

## 地表断層変位を考慮した鉄道構造物の評価手法 に関する基礎的検討

日野 篤志<sup>1</sup>・室野 剛隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 （株）ジェイアール総研エンジニアリング 構造技術部  
（〒186-0002 東京都国立市東1-4-13）

<sup>2</sup>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）

### 1. はじめに

一般的な鉄道構造物の耐震設計では、幾何学的非線形性は数値解析に直接考慮されておらず、その影響は、部材の耐力評価<sup>1)</sup>に取り入れられていることや、基礎の変形を一定の範囲内に抑えることで無視することができることとなっている。これは、現行の耐震設計法が地震動の揺れを対象としたものであり、設計実務者が容易に耐震設計を行うためである<sup>1)</sup>。しかしながら、地震による被害の一つである地表断層変位を対象とする場合には、この限りではない。

地表断層変位の値は、地震規模や断層パラメータや表層地盤の条件によっては異なるものの、1999年の台湾の地震被害においては、地表面位置において最大で10m程度の変位が発生した事例がある<sup>2) 3)</sup>。このような大規模な断層変位が構造物位置において発生した場合には、構造物には数メートル規模の変形が生じる可能性があり、構造物の倒壊や桁の落橋などといった被害が発生する可能性が高い。そのような状況に対して、現行の鉄道構造物基準<sup>4)</sup>では、地表断層変位を地震随伴事象とした扱いとしており、体系立てた対策法は示せていないのが現状である。

そこで、地表断層変位を対象とした耐震設計法を確立させるための基礎的な検討として、構造物が地表断層変位によって大規模な変形が生じた際の挙動の評価手法について幾何学的非線形性の影響に着目した検討を行うこととした。本稿では、一般的な鉄道構造物であるラーメン高架橋を対象に数値解析を実施し、地表断層変位が作用した際の挙動評価における幾何学的非線形性の有無が与える影響について



図-1 対象構造物の概念図

分析を行った。なお、検討には、著者らが地表断層変位に対して損傷の低減が可能なラーメン高架橋の構造形式として提案している張出し式1径間のラーメン高架橋<sup>5) 6)</sup>についてもその影響の比較を行うこととした。

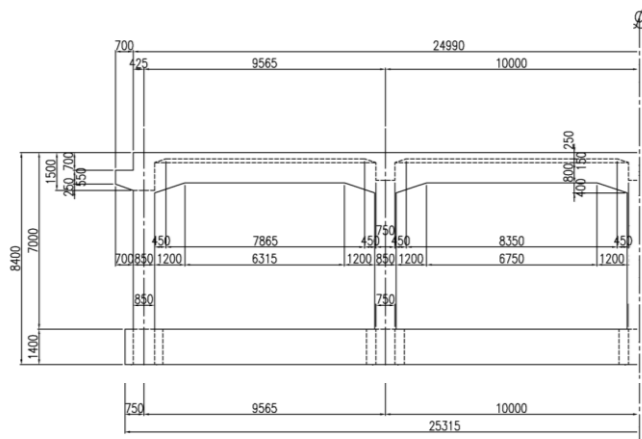
### 2. 検討内容

#### (1) 対象構造物の設定

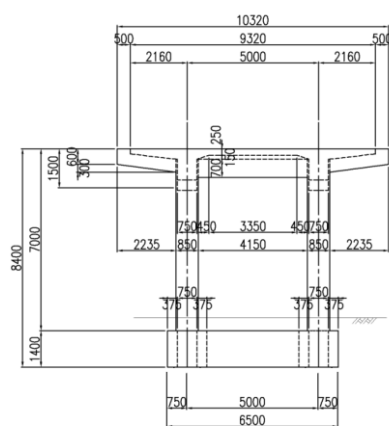
本検討には、既往の検討<sup>6)</sup>と同様に径間数の異なる2タイプのラーメン高架橋を用いることとする（図-1）。なお、これらのラーメン高架橋は現行の耐震基準を満足するように設計された柱高さ約8m、橋軸方向スパン10mの鉄道高架橋を用いることとした（図-2）。

Type1：一層4径間ラーメン高架橋

Type2：一層1径間張出し式ラーメン高架橋



(a) 縦断面図



(b) 横断面図（中央部）

図-2 検討対象の基とした構造一般図

Type1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。Type2は地表断層変位に対して有効な高架橋形式として提案している1径間張り出し式のラーメン高架橋であり、径間数を短くしたことで発生断面力の低減や、端部を張り出し式にすることで桁の落下を防止することが可能であることや、径間ごとに構造が独立しているため、被災時にも損傷したブロックのみの修復がかのうとなり復旧性にも優れた構造という特徴を持つ。

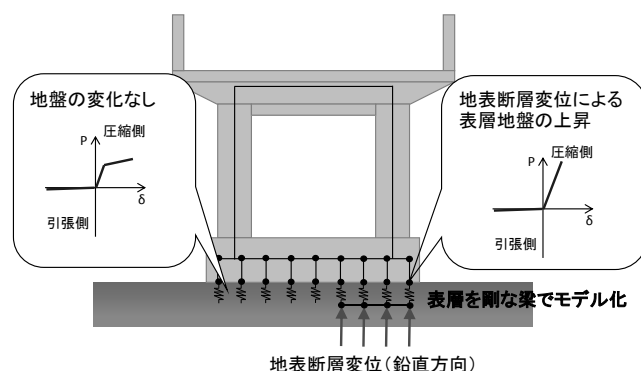


図-3 地盤ばねのモデル化の概念図

## (2) 解析条件

2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こととした。

### a) 構造物のモデル化

解析モデルは、橋軸方向、橋軸直角方向についてそれぞれ鉄道構造物の設計で一般的に用いられている梁ばねモデルとして構築した。非線形性については、柱や梁といったRC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した。基礎と地盤の相互作用ばねの設定には、鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）<sup>45</sup>に準拠してばね定数および上限値の算出を行った。

なお、底面の鉛直方向のばねはバイリニア型の非線形性を示すが、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することとした（図-3）。これは、地表断層変位を入力する側の地盤ばねに非線形性を設定すると、構造物に作用する断層変位の値に頭打ちを設けることとなり、構造物に作用する断層変位の値を過小評価してしまうためである。

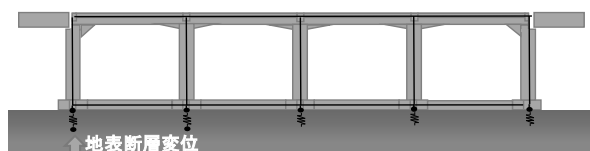


図-4 地表断層変位の入力位置

### b) 解析に用いる地表断層変位の設定

解析で考慮する地表断層変位の値は、これまでの観測事例に基づく地表断層変位分布の結果<sup>8)</sup>より、鉛直方向に十分大きな値として3.0mとした。構造物に対して地表断層変位の作用位置は、既往の検討結果をもとに設定した。既往の検討においては、地表断層変位の入力位置をパラメータとした検討を実施しており、部材の発生断面力が最も大きくなる入力位置として、構造物端部位置のみに地表断層変位が入力される条件であった（図-4）。そこで、本検討においては、幾何学的非線形性の影響による発生断面力の変化について確認を行うため、既往の検討における発生断面力が最大となる条件で地表断層変位の入力を行うこととした。

なお、実際に地表断層変位が構造物に作用する場

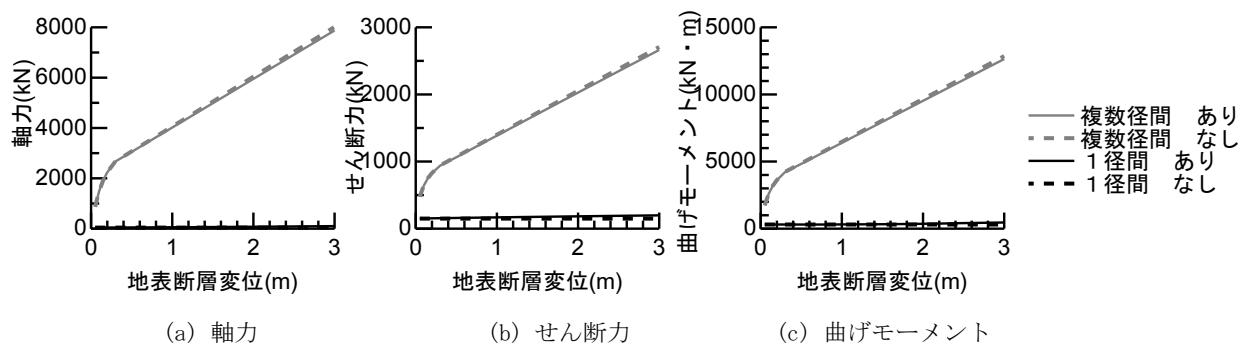


図-5 地表断層変位と上層梁の発生断面力の関係

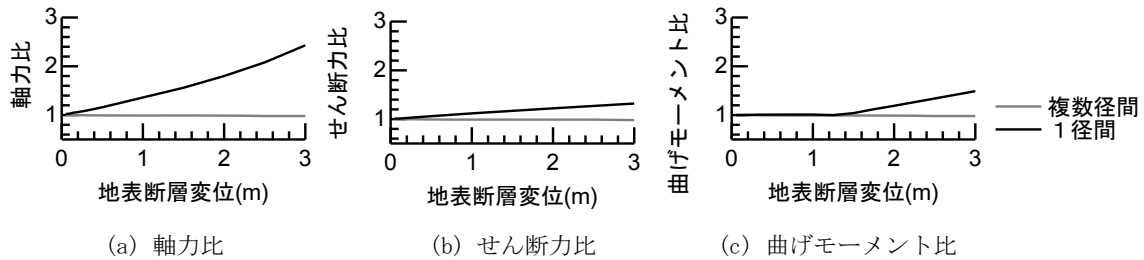


図-6 地表断層変位と上層梁の発生断面力比の関係

合には、表層付近での地盤の塑性化の影響により鉛直方向の変位が深さ方向に変化することが考えられるが、本検討が幾何学的非線形性の違いによる影響を評価することが目的であることから構造物への地表断層変位の入力方法については、表層地盤の塑性化の影響やRC部材の非線形化の影響を無視することとした。

### 3. 静的非線形解析による幾何学的非線形性の影響の確認

幾何学的非線形性の有無をパラメータとした静的非線形解析結果より、上層梁、地中梁、柱の発生断面力について整理を行った。以降では、部材ごとの発生断面力の最大値について地表断層変位の入力値との関係を示す。なお、紙面の都合上、橋軸直角方向の結果は省略する。

#### (1) 発生断面力の比較

##### a) 上層梁

図-5に地表断層変位と上層梁の発生断面力の値をそれぞれ示す。この結果においては、軸力、せん断力、曲げモーメントいずれの値も幾何学的非線形性の有無による差はわずかであった。なお、いずれの値も幾何学的非線形性を考慮することで発生断面力の値がわずかながら減少していることがわかった。

また、図-5の結果より、既往の検討と同様に1径間のラーメン高架橋は、複数径間のラーメン高架橋と比べて発生断面力の大幅な低減が可能であることがわかる。

次に、幾何学的非線形性の有無による影響について、発生断面力の比率（あり/なし）を図-6に示す。この結果より複数径間の場合には、地表断層変位の入力値に対して幾何学的非線形性による発生断面力の増加は小さく、概ね一定の値となっていることがわかる。なお、1径間の場合には比率としては大きくなるものの、発生断面力の値が非常に小さいため、幾何学的非線形性の有無による影響は小さいものと判断できる。

##### b) 地中梁

地中梁についても上層梁同様に幾何学的非線形性の有無による発生断面力の確認を行った。図-7に発生断面力の値を示す。この結果より、上層梁同様にいずれの発生断面力の値も幾何学的非線形性の影響を考慮すると発生断面力は低下する結果となった。また、1径間の場合の発生断面力も複数径間と比べて大幅に小さくなることが確認できた。

次に、幾何学的非線形性の有無による発生断面力の比率を図-8に示すが、複数径間の場合には発生断面力の増加の割合は小さく、1径間の場合に大きくなる結果となった。なお、軸力比については径間数の違いによる影響はわずかであった。

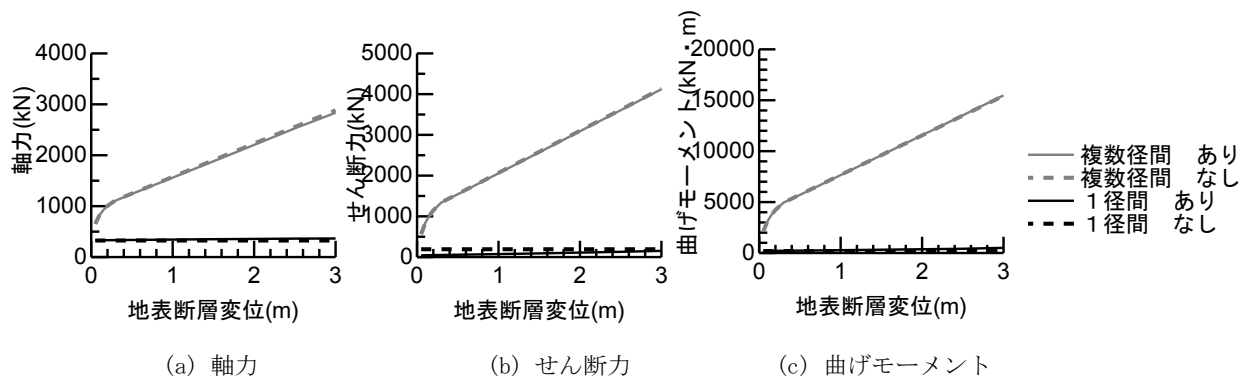


図-7 地表断層変位と地中梁の発生断面力の関係

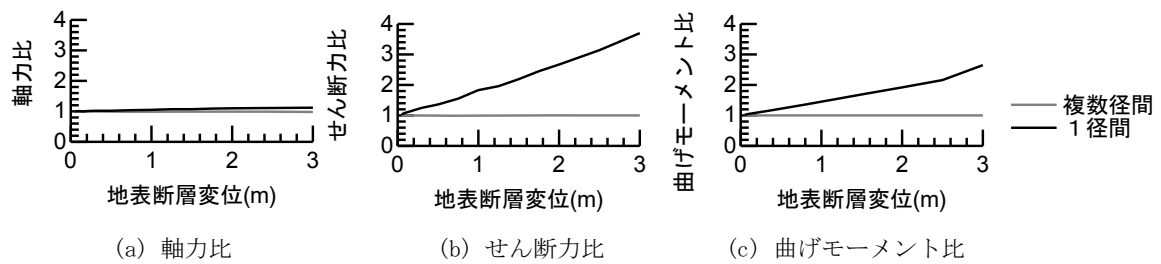


図-8 地表断層変位と地中梁の発生断面力比の関係

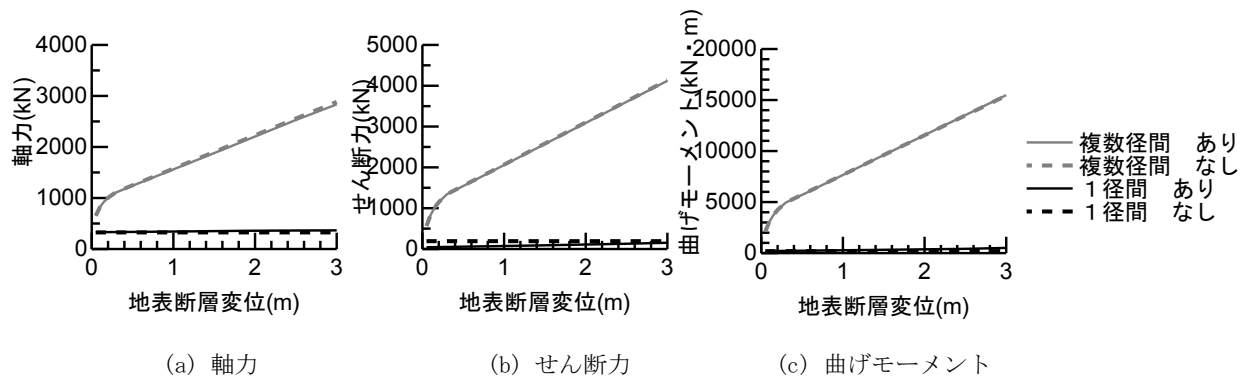


図-9 地表断層変位と柱の発生断面力の関係

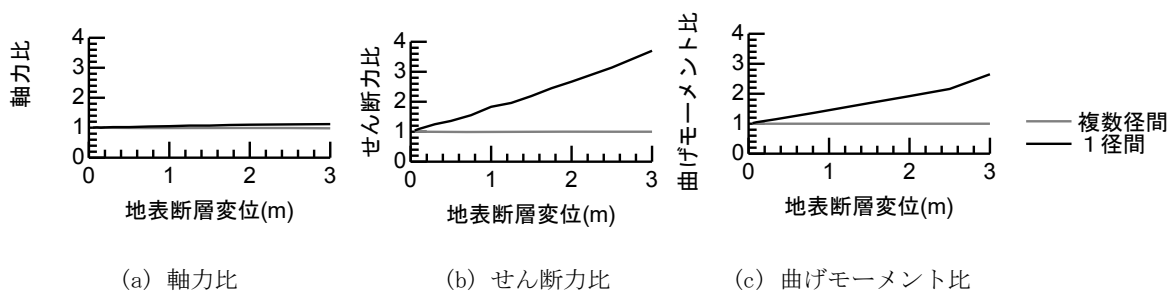


図-10 地表断層変位と柱の発生断面力比の関係

### c) 柱

柱についても幾何学的非線形性の有無による発生断面力について確認を行った。地表断層変位と柱の発生断面力の関係を図-9に示す。この結果より、柱も他の部材同様の傾向を示し、幾何学的非線形性を

考慮すると発生断面力が低下する傾向を示した。径間数の違いによる影響も同様で、1径間の場合には発生断面力を大幅に低減することが可能である。

幾何学的非線形性の有無による比率も他の部材と同様の傾向であり、1径間の場合が比率としては大

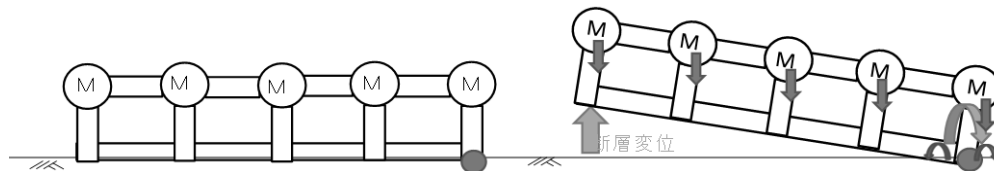


図-11 複数径間モデルにおける幾何学的非線形性の影響

きくなるものの、発生断面力の絶対値が小さいことを勘案するとその影響は小さいと判断できる。

## (2) 影響の評価

以上の結果より、上層梁、地中梁、柱に発生する断面力の値について、幾何学的非線形性による影響は非常に小さいことがわかった。径間数の違いによる影響としては、1径間モデルの場合は、幾何学的非線形性の考慮による影響は比率としては大きくなるものの、その値としては小さいことがわかった。また、部材ごとの結果としてもいずれの部材も同様の傾向を示す結果となった。

したがって、本検討のようにラーメン高架橋の線路方向断面の場合には、幾何学的非線形性の影響は小さく、場合によっては発生断面力を抑える効果が確認された。これは、図-10に示すように上層梁を例にとると地表断層変位によって発生断面力が最も大きくなる位置は、地表断層変位作用位置の逆側の端部であり、その位置には地表断層変位によって時計回りのモーメントが発生する。それに対して、幾何学的非線形性を考慮したことによって、地表断層変位の作用位置から、端部までの質量による付加モーメントは反時計まわりのモーメントとなる。したがって、複数径間の場合には、幾何学的非線形性を考慮することで、地表断層変位によるモーメントと逆向きのモーメントが多く発生することが、発生断面力の比率が小さくなった原因と考察している。一方で、1径間の場合には、幾何学的非線形性による反時計まわりのモーメントも発生するものの、それと同程度のモーメントが時計まわりに作用するため、幾何学的非線形性の影響による効果が大きくなったと考えられる。

認するために、静的非線形解析を実施した。その結果、以下のような知見が得られた。

- ・ 線路方向のラーメン高架橋の場合には、幾何学的非線形性を考慮すると、発生断面力を小さく評価するかの可能性がある
- ・ 幾何学的非線形性が構造物の発生断面力に与える影響は、上層梁、地中梁、柱といった部材ごとの違いはわずかであった
- ・ 1径間のラーメン高架橋は、複数径間のラーメン高架橋と比べて幾何学的非線形性の影響による発生断面力の比率は大きくなるものの、発生断面力の絶対値が小さいため、影響はないものと判断できる
- ・ ラーメン高架橋の線路方向のようにスパンの長い構造物の場合には、構造物の重量が地表断層変位による発生断面力を抑制する効果をもつ

したがって、本検討のようにラーメン高架橋を対象とした線路方向の検討で、構造部材が塑性化しない条件においては、構造物の設計を行う際に、幾何学的非線形性の影響を無視することが可能と考えられる。ただし、部材が降伏するような場合には、幾何学的非線形性の影響によって局所的な損傷（変形）が進む可能性が考えられるため、部材が降伏するような場合には注意が必要である。

また、今後は幾何学的非線形性の影響が大きいと考えられる橋脚について、ラーメン高架橋同様に断層変位が採用した際の挙動を評価し、同様の検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 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（コンクリート構造物），2004
- 2) 幸左賢二，森伸一郎，沼田淳紀，大原繁：台湾地震による台中付近の橋梁被害概要，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

## 4. まとめ

本検討では、地表断層変位の作用する構造物の挙動評価における幾何学的非線形性の影響について確

ム講演論文集, pp421-424, 1999

- 3) 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  
ポジウム講演論文集, pp425-432, 1999
- 4) 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(耐震設計), 2012
- 5) 日野篤志, 室野剛隆: 縦ずれ断層の影響を受けにく  
いラーメン高架橋形式の提案、鉄道総研報告  
Vol.31, No.7 pp47-52, 2017
- 6) 日野篤志, 室野剛隆, 澤田純男: 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, 第36回地震工学研究発表会論文集
- 7) 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.
- 8) 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