

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

小野寺 周¹・坂井 公俊²・豊岡 亮洋³

¹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）

²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）

³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被害を受ける場合がある。例えば1999年のトルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震では、慣性力と断層変位が一体的に影響したと推察される橋脚躯体の損傷や落橋等の被害が報告されている^{1),2)}。こうした被害の甚大さを鑑みると、構造計画の段階で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³⁾でも断層変位を地震随伴事象として扱い、その影響を極力小さくするよう配慮することを求めている。一方、断層変位の影響が避けられない場合、適切な対策を講じなければならず、対策を決定するためには通常想定する慣性力の影響だけでなく、断層変位の影響も考慮して応答値を算定する必要がある。

慣性力と断層変位の両者の影響を考慮した検討事例として、著者ら⁴⁾は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両者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。大塚ら⁵⁾も鋼斜張橋を対象とした検討により、慣性力もしくは断層変位のみでの静的解析では、動的解析に対して応答を過小評価する傾向があることを示している。

しかしながら、慣性力と断層変位の影響を考慮した挙動評価は解析的な検討に限られている。実験的

な検討事例は見当たらず、両者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。そのため、これまで検討してきた応答評価手法を設計に実装するには、慣性力と断層変位が同時に作用した構造物の挙動に関する知見を蓄積していく必要がある。

以上の背景を踏まえ、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実験的検討を行った。具体的には、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。

2. 慣性力と横ずれの断層変位を同時に作用させた振動台実験

慣性力と横ずれの断層変位の同時作用を模擬するために、振動台による加振中に水平方向のジャッキ載荷が可能な強制変位載荷装置、柱と梁からなる鋼製のラーメン模型を製作した。これらを振動台上に構築し、加振もしくはジャッキ載荷のみ行う試番、加振中にジャッキ載荷を同時に行う試番をそれぞれ実施した。

(1) 強制変位載荷装置

大型振動台による加振中に横ずれの断層変位を模擬したジャッキ載荷を行うために、振動方向への固定・可動条件が異なる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。装置の概要を図-1に示す。可動テーブル下の台座にはリニアガイドを取り付けており、テーブルを加振方向に変位させることができる。一方、固定テーブルと台座はボルト結合している。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、振動台に固定した。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のみに最大300mmの強制変位を与えることができる。

(2) 鋼製ラーメン模型

柱と梁部材からなる鋼製のラーメン模型を製作した。模型の諸元を図-2 および表-1 に示す。模型は柱が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周期で振動することを念頭に設計した。柱に使用した SM490 材の降伏ひずみは 1829μ である。梁は変形が生じないよう剛性を十分大きくした。

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、柱基部と強制変位载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。

表-1 に示す柱の諸元をもとに、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それぞれ算定した。部材断面力の算定は設計標準⁶⁾を参考としている。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、ジャッキによる強制変位量は 145mm であった。

また、各ケースの最初に実施したホワイトノイズ加振から得られた固有振動数は、全ケース(Case1~Case3)で約 2.2Hz であった。

(3) 実験ケースおよび加振条件

表-2 に示す 3 ケースの実験(Case1~Case3)を実施した。Case1 は慣性力の作用を模擬した条件、Case2 は断層変位の作用を模擬した条件、Case3 は慣性力と断層変位の作用を模擬した条件である。具体的な加振条件を以下に示す。

a) Case1 (慣性力のみ作用)

Case1 では、模型に慣性力のみ作用させる条件として、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。試番を表-3 に示す。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

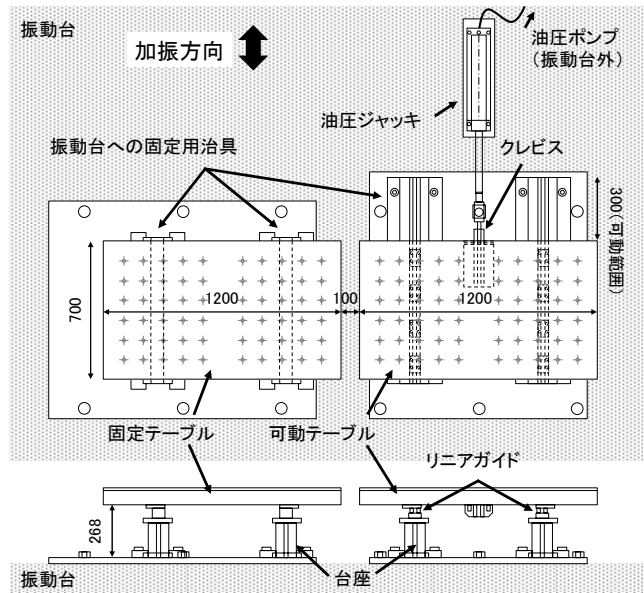


図-1 強制変位载荷装置の概要 (単位: mm)

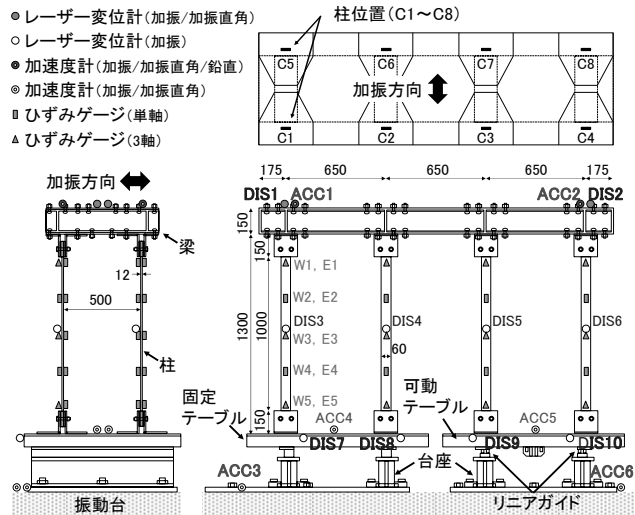


図-2 鋼製ラーメン模型の概要 (単位: mm)

表-1 柱の諸元

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

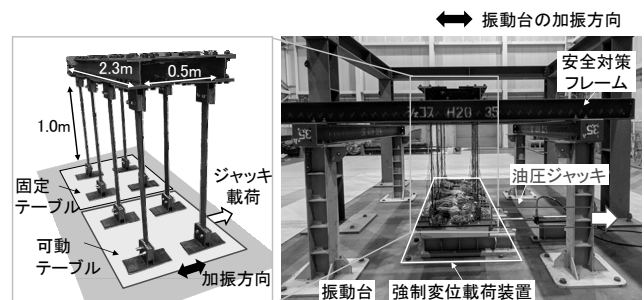


図-3 実験の構成

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。模型の過渡応答を可能な限り抑制するために、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、振動台の特性上、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ている。なお、最初と各試番の終了時には模型の振動特性を把握するため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)

Case2 では、模型に断層変位のみ作用する条件として、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。ジャッキの荷重速度は模型に振動が生じないように十分低速 (1mm/s 程度) とし、柱の変形が十分に進展するまで継続して荷重した。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。荷重前と 260mm の荷重直後にはホワイトノイズ加振を行って振動特性を把握した。

c) Case3 (慣性力と断層変位を同時に作用)

Case3 では、慣性力と断層変位が同時に作用する条件として、Case1 と同一の入力波形を用いて振動台を加振し、同時に油圧ジャッキによる強制変位を与えた。Case3 の試番を表-4 に示す。強制変位量は Case2 の結果をもとに、柱基部のひずみが Case1 と概ね同程度となるよう設定した。強制変位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。

加振条件の一例として、試番 3-2 における可動テーブルの変位波形を図-5 に示す。このときの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 の変位波形に含まれている周期成分は、模型の揺り戻しによって油圧ジャッキが伸縮して生じたものである。この試番でのジャッキの荷重速度は平均 7mm/s 程度である。

加振後のホワイトノイズ加振では、加振終了時のジャッキ変位を維持した状態で行った。その後の加振では可動テーブルを初期の位置に戻し、柱は交換せずに行った。

(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。

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	ジャッキ荷重のみ
Case3	振動台加振中にジャッキ荷重

表-3 Case1 の試番

試番	振動数 (Hz)	最大加速度 (gal)	加振時間 (s)
1-1	2.6	63	50
1-2	2.6	133	50
1-3	2.6	203	50
1-4	2.6	274	50
1-5	2.6	365	50
1-6	2.6	411	50
1-7	2.6	452	30
1-8	2.6	502	30
1-9	2.6	554	30
1-10	2.6	603	25
1-11	2.6	663	20
1-12	2.6	772	20
1-13	2.6	893	20

※各試番の後にホワイトノイズ加振を実施

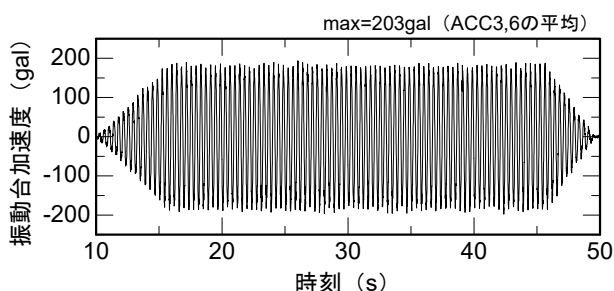


図-4 振動台の加速度波形 (試番 1-3)

表-4 Case3 の試番

試番	振動数 (Hz)	最大加速度 (gal)	強制変位 (mm)
3-1	2.6	133	50
3-2	2.6	203	62
3-3	2.6	274	76
3-4	2.6	365	103
3-5	2.6	452	128
3-6	2.6	554	157
3-7	2.6	663	122
3-8	2.6	772	213
3-9	2.6	893	232

※各試番の後にホワイトノイズ加振を実施

変位計の計測値はすべて振動台からの相対変位である。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、ジャッキ载荷のみ行う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。

3. 実験結果

(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-6、図-7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-6より、試番1-8（振動台加速度502gal）において柱は降伏ひずみを超過する応答を示した。このときの天端の最大加速度は図-7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 μ であり、降伏ひずみ（1829 μ ）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-8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低下しており、塑性化による部材剛性の低下が見取れる。

続いて、模型の振動特性の変化を把握するために、加振前、試番1-8の後、最終試番1-13の後に実施した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スペクトルの比を図-9に示す。得られたスペクトル比に対して、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固有振動数および減衰定数を同定した。その結果、初期の振動数は2.23Hz、減衰定数は0.5%であった。一方、

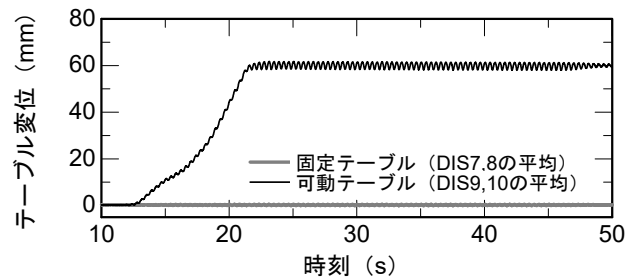


図-5 固定・可動テーブルの変位波形（試番3-2）

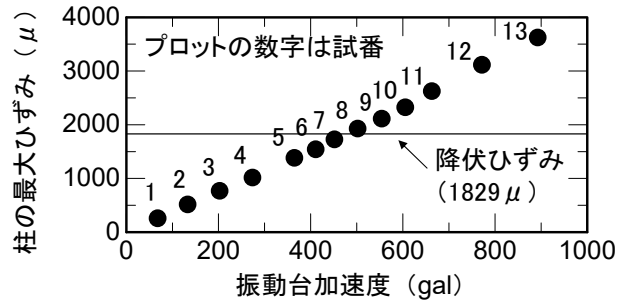


図-6 振動台加速度と柱の最大ひずみの関係（Case1）

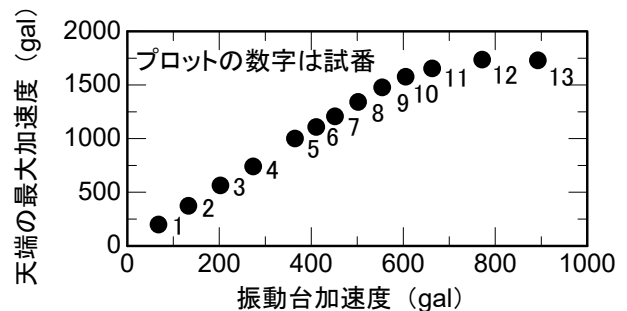


図-7 振動台加速度と天端の最大加速度の関係（Case1）

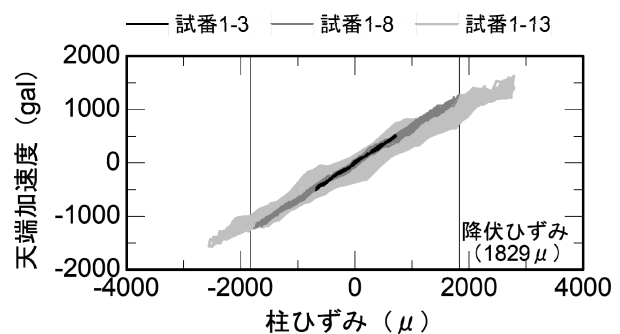


図-8 天端加速度－柱ひずみの関係（Case1）

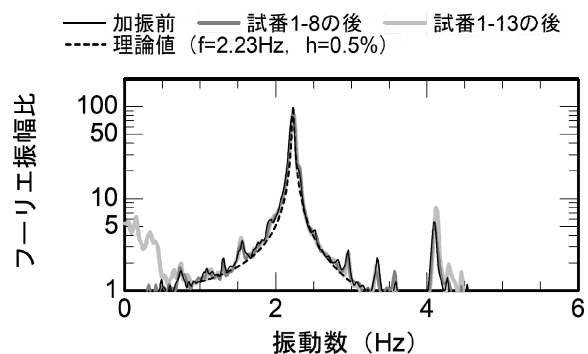


図-9 フーリエ振幅比の変化（Case1）

試番1-13後に同定された模型の振動数は2.22Hz、減衰定数は0.5%であり、加振前とほとんど変化はなかった。

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、振動台加速度がおよそ500galを超えたときに柱基部が降伏することを確認した。

(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-10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、静的に加振できていることを確認している。

図-10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-11に示す。図にはC1～C4の応答のみ示すが、C5～C8も同一列の柱とほぼ同等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でほぼ同じタイミングで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-10に示した固定・可動テーブルの応答変位の大小関係、図-11に示した柱ひずみの大小関係に関して、模型の平面形状の概略図を図-12に示す。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っていることが分かる。

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-13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のが、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

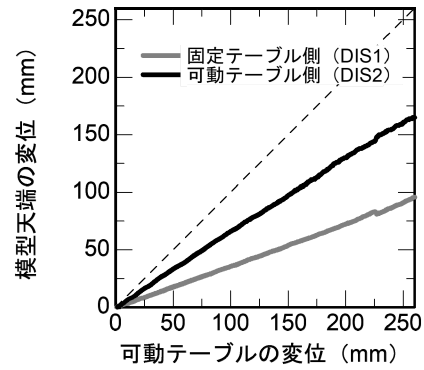


図-10 可動テーブル変位と天端変位の関係 (Case2)

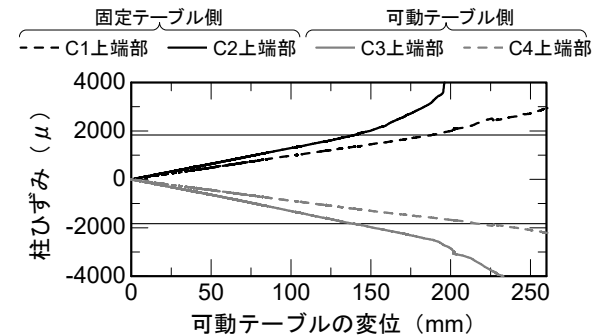


図-11 可動テーブル変位と柱ひずみの関係 (Case2)

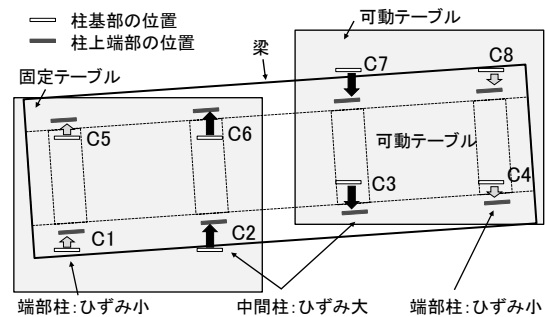


図-12 模型の平面形状とひずみの大小関係

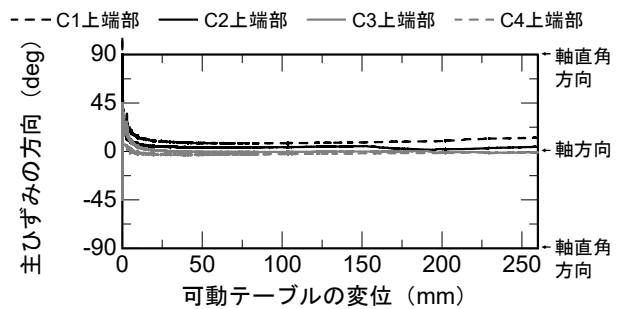


図-13 主ひずみの方向の履歴

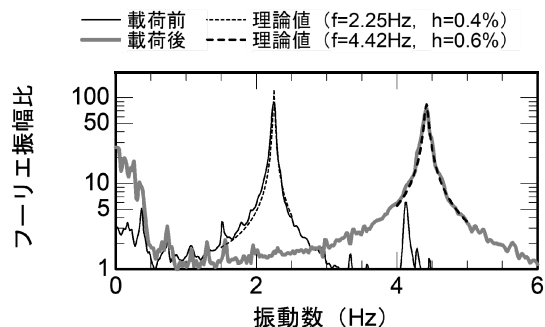


図-14 伝達関数の変化 (Case2)

響と考えられる。

载荷による振動特性の変化を確認するために、載前と260mm载荷時のホワイトノイズ加振より得られた振動台～模型天端のフーリエ振幅スペクトルの比を図-14に示す。カーブフィッティングから同定された初期の模型振動数は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载荷時の模型振動数は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-15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、強制変位量が大きい場合、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、中間柱の変形が相対的に大きくなり先行して降伏した。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見かけの剛性が変化することで、加振方向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载荷した。試番3-2（振動台加速度203gal+強制変位62mm）、試番3-5（452gal+128mm）、試番3-9（893gal+232mm）における模型天端の加速度と柱ひずみの関係を図-16に示す。加速度は図-2に示すACC1、柱のひずみはCase2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3-2と同じ大きさの加振のみ（Case1の試番1-3）もしくは強制変位のみ（Case2の62mm载荷時）の作用条件では、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、これらの応答の単純な重ね合わせでは降伏しない。

図-16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同一方向（正側）に累積している。その結果、試番3-2において降伏ひずみを超過する応答を示しており、Case1とCase2の応答の重ね合わせが成り立っていない。これについて、各試番後のホワイトノ

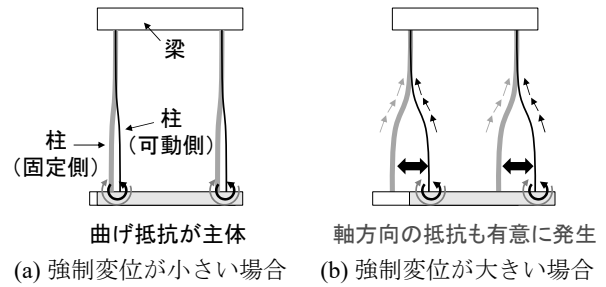


図-15 大変形による抵抗特性の変化のイメージ

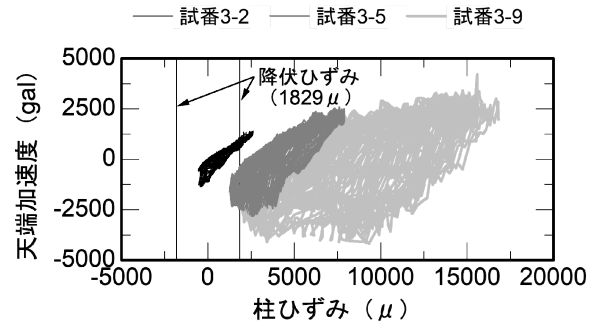


図-16 天端加速度－柱ひずみの関係 (Case3)

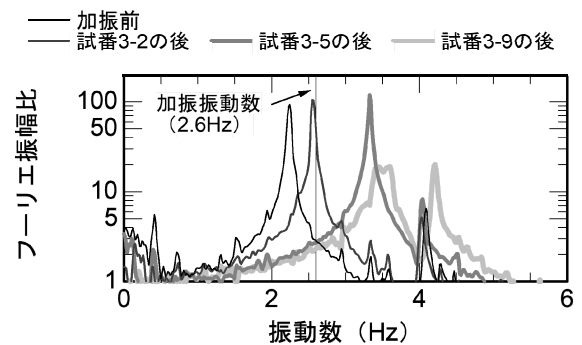
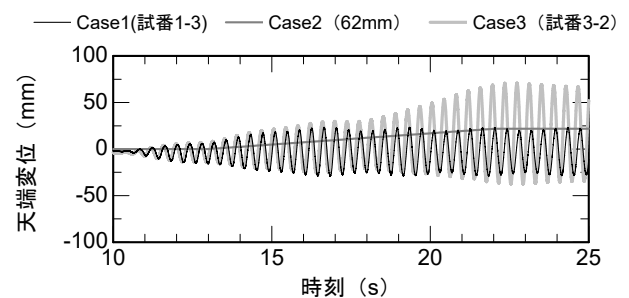
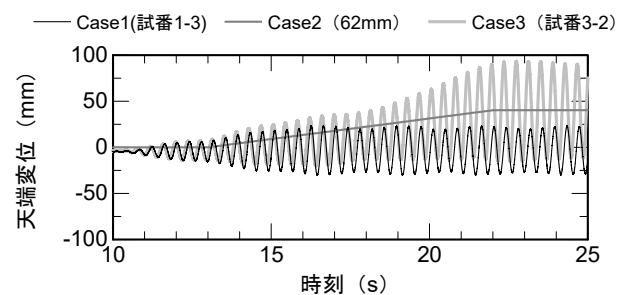


図-17 伝達関数の変化 (Case3)



(a) 固定テーブル側



(b) 可動テーブル側

図-18 模型天端の変位波形の比較

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図-17に示す。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-15に示す見かけの剛性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)に漸近したことで、Case1、Case2の重ね合わせ以上に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模型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番3-2(203gal+62mm)に着目して、Case1の試番1-1(203gal)、Case2の62mm載荷時の応答と比較する。試番3-2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。

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-18～図-20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)に対して半分より小さな作用の組み合わせ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は挙動が異なることが分かった。具体的には、断層変位の作用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模型の振動数が加振振動数により近づくことで共振が励起され、個別の作用を受ける場合よりも応答が増大した。

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3-9で載荷した最大232mmの強制変位は、実構造物(構造高さ10mと想定)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場合には、大変形による見かけの剛性変化が無視で

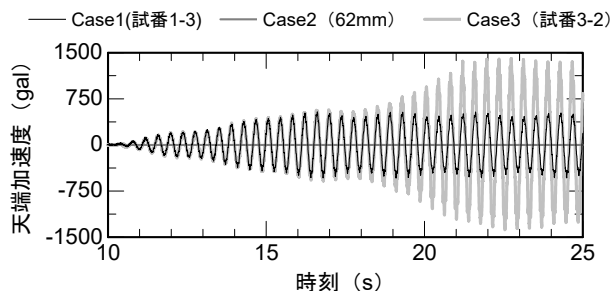


図-19 模型天端の加速度波形の比較

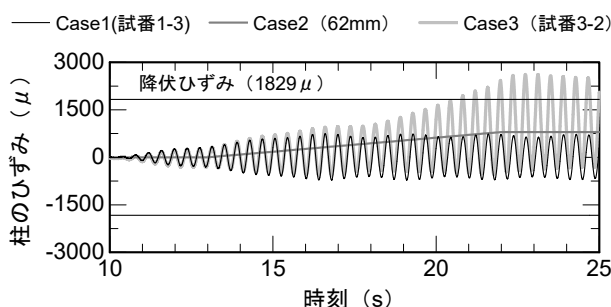


図-20 柱のひずみ波形の比較

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考えられる。

4. 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把握を目的として、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。以下に本検討で得られた知見を示す。

- 1) 横ずれの断層変位の作用を模擬するために、模型基部に油圧ジャッキによる水平方向の強制変位を静的に作用させた。その結果、模型は並進挙動と平面的な回転挙動を生じ、柱の位置によって生じるひずみは異なることが分かった。また、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) 慣性力と断層変位の同時作用を模擬するために、振動台による加振中に強制変位を載荷した。このときの最大応答は、同じ加速度による振動台加振のみ行った場合と、同じ強制変位のみを載荷した場合の応答の足し合わせよりも増大した。これは、強制変位によって模型の振動数が時々刻々と変化し、振動台加振との共振が励起されたためである。
- 3) 実験で載荷した強制変位量は実構造物のスケールに換算すると1.5m程度である。この程度の大

きな断層変位を想定した場合，大変形時の見かけの剛性変化が動的挙動に及ぼす影響を無視できない可能性があるため，その影響を適切に考慮する必要がある。

本結果を踏まえると，断層変位の影響が想定される場合には慣性力と断層変位の両者の影響を同時に考慮して応答値を算定する必要があると考えられる。なお，本実験の再現解析を別途実施し，著者らが検討⁴⁾で用いている解析手法の妥当性を確認している⁷⁾。今後，より広範な構造形式を対象として両者の影響を考慮した解析を行う予定である。

参考文献

- 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.
- 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.
- 3) （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.
- 4) 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.
- 5) 大塚久哲，中村壮，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.
- 6) （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.
- 7) 小野寺周，坂井公俊，豊岡亮洋：鋼製ラーメン模型に慣性力と断層変位を同時に作用させた振動台実験の再現解析，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）