

極大地震により損傷を受けた連続高架橋 CFT 橋脚柱の残存耐力の算定法

豊田工業高等専門学校 正会員 ○川西 直樹, 名古屋工業大学 フェロー 後藤 芳顕

1. はじめに : 現行の鋼・合成構造の耐震照査法¹⁾などでは, 地震時の構造物の応答が規定された限界点を超えないことで安全性の照査がなされる. この場合, 通常, 限界点は構造物の最大耐力点までの範囲に設定されているので, 応答が限界点以内に留まれば地震後の構造物の残存耐震性能はほとんど低下しない. したがって, 地震後の構造物の残存耐震性能が直接照査されることはない. しかし, 極大地震動により構造物の応答が最大耐力点を超えた場合には, 地震後の残存耐震性能は低下する可能性がある. さらに, CFT 橋脚 (コンクリート充填橋脚) の場合は, 優れた変形性能を利用するために最大耐力点以降のポストピーク領域に限界点が設定されることもある²⁾. このような場合には構造物の地震時応答が限界点以内であっても最大耐力点を超えるときがあるので, 地震荷重の履歴によっては残存耐震性能が有意に低下する恐れもある. 以上から, 構造物の地震時応答が最大耐力点を超えた場合には, 地震後の構造物の残存耐震性能を適切に評価して, 余震や将来の地震に対して構造物の補修・補強の必要性を判断することが重要である.

本研究では, CFT 橋脚で支持された連続高架橋を対象に, 極大地震による橋脚柱の損傷過程を追跡し, 地震後の残存耐力を適切に評価するための精緻な方法について検討した. ここで, 極大地震時の CFT 橋脚柱の損傷過程の再現解析の精度は, 図 1 に示す 2013 年実施の CFT 橋脚で支持された 2 径間連続高架橋模型の大型加振実験³⁾結果との整合性により検証した.

2. 高架橋での CFT 橋脚柱の損傷過程と残存耐力の算定法

(1) 2 段階解析による地震時の CFT 橋脚柱の損傷挙動の追跡:

極大地震動下の連続高架橋における CFT 橋脚柱には, 鋼管の局部座屈や充填コンクリートの圧壊とひび割れなどの損傷が生じる可能性がある. このような損傷を考慮して CFT 橋脚柱の損傷過程を正確に追跡するためには, 鋼管を構成則として 3 曲面モデルを導入したシェル要素, 充てんコンクリートを構成則として損傷塑性モデルを導入したソリッド要素, 両者の境界を接触・離間と摩擦を考慮した接触対でそれぞれ表した精緻な解析モデル⁴⁾が必要となる. しかし, この解析モデルを CFT 橋脚柱に適用して連続高架橋全体系の応答を直接計算すると, 自由度の増加による収束性の極端な悪化でほとんど計算は不可能になる. したがって, ここでは, 図 2 に示すように解析を 2 段階に分けて実施する. 1 段階目では, CFT 橋脚柱のマクロ的な損傷挙動解析を対象として著者らが過去に開発したセグメントモデル⁵⁾を適用した高架橋全体系の地震応答解析を実施し, 各橋脚柱頂部の変位, 作用力, 作用モーメントの時刻歴応答を計算する. そして, 2 段階目では, 1 段階目で算定された各橋脚柱頂部に作用する各物理量の時刻歴応答を精緻なシェル・ソリッド要素による CFT 橋脚単柱モデル⁴⁾の頂部に作用させることで, 対応する連

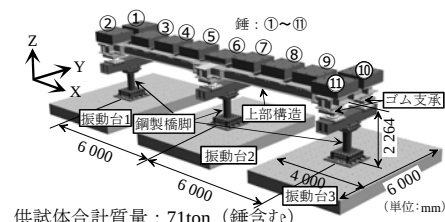


図 1 連続高架橋模型の加振実験(2013)

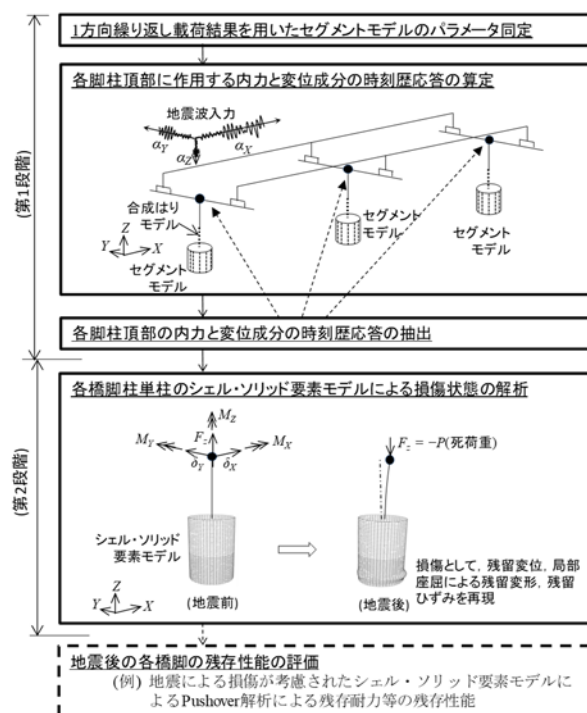


図 2 連続高架橋 CFT 橋脚柱の損傷過程解析法

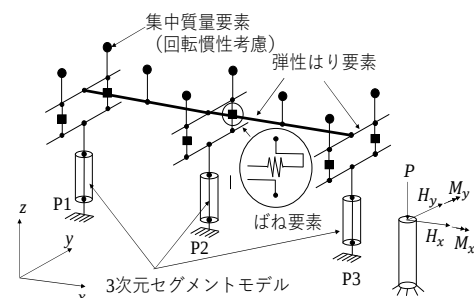


図 3 全体系解析モデル

キーワード 耐震設計法, 連続高架橋, CFT, セグメントモデル, 加振実験

連絡先 〒471-8525 豊田市栄生町 2 丁目 1 番地 豊田工業高等専門学校 TEL 0565-36-5883

続高架橋内の橋脚柱の損傷挙動を正確に再現した解析を実施する。

(2) CFT 橋脚柱の残存耐荷力の評価解析：

(1)の2段階解析完了後のシェル・ソリッド要素による橋脚単柱モデルには極大地震時の連続高架橋内における当該橋脚柱の損傷状態が反映されている。したがって、地震後の橋脚柱の残存耐力は、この橋脚単柱モデルを対象に Pushover 解析を実施し、最大水平荷重として評価する。なお、残存耐力を水平1方向漸増両振り载荷で評価する方法も考えられるが、これによると充填コンクリートに生じる塑性ひずみが極めて大きくなり、材料構成則の適用範囲外となる。

3. 2径間連続高架橋模型の大型加振実験を対象とした解析例

(1)連続高架橋全体系の解析（1段階）： 図1の高架橋模型のCFT橋脚柱にセグメントモデルを導入した全体系モデル（図3）により加振実験の再現解析を実施する。算定された中央橋脚柱(P2)頂部の水平変位成分の時刻歴応答を図4に示す。これより、図3の全体系モデルによる解析で加振実験における橋脚柱頂部の変位応答が精度よく算定されているのがわかる。同様に、橋脚柱頂部の作用力、作用モーメントも精度よく算定された。なお、この解析モデルによる計算時間は10分程度に過ぎない。

(2) CFT 橋脚単柱の損傷挙動解析（2段階）： 図5に示すシェル・ソリッド要素モデルで表した各CFT橋脚単柱の頂部に(1)の全体解析から得られた水平変位3成分、モーメント3成分の時刻歴応答を静的に入力することで、各CFT橋脚柱の正確な損傷挙動解析を実施する。解析結果として、図6に等価水平力-水平変位で表したP2橋脚の履歴曲線、図7に加振終了後の同橋脚基部の変形状況を示す。これより、2段階解析で連続高架橋内のCFT脚柱の損傷状況が精度よく追跡できることが分かる。

(3) 残存耐力の算定： 2段階解析完了後のシェル・ソリッド要素による橋脚単柱モデルに引き続き Pushover 解析を実施して最大水平荷重として残存耐力を評価する。载荷方向については、橋軸(X軸)と橋軸直角方向(Y軸)の正・負の向きに単調载荷する4ケースを実施し、残存耐力に対する方向性の影響についても確認する。Pushover 解析の結果を図8に示す。これより、加振実験で損傷したCFT橋脚柱は加振前(Virgin)に対し少なくとも93.5%の残存耐力を有していることが分かる。

参考文献：1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V（耐震設計編），2017。

2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計基準・同解説，2016。3) Goto, Y.

et.al: Ultimate behavior of steel and CFT piers in two-span continuous elevated-girder bridge models tested by shake-table excitations, *J. Bridge Eng.* ASCE, 10.1061/(ASCE)BE.1943-5539.20001021, 2017。

4) Goto, Y. et.al: Local buckling restraining behavior of thin-walled circular CFT columns under seismic loads, *J. Struct. Eng.*, ASCE, 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000904, 04013105-1-14, 2014。

5) 川西直樹，後藤芳顕：コンクリート充填構造を対象とした3次元セグメントモデルの開発と耐震照査法，構造工学論文集，Vol.64A, pp.73-85., 2018。

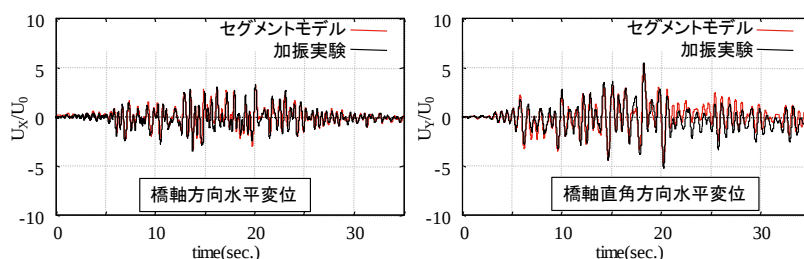


図4 全体系解析モデルによる中央橋脚柱(P2)頂部の水平変位履歴

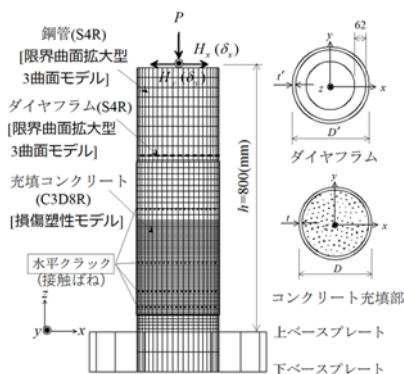


図5 シェル・ソリッド要素モデル

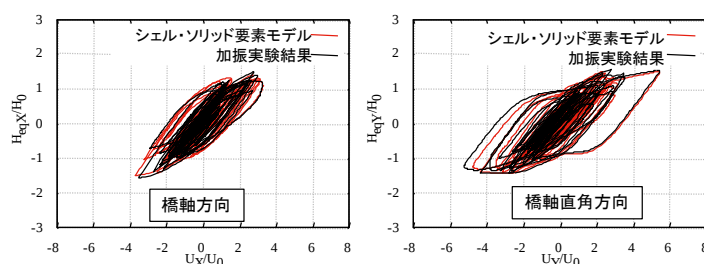


図6 中央橋脚柱(P2)の等価水平力-水平変位の履歴曲線



図7 加振終了後のP2橋脚柱の変形状況の比較

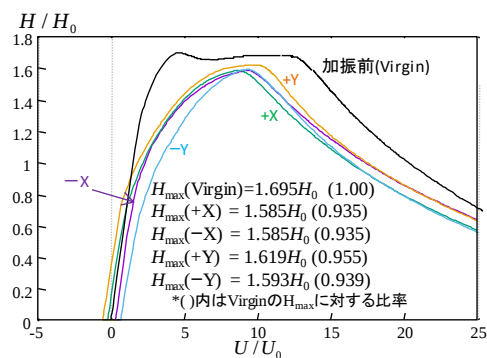


図8 P2橋脚柱の加振後のPushover解析結果