## -473

## 3次元セグメントモデルによる CFT 橋脚を有する連続高架橋加振実験の再現解析

豊田工業高等専門学校 正会員 川西直樹 名古屋工業大学 フェロー会員 後藤芳顯 名古屋工業大学 学生会員 Lyu Fei

1. 研究背景と目的: コンクリート充填橋脚(以降, CFT 橋脚と記す)は,繰り返し水平荷重下の履歴挙動に関し て無充填柱に比べピーク点以降の軟化域でも安定した履歴吸収エネルギー能を持つことが知られている.しかし, 現行の CFT 橋脚の耐震照査法として,道示<sup>1)</sup>では無充填柱と同様にピーク点が限界点と定められており,ピーク以 降の高いエネルギー吸収能が考慮されていない.一方,鉄道構造物設計標準<sup>2)</sup>では曲げ耐力モーメント 90%低下点 まで挙動が許容されているものの,道示と同様に水平一方向の入力地震動に特化した照査法になっており,水平 2 方向や3方向など多方向地震動の同時入力に対応していない.多方向地震動下の CFT 橋脚のポストピーク域の力学 挙動を耐震照査で考慮するには,著者らによる FE モデルによる数値解析法<sup>3)など</sup>が挙げられるものの,非常に長い 計算時間が必要であることと,連続高架橋のような複数の CFT 橋脚を含む橋梁システム全体を解く場合には収束解 が得られず計算が破綻する可能性も高く実用的ではない.このため,著者らは文献4)において CFT 構造一般に対し てポストピーク領域も含めた3次元の地震時挙動を解析できる汎用かつ実用的なセグメントモデルを導入したファ イバーモデルを開発した.そして,単柱式の CFT 柱に対する水平2方向繰り返し載荷実験および加振実験を十分な

精度での再現できることを確認している.本研究では、さらに、より実用 的なケースとして、複数の CFT 橋脚で支持された 2 径間連続高架橋模型 全体系の水平 2 方向同時加振実験<sup>5)</sup>の再現解析にセグメントモデルを適用 した場合の精度と計算効率を検証する.

2.3次元セグメントモデルと CFT 橋脚を持つ連続高架橋解析への適用 (1) 3 次元セグメントモデルの概要: 部分充填 CFT 橋脚を対象に CFT セグメントのモデル化について説明する.鋼管の局部座屈による損傷が生 じるコンクリートを充填した基部の上下ダイヤフラム間をセグメントと して、図1のように鋼管を1本の3次元はり要素、充填コンクリートを複 数本の3次元トラス要素で表す.鋼管下部の局部座屈変形が生じる部分を 有効破壊長領域(長さ L<sub>se</sub>)としてこの領域の一軸の構成則として圧縮側 には局部座屈による軟化現象と繰り返しの影響を考慮したモデル(図2) を導入する.有効破壊長領域は軟化にともなう局所化で数値解析上の不安 定性が生じる可能性があるため、この区間を1要素でモデル化する.これ 以外の部分の鋼管には通常のバイリニア型移動硬化則(2次勾配はE/100) を用いる.充填コンクリートはセグメントの上下ダイヤフラム間を部材長 とする複数のトラス要素でモデル化する.トラス要素の総断面積は充填コ ンクリートの断面積に等しく、本数は曲げ挙動が再現できるように決定す る.トラス要素の上下端のピン節点群は剛な上下ダイヤフラム要素に接合 される.この上下ダイヤフラム要素は鋼管を表したはり要素にそれぞれ剛 結する. 充填コンクリートの1軸の構成則はダメージ関数を導入した図3 による. 有効破壊長 Lse, 材料構成則の各パラメータは, 水平 1 方向漸増 振り繰り返しを受ける CFT 橋脚の FE 解析結果(または,繰り返し載荷実 験結果)と整合するよう滑降シンプレックス法による最適計算で同定する. (2) 2 径間連続高架橋加振実験とそのモデル化: 3 次元セグメントモデ ルの連続高架橋の CFT 橋脚への適用性について検証するため、ここでは 文献 5) における 3 本の部分充填 CFT 橋脚で支持された 2 径間連続高架橋 模型の加振実験の再現解析に3次元セグメントモデルを適用する.加振実 験の概要を図4に示す.この模型の実橋に対する縮尺比は1/6.7であり, 道示 V<sup>1)</sup>に基づいて設計している. 桁と橋脚はゴム支承で結合されており,



図1CFT橋脚の3次元セグメントモデル



図2 有効破壊長領域の材料構成則



キーワード: CFT 橋脚, 連続高架橋, 加振実験, ポストピーク 連絡先: 〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1 TEL:0565-36-5883 FAX:0565-36-5927

-945-

各橋脚のピーク点においても桁が塑性変 形することはない.橋脚の軸力比  $P/P_0$ は, 端橋脚  $P_1,P_3 \circ 0.08$ ,中間橋脚  $P_2 \circ 0.12 \circ$ ある.入力加速度は,日本海中部地震 Tsugaru 波の橋軸および橋軸直角方向加速 度成分をそれぞれ 400%に拡大するととも に,相似則を考慮して時間軸を $1/\sqrt{6.7}$ 倍 したものを水平 2 方向に同時入力する.3 本の CFT 橋脚についてセグメントモデル を適用した高架橋全体系の解析モデルを

図5に示す.ゴム支承は6成分からなる非弾性ばね要素,

3. CFT 橋脚をもつ連続高架橋加振実験の再現解析

上部構造と橋脚横梁は3次元弾性はり要素でモデル化する.

(1) 3 次元セグメントモデルのパラメータ同定結果:軸力比 P/P<sub>0</sub>=0.12の中間橋脚 P<sub>2</sub>の単柱に対し,水平1方向繰り返し

載荷したときの FE 解析結果とセグメントモデルの水平荷 重-水平変位の履歴曲線を図 6(a)に示す. これより, セグメ

ントモデルはポストピーク領域まで精度よく FE 解析結果

を再現しており、CFT 橋脚特有のピンチング現象も再現で

きている. 軸力比 P/P<sub>0</sub>=0.08 の端橋脚 P<sub>1</sub>, P<sub>3</sub>に対しもセグメ

ントモデルのパラメータを別途同定する必要がある.しか

し,図 6(b)のように FE 解析による端橋脚 P1,P3の履歴曲線

は中間橋脚 P2(P/P0=0.12)とほとんど変わらないので、こ

こでは、すべての橋脚のセグメントモデルに同じパラメー

(2) セグメントモデルによる再現解析結果: セグメントモデ

ルに加振実験の再現解析結果を中間橋脚 P2 頂部の橋軸直角

タ値を用いる.

ゴム支承 [1] [3][4] [5] 重り:[1]~[11] 計 46ton [6] [7] [8] <sub>[9]</sub> [10] [2] 6分力計 横桁 ゴム [11] 支承 振動台1 P2 √=12 7mr 6000 **F** P3 ダイヤフラム 振動台 2 部分充填 0000 (t<sub>D</sub>=9mm) =5mm CFT橋脚 6000 40.R 6000 充填コンクリー 合計質量: 71ton (単位:mm) 振動台

図4 2径間連続高架橋の加振実験





図5 セグメントモデルを用いた全体系解析モデル









方向水平変位成分の時刻歴応答と中央橋脚 P<sub>2</sub>と端橋脚 P<sub>1</sub>頂
部における等価水平力 - 水平変位の履歴曲線について実験
結果と比較して図 7,8 に示す.これらの結果からセグメント
モデルによる解析で加振実験結果がいずれも精度よく再現
できていることが分かる.
計算時間について考察する. CFT 橋脚を FE モデルで表し
-10
た連続高架橋モデルを汎用ソフト ABAQUS により Intel

た連続高架橋モデルを汎用ソフト ABAQUS により Intel Xeons E5-2697 V2 プロセッサーの4 コアで並列計算した場 合,非線形解析の収束性が悪いため,非現実的に長い時間 (1カ月以上)を要する.さらに,収束の悪化で解析が停止 する場合も多くある.一方,セグメントモデルではパラメ ータ同定に 3~4 時間を要するが加振実験の計算時間は約 10 分間程度であり,解の収束性も良い.このように,実務で 対象とする必要のある複数の CFT 橋脚で支持された連続高 架橋全体構造の終局ならびにポストピーク挙動の解析では セグメントモデルは非常に有用であるといえる.

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, 2012. 2)鉄道総研:鉄道構造物等設計基準・同解説,2016. 3)後 藤ら:地震動下のコンクリート充填円形断面鋼製橋脚における局 部座屈変形の進展抑制機構と耐震性向上,土木学会論文集 A1,

Vol.69, No.1, pp.101-120, 2013. 4) 川西ら: 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, 2018. 5) Goto, Y., et.al: "Ultimate behavior of steel and CFT piers in two-span continuous elevated-girder bridge models tested by shake-611 table excitations." *J. Bridge Eng.*, 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001021, 04017001,2017.