

ラーメン高架橋における倒壊方向制御機構の有効性に関する基礎的検討

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○小野寺 周 日野 篤志 室野 剛隆

1. はじめに

鉄道構造物に対する耐震設計として、万一、想定を超えるような地震動が作用した場合であっても、構造物が破滅的な破壊形態に至らないように危機耐性に優れた構造形式とすることが求められている¹⁾。危機耐性に優れた構造形式として、地震時に損傷が集中する部材に予め特定方向への変位を抑制するデバイスを取り付けることによって構造物の保有する耐力に非対称性を与え、構造物の万一の倒壊を相対的に耐力の小さい方向へと誘導する倒壊方向制御機構の開発が進められている²⁾。倒壊方向制御機構は、構造物の万一の倒壊による人的被害の回避や地震後の作業ヤードの確保等、安全性および復旧性を向上させることが可能となるものであり、比較的簡易なデバイス取付により、新設、既設によらず適用が可能であると考えられる。

以上を踏まえて、本論文では、倒壊方向制御機構の実用化に向けた基礎的な検討として、一般的なラーメン高架橋を対象とし、ブロックデバイスを用いた倒壊方向制御機構の有効性に関する解析的検討を行う。

2. 倒壊方向制御デバイスの設計思想

危機耐性の向上を目的とした倒壊方向制御機構の性能として、1) 想定される L2 地震動に対してはデバイス取付による応答進展等の性能低下が生じず、2) L2 地震動を超えるような地震動に対して初めて効果を発揮することが求められる。本検討では、図 1 に示すようなラーメン高架橋に対するデバイスの取付を想定し、デバイス長および柱とデバイスとの遊間距離を設計パラメータとした事前検討によって、上記の要求性能を満足するデバイス諸元を決定した。

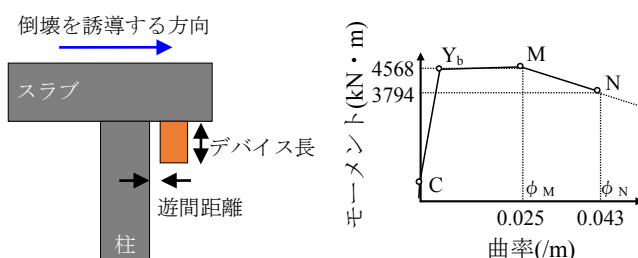


図 1 デバイスの取付概要

図 2 柱部材の非線形特性

3. 解析モデルの構築

まず、現行の耐震標準³⁾に準拠して設計された一般的なラーメン高架橋の線路直角方向について、梁ばね要素から成る 2 次元のフレームモデルを構築した。ただし、本検討では簡易的に基礎のモデル化はせず、フーチング底面で基盤結合させている。

柱部材の非線形特性は図 2 に示す $M-\phi$ 関係で表現し、負勾配領域までを考慮したテトラリニア型の骨格曲線でモデル化した。履歴特性は Clough モデルを用いた。ただし、計算を安定させるために軸力変動は考慮しない。

デバイスについては、図 3 に示すような柱-デバイス間の衝突を表現するばね要素によってモデル化した。デバイス長は柱の断面高さの 2 倍 (2D 区間) とし、柱とデバイスには 45mm の遊間を設けた。この値は、柱端部において図 2 に示す M 点を超えた際に初めてデバイスと柱が衝突する距離であり、この応答領域に至るまではデバイスは機能しない。また、柱とデバイスが衝突した際の剛性は柱部材に対して十分に大きい。デバイスを取り付けた場合の解析モデルを図 4 に示す。次章以降では、デバイスの取付によって倒壊を任意の方向に誘導可能かを検討するために、表 1 に示す解析ケースについてプッシュ・オーバー解析および動的解析を実施する。

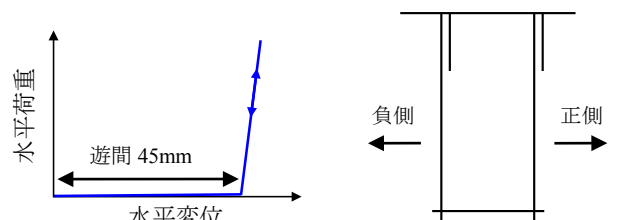


図 3 柱-デバイス間のばね要素

図 4 解析モデル(CaseP)

表 1 解析ケース

解析ケース	デバイス設置位置	倒壊方向
CaseR	なし	—
CaseP	柱上端部 2D 区間	正側に誘導
CaseN	柱上端部 2D 区間	負側に誘導

4. プッシュ・オーバー解析による有効性の検討

まず、構築した解析モデルに対してプッシュ・オーバー解析を実施した。ただし、本章においてのみ、解析上のキーワード 倒壊方向制御、危機耐性、ラーメン高架橋

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター

制約から、柱部材の非線形特性について M 点以降の負勾配は考慮しておらず、3 次剛性のまま損傷が進展するものとした。

慣性力を正方向に作用させた場合の構造物天端における水平震度—水平変位曲線を図 5 に示す。また、天端変位に対するデバイス—柱間の遊間距離を合わせて示す。図 5 より、構造物天端における水平変位が小さい領域においては、いずれの解析ケースも同じ履歴を辿るが、倒壊を負側に誘導する CaseN では、天端の水平変位が 0.30m の時に遊間距離が 0mm となってデバイスと柱が衝突し、柱の曲げ変形が抑制されることで水平震度が増加している。一方、CaseP ではデバイスと柱が離れる方向に変形するため、デバイスを取り付けていない CaseR と同じ履歴となる。以上より、大変形領域においてデバイスと柱の衝突によって構造物の耐力に非対称性が生じ、相対的に耐力の小さい方向へと損傷が誘導されやすい構造形式となることが分かった。

5. 動的解析による有効性の検討

次に、構築したモデルに対して動的解析を実施する。入力波形は振動数 1Hz、加速度振幅 1.25m/s^2 の正弦波とし、作用外力には非対称性が無いものとした。なお、0s~3s において加速度が 1.25m/s^2 となるように振幅を漸増させている。ここで、構造物の倒壊に対応した部材の限界状態について、本検討では簡易的に、鉄道の設計標準に準拠して図 2 に示す柱部材の N 点に対応した曲率 ϕ_N への到達とした。そして、 ϕ_N を超過した時点で解析を打ち切り、その際の天端の変位方向を構造物の倒壊方向とした。

各解析ケースにおける構造物の応答として、柱—デバイス間の遊間距離、柱上端部の応答曲率、構造物天端における応答変位の時刻歴波形を図 6 に示す。図 6(a)より、CaseP では 2.5s 付近、CaseN では 3.0s 付近において柱とデバイスが衝突している。衝突により、図 6(b)に示すように、CaseP では $+\phi_M$ 、CaseN では $-\phi_M$ を超過した後、それ以上の変形が抑制され、逆方向への変形によって ϕ_N に到達していることが分かる。その結果、柱部材の応答が N 点に到達した際の構造物天端における変位は CaseP で正側、CaseN で負側となり、期待した倒壊方向と一致している。以上より、本解析条件においては、デバイス取付によって任意の方向に倒壊を誘導可能であることが示された。

6. おわりに

危機耐性に優れた構造形式の実用化に向けた基礎的な検討として、一般的なラーメン高架橋を対象とした倒壊方向制御機構の有効性に関する解析的検討を行った。その結果、大変形領域においてデバイスと柱が衝突した場合、柱端部の曲げ変形が抑制されることによって構造物の保有する耐力に非対称性が生じることが示された。また、正弦波を用いた動的解析により、デバイス取付によって任意の方向へと倒壊を誘導できることが示された。この結果は、L2 地震動に対する構造物の耐震性能を阻害することなく、それを越える地震動の作用下において倒壊方向を制御でき、危機耐性を向上させる可能性を示すものである。今後、本結果を踏まえて、デバイスの設計思想や解析手法に関する深度化を行っていく予定である。なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) (公財)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，丸善出版，2012。
- 2) 齊藤正人，室野剛隆，本山紘希：地震時における構造物の倒壊に対する危機耐性機構の一考察，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，I-144，pp. 287-288，2015。

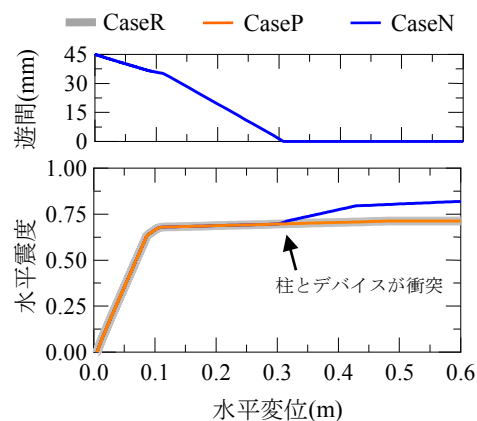


図 5 プッシュ・オーバー解析結果

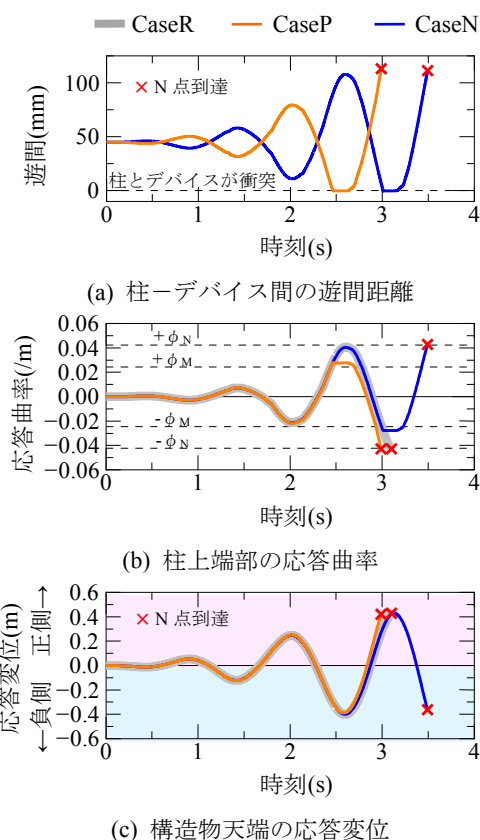


図 6 構造物における応答の時刻歴