

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

日野 篤志* 室野 剛隆**

Proposal of a New Type of Rigid Frame Viaduct Insusceptible to a Reverse Fault

Atsushi HINO Yoshitaka MURONO

For linear structures such as railway structures, it may be impossible to avoid building near a fault. Therefore, we have been studying strike slip faults. In this study, we evaluated the behavior of the rigid frame viaducts against the vertical surface fault displacement initiated by a reverse fault in order to propose an effective structure type for viaducts against such fault displacement. We studied three types of the viaduct; two types with many usage records and one type proposed in this study. As a result, we confirmed the effectiveness of the proposed type, one-span extension type viaduct, against the vertical surface fault displacement.

キーワード：地表断層変位，ラーメン高架橋，直接基礎，1径間，張出し式

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に甚大な被害が確認され、地表断層変位の脅威を改めて認識した^{1) 2)}。地表断層変位は、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特徴であり、その変位量については、台湾集集地震においては最大で10mにも及ぶ極めて大きな値を記録している。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の最大変位量が観測されている。また、2016年に発生した熊本地震においても、幸いにして土木構造物への被害は確認されなかったものの横ずれ断層による水平方向に2.0m程度の地表断層変位が発生している³⁾。そのため、多数の内陸活断層が存在する我が国においては、土木構造物として地表断層変位への対策を講じる必要がある。しかしながら、地表断層変位への対策は変位量の予測の難しさなどから容易ではなく、土木構造物としては地表断層変位の影響を受けないように構造物を建設することが望ましい⁴⁾。

一方で、線状構造物である鉄道構造物の場合には、路線の線形の関係から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。そのような状況に関して、鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）（以下、耐震標準と呼ぶ）⁵⁾では、地震随伴事象として地表断層

変位を扱っており、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。

また地表断層変位を対象とした構造物被害に関する既往の研究では、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^{6) ~ 10)}。ただし、断層破壊の形態には、横ずれの他に縦ずれによるものがあるものの、縦ずれによる検討を行なった事例は少なく、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多い。

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を対象として、縦ずれに伴う鉛直方向の地表断層変位に対する挙動の評価を行なうとともに、地表断層変位の影響を受けにくい高架橋形式の提案を行なう。ラーメン高架橋のような構造形式の場合には、鉛直方向の地表断層変位が作用することで、上層梁や地中梁といった水平部材に変形が生じ構造物全体系が崩壊することが考えられる。

検討内容としては、3タイプのラーメン高架橋についてモデル化を行い、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により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、使用実績の多い2タイプとして地中梁の有無をパラメータとしたラーメン高架橋と、地表断層変位に対して有効と考える形式として本検討用に考案した張出し式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

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
（現：株式会社ジェイアール総研エンジニアリング）

** 鉄道地震工学研究センター

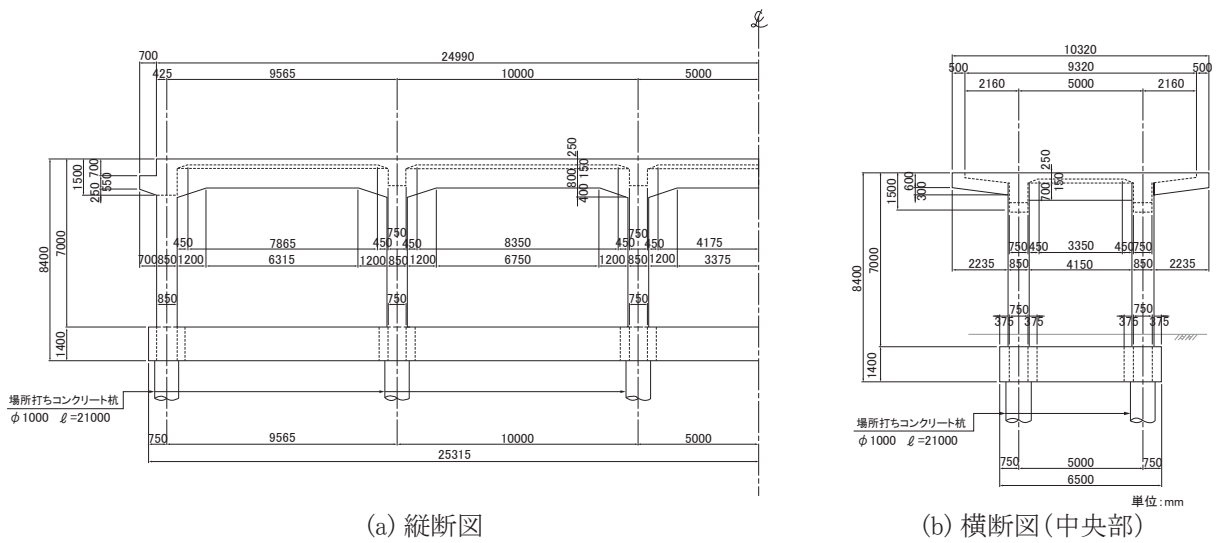


図1 検討対象の基とした構造一般図

では、地表断層変位が作用した場合のラーメン高架橋の挙動をラーメン高架橋の形式ごとに評価することを目的としているため、作用としては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、慣性力が構造物に及ぼす影響は、一般的な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

2.1 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、端部を張出し式としてゲルバー桁を省略したことで、落橋のリスクがゼロになること、仮に地表断層変位によって被害を受けたとしても1径間ごとに独立しているため被害箇所のみでの復旧が行なえることといった特徴を有した構造である。

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N値30の砂質土地盤とした。

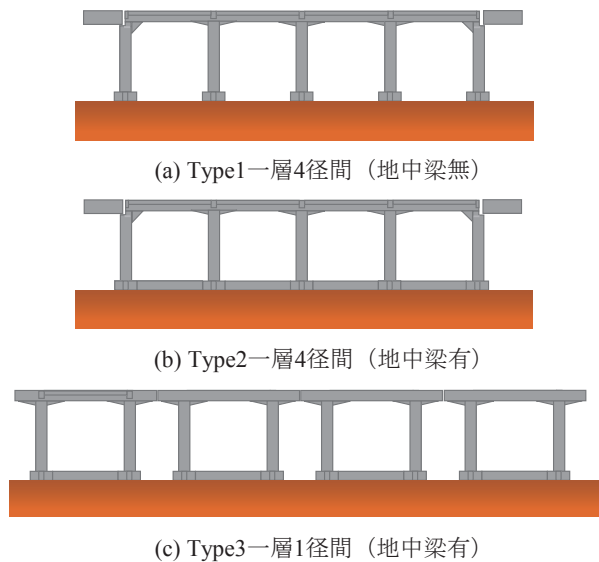


図2 検討対象のラーメン高架橋の概念図

フーチングの大きさは、基礎の地震時の安定性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と設定した。

2.2 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、沖積層の厚さなど、多くの要因が関係しており、地表断層変位を考慮した構造物の耐震設計では、考慮する変位量の設定を慎重に行う必要がある⁴⁾。ここでは、構造物の径間数や地中梁の有無をパラメータとした地震時挙動の相対比較を目的としているため、考慮する地表断層変位の値は想定される中で十分大きな値として鉛直方向に3.0mの値を設定した。

地表断層変位の値については、文献12)においてこれまでの観測事例に基づく地表断層変位分布がまとめ

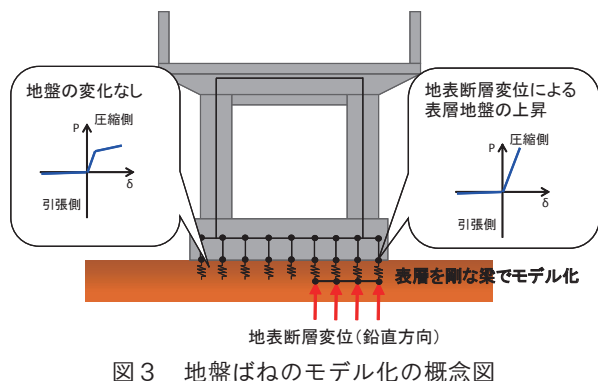


図3 地盤ばねのモデル化の概念図

られており、 $M_w7.5$ 程度の場合には地表断層変位が 10m を超えた地点も存在しているが、地表断層変位が 3.0m を超えた地点は全体の 30% 程度である。一方で、 $M_w7.0$ 程度の場合には地表断層変位が 3.0m 超過する割合は数パーセントに留まることがわかっている。耐震標準における L2 地震動スペクトルⅡの震源規模が $M_w7.0$ としていることから、今回の検討に用いる 3.0m という値は十分に大きな値であることが分かる。

2.3 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、幾何学的非線形性を考慮した 2 次元の静的非線形解析を行う。

解析モデルは、鉄道構造物の一般的な構造解析に用いられている梁ばねモデルを用いて橋軸方向、橋軸直角方向について構造物のモデル化を行った。部材の非線形性の設定については、本研究の主目的が地表断層変位を対象とした耐震設計では無く、地表断層変位を受けた場合の構造物の挙動評価にあるため、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要素としてモデル化した。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パ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、鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）（以下、基礎標準と呼ぶ）¹³⁾ に準拠してばね定数および上限値の設定を行った。

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）については上限値を考慮せず線形のばねとしてモデル化した（図3）。これは基礎標準の地盤ばねが、上限値に達した後 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、2.2 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。

表 1 地表断層変位の入力ケース

(a) 橋軸直角方向		(b) 橋軸方向	
	入力幅 (m)		入力幅 (m)
CaseC1	0	CaseL1	0
CaseC2	0.8	CaseL2	10
CaseC3	1.7	CaseL3	20
CaseC4	2.5	CaseL4	30
CaseC5	3.3	CaseL5	40
CaseC6	4.1		
CaseC7	4.9		
CaseC8	5.7		
CaseC9	6.5		

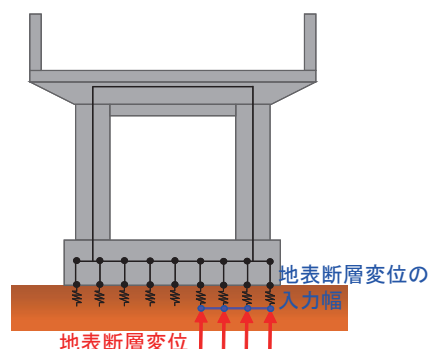


図4 地表断層変位の入力範囲の例（橋軸直角方向）

3. 静的非線形解析による挙動の評価

3.1 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で設定した幅の地盤変位を入力した。なお、橋軸直角方向の検討では、対象の 3 タイプの構造形式の違いが少ないため Type2 の直角方向のモデルを用いて挙動の評価を行うこととし、構造形式の違いについては評価を行っていない。

3.2 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行った。なお、橋軸方向の結果については、構造形式の違いによる影響を評価するためにいずれも表1の解析ケースのうち、発生断面力が最大となったケースの結果を示す。また、フーチングや上層梁といった部材は、線形部材として扱っており非線形化による影響を無視しているため、発生断面力の大きさの目安として元の設計における部材ごとの曲げ降伏耐力およびせん断耐力

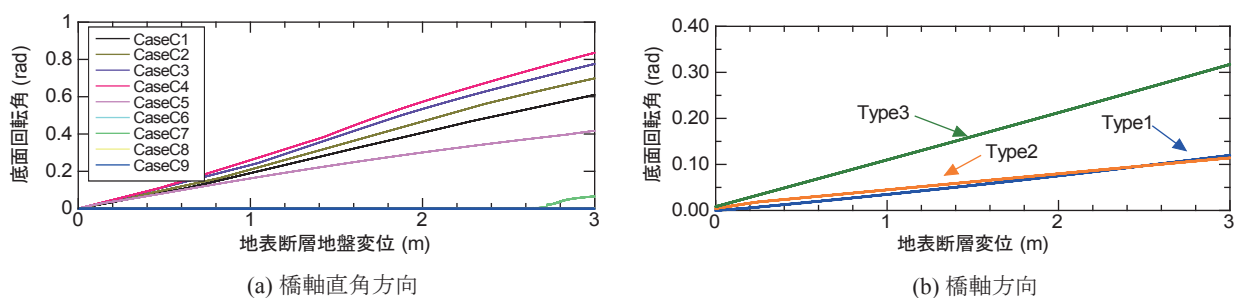


図5 フーチング中心の回転角の分布

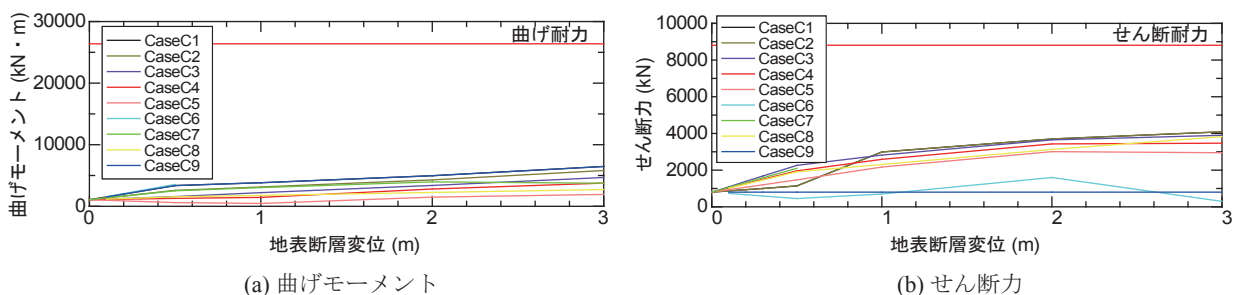


図6 フーチングの発生断面力の分布（橋軸直角方向）

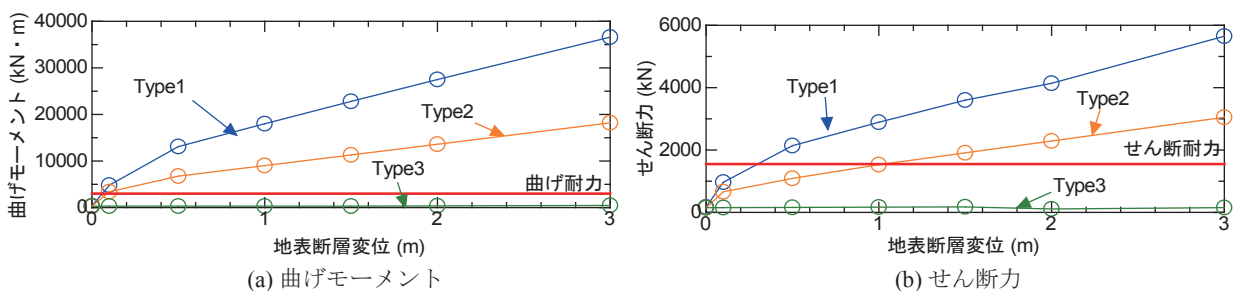


図7 上層梁の発生断面力の分布（橋軸方向）

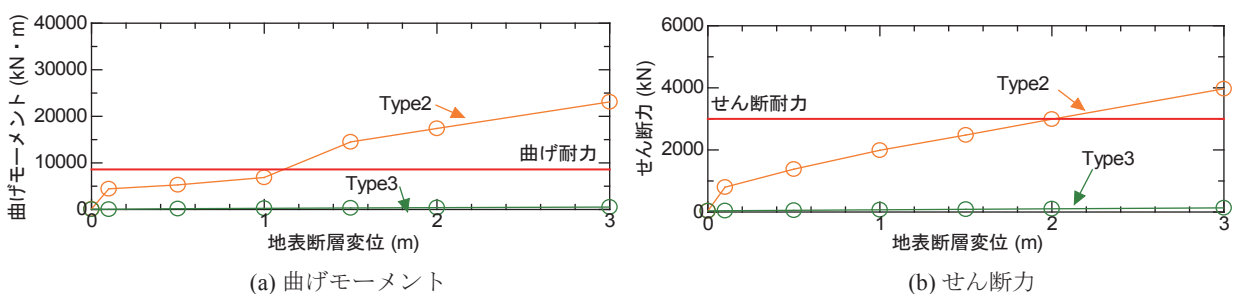


図8 地中梁の発生断面力の分布（橋軸方向）

の値を合わせて示す。

(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地表断層変位によって持ち上がる結果となった。

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。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、基礎標準における回転角の制限値が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

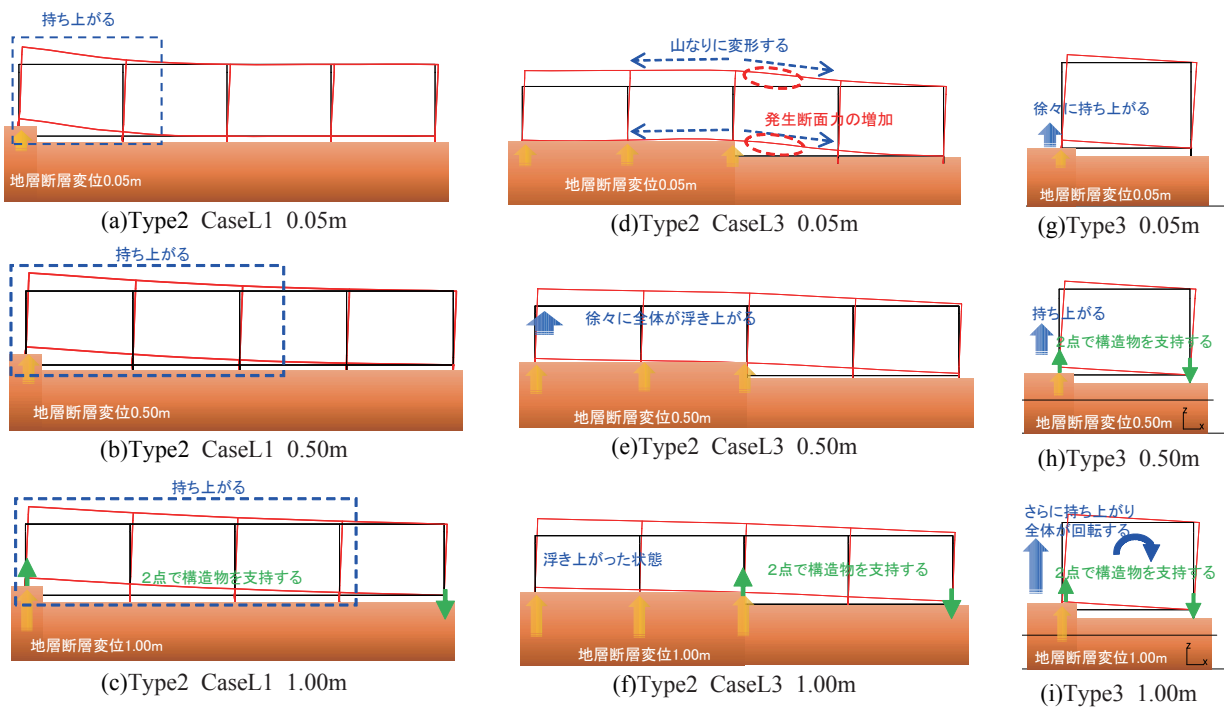


図9 2次元静的非線形解析における主な挙動のまとめ

位とフーチングの発生断面力の値を示す。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。

(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。図7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こと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。

(4) 地中梁の発生断面力

図8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8より、Type2のラーメン高架橋において、曲げモーメントはおおよそ1.0m、せん断力はおおよそ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こと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が大きいため、上限値を超過する地表断層変位の値が大きくなっている。

3.3 挙動のまとめ

挙動のまとめとして複数径間の地中梁を有するラーメン高架橋(Type2)に端部のみに地表断層変位が作用した場合(CaseL1)と構造物の中間位置まで断層変位が作用した場合(CaseL3)、1径間のラーメン高架橋(Type3)に地表断層変位が作用した場合の挙動の概略を図9に示す。地中梁の有無による挙動の差は明確に見られなかったため、地中梁のない複数径間のラーメン高架橋(Type1)についての記載は省略する。

複数径間のラーメン高架橋の端部のみに地表断層変位が作用した場合には、地表断層変位の値が小さい段階(図9(a))では、地表断層変位が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複数径間のラーメン高架橋では、橋軸方向のスペンが長いため、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、構造物の中間位置まで地表断層変位が作用した場合には、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9(e)の左側の状態のように構造物全体が浮き上がり、図9(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、1径間のラーメン高架橋の挙動については、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ことと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ペンが短いため、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し、地表断層変位の影響を受けにくい高架橋形式を提案するために、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本検討用に考案した張出し式1径間のラーメン高架橋について2次元の静的非線形解析を行い、挙動の評価を行なった。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
- ・ 1径間のラーメン高架橋(Type3)は、複数径間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

以上の結果より、本検討用に考案した1径間のラーメン高架橋(Type3)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、部材の損傷は複数径間のラーメン高架橋(Type1およびType2)と比較すると大幅に低減することが可能である。その結果、上層梁の損傷によって軌道面が破壊するといった事態を免れることが可能となる。したがって、1径間のラーメン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懸念される。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、1径間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。

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講演論文集, pp.409-416, 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講演論文集, pp.425-432, 1999.12
- 3) 平成28年度土木学会全国大会 特別セッション「熊本地震報告会」, 2016.9
- 4) 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
- 5) 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
- 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5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.425-432, 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, pp.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震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講演論文集, 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