

断層を跨ぐ鉄道ラーメン高架橋の 地震時挙動に関する基礎的検討

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 地震応答制御研究室
(〒186-8540 東京都国分寺市光町3-4-1)

²正会員 工博 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒186-8540 東京都国分寺市光町3-4-1)

³正会員 工博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ床)

1. はじめに

これまでの地震被害において、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挙げられる。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。また、明治以降の我が国においては1891年の濃尾地震において水平で8.0m、鉛直で4.0mの最大変位量を観測しており、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、断層上または断層近傍の構造物は、地表断層変位による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⁵⁾。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、地震随件事象として「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⁾が示されており、これらの方法はいずれも「追従する」といった方針に当てはまる対策方法である。現状において地表断層変位の影響が想定される範囲での鉄道構造物の建設は、これらの考え方をもとに行わ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), 7)-10)}。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には、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、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

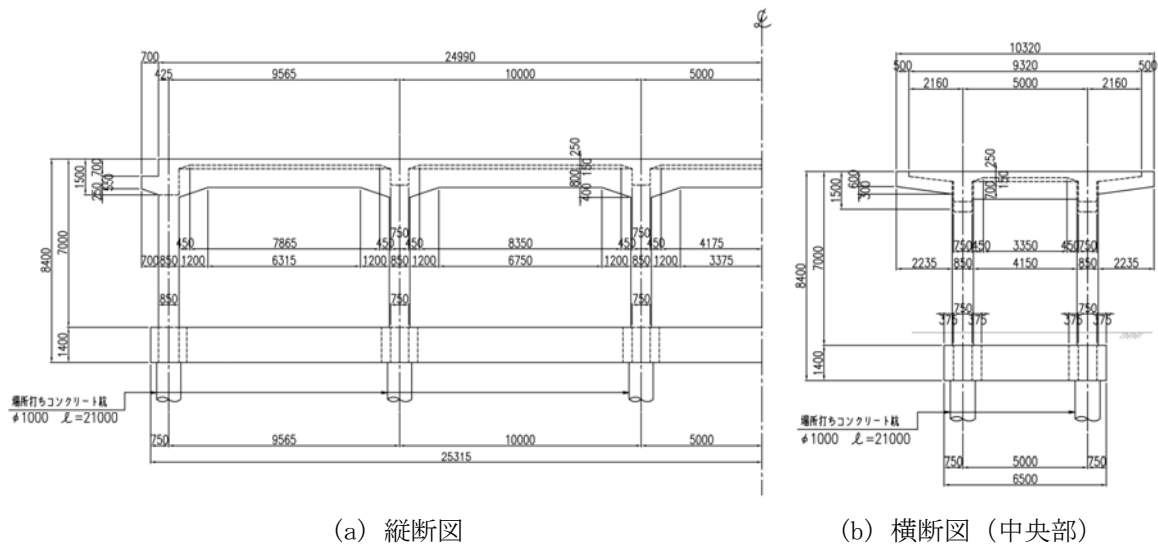


図 1 検討対象の基とした構造一般図

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. 検討条件の整理および構造物のモデル化

(1) 検討対象とする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。

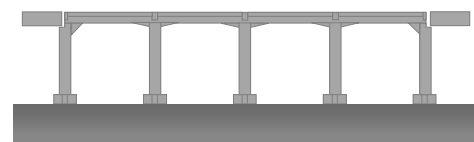
Type1：一層4径間の地中梁ラーメン高架橋

Type2：一層4径間の地中梁を有するのラーメン高架橋

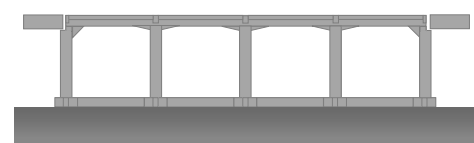
Type3：一層1径間の地中梁を有するラーメン高架橋（張出し式）

Type1 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、端部を張出し式にして桁の無い構造としたことで、落橋のリスクを除いた構造である。

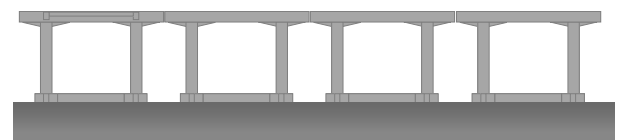
なお、図1の検討の基となるラーメン高架橋は杭基礎形式であるため、基礎形式を直接基礎に変更した。直接基礎の支持地盤の条件は砂質土の N 値は30の地盤とした。フーチングの大きさは、基礎の地



(a) Type1 一層4径間（地中梁無）



(b) Type2 一層4径間（地中梁有）



(c) Type3 一層1径間（地中梁有）

図2 検討対象のラーメン高架橋の概念図

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) 検討で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

表 1 地表断層変位の入力ケース

(a) 橋軸直角方向

	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
CaseC9	6.5

(b) 橋軸方向

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

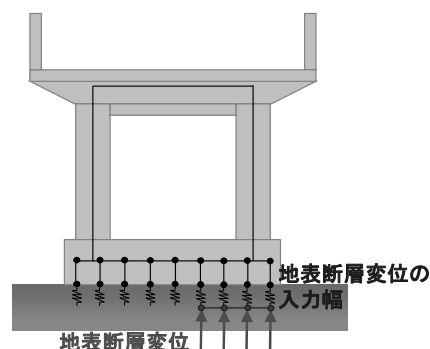
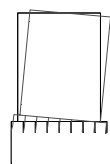
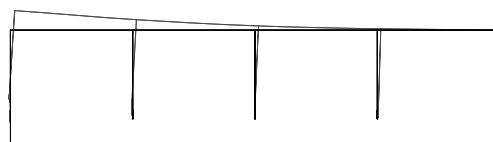


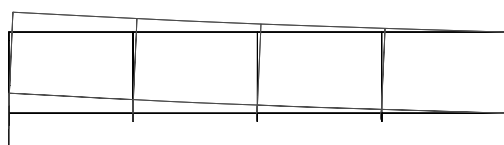
図 3 地表断層変位の入力方法



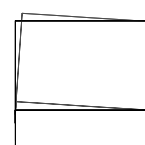
(a) CaseC1 最大変位 5.136m



(b) Type1_CaseL1 最大変位 3.020m



(c) Type2_CaseL1 最大変位 3.002m



(d) Type3_CaseL1 最大変位 3.499m

図 4 二次元解析結果の最大変形図の例

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。

(3) 検討モデルおよび解析ケースについて

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、二次元の静的非線形解析を行う。なお、静的非線形解析は、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。

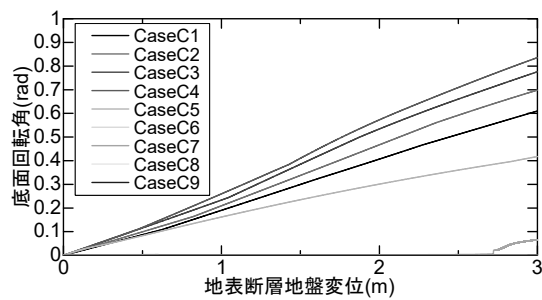
なお、本検討では底面の鉛直方向のばねのうち地表断層変位を入力する位置（地盤に押し上げられる位置）には上限値は考慮せず線形のばねとしてモデル化した。これは鉄道標準（基礎構造物）¹³⁾の地盤

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。

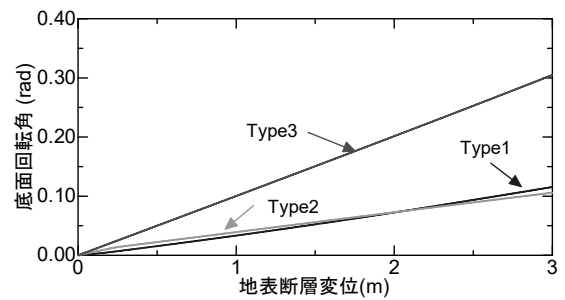
地表断層変位の入力位置はそれぞれのモデルについて、表1に示すような橋軸直角方向9ケース、橋軸方向5ケースを設定した。地表断層変位の入力方法は図3に示すように、基礎底面の地盤ばねを介して強制変位として入力を行った。なお1stepあたりの地表断層変位の入力は、解析に考慮する地表断層変位3.0mを12000分割して0.25mmの強制変位として与えた。

3. 静的非線形解析による応答値の算定

構築したモデルについて二次元解析を行い、地表断層変位の値と部材の発生断面力、基礎の回転角について整理した。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4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。

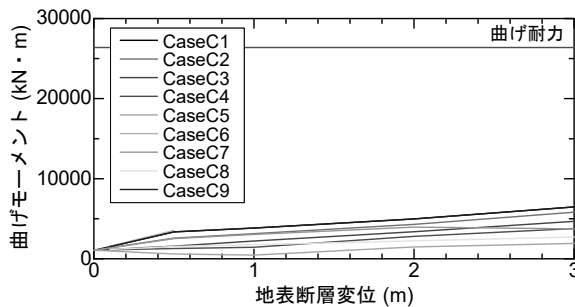


(a) 橋軸直角方向

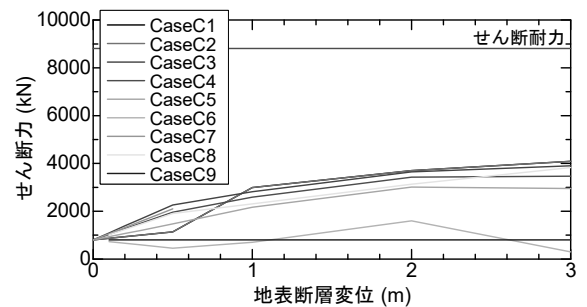


(b) 橋軸方向

図5 フーチング中心の回転角の分布

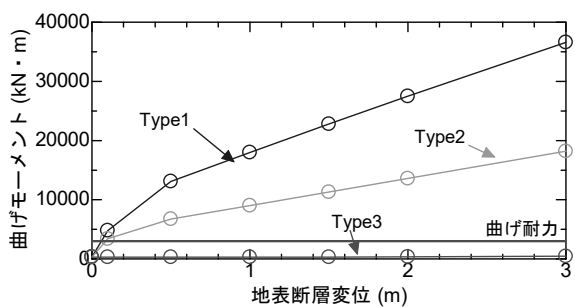


(a) 曲げモーメント

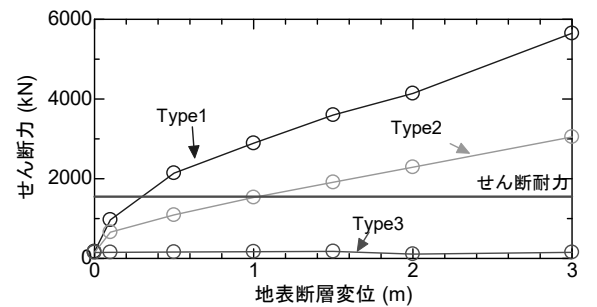


(b) せん断力

図6 フーチングの発生断面力の分布（橋軸直角方向）



(a) 曲げモーメント



(b) せん断力

図7 上層梁の発生断面力の分布（橋軸方向）

(1) 基礎の回転角

図5(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持ち上がるのがわかった。図5(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。

(2) フーチングの発生断面力

図6には橋軸直角方向の解析結果における地表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6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。

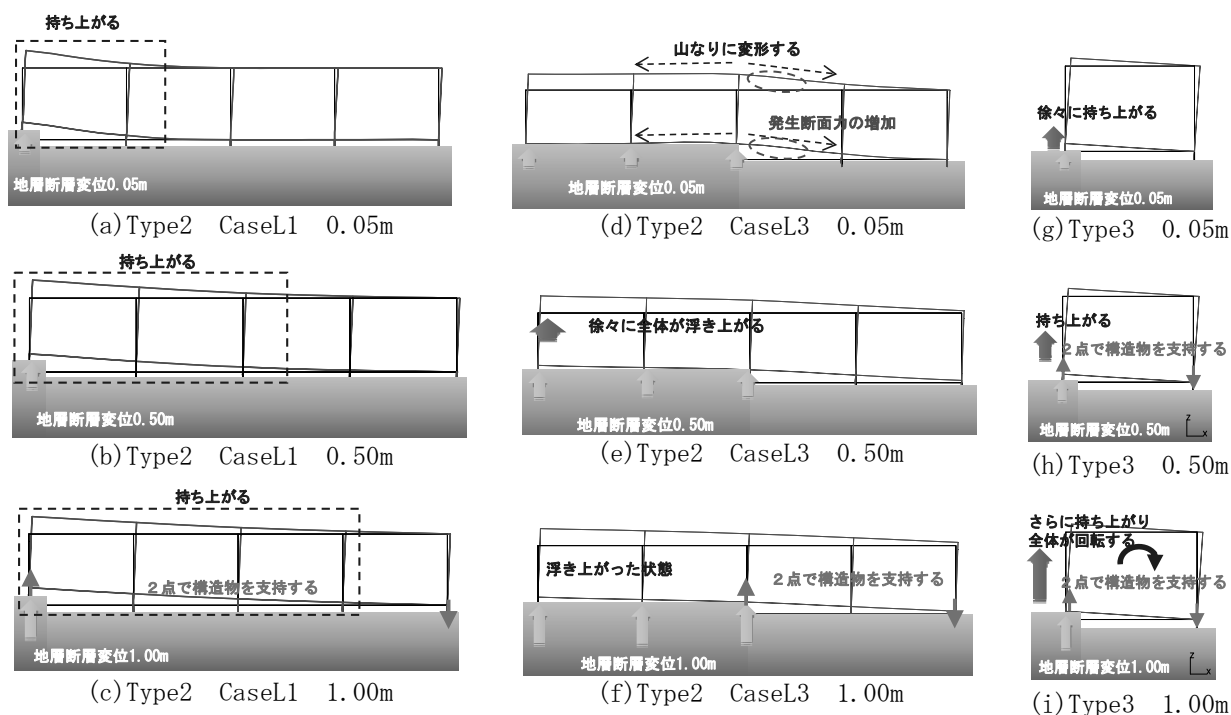


図8 主な挙動のまとめ

(3) 上層梁の発生断面力

図7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上層梁の発生断面力の関係を示す。なお、図7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4より、曲げモーメントはType1とType2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、Type1は0.3m、Type2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。

なお、Type2とType3の地中梁に発生する断面力についても確認を行ったところ、上層梁と同様の傾向が確認できた。

(4) 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8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8(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りようとするが、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8(e)の左側の状態のように構造物全体が浮き上がり、図8(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. 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るために、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二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非常に大きいことが分かった
- ・ 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ことがわかった
- ・ 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ことがわかった

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形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

- 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
- 3) 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
- 4) 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
- 6) 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
- 11) 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
- 12) 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