

論文 断層変位を受ける鉄道高架橋の 地震時挙動に隣接構造物の拘束が及ぼす影響

小野寺 周¹・坂井 公俊²・豊岡 亮洋³

¹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)

²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

³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、地表に現れる断層変位によって構造物に甚大な被害が生じる可能性があるため、断層変位の影響が避けられない場合にはその影響を考慮して地震時挙動を評価する必要がある。支承や桁、軌道を介して線路方向に連続している鉄道構造物では、隣接構造物が挙動に影響を与える可能性があるが、その影響程度は不明である。そこで本検討では、断層変位を受ける鉄道高架橋を対象として、隣接構造物による変位拘束の有無が地震時挙動に及ぼす影響を比較した。その結果、線路方向の変位が拘束されることでモーメント分布が変化し、変位の拘束を考慮しない場合とは部材の損傷程度が異なることが示された。したがって、断層変位を受ける構造物の地震時挙動を評価する際には、隣接構造物の影響を適切に考慮する必要がある。

Key Words: *fault displacement, railway viaduct, adjacent structure, seismic response*

1. はじめに

内陸活断層による地震では、地表に現れる断層変位によって構造物に甚大な被害が生じる場合がある。1999年のトルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震では、断層変位による落橋等の被害が報告されている^{1,2)}。断層変位による被害の甚大さを鑑みて、鉄道構造物の設計標準³⁾では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に構造計画の段階から配慮することとしている。一方、やむを得ず断層変位の影響を回避できない場合には、その影響を考慮して地震時挙動を評価し、必要に応じて安全性や復旧性を高めるための対策を講じなければならない。

断層変位を受ける構造物の地震時挙動を評価する検討は多分野で行われている。鉄道分野では断層変位の影響を受けにくい構造形式の提案⁴⁾や断層変位に配慮した施工事例の報告⁵⁾もされている。また、著者らは慣性力と

断層変位の影響を同時に考慮した鉄道高架橋の地震応答解析を実施し、個別の影響のみを受ける場合よりも部材の応答が増大する可能性があることを示している⁶⁾。

ただし、既往検討⁶⁾では線路直角方向の挙動を把握する目的から、線路方向に対する構造物の変位と回転を拘束した条件としている。断層変位を受けた場合は3次元的な挙動が想定される点を踏まえると、既往検討⁶⁾の結果は、実際の鉄道構造物における支承や桁、軌道を介して隣接構造物と連続していることによる拘束の影響が加味されていると考えられるが、隣接構造物による拘束条件が異なれば挙動も変化する可能性がある。しかしながら、断層変位を受ける構造物に対して、隣接構造物による拘束条件の違いが挙動に及ぼす影響を検討した事例は見当たらず、その影響程度は不明である。

そこで本検討では、断層変位を受ける鉄道高架橋を対象として、隣接構造物による拘束条件が地震時挙動に及ぼす影響を把握することを目的とした検討を行う。具体

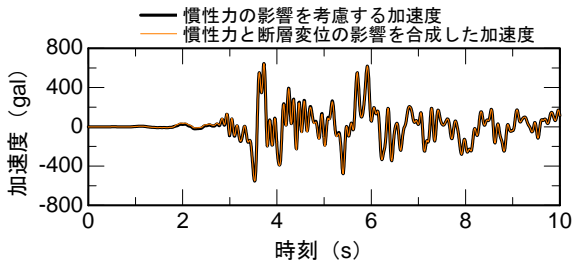


図-3 慣性力の影響を考慮する加速度波形

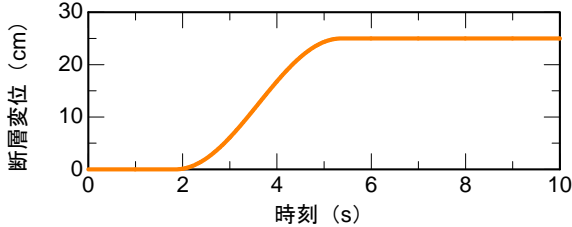


図-4 断層変位波形

は隣接構造物との相対変位が生じ、支承や桁を介して変位が拘束される可能性がある。そこで、隣接構造物によって線路方向に対する変位が拘束される影響を把握するために、拘束の有無が異なる2ケースを表-1のように設定した。

変位の拘束がない Case1 では、解析自由度をすべてフリーとした。拘束がある Case2 では、便宜的に線路方向 (X) の自由度のみを固定することとした。なお、既往検討⁹⁾では、線路直角方向に対する挙動評価を主目的としたため、線路方向 (X) および線路直角方向周り (Ry) の自由度を固定としており、本検討条件とは異なる。

(4) 解析条件

(3)で設定した2ケースに対して、プッシュ・オーバー解析³⁾、断層変位を作用させた静的解析、慣性力と断層変位を同時に作用させた動的解析をそれぞれ実施する。

プッシュ・オーバー解析では、線路直角方向に水平震度を漸増させながら作用させる。水平震度の分布は高さ方向に一様とし、水平震度 1.0 まで全 1000 ステップで漸増させる (1 ステップあたりの水平震度の増分 0.001)。このときラージマスおよび表層地盤の節点は固定する。

断層変位を作用させる静的解析では、地盤 B に対する地盤 A の相対変位が 50cm となるような断層変位を作用させる。作用方向は線路直角方向とし、2500 ステップに分割してラージマス A に作用させる (1 ステップあたりの断層変位の増分 0.02cm)。このとき地盤 B のラージマスは固定する。

動的解析では、慣性力と断層変位を同時に作用させる。慣性力の影響は既往の検討⁹⁾と同じ L2 地震動 (スペクトル II) を想定する。断層変位の影響は地盤 A、B 間の相対変位が最大 25cm となる変位波形を想定する。慣性力の影響として基盤に生じる加速度波形を図-3 に示し、断層変位の影響として地盤 A、B 間に生じる相対変位波

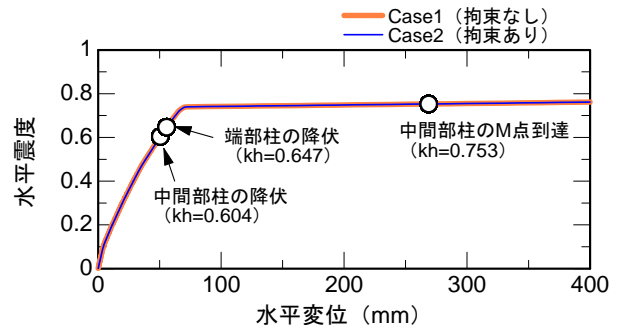


図-5 水平震度-水平変位関係

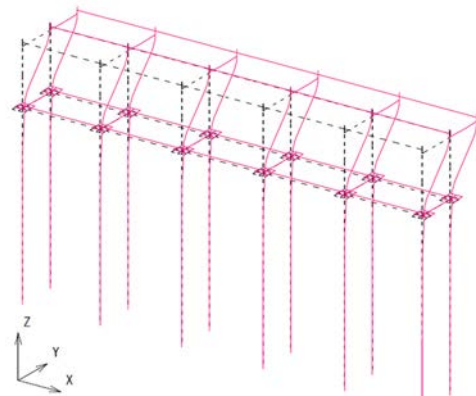


図-6 水平震度 0.75 における変形図 (Case1)

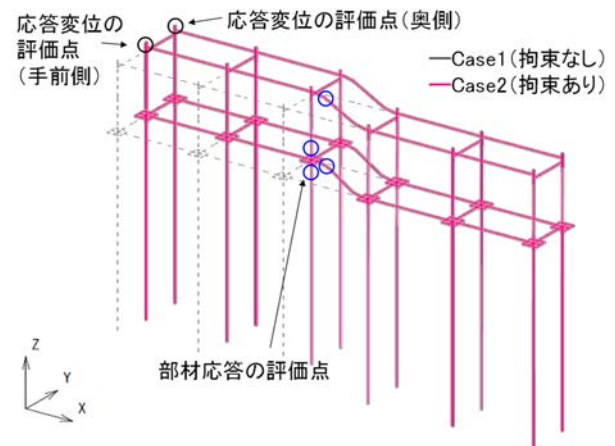


図-7 断層変位 50cm 作用時の変形図

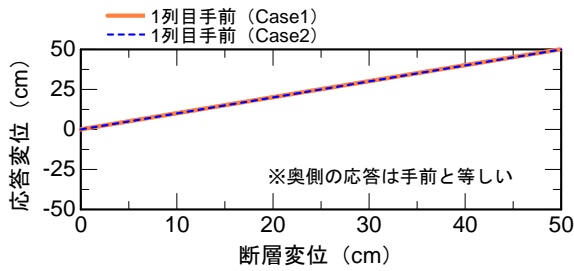
形を図-4 に示す。数値積分には Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用い、時間刻み 0.005 秒として逐次非線形解析を行う。

3. 解析結果

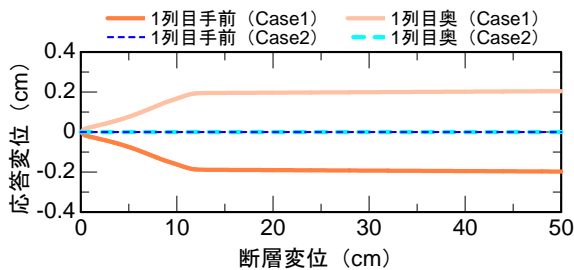
(1) プッシュ・オーバー解析による挙動の比較

慣性力に対する基本的な挙動を把握するために、水平震度を漸増させるプッシュ・オーバー解析を実施した。

構造天端での水平震度-水平変位関係を図-5 に示す。図より、水平震度-水平変位関係は両ケースで一致している。これは、対象構造物が整形であり、構造全体が回転せずに線路直角方向のみに一様に変形しているため



(a) 線路直角方向の変位



(b) 線路方向の応答変位

図-8 断層変位一構造天端の応答変位の関係

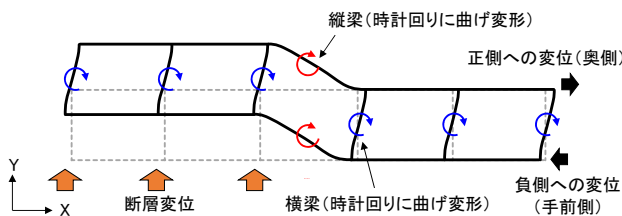


図-9 断層変位を受ける構造物の変形概念図

ある。なお、いずれのケースも柱の損傷が卓越する損傷形態を示しており、これは図-6 に示す変形図からも見て取れる。

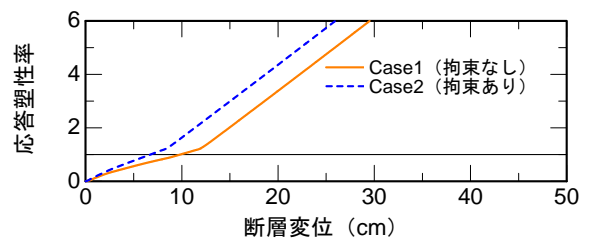
(2) 断層変位を受ける場合の損傷形態の比較

断層変位が作用した場合の挙動を両ケースで比較するために、図-2 に示すラージマス A に断層変位を静的に作用させた。

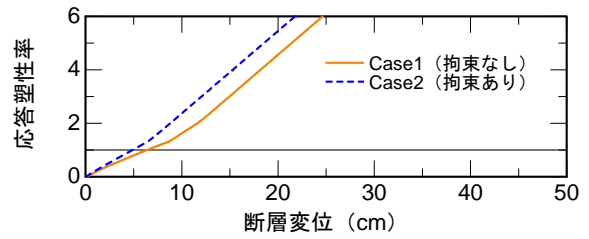
(a) 変形形状

断層変位が 50cm 作用したときの変形図を図-7 に示す。図には両ケースを重ね描いているが、両ケースで変形形状は類似しており、断層を跨ぐ 3-4 列間の地中縦梁および上層縦梁が相対的に大きく変形していることが見て取れる。

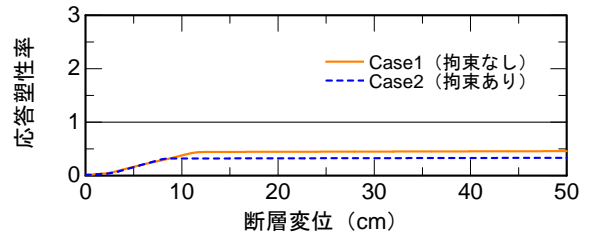
図-7 に示す応答変位の評価点 (黒丸) に着目して、断層変位と構造天端における応答変位の関係を図-8 に示す。図-8(a)より、線路直角方向の変位は両ケースではほぼ一致している。一方、線路方向について図-8(b)より、拘束がある Case2 では当然変位が生じていないが、拘束がない Case1 では最大で±0.2cm程度の変位が生じていることが確認できる。図-7 に示す手前側の柱は負側に変位し、奥側の柱は正側に変位している。他の列における天端位置でも同様の挙動を確認している。すなわち、構



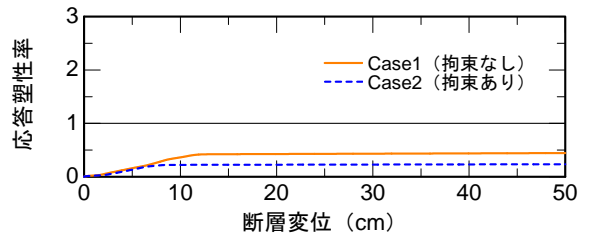
(a) 上層縦梁の端部 (3-4 列間)



(b) 地中縦梁の端部 (3-4 列間)



(c) 柱基部 (3 列目)



(d) 杭頭部 (3 列目)

図-10 断層変位一応答塑性率の関係

造全体が平面的に見て時計回りに回転している。これは、図-9 に示す概念図のように、断層を跨ぐ 3-4 列間の縦梁が平面上で時計回りの曲げ変形 (図の赤矢印) を生じる結果、線路直角方向に接続されている横梁にも同じ向きに曲げ変形 (図の青矢印) が生じるためである。ただし、線路方向への変形量は線路直角方向と比較して十分小さく、2 軸のモーメントの相関を考慮していないことによる影響は限定的と考えられる。

なお、図-8(b)では、断層変位が 10cm を超えた領域では線路方向の変位はほとんど増加していない。この要因については(b)で後述する。

(b) 損傷形態

断層変位による損傷形態を把握するために、変形が大きい断層付近の部材に着目して、断層変位と応答塑性率の関係を図-10 に示す。図には図-7 に示す断層を跨ぐ位置の上層縦梁、地中縦梁、柱基部、杭頭部 (青丸) における応答塑性率を示している。応答塑性率は各部材の降伏曲率に対する応答曲率の比を算定している。部材の変

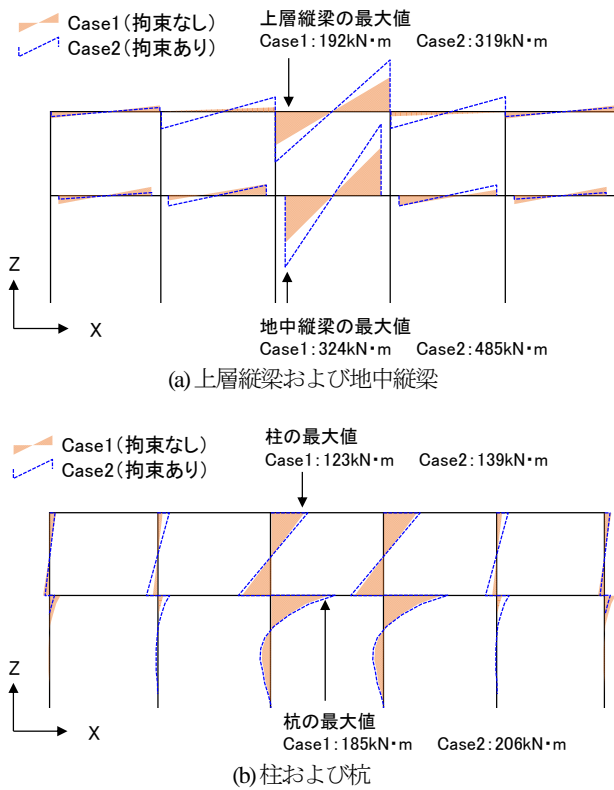


図-11 断層変位 0.3cm でのモーメント分布

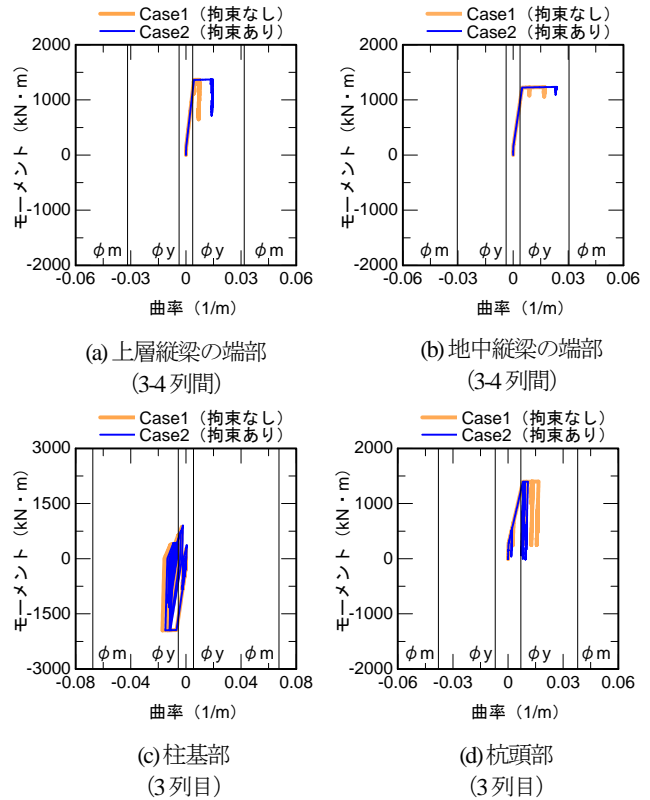


図-12 モーメントー曲率関係

形方向はいずれも線路直角方向である。

図より、両ケースで部材ごとの応答の傾向は類似しており、地中縦梁がより小さな断層変位によって先行して降伏し、その後、上層縦梁が降伏して両者の応答が進展している。柱と杭は梁部材の降伏後は応答の進展が抑制され、最大 50cm の断層変位に対しても降伏していない。これは、上層縦梁と地中縦梁が降伏して剛性が低下した結果、柱や杭に伝達される断面力がほぼ一定となったためである。なお、同様の理由で横梁に伝達される断面力も頭打ちとなるため、図-7 で示した線路方向の天端変位は断層変位が 10cm 程度以降で頭打ちになっている。

両ケースの相違点に着目すると、梁部材が降伏するときの断層変位量は、拘束がない Case1 では上層縦梁で 9.8cm、地中縦梁で 6.4cm であるのに対し、拘束がある Case2 では上層縦梁で 6.8cm、地中縦梁で 4.9cm であり、拘束した Case2 の方がより小さい断層変位で損傷する。一方、柱および杭は Case1 の方がより大きな応答値で一定となっている。

両ケースで梁部材が降伏するときの断層変位量の違いについて、線形状態でのモーメント分布から議論する。図-11 には断層変位が 0.3cm のときの線路直角方向の曲げ変形によるモーメントを示している。

図-11(a)より、梁部材に着目すると、断層を跨ぐ 3-4 列間では、Case2 の方が Case1 よりもモーメントは大きいことが分かる。また、断層から離れるほどモーメントの絶対値は相対的に小さくなるが、いずれの部材でも両ケー

スで分布形状は異なっている。柱および杭についても、図-11(b)より、両ケースともに断層に最も近い 3、4 列目でモーメントが最大となっている。このとき Case2 の方が Case1 よりも僅かに大きい。

ここで、3、4 列目の柱と杭について、線形状態のモーメント分布は Case2 の方が僅かに大きい一方、図-10 に示した応答塑性率は反対に Case1 の方が大きい。これは、Case2 では梁部材が Case1 より小さい断層変位で降伏することで、柱に伝達される断面力も先に頭打ちになるためである。

以上より、線路直角方向の断層変位によって構造全体が平面的に回転する挙動を示すことで、線路方向にも変位が生じることが分かった。隣接構造物によって線路方向の変位が拘束された場合、拘束されない場合とは断面力分布が異なり、特に断層を跨ぐ梁部材ではより大きなモーメントが生じる。その結果、梁部材はより小さな断層変位によって損傷する可能性があることが示された。

(3) 動的解析による損傷程度の比較

拘束条件の違いによる損傷程度を比較するために、慣性力と断層変位の影響を考慮した地震応答解析を行った。具体的な解析手法は文献6)に譲るが、図-3 に示す慣性力の影響および図-4 に示す断層変位の影響を同時に考慮した。

3 列目の柱基部および杭頭部、3-4 列間の上層縦梁および地中縦梁におけるモーメントー曲率関係を図-12 に示

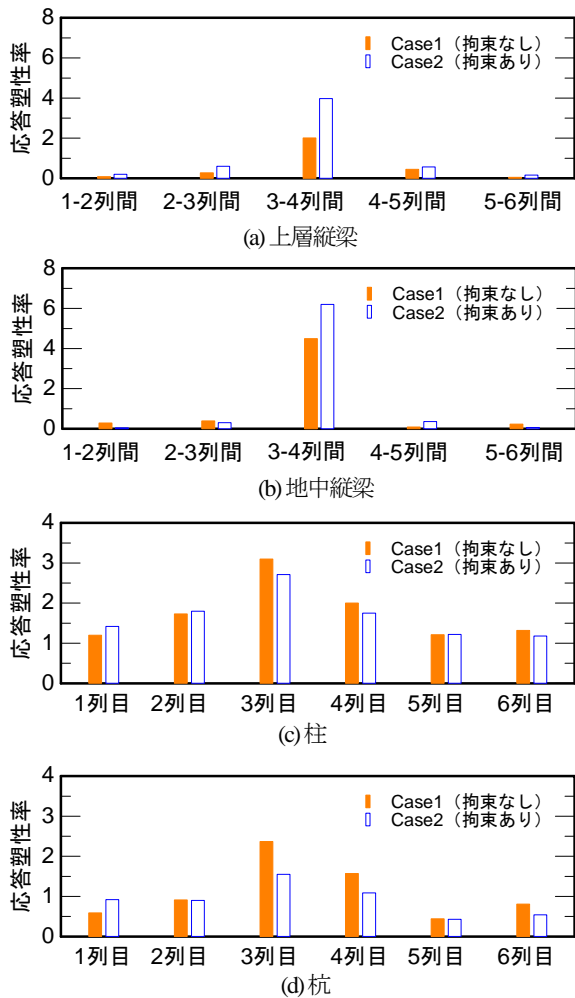


図-13 応答塑性率の分布

す。図には降伏曲率 ϕ_y 、最大耐力時の曲率 ϕ_m も示している。

図より、上層縦梁および地中縦梁の応答曲率は、拘束を受ける Case2 の方が拘束を受けない Case1 よりもそれぞれ 98%、38%大きく、損傷がより進展している。一方、柱および杭の応答曲率は、Case1 の方が Case2 よりもそれぞれ 14%、53%大きい。ケース間での応答の大小関係は図-10 で示した静的解析の結果と整合している。

また、各列の応答塑性率を図-13 に示す。図より、両ケースで損傷程度の分布は類似しており、断層に近い部材で損傷がより大きく進展していることが分かる。この傾向も図-11 に示したモーメント分布と類似している。一方、両ケースの応答値はほとんどの列で異なっていることが分かる。これも図-11 に示すモーメント分布が各列で異なっているためと考えられる。

以上より、隣接構造物によって線路方向の変位が拘束される場合、拘束を受けない場合と比較して断層を跨ぐ上層縦梁および地中縦梁の応答が増加する。一方で柱および杭の応答は反対に低減し、部材によって拘束の影響が異なることが分かった。したがって、断層変位を受ける構造物の地震時挙動を評価する際には、隣接構造物の

影響を適切に考慮する必要がある。

4. まとめ

本検討では、横ずれの断層変位を受ける鉄道高架橋を対象として、隣接構造物による拘束条件が構造物挙動に及ぼす影響を把握するための基礎的な解析を行った。具体的には、線路直角方向の断層変位を受けた場合に、線路方向に対する変位拘束の有無による損傷形態や損傷程度を比較した。以下に本検討で得られた知見をまとめる。

- (1) 断層変位を作用させた静的解析の結果、線路直角方向の断層変位が作用した場合であっても、梁部材の曲げ変形によって構造物全体が平面的に回転し、線路方向にも変位が生じる。
- (2) (1)で生じた線路方向の変位が隣接構造物によって拘束される場合、拘束がない場合とはモーメント分布が異なる。特に断層を跨ぐ上層縦梁や地中縦梁は拘束によってモーメントが増加し、より小さい断層変位によって損傷する可能性がある。
- (3) 地震応答解析の結果、隣接構造物によって変位が拘束された場合、断層を跨ぐ位置の上層縦梁と地中縦梁の損傷がより進展する一方、柱と杭の損傷は抑制される傾向にあり、拘束の有無によって損傷程度が異なる。

以上より、隣接構造物による変位の拘束条件が異なることで、部材の損傷程度は変化することが確認された。したがって、断層変位を受ける構造物の地震時挙動を評価する際には、隣接構造物の影響を適切に考慮する必要がある。

一方、得られた知見から、支承条件や桁同士の遊間等によって拘束条件を人為的に変更することで、部材の損傷を制御できる可能性も示唆された。構造条件や断層の作用位置等によって隣接構造物の影響を受ける部材やその程度は異なると考えられるため、より広範な条件で検討を行って知見を蓄積させることで、断層変位の影響を受けにくい工法等の開発につなげていきたい。

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. 409-416, 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. [Railway Techniacl Research Institute: *Design Standards for Railway Structures(Aseismic Design Standard)*, 2012.]
- 4) 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 Murono, 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.]
- 5) 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.]
- 6) 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.]
- 7) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力~ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 494-497, 2006. [Murono, Y. and Nogami, Y.: Shear Stress-Shear Strain Relationship Taking into Account S-Shape Hysteresis Loop, *Proceedings of the 12th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp. 494-497, 2006.]
- 8) (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.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

EFFECT OF RESTRAINT OF ADJACENT STRUCTURE ON SEISMIC RESPONSE OF RAILWAY VIADUCT UNDER FAULT DISPLACEMENT

Meguru ONODERA, Kimitoshi SAKAI and Akihiro TOYOOKA

Fault displacement that appears on the ground surface may cause extensive damage to structures, so it is necessary to evaluate seismic response by considering the effects of fault displacement. For railway structures that are continuous in the track direction via bearings, girders, and tracks, adjacent structures may affect the response, but the degree of influence is unknown. In this study, we investigated the effect of displacement constraint by adjacent structures on the seismic response of railway viaduct. It was shown that the restrained displacement in the direction of the track changes the moment distribution, and that the degree of damage to the member differs from that without considering the restrained displacement. Therefore, when evaluating the seismic behavior of structures subjected to fault displacement, it is necessary to consider the effects of adjacent structures.