

## 慣性力と断層変位を同時に受けるフレーム模型による振動台実験

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○小野寺 周 坂井 公俊 豊岡 亮洋

### 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ります。両者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。そのため、断層変位の影響が想定される場合は両者の影響を同時に考慮して地震応答値を算定し、必要に応じて対策を講じなければならない。著者ら<sup>1)</sup>は両者の影響を同時に考慮して鉄道高架橋の挙動を解析的に評価しているものの、このような解析事例は少なく、断層直上における構造物の設計に実装していくには知見を蓄積する必要がある。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、同時作用下の模型挙動を把握した。

### 2. 実験条件

図1に示すように、柱と梁からなるフレーム模型を製作し、慣性力の影響を模擬した振動台加振と断層変位の影響を模擬したジャッキ载荷を同時に行った。ジャッキ载荷のために、固定・可動が異なる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、振動台上に設置した。固定・可動テーブルを跨ぐように模型を設置し、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上の柱のみに強制変位を与えることができる。

模型の諸元を表1に示す。柱は座屈せずに曲げ変形し、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。梁は変形が生じないよう剛性を十分大きくした。柱上部と梁、柱基部と強制変位载荷装置はアングル材を介してボルト結合した。試験前に実施した模型の衝撃振動試験の結果、固有振動数は約2.2Hzであった。

表2に示す3ケースの実験を実施した。Case1（慣性力のみ作用）では、可動テーブルを固定して正弦波加振を行った。加振振動数は全試番で2.6Hzとし、振動台の最大加速度（以下、振動台加速度）を試番ごとに漸増させた。Case2（断層変位のみ作用）では、加振せずにジャッキで可動テーブルに強制変位を静的に与えた。Case3（慣性力と断層変位を同時に作用）では、Case1と同じ条件で加振中にジャッキで強制変位を与えた。試番ごとの最終的なジャッキ変位量は、Case2の結果から柱基部のひずみがCase1と概ね同程度となる条件とした。ジャッキ载荷は加振開始と同時に開始し、模型が定常応答を示す時間内に最終変位に到達するよう载荷速度を調整した。また、各試番の終了後は可動テーブルを加振前の位置に戻した。

各ケースに対して、模型天端と固定・可動テーブルに設置した加速度計および変位計、ならびに各柱の上下端部に貼付したひずみゲージにより応答値を記録した。なお、柱はケースごとに交換した。

### 3. 実験結果

Case1（慣性力のみ作用）について、振動台加速度と天端の最大加速度、柱基部の最大ひずみの関係を図2に示す。図2(b)より、試番8（振動台加速度502gal）で降伏ひずみを超過し、このときの天端の最大加速度は1389galであった。振動台加速度がより大きな試番では柱の降伏によって最大加速度が頭打ちになる傾向が確認できる。

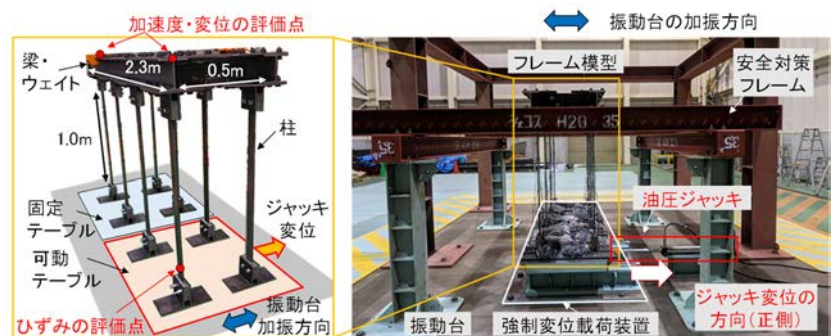


図1 振動台試験の概況

表1 柱の諸元

断面寸法(mm)		部材長 (mm)	上載荷重(kg) ※柱1本あたり	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (μ)
加振方向	直角方向				
12	60	1000	81.3	384	1829

表2 実験ケース

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

キーワード 断層変位, 慣性力, 振動台実験

連絡先 〒186-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター

Case2 (断層変位のみ作用) について, ジャッキ変位と天端変位, 柱基部の最大ひずみの関係を図3に示す. 図3(a)より, 天端変位はジャッキ変位の増加に伴って線形的に増加している. また, 固定テーブル側を中心に模型全体が回転するため, 固定テーブル側よりも可動テーブル側の方が変位は大きい. 図3(b)より, 柱はジャッキ変位137mmのときに降伏ひずみに達した.

Case3 (慣性力と断層変位を同時に作用) について, はじめて柱が降伏した試番 (振動台加速度 203gal+ジャッキ変位 62mm) の模型挙動を詳細に考察する. 加振条件として振動台の加速度波形およびジャッキの変位波形を図4に示す. 図4(b)に合わせて示すCase2の変位波形について, 実際には静的に載荷しているが, 図中では便宜上13秒~22秒の間を結ぶ直線で示している.

模型天端の加速度波形および柱基部のひずみ波形を図5に示す. 図にはCase1, Case2での応答値と, それらを足し合わせた値 (Case1+Case2) も合わせて示している. 図5(b)より, Case1, Case2のいずれも柱基部の最大ひずみは降伏ひずみ (1829 $\mu$ ) に対して4割程度であり, それらを単純に足し合わせたCase1+Case2でも降伏ひずみには達しない. 一方, Case3はCase1+Case2と比較して最大加速度が2.5倍程度, 最大ひずみは1.5倍程度まで増幅し, 柱が降伏するひずみ (2087 $\mu$ ) を生じた. 以上より, フレーム模型に慣性力と断層変位が同時に作用した場合, それぞれが個別に作用した場合よりも応答が増幅した.

Case3での応答増幅の要因について, 加振前後のホワイトノイズ加振から得られた模型の伝達関数と, 変形形状による部材抵抗の概念図を図6に示す. 図6(a)より, 加振後の模型の固有振動数は高振動数側にシフトしている. これは図6(b)に示すように, ジャッキ変位の増加に伴って曲げ抵抗だけでなく部材軸方向の抵抗も有意に生じた結果, 加振方向の見かけの剛性が大きくなったためと考えられる. これにより加振中に模型の固有振動数と加振振動数 (2.6Hz) が近づき, 共振を誘発したことで応答が大きく増幅した.

4. まとめ

鋼製のフレーム模型に対して慣性力と断層変位が同時に作用した場合, 個別の作用を受けた場合より応答が増幅する挙動を確認した. 今後, 再現解析を行い, 著者らが用いている解析手法<sup>1)</sup>の妥当性を確認する予定である.

参考文献

- 1) 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.

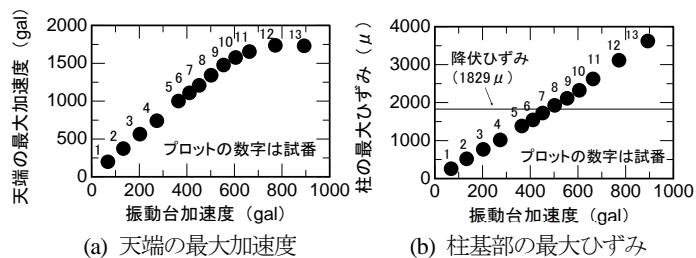


図2 Case1の結果 (慣性力のみ作用)

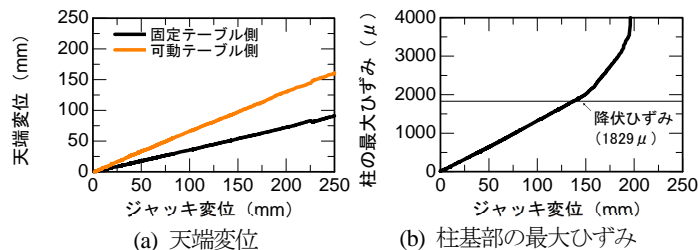


図3 Case2の結果 (断層変位のみ作用)

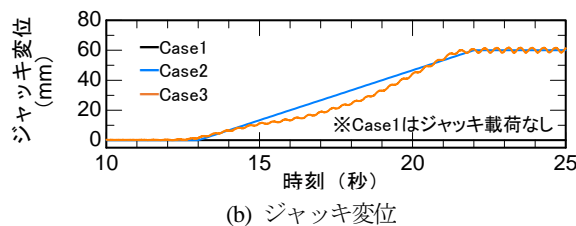
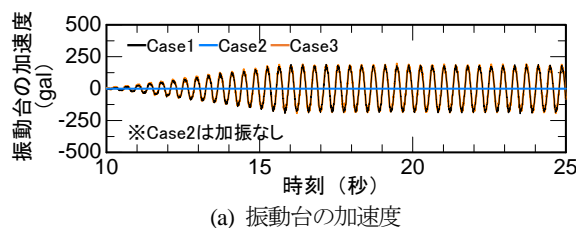


図4 Case3の加振条件

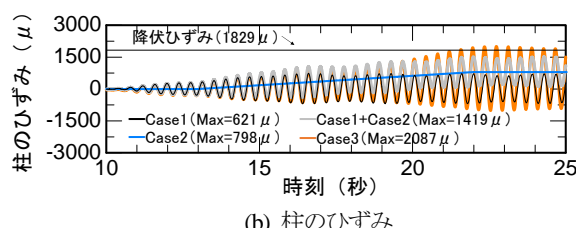
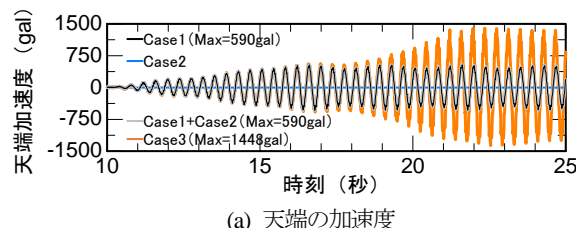


図5 Case3の結果 (慣性力と断層変位を同時に作用)

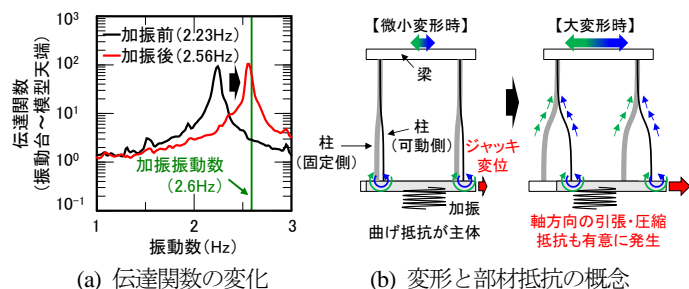


図6 伝達関数の変化と変形形状の関係