地表断層変位が直接基礎形式の 鉄道ラーメン高架橋に与える影響の評価

日野 篤志¹·室野 剛隆²·澤田 純男³

¹正会員 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:hino.atushi.44@rtri.or.jp

²正会員 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:murono@rtri.or.jp

> ³正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄) E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

既往の地震被害では、地表断層変位による土木構造物への甚大な被害が確認されている.土木構造物と しては、地表断層変位を避けるような構造物の建設が望ましいが、線状構造物である鉄道構造物には、断 層近傍での建設が避けられない場合がある.そのため、鉄道分野では、横ずれ断層を対象として落橋のメ カニズムに関する研究や地表断層変位を考慮した耐震設計法について検討を行っている.本稿では、縦ず れ断層による鉛直方向の地表断層変位がラーメン高架橋に作用した場合の挙動を確認するために、3 タイ プの直接基礎形式のラーメン高架橋について静的非線形解析を行った.その結果、地表断層変位がラーメ ン高架橋に及ぼす影響について確認することができた.また、新たに考案した1径間のラーメン高架橋の 地表断層変位に対する有効性を確認した.

Key Words: surface fault displacement, rigit-flame virdact, base foundation, static nonlinear analysis

1. はじめに

1999年のトルコ・コジャエリ地震や台湾集集地震では、 地表断層変位による土木構造物へ甚大な被害が確認され、 地表断層変位の恐ろしさを改めて認識した^{1,2,3)}.地表断 層変位の恐ろしさとは、地表面位置における変位量の予 測の難しさ、発生すると構造物に甚大な被害を及ぼすこ となどがある.地表断層変位量については、台湾集集地 震において最大で10mにも及ぶ極めて大きな地表断層変 位が出現している.このような地表断層変位の出現は、 海外の事例のみではなく我が国においても1891年の濃尾 地震の際には水平で8.0m、鉛直で4.0mの最大変位量を観 測しており、明治以降の主要な断層運動の平均で水平 2.6m、鉛直1.7mの地表断層変位量となっている⁴⁾.その ため、複数の活断層が存在する我が国では、地表断層変 位による土木構造物への被害がいつ発生してもおかしく ない状況にある.

そこで、土木構造物としての地表断層変位に対する工 学的な対策方針として「避ける」、「追従する」および 「吸収する」という順で考え方が示されており、技術的 な対応の困難さに合わせて方針を選択することが望まし いとされている⁹. 鉄道構造物の場合には路線の線形の 関係から「避ける」事が困難な場合が多く,断層上また は断層近傍に構造物を建設せざるを得ない場合がある. そのような場合には,「追従する」または「吸収する」 といった対策を講ずる必要があり,地震随伴事象として 「地表断層変位」の影響を考慮した耐震設計が求められ る. 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)⁴では, 断層上に構造物を建設する場合には,復旧性の観点から 構造型式を盛土構造とする方法や,桁座を拡幅した橋梁 型式を用いる方法⁶が示されているおり,断層上または 断層近傍での鉄道構造物の建設は,これらの考え方をも とに実施されているのが大部分である.

既往の研究においては、橋梁型式の構造物について横 ずれ断層による地表断層変位が作用した場合の構造物の 安全性に関する研究が多く行われており、地表断層変位 量と基礎の損傷の関係や地表断層変位に対する構造とし ての対策方針などが度々議論されている^{5,7710}. 断層破壊 の形態には、横ずれの他に縦ずれがあり、縦ずれによる 地表断層変位が構造物に作用した場合の挙動については 未解明な部分が大きいものの、水平部材に変形が生じ構 造物全体系の崩壊が想定される.そこで、本研究では鉄



図-1 検討対象の基とした構造一般図

道構造物として広く用いられているラーメン高架橋に対 して縦ずれに伴う地表断層変位が作用した場合の挙動に ついて確認を行うこととした.また,あわせて地表断層 変位に対して有効なラーメン高架橋の構造形式について 検討を行った.

検討内容は、3タイプのラーメン高架橋について、2次 元と3次元でモデル化を行い、地表断層変位を強制変位 として入力した静的非線形解析を行い構造物の挙動につ いて確認を行った.対象とした3タイプのラーメン高架 橋は、地中梁の有無をパラメータとした2タイプと地表 断層変位に対して有効と考える張出し式1径間のラーメ ン高架橋とした.本検討で行った静的非線形解析では、 ラーメン高架橋への地表断層変位の影響の程度を知るこ とを目的としているため作用として地表断層変位のみを 考慮しており、慣性力の影響については考慮していない. これは、慣性力による影響は従来の耐震設計のなかでも 考慮されているものであり、慣性力の大小による構造物 への影響については部材の配筋等を調整することで破壊 を免れる可能性が高いためである.

2. 検討条件および構造物のモデル化

(1) 検討対象のラーメン高架橋の設定

本検討では、図-1に示す一層5径間の鉄道RCラーメン 高架橋¹¹⁾の諸元を基に、径間数と地中梁の有無をパラメ ータにとして3タイプのラーメン高架橋を作成し検討に 用いることとした.各タイプの概念図を図-2に示す.

- Typel:一層4径間の地中梁ラーメン高架橋
- Type2:一層4径間の地中梁を有するラーメン高架橋
- Type3: 一層 1 径間の地中梁を有するラーメン高架橋 (張出し式)



図-2 検討対象のラーメン高架橋の概要図

Typel および Type2 は現在多く用いられているラーメ ン高架橋であり高架橋端部にはゲルバー桁が用いられて いる. Type3 は本検討用に考案した高架橋であり,径間 数を短くしたことで発生断面力の低減や,端部を張出し 式としたことでそもそも桁の存在しない構造としたこと で,落橋のリスクをゼロとした構造である.

なお、図−1の検討の基となるラーメン高架橋は杭基 礎形式であるため、基礎形式を直接基礎に変更した.直 接基礎の支持地盤の条件は砂質土の N値は 30の地盤と した.フーチングの大きさは、基礎の地震時の安定の照 査を満足する程度の大きさとして橋軸方向の幅 3.0m× 橋軸直角方向の幅 6.5m×厚さ 2.0mを設定した.

(2) 考慮する地表断層変位量の設定

地表断層変位の値は、断層の規模や深さ、沖積層の厚



図-3 地盤ばねのモデル化の概念図

さなど、多くの要因が関係しており地表断層変位量を用いて構造物の耐震設計を行う場合には慎重に設定を行う 必要がある⁴⁾. 今回の検討では、構造物に作用させる地 表断層変位量の値は、鉛直方向に3.0mとした. これは、 これまでの観測事例に基づく地表断層変位分布¹²におい て、*M*_w7.5程度の場合には地表断層変位が10mを超える 場合もあるが地表断層変位が3.0mを超えた地点は30%程 度であり、*M*_w7.0程度の場合には地表断層変位が3.0mと なる場合は数パーセントであったことより設定した.

この検討に用いる地表断層変位3.0mという値は,前述 した我が国で観測されている地表断層変位の鉛直方向の 値の平均と比較しても十分大きな値であることがわかる.

(3) 解析モデルの構築

3 タイプのラーメン高架橋について解析モデルの構築 を行い,2次元および3次元の静的非線形解析を行う. なお,2次元の静的非線形解析には,幾何学的非線形性 を考慮した.

解析モデルは、橋軸方向、橋軸直角方向についてそれ ぞれ梁ばねモデルとして構築した.部材の非線形性につ いては、柱や梁といった構造部材は線形部材、基礎と地 盤の相互作用ばねは非線形部材としてモデル化をした. 基礎と地盤の相互作用ばねとは、フーチング底面での鉛 直方向および水平(せん断)方向の地盤の抵抗をモデル 化したバイリニア型の地盤ばねである.地盤ばねの物性 値については、鉄道標準(基礎構造物)¹³に準拠してば ね定数および上限値の算出を行った.

なお、本検討では底面の鉛直方向のばねのうち地表断 層変位を入力する位置(地盤に押し上げられる位置)に は上限値は考慮せず線形のばねとしてモデル化した(図 -3).これは鉄道標準(基礎構造物)¹³⁾の地盤ばねが地 表断層変位を考慮した設定になっておらず、上限値に達 し後に2次勾配(初期勾配の3%)になると変位の増加 量に対して荷重の増加はわずかとなり、構造部材に発生 する断面力の値を過小評価してしまう可能性が考えられ るためである.また、作用としての地表断層変位のモデ

表-1 地表断層変位の入力ケース(2次元解析)

(a)橋軸直角方向

(b)橋軸方向

	入力幅(m)
CaseC1	0
CaseC2	0.8
CaseC3	1.7
CaseC4	2.5
CaseC5	3.3
CaseC6	4.1
CaseC7	4.9
CaseC8	5.7
0 00	6.5

	入力幅(m)
CaseL1	0
CaseL2	10
CaseL3	20
CaseL4	30
CaseL5	40



ル化については、表層地盤の塑性化の影響を無視したかたちで、(2)で設定した変位量をフーチング底面の地盤 ばねを介して構造物へ与えることとした. なお 1step あたりの地表断層変位の入力は、解析に考慮する地表断層 変位 3.0mを 12000 分割して 0.25mm の強制変位として与えた.

3. 2次元モデルによる静的非線形解析の実施

(1) 解析ケース

構築した解析モデルを用いて静的非線形解析を行なう 際に、地表断層変位の入力位置をパラーメータとした解 析を実施する.地表断層変位の入力位置については、表 -1に示す橋軸直角方向9ケース、橋軸方向5ケースを設 定した.地表断層変位の入力範囲は図-4に示すように、 表-1で設定した幅に地盤変位の入力を実施した.

(2) 応答値の算定結果

構築したモデルについて表-1のケースに対して二次元 の静的非線形解析を実施した.各解析結果に対して,地 表断層変位の値と基礎の回転角,部材の発生断面力の関 係について整理を実施した.

なお,解析結果の例としての地表断層変位 3.0m 作用時の最大変形図を図-5 に示す.ここで示す変位量は地表断層変位 3.0m を入力した場合の水平と鉛直方向の合



成の変位量を示す.

a) 基礎の回転角

図-6(a)には橋軸直角方向の地表断層変位とフーチン グ底面の回転角の値を示す.この結果よりフーチング幅 の半分以上(CaseC6以降)に地表断層変位が作用する と,基礎底面は回転せず高架橋が地表断層変位によって 持ち上がる結果となった.

図-6(b)には Type1 から Type3 の橋軸方向の解析結果に おける地表断層変位と基礎の回転角の値を示す.表-1 のケースの解析結果で回転角が最大となるケースの結果 を示す.この結果より,Type1と Type2に発生する回転 角の値に大きな差はみられず,Type3は他のタイプの3 倍程度の回転角の値となった.これは,Type3のラーメ ン高架橋は他のラーメン高架橋と比較して橋軸方向の長 さが短いためである. なお,現在の設計基準¹³における 基礎の回転角の制限値が 0.03rad であることを考えると, 今回の検討で発生した回転角の値は非常に大きな値であ ることが分かる.

b) フーチングの発生断面力

図-7 には橋軸直角方向の解析結果における地断層変 位とフーチングの発生断面力の値を示す.なお、図中に は制限値の目安として曲げ降伏耐力およびせん断耐力の 値を合わせて示す.図-7 の結果より、フーチングの発 生断面力の値は、本検討のように地表断層変位の値が 3m の場合には、地表断層変位の作用位置によらず曲げ 降伏耐力およびせん断耐力を超過することはなかった.



c) 上層梁の発生断面力

図-8 には Typel から Type3 の橋軸方向の解析結果にお ける地表断層変位と上層梁の発生断面力の関係を示す. なお,図-8 では表-1 の各ケースの発生断面力が最大と なったケースの値をタイプごとに示す.

図-8 より、曲げモーメントは Type 1 と Type 2 のラー メン高架橋はわずかでも地表断層変位が作用すると耐力 を超過する結果となった. せん断力については、Type 1 は 0.3m、Type 2 は 1.0m 程度の地表断層変位が作用する とせん断耐力の値を超過することがわかった. Type3 の 発生断面力の値は、他のタイプと比較すると小さく地表 断層変位 3.0m においても曲げ耐力およびせん断耐力を 超過することはなかった. なお、Type1 および Type2 で 曲げモーメントの値が最大となったのはいずれも端部列 に地表断層変位が作用したケース(CaseL1)であり、地 表断層変位によって発生する鉛直方向の力の作用位置か らの距離が長いため上層梁に発生する曲げモーメントの 値が大きくなったことが挙げられる.

d) 地中梁の発生断面力

図−9 には Type2 および Type3 の橋軸方向の解析結果に おける地表断層変位と地中梁の発生断面力の関係を示す. なお,図−9 では表−1 の各ケースの発生断面力が最大と なったケースの値をタイプごとに示す.

図-9 より, Type2 のラーメン高架橋において, 曲げモ ーメントはおよそ 1.0m, せん断力はおよそ 2.0m の地表 断層変位が作用すると耐力を超過する結果となった. Type3 の発生断面力の値は、上層梁同様に Type2 と比較 すると小さく地表断層変位 3.0m においても曲げ耐力お よびせん断耐力を超過することはなかった. なお、 Type2 で曲げモーメントの値が最大となったのはいずれ も端部列に地表断層変位が作用したケース(CaseL1)で あり、上層梁同様に地表断層変位によって発生する鉛直 方向の力の作用位置からの距離が長いため地中梁に発生 する曲げモーメントの値が大きくなったことが挙げられ る.

なお、地中梁の発生断面力を上層梁の発生断面力と比 較すると概ね同等程度の値であるが、地中梁は上層梁に 比べて耐力を超過する地表断層変位の値が大きかったこ とについては、部材厚や配筋の影響と考えている.

(3) 挙動のまとめ

挙動のまとめとして Type2 の CaseL1 と CaseL3, Type3 のラーメン高架橋に地表断層変位が作用した場合の挙動 の概略を図-10 に示す. Type1 については Type2 と挙動 に大きな差は見られなかっためここでは省略する.

Type2の CaseL1 では作用する地表断層変位の値が小さ い場合(図-10(a))には、地表断層変位によって構造物 を押し上げようとする力に対して構造物の重量が抵抗す るため、地表断層変位が作用する柱の周辺のみが持ち上 がろうとするが、地表断層変位の値が大きくなると徐々 に持ち上がる範囲が広くなり、両端の柱のみで構造物を 支持した状態となる.このような状態において Type2の



ラーメン高架橋は,橋軸方向のスパンが長いため,上層 梁の曲げモーメントの値は大きくなり,基礎の回転角は 小さくなる.

また, CaseL3 の場合には,地表断層変位の入力端部 を中心として構造物が持ち上がり始め,地表断層変位の 値が大きくなると,図−10(e)の左側の状態のように構造 物全体が浮き上がり,図−10(f)の状態では地表断層変位 の端部を境に構造物が回転することがわかった.

次に, Type3 は橋軸方向の長さが短く全体の重量が他 のラーメン高架橋より軽いため僅かな地表断層変位でラ ーメン高架橋は持ち上がり始め,徐々に回転することが わかった.全体の重量が軽いことやスパンが短いため, 水平部材に発生する断面力の値は他のタイプと比較して ごく僅かな値となる.

4. 3次元モデルによる静的非線形解析の実施

(1) 解析ケース

3章の2次元の解析において、ラーメン高架橋に地表 断層変位が作用した際の部材や基礎の挙動について確認 することができた.本章では実際の構造物の挙動を評価 するにあたってねじれの影響についても評価する必要が あるため、3次元モデルを用いた静的非線形解析を行な うことで水平部材のねじれの影響について確認を行った.

3次元モデルとして構築した解析モデルを用いてこれ まで同様に、地表断層変位の入力位置をパラーメータと した静的非線形解析を実施する.本章では水平部材での





ねじれの影響が現れやすいように片側の柱のみに地表断 層変位を入力した解析を行なうこととした. 地表断層変 位の入力方法については, 柱単位での地表断層変位の入 力を行うこととして, 表-2 に示す 3 ケースを設定した. 地表断層変位の入力範囲の概念図をは図-11 に示す.

(2) 上層梁のねじれモーメントの確認

3Type のラーメン高架橋について,表-2のケースの静 的非線形解析を行ない,上層梁に発生するねじれモーメ ントの値について整理を行った.解析結果の例としてそ れぞれのラーメン高架橋における Casel の変形図を図-12に示す.

上層梁のねじれモーメントの値と入力した地表断層変 位の関係を図-13 に示す. なお、図-13 では各 Typeのモ デルについて表-2 に示す地表断層変位の入力位置を変 化させた解析結果のうち、ねじれモーメントの最大値を





(a) Type1_Case1 最大変位 3.693m

(b) Type2_Case2 最大変位 3.421m



(c) Type3_Case3 最大変位 4.114m図-12 3 次元解析結果の最大変形図の例

地表断層変位の入力値ごとに示す.

図-13 の結果より, Type 1 は他のケースと比較すると 非常に大きなねじれモーメントが発生していることがわ かる.また, Type3 はねじれの影響が小さいことがわか る.これらの結果より, Type 2 や Type 3 のような地中梁 を有するラーメン高架橋の場合は,上層梁に発生するね じれモーメントの大幅な低減が可能であることがわかっ た.

5. まとめ

本検討では、ラーメン高架橋に鉛直方向の地表断層変 位が作用した場合の挙動を確認すために、地中梁の有無 をパラメータとした2タイプのラーメン高架橋と地表断 層変位に有効と考える張出し式1径間のラーメン高架橋 について2次元と3次元の静的非線形解析を行った.そ の結果、以下のような知見が得られた.

- ・ 地表断層変位が基礎の安定に及ぼす影響は大きい
- ・ 地表断層変位が構造部材へ与える影響は、フーチン グ部材では小さく、上層梁や地中梁では大きい
- Type 3の1径間のラーメン高架橋は、他のラーメン 高架橋と比較すると、部材の損傷は大幅に小さくなる
- ねじれの影響については地中梁を有することで大幅
 に低減することが可能である

このような結果より、Type3のラーメン高架橋は、地 表断層変位が作用した場合に基礎に大きな変形は発生す



るものの,部材の配筋を調整することなど軽微な諸元の 変更によって,構造部材としての被害は抑えることが可 能と言える.部材の損傷を抑えることで梁部材の破壊な どによって軌道面が破壊し,列車が下層へ落下するとい った最悪の事態を免れること可能となる.したがって, Type3 の高架橋は基礎の変形を許容することで地表断層 変位に対して有効な構造型式となり得ることが分かった. ただし,このような1径間のラーメン高架橋は、中小規 模の地震時の走行安全性の問題や,地震時以外における メンテナンスや景観の問題が考えられる.これらの問題 それぞれに対して個別に改善していくことで,Type3 の ラーメン高架橋は地表断層変位が作用した状態のみなら ず,総合的に優れた構造形式となる.

今後は、慣性力の影響を考慮した検討を行うとともに、 地表断層変位の入り方についても検討を行いたい.

参考文献

 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 ウム公演論文集, pp409-416, 1999.12

- 2) 川島一彦,家村浩和,庄司学,岩田秀治:1999 年集 集地震(台湾)における道路橋の被害,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 ポジウム公演論文集,pp425-432,1999.12
- 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, 2015.7
- 国土交通省鉄道局監修,鉄道総研編:鉄道構造物等 設計標準・同解説(耐震設計),2012.9
- 5) 常田賢一:土木構造物における地震断層変位の工学 的対応に関する考察,土木学会論文集,No.752/I-66,63-77,2004.1
- 室野剛隆,弥勒綾子,紺野克昭:断層交差角度に着 目した橋梁の挙動に関する基礎的研究,土木学会地 震工学論文集,2003.6
- 7) 下山田英介,川島一彦:断層変位を受ける杭基礎構造物の耐震性に関する検討,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公演論文集,pp425-432,2002.1
- 8) 矢葺亘,野口邦生,真崎洋三,越智大三:断層変位

を受ける PC ラーメン橋の耐震安全性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.25,No.2, 2003

- 9) 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 (構造・地震工学), vol.65,417-425, 2009
- 10) 浦川洋介,吉川卓,大塚久哲,角本周:橋軸直角方向の断層変位に対する連続ラーメン橋の地心性能に関する一検討,第9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公演論文集,2006.2
- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解
 説 設計計算例 RC ラーメン高架橋(場所打ち 杭),2014.3
- 2) 翠川三郎,三浦弘之:内陸地震による地表での断層 変位分布,日本建築学会構造工学論文集,vol.50B, 2004.3
- 13) 国土交通省鉄道局監修,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),2012.1

(受付)

EVALUATION OF THE IMPACT OF THE SURFACE FAULT DISPLACEMENT ON RAILWAY RIGID FRAME VIADUCTS WITH BASE FOUNDATION

Atsushi HINO, Yoshitaka MURONO and Sumio SAWADA

From past seismic damage, it was confirmed that extensive damage to civil engineering structures by the surface fault displacement was severe. Therefore, the structures should ideally be built in ways to avoid a surface fault displacement. However, for linear structures such as railway structures, it may be impossible to avoid building near a fault. In the field of railway, the study on the mechanism about bridge collapse due to strike-slip fault, and the examination of seismic design method taking into account surface fault displacement have been conducted.

In this study, to grasp the behavior of ramen viaduct under the action of vertical surface displacement caused by vertical dislocation of a fault, 3 types of ramen viaducts were examined based on static nonlinear analysis. As a result, the extent of impact on the ramen viaducts was confirmed, which was caused by surface fault displacement. Moreover, it was understood that the 1span ramen newly devised was effective against surface fault displacement