fault displacement was clarified.