東日本大震災における新幹線ラーメン高架橋の損傷メカニズムの動的非線形解析による分析

東京大学	学生会員(○楢崎	泰隆
東京大学	正会員	水谷	司
東京大学	フェロー	藤野	陽三

1. 背景と目的

東日本大震災における鉄道高架橋の被害に着目すると,図1に示すようにブロック中間部の柱と比べてブロ ック端部の柱により大きな損傷が見られる傾向があった.このような損傷の原因として,端部柱のせん断スパ ンが中間柱のせん断スパンより短いこと,および高架橋の非対称性に起因する3次元的ねじれ挙動の影響が考 えられる.そこで,本研究では新幹線ラーメン高架橋の端部柱により大きな損傷が集中する現象に着目し,動的非 線形解析により損傷が発生するメカニズムを明らかにすることを目的とした.本研究では,後述する少ない要素数 のモデルと独特の復元力特性を使用するために独自に解析プログラムを構築した.

2. 新幹線高架橋モデルの構築

図面および既往の解析のデータを用いて新幹線ラーメン高架橋の3次元骨組構造モデルを構築した.部材モ デルとしては、図2に示す材端ばねモデル¹⁾を採用した.このモデルでは系の非線形特性を材端に設けた非線 形ばねに集約して表現するため、あらかじめ塑性ヒンジ発生が見込まれる部位に非線形ばねを挿入してモデル を構築することにより、少ない要素数で非線形解析が可能となる.また、復元力特性モデルとしては図3に示 す耐震標準記載の履歴特性²⁾を用いた.このモデルの特徴としては、①最終勾配が負勾配のテトラリニア型骨 格曲線を用いる点、②経験最大変位に応じて除荷時剛性を低減させる点、③除荷後再載荷途中からの除荷時に 剛性を更新することにより内部ループによるエネルギー消散を表現する点が挙げられる.

これらに基づき構築した新幹線高架橋モデルを図4に示す.図に赤く示した柱中間部のノードは解析上剛域 とみなせる部位(桁およびフーチング部)と柱の接合部および鉄筋の段落し部に相当し,これらの点を塑性ヒ ンジが発生しうる部位と考え,非線形ばねを挿入した.減衰にはレイリー減衰を用いた.その際,有効モード 質量が大きな3次モード(3.69Hz)と6次モード(10.9Hz)を使用し,モード減衰定数の決定の際にはひずみエネ ルギー比例減衰の考え方を用いた³⁾.

3. 新幹線高架橋モデルの動的非線形解析

構築したモデルに図 5 に示す東北地方太平洋沖地震本震時に仙台で観測された KNET の地震波の 3 成分⁴⁾ を入力し、動的非線形解析を行った.解析結果の一例として、図 4 に示したノード A, B, C における橋軸方 向の作用せん断力とせん断耐力の時刻歴を図 6 から図 8 に示す.ここで、せん断耐力の算定にはせん断スパン 比の影響を考慮しており実験式に近い値を与える 1999 年版の鉄道標準 ⁵⁾記載の式を用いた.作用せん断力を せん断耐力で除した割合の最大値はノード A, B, C においてそれぞれ 1.75, 0.942, 1.42 となった.この結果か ら、端部柱に中間柱と比べて大きなせん断による損傷が生じることが分かった.また、せん断スパンが同じ端



キーワード 新幹線ラーメン高架橋,動的非線形解析,材端ばねモデル,せん断損傷,ねじれ挙動 連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 03-5841-1146 部柱でも上述の割合に 20%以上の差が生じうることが分かった.ノード A では、軸圧縮応力が小さくなり、 せん断耐力が小さくなった瞬間に大きな作用せん断力が生じたため、比率が大きくなったことが確認された.

次に、系の非対称性に起因する3次元的なねじれ挙動について考察した.新幹線高架橋モデルの応答値を非 対称性を除いた仮想的な対象高架橋モデルの応答値で除した割合を図4に示したノードC(端部柱)およびノー ドD(中間柱)において比較すると、表1のようになった.この表より、非対称性に起因して柱の部材軸方向ま わりのねじりモーメントが生じていること、およびせん断力が3~3.8%、曲げモーメントが1%程度端部に偏っ て作用することが分かった.

4. 結論と今後の展望

本研究では、せん断による損傷モードを考慮することにより、東日本大震災において新幹線ラーメン高架橋 の端部柱により大きな損傷が生じる現象を再現できた.また、せん断スパンが同じでも、軸力の状態が異なる ことによりせん断による損傷の程度に20%以上の差が生じ得ることが分かった.さらに、非対称性に起因する 3 次元的ねじれ挙動により、1~4%と影響は比較的小さいもののせん断力や曲げモーメントが端部に偏って作 用することが分かった.

さらに、本研究では独自に解析プログラムを構築したため、任意の勾配と折れ点を持つ骨格曲線を用いた解 析をすることが可能になった。例として、5折6勾配のヘキサリニアモデルを用いた1要素系に振幅が線形 に増大する正弦波を入力して得られた非線形ばねの*M* – *θ*関係を図9に示す。このプログラムにより、従来は 解析に反映させることが出来なかった耐震補強の効果を検証することが可能になるといえる。

参考文献

- M.F.Giberson: The Response of Nonlinear Multi-story Structures Subjected to Earthquake Excitation, doctoral thesis presented to California Institute of Technology, 1967.
- 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, pp.288-291, 丸善出版, 2012.
- 3) 日本道路協会:道路橋示方書(V 耐震設計編)·同解説, pp.124-126, 丸善出版, 2012.
- 4) 防災科学技術研究所ホームページ(閲覧日: 2013.04.02): http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
- 5) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準·同解說—耐震設計, pp.84-92, 丸善出版, 1999.

