

位相最適化による地震時性能に優れた鉄道 RC 橋りょう・高架橋の形状探索

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○月岡 桂吾

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 坂井 公俊

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計では、設計者の経験に基づいて構造形式が選択されることが多いため、設計された構造物は設計者の主観による前提条件下での局所最適解となっている可能性も考えられる。他方、近年では位相最適化¹⁾による自由度の高い設計を実現した事例が報告されている。そこで本稿では RC 橋りょう・高架橋の耐震設計を対象とした位相最適化手法を提案するとともに試算を行う。

2. RC 橋りょう・高架橋の耐震設計を対象とした位相最適化手法

今回は、位相最適化の代表的な手法の 1 つである IESO 法²⁾ (以下、既往の方法と呼ぶ) を用いるが、耐震設計に対してこの手法に用いるために 3 点の工夫を行う。

- (1) 構造物の応答値算定として、既往の方法では静的解析を用いているが、今回は非線形動的解析を用いる。
- (2) 寄与度の算定方法として、既往の方法では初期剛性時の要素のひずみエネルギーを用いている。これに対して今回は、正規化累加ひずみエネルギー³⁾を寄与度とすることで非線形動的条件にも適用可能とした。
- (3) 既往の方法では RC 構造物への適用を想定していないため、配筋の更新方法を新たに提案した。具体的には、単位体積当たりの鉄筋量や、主鉄筋とせん断補強鉄筋の交差角度は固定した上で、構造物の形状が更新されるたびに水平震度を一様に加える静的解析を行い、構造物内の最大主応力の向きに合わせて主鉄筋の角度を更新する。

3. 試算の条件

直接基礎を有する RC 製橋脚 (図 1) を想定した試算を行う。上下端 2 つの固定区間の間を形状探索の範囲 (以下、設計領域) とし、設計領域に要素が密に配置された状態を初期構造とする。本検討では、標準的な鉄道構造物の形状である柱幅 4m の橋脚 (以下、標準構造) と提案手法による構造物との比較を行う。このとき、せん断補強鉄筋比は 0.3% で固定とし、主鉄筋比を 1.00%, 1.25% (標準構造), 1.50% の 3 通りに変化させて探索を行う。なお、対象構造物の物性値や構造物の寸法は、一般的な鉄道構造物をイメージして文献 4) を参考に決定している。

この構造物を、平面ひずみを仮定した二次元有限要素モデルにより表現する。このとき、固定区間は線形弾性体により、設計領域は前川モデル⁵⁾によりモデル化している。地盤と構造物間の相互作用は、解析モデル底面に線形地盤ばねを設けることで表現する。また、支持地盤の塑性化によるエネルギー吸収を考慮した減衰として、1.0Hz～10Hz で 20% 前後を推移するようなレーリー減衰を設定した。この解析モデルに対して、入力地震動としてスペクトル II⁶⁾ を水平方向に作用させた非線形動的解析を実施し、構造物の地震応答値を算定する。

構造物のコストは設計領域の材料費 (文献 7) に基づいて算定) で評価するとともに、構造物の性能は照査値 (応答値/限界値) により評価する。本検討では、正規化累加ひずみエネルギー、偏差ひずみ第 2 不変量³⁾および主鉄筋のひずみを照査指標とする。

4. 試算結果

主鉄筋比が 1.00% とした場合の構造物形状の変化を図 2 に、主鉄筋比の変化による構造物形状の違いを図 3～5 に示す。 V_r は設計領域に対する残存要素の体積比率を表し、黄色および茶色は水平方向に対する主鉄筋の角度を表し (黄色が 60°, 茶色が 90°), 赤破線は水平方向に対する角度 θ を表しており、小さいものから順に 0°, 30°, 60° および 90° である。また、各図右端の形状が性能を満足する体積最小の結果である。

これらの結果より、主鉄筋比によらず設計領域下部の左右端が残ることが分かる。これは、設計領域下部の左右端では曲げモーメント、ひずみエネルギーが大きくなるため、この部分の要素が残されたものと考えられる。その一方で各ケースの体積最小時の構造物に着目すると、主鉄筋比が大きいほど V_r が小さくなっている。これは、主鉄筋比が大きいほど各要素の剛性や強度が増加するため、体積の削減により要素内の応力が増加しても、性能を満足する構造物形状が実現されたものと推察される。

続いて、標準構造で正規化した材料コストと正規化累加ひずみエネルギーに関する照査値の関係を図 6 に示す。これより、提案手法によってコストおよび性能が優れた構造物が複数得られていることが分かる (図 6 の青色ハッチング部分)。

さらに、図 6 中の構造 A および構造 B と標準構造について、正規化累加ひずみエネルギーの照査値の分布を図 7 に示す。これより、標準構造では損傷が下端部のみに集中している一方で、構造 B では構造全体に損傷が分散して

キーワード 位相最適化, RC 橋りょう・高架橋, 形状探索

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL:042-573-7394

いる。これにより、コストを削減したうえで照査値を低減した状態が実現したと考えられる。なお、紙面の都合上割愛するが、その他の照査指標についても同様の結果が得られることを別途確認している。

5. まとめ

位相最適化に基づく鉄道 RC 橋りょう・高架橋の耐震設計法を構築した。直接基礎を有する RC 橋脚の躯体部分を対象とした形状探索を実施し、提案手法の有効性を確認した。今後は、様々な条件に対する試算を行い提案手法の有効性を検証するとともに、3次元問題への拡張等に取り組む予定である。

参考文献 1) M. P. Bendsøe, et al.: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71(2):197–224, 1988. 2) 新内ら: IESO 法を用いた建築構造の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 731 号, pp.97-103, 2017. 3) 齊藤ら: 非線形有限要素解析による RC はり部材の損傷評価, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No. 2, pp.166-180, 2011. 4) (公財) 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 橋脚 (直接基礎), 2013. 5) 前川ら: 疑似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築, 土木学会論文集, No. 634/V-45, pp.157-176, 1999. 6) (公財) 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. 7) (一財) 建設物価調査会: 月刊建設物価 2023 年 1 月号, 2023.

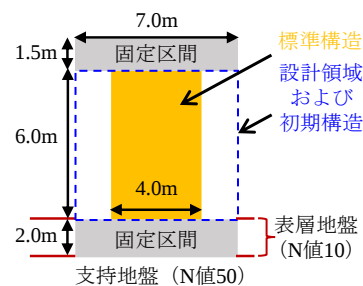


図 1 試算条件

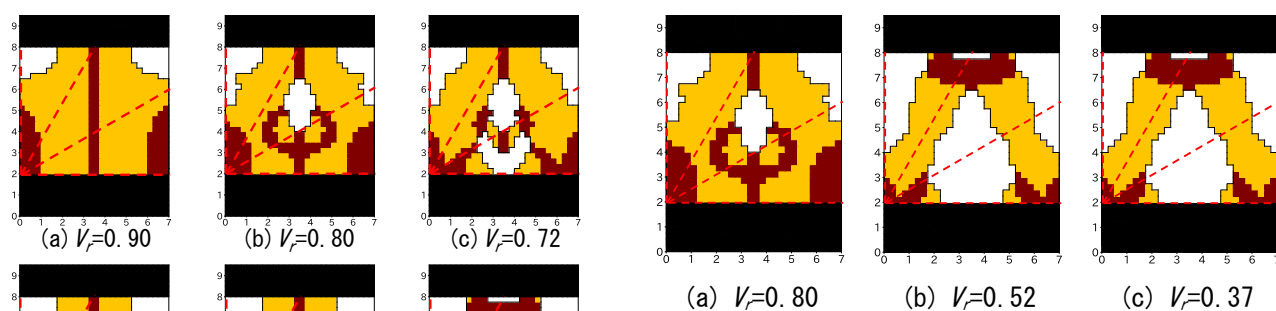


図 3 得られる形状 (主鉄筋比 1.00%)

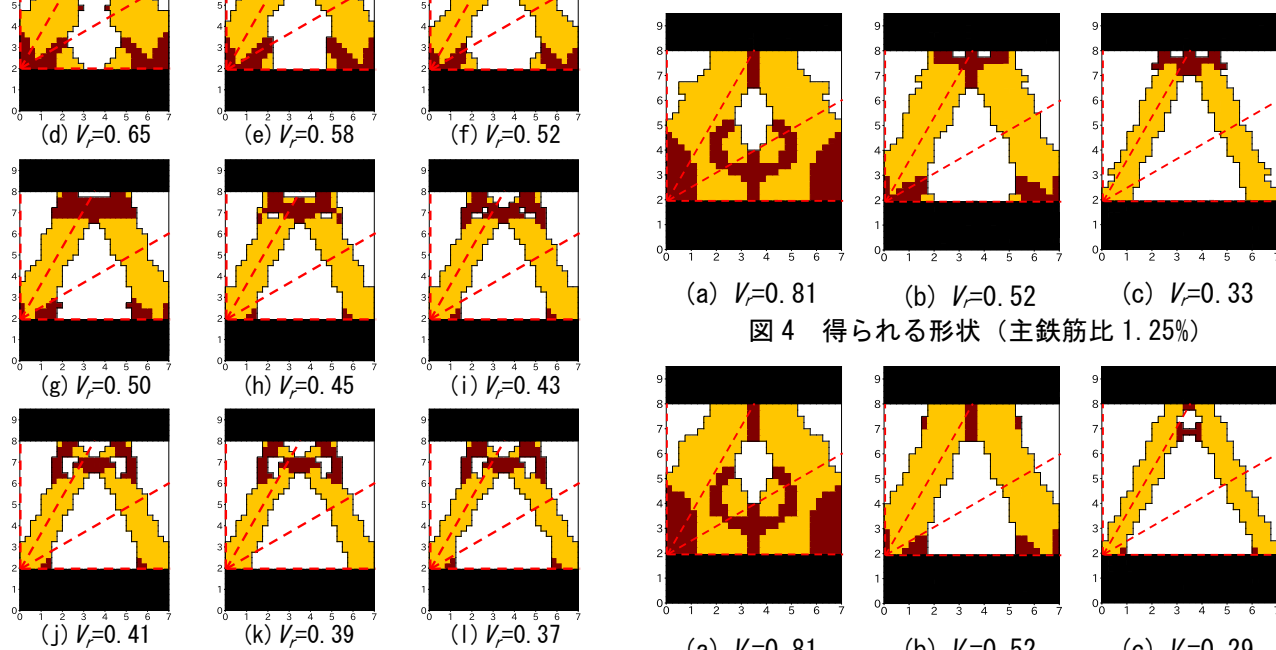


図 4 得られる形状 (主鉄筋比 1.25%)

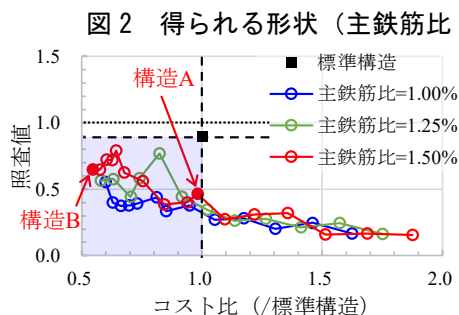


図 6 コスト比と照査値の関係 (正規化累加ひずみエネルギー)

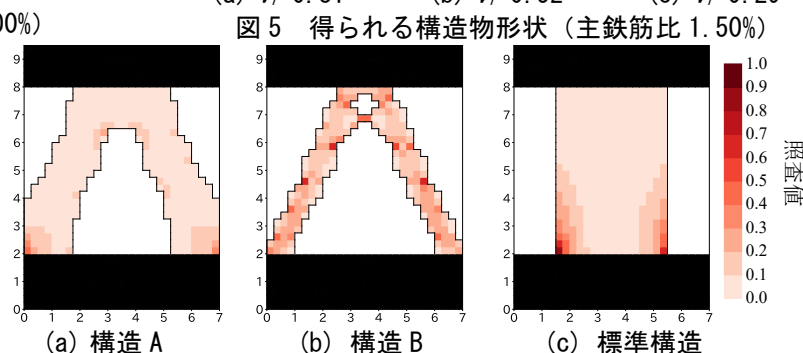


図 7 照査値の分布 (正規化累加ひずみエネルギー)