

第 I 部門

損傷を受けた中層梁を補修した二層式 RC ラーメン高架橋の列車走行性に関する解析的検討

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○日下 和希

京都大学大学院工学研究科 正会員 植村 佳大

京都大学大学院工学研究科 正会員 高橋 良和

1. 背景・目的

2022年3月16日に発生した福島県沖を震源とするマグニチュード7.4の地震において、被害を受けた二層式RCラーメン高架橋の多くで過去の地震被害に伴う補修跡が確認され、さらに新幹線が脱線した付近の高架橋の中層梁では、補修跡に沿った損傷が多数確認された。以上より、地震後の補修による中層梁の耐震性能回復が十分ではなく、列車の走行安全性に影響を与えた可能性があるといえる。そこで本検討では、中層梁の補修が二層式RCラーメン高架橋全体の動的応答性状に与える影響、および列車の走行安全性に与える影響について解析的に検討する。

2. 二層式RCラーメン高架橋のモデル化

(1) 健全な二層式RCラーメン高架橋の構造モデル

東北新幹線の諸元を用いた解析モデルを上層梁および中層梁－柱間の接合部を剛体、柱を非線形梁要素(ファイバーモデル)、中層梁を材端剛塑性ばね法に基づく $M-\theta$ モデルとしモデル化した(図-1)。具体的には、第一変曲点をひび割れ発生点、第二変曲点を部材の曲げ降伏点とし、その後の曲げモーメントが一定であるトリリニアとした。履歴曲線は最大点指向型とし、除荷時の勾配は骨格曲線の第一勾配と同一とした。以降、この中層梁のモデルを「健全部材モデル」と呼び、中層梁が健全である高架橋全体のモデルを「健全高架橋モデル」と呼ぶこととする。

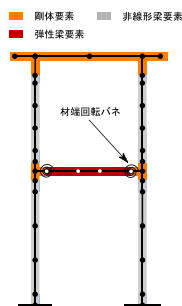


図-1 二層式RC ラーメン高架橋解析モデル

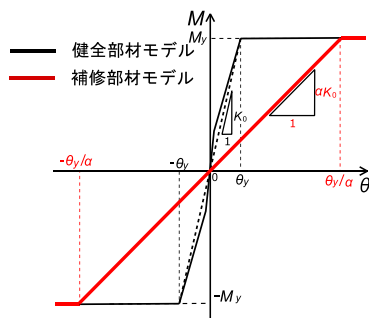


図-2 補修部材モデルの骨格曲線

(2) 補修した中層梁の部材モデル(補修部材モデル)

RC部材を対象とした断面修復やひび割れ注入による補修効果に関する既往の実験的検討では、荷重－変位関係における最大荷重は回復するものの、原点と降伏点を結ぶ勾配(以下、降伏剛性とする)は低下することが明らかとなっている。これら知見を踏まえ、下記のように補修の影響を考慮した。

- ひび割れ発生点を無視し、第一変曲点を降伏点とする
- 降伏剛性比 α ($0 < \alpha \leq 1$)を[(補修高架橋モデルの降伏剛性)/(健全部材モデルの降伏剛性)]と定義し、補修前の損傷度に応じて α を決定する
- 最大耐力は健全部材モデルと同一とする
- 第二勾配は健全部材モデルの第三勾配と同一とする

ここで、補修部材モデルの骨格曲線を図-2に示す。以降、中層梁のモデル化に補修部材モデルを用いた二層式RCラーメン高架橋の構造モデルを「補修高架橋モデル」と呼ぶこととする。

本検討では、降伏剛性比 α について、東北新幹線工事誌りににおいて報告されている健全状態の高架橋の固有周期と補修後の高架橋の固有周期から算出した固有周期の比(1.16)に合致するよう $\alpha=0.62$ と定めた。一方、震害補修されたRC部材では $\alpha=0.76 \sim 0.80$ となることが一般的であること、東北新幹線工事誌りに記載の固有周期は同一の高架橋から得たデータではないことから、 $\alpha=0.62$ とした補修部材モデルを用いた高架橋のモデルを「補修高架橋モデル1」、 $\alpha=0.80$ とした補修部材モデルを用いた高架橋のモデルを「補修高架橋モデル2」とし、検討対象とした。

4. 解析的検討

(1) 解析手法

2. で作成した健全高架橋モデル、補修高架橋モデル

ル1・2を対象に、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計²⁾のG0地盤のL2地震動スペクトルIに基づく地表設計地震動を入力地震動とし、漸増動的解析を行う。なお、解析モデルの固有周期については、健全高架橋モデルが0.335s、補修高架橋モデル1が0.389s、補修高架橋モデル2が0.375sであった。また、地震時の列車の走行安全性に与える影響の評価には、地震動により生じる構造物の横振動変位に対する照査法を採用した。なお、本検討で用いた高架橋モデルにおける限界スペクトル強度 SI_L はすべて4100mmであった。

(2) 解析結果

PGAが300galの場合の二層式RCラーメン高架橋の荷重－変位関係を図-3に示す。図より、三種類すべてのモデルで概ね線形の荷重－変位関係となっているが、高架橋全体の初期剛性に僅かな差が確認できる。

次にSI値を指標としたIDA曲線を図-4に示す。PGAが小さい範囲では、補修高架橋モデル1・2と健全高架橋モデルの間に差があり、その領域は限界状態スペクトル $SI_L=4100\text{mm}$ の周辺の領域であることがわか

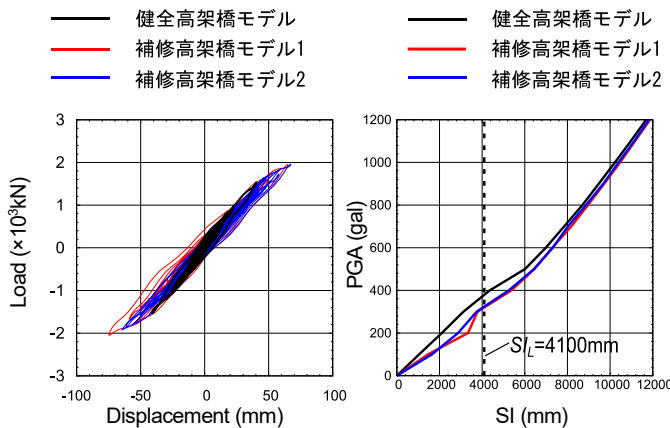


図-3 高架橋の荷重－変位関係

図-4 SI値を指標としたIDA曲線

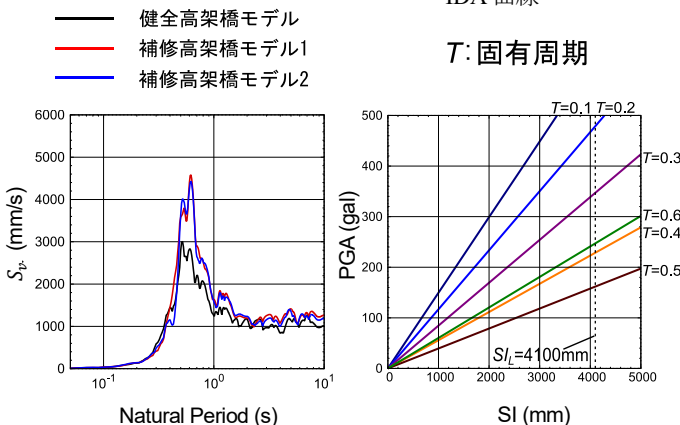


図-5 高架橋天端の加速度応答波の速度応答スペクトル

図-6 SI値を指標としたIDA曲線(一質点系モデル)

る。さらに、PGA=300galの場合の、各モデルの天端における加速度応答波の速度応答スペクトル(図-5)を見ると、三種類のモデルで速度応答値が大きい周期帯は一致している一方、速度応答の最大値が異なり、中層梁補修の影響で速度応答が50%程度増加していることがわかる。このことから、中層梁の補修による高架橋全体の動的応答性状の変化が、高架橋上の列車の速度応答へ明確な差となって現れていることがわかった。

ここで、構造物の固有周期と列車の走行安全性に係るSI値との関係について考察するため、固有周期が0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6の一質点系モデルを対象に、SI値を指標とし漸増動的解析を行った(図-6)。図より、本検討で用いた入力地震動に対しては、固有周期が0.1~0.5sの区間において、同PGAに対するSI値が増大しており、固有周期が0.6sになると、SI値が減少することがわかる。対象とした高架橋においては、中層梁の補修によって変動する高架橋全体の固有周期帯が、列車の走行安全性の指標であるSI値が増加する領域内となっていることがわかる。

5. 結論

本検討の結果、中層梁の補修が地震時の二層式RCラーメン高架橋天端の最大応答変位に与える影響は限定的である一方、列車の走行安全性に一定の影響を与える可能性があることがわかった。一方で、本研究は、東北新幹線の一般的な諸量を持つ二層式RCラーメン高架橋に対する、単一の地震動を用いたものであるため、二層式RCラーメン高架橋の構造パラメータや入力地震動の性質を変化させるなど、今後更なる検討が必要であるといえる。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574と、科学研究費補助金若手研究21K14231の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道仙台新幹線工事局：東北新幹線工事誌 黒川・有壁間，1978。
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012