

逆L字形橋脚を有する橋梁システムの 日米間分散ハイブリッド地震応答実験

高橋 良和¹·中野 陽介²·家村 浩和³·Steve A. MAHIN⁴·Gregory L. FENVES⁵

¹京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄) E-mail: yos@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp ²鹿島建設 関西支店 (〒 540-0001 大阪市中央区城見 2-2-22 マルイト OBP ビル)

³京都大学教授 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター) ⁴Professor, University of California, Berkeley (Davis Hall, Berkeley CA USA 94720-1710) ⁵Professor, University of California, Berkeley (Davis Hall, Berkeley CA USA 94720-1710)

偏心橋脚などの複雑な挙動をすることが予想される橋脚を複数有する連続橋梁システムの地震応答解析を行 うためには、各部材挙動の理解度に応じた適切なモデルの選択が重要となる。本研究では単柱式 RC、逆 L 字形 RC、単柱式鋼橋脚を有する橋梁の地震応答を評価するため、曲げ挙動が卓越する単柱式 RC 橋脚をファイバー モデル、挙動が複雑になると考えられる逆 L 字形 RC 橋脚および単柱式鋼橋脚を実験ハイブリッドモデルとし てモデル化し、RC 橋脚モデルを京都大学で、鋼橋脚モデルをカリフォルニア大学バークレー校で実験を行う日 米間分散ハイブリッド実験を実施した。その結果、数値モデル化が困難な逆 L 字形橋脚や鋼橋脚の強非線形挙 動を含む橋梁システムの応答を得ることができ、分散ハイブリッド実験手法の有用性を示すことができた。

Key Words : international hybrid simulation, bridge system, C-bent RC column, strong nonlinear response

1. はじめに

1995年1月17日の兵庫県南部地震では都市機能の 根幹を担う社会基盤の多くが崩壊し、陸・海・空の交通 網の麻痺や水道・ガス・電気などのライフラインの寸 断による都市機能の低下が問題となった。この復旧作 業の中で、大きく損傷した橋脚はもちろん撤去・再構 築の対象となったが、橋脚天端の残留変形が大きいた めに、損傷程度は大きくないものも撤去・再構築となっ た橋脚も数多く存在した1).都市内高速道路は震災後の 復旧・救援活動において重要なライフラインとなるが、 都市部では土地利用に制約があり, 逆L字形橋脚の採 用が余儀なくされることも少なくない。逆L字形橋脚 には偏心鉛直荷重が作用し,曲げやせん断,ねじり挙 動が連成するため、復元力特性が複雑であるとともに、 残留変位が偏心側に蓄積しやすいなど、地震後の供用 性も不利な構造である^{2,3)}.またひとつの橋脚の挙動は 上部構造を通じて他の橋脚とも相互作用するため、橋 梁の地震挙動を正しく評価するためには、複数の橋脚 を含む、橋梁システムとしての評価が必要となる。数 値モデル化が困難な要素を含む全体系応答を評価する ための手法としてサブストラクチャーハイブリッド地 震応答実験が提案されているが,従来の手法では複数 の実験を取り扱うことが困難であることや、ハイブリッ ド実験の数値計算部分においては比較的簡単なモデル しか用いることができないなど、課題も少なくないの が現状である.

2. 対象橋梁システム

(1) 橋梁構造

本研究で対象とする橋梁は,橋長 60 m の二径間連続 橋梁である (図-1). 下部構造は P1 橋脚が単柱式 RC 橋 脚, P2 橋脚が逆 L 字形 RC 橋脚,そして P3 橋脚が単柱 式鋼橋脚で,いずれも高さ 10 m である. P2 橋脚は逆 L 字形であるため,上部工重量が柱部に偏心して作用し ている.上部構造は二径間連続鋼 I 桁橋 (地震時水平反 力分散構造) であり,弾性支承により支持されている.

(2) 数値モデル

本研究では、図-1の橋梁システムの橋軸方向の地震 応答性状を検討するのが目的である.橋軸方向のみを 対象としているものの、P2橋脚が逆L字型橋脚である ため、3次元モデルを用いる必要がある.図-1に対し、 橋脚、桁はフレームモデルで、支承はバネモデルでモ デル化した(図-2).ここで桁、支承は弾性とし、橋脚



図-1 検討対象橋梁システム

柱部は非線形, T 形やL 形橋脚張り出し部は剛体とした. 桁が橋軸方向に振動するに伴い, P1, P3 橋脚は橋軸方向に変形するが, P2 橋脚は橋軸方向に変形するとともに柱部にはねじり変形も生じることになる.

橋脚の非線形挙動を表す手段として、モーメント-曲 率関係や荷重-変位関係がよく用いられるが, RC 部材 のような複合構造をより精度良く検討したい場合には, 材料の応力--ひずみ関係に基づくファイバーモデルが用 いられる、本研究の目的のひとつは、各部材挙動の理 解度に応じた適切、詳細なモデル化により応答を評価 することである。従来の研究より曲げ破壊を呈する単 柱式 RC 橋脚に対してはファイバーモデルによる解析結 果が実験結果とよく整合することが明らかとなってい るため、P1 橋脚にはファイバーモデルを適用した。材 料構成則として、コンクリートには Ristić モデル4)、鉄 筋には Menegotto-Pinto モデルを用いた. P3 橋脚は単 柱式鋼橋脚であるため, Menegotto-Pinto 型履歴を用い た荷重-変位関係によりモデル化した。P2橋脚はRC橋 脚であるが、曲げと同時にねじり変形も生じる. 現時 点では研究レベル以外に適当な曲げ・ねじり連成を考 慮した RC 柱の数値モデルがない。一般の解析プログ ラムにおける3次元はり要素では曲げ挙動とねじり挙 動は独立に(連成しない)モデル化が用いられている 例がほとんどである⁵⁾. ここでは曲げについては P1 橋



図-2 解析モデル

脚と同じ材料モデルによるファイバーモデル,ねじり については線形のねじり剛性 GJ を設定した3次元はり 要素を適用した.

(3) 数値解析による検討

図-2のモデルに対し、地震応答解析を実施した.入力 地震動としては 1995 年兵庫県南部地震 JR 鷹取記録 (NS 成分)の振幅 80%にした波形を用いる.減衰として 5%の レーリー減衰を、数値積分には α -OS 法を用いた.解析 には OpenSees (Open System for Earthquake Engineering



図-3 地震応答解析結果

Simulation)を用いた⁶⁾. OpenSees は PEER (the Pacific Earthquake Engineering Research center) において開発が 進められているオブジェクト指向型地震応答解析フレー ムワークである. OpenSees はオープンソース型の開発 が進められており,ソースコードやドキュメント等は ホームページから参照することができる⁷⁾. OpenSees は アメリカにおける地震工学プロジェクト NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation)⁸⁾における数値解 析コードとして正式に採用され,全米を中心に広く利 用されるようになってきている.

地震応答解析結果として各橋脚の荷重-変位関係と桁 の変位応答時刻歴を示す(図-3). 図-3-b,c はそれぞれ 逆L字型橋脚P2の水平荷重-水平変位関係とねじりモー メント-ねじり率関係である. 図-3-bの履歴形状はP1 橋脚と同様に紡錘形を示していることが分かるが,こ の解析モデルでは曲げとねじりが連成していないため, 必ずしも上部構造や他の橋脚の応答を正しく評価でき ているとは言えないのが実情である.

3. 逆L字形 RC 橋脚の正負交番載荷実験

(1) 実験概要

図-1に示す橋梁において,最も複雑な挙動をすることが予想される逆L字形 RC 橋脚について,偏心荷重と水平変位,ねじりが加わった際の基本変形特性を確認するため,正負交番載荷実験を行った.

供試体は P2 橋脚の 7.5 分の 1 縮小柱模型である.供 試体は高さ 1255 mm, 320 × 320 mm の正方形断面を 有し,偏心引張側に軸方向鉄筋を多く配置している (図 -4).本実験では,便宜上偏心引張側を N 面,偏心圧 縮側を S 面と呼び,その側面をそれぞれ E,W 面と呼 ぶ.軸方向鉄筋比,横拘束鉄筋比は実橋脚の値に近似 するよう,軸方向鉄筋には SD295D10,ねじり補強筋に は SD295D4 を用い,帯筋間隔は全区間 40mm と設定 した(軸方向鉄筋比 1.18%,帯鉄筋比 0.46%).コンク リートには粗骨材の最大寸法が 15mm である早強コン クリートを用いている.実験後に実施した要素試験結 果より,コンクリート圧縮強度が 38.5 MPa,軸方向鉄 筋および帯鉄筋の引張強度はそれぞれ 331 MPa, 327 MPa であった.

(2) 載荷システム

供試体は単柱として作成し, 偏心載荷状態を図-5 に 示すねじり伝達治具により再現した.水平方向には供 試体柱中心から 750 mm の位置に東京衡機製アクチュ エータを設置し, 図-5 の紙面に対し垂直方向に水平荷 重を載荷する. 偏心荷重として, 断面中央から 400 mm の位置において鉛直方向にアクチュエータを設置し, 桁 重量から算定した 90 kN を軸力として載荷している.

各アクチュエータは島津製作所製デジタルコントロー ラにより制御され、水平アクチュエータは変位外部ア ナログ信号と一致するよう計算制御されている.



図-4 実験供試体



図-5 載荷方法 (E 面よりの図示)

(3) 実験結果

図-6に、水平載荷用アクチュエータから得た荷重-変 位履歴関係を示す.実験は最大荷重の8割まで耐力が 減少したサイクルで終了した.本節以降で示す実験結 果は、図-3等と比較できるよう、相似則に従い実大橋 脚の諸量に変換して表している(図-6のみ相似則適用 前の実験計測値も参考として示す).これを見ると、履 歴が描く形状は従来の曲げ破壊試験結果に比べると細 く、やや逆S字形の形状をしていることが分かる.

そこで、柱のE面に設置した2本の変位計の差分より 柱の回転変形を計測することにより(図-7)、アクチュ



図-6 荷重-変位関係(右・上の軸は実験計測値)



図-7 変位計によるねじり成分の分離



図-8 荷重-変位関係の分離

エータ変位を水平成分と回転成分に分離し,水平荷重-変位関係とねじりモーメント-ねじり率関係として表し たものがそれぞれ図-8-a,図-8-bである.図-8-aをみ るとその履歴形状は紡錘型を示しているのに対し,図 -8-bは純ねじり載荷実験より得られる形状とよく似た 逆S字形の履歴形状を示しており,かつ非線形化して いることが分かる.これよりP2橋脚の挙動には,ねじ り挙動の影響が現れているといえる.

図-9に実験終了時のひび割れ図より一方向に発生し ているひび割れを抽出した図を示すが、斜めひび割れ が高さ方向に分散していることからもねじり挙動の影 響が確認できる.また南東角において斜めひび割れの





図-10 OpenFresco のオブジェクトクラス図

角度が緩やかになり水平方向に変化していることから, 曲げ引張変形の影響が確認でき、曲げとねじりの連成 挙動を読み取ることができる.

以上より、図-1のP2橋脚においては曲げとねじりの 連成挙動が無視できないことが明らかであり、前章で 実施した純数値解析による橋梁システムの地震応答性 状評価には限界があることが分かる.

分散実験フレームワーク 4.

(1) 分散ハイブリッド実験システム

ハイブリッド実験ではアクチュエータにより検出さ れる復元力特性を計算機の地震応答解析プログラムで 取り込みながら応答変位を算出し、アクチュエータより 実験供試体を載荷、荷重を計測してプログラムにフィー ドバックしているため、地震時における履歴復元力特 性をモデル化することなくその応答を精度よく評価で きる、ハイブリッド実験はモデル化が困難なシステム の地震応答特性を把握する上で強力な実験法であるが、 実験をコントロールすることが必要なため、従来実施 されている研究では、数値モデル部に単純なモデルを 用いるに留まっているものがほとんどである。このよ

うに FEM やファイバーモデルなどの高度なモデルや数 値積分法を容易に利用できないことや、複数の並列·分 散実験を制御することが困難であるなど、ソフトウェ ア側の制約が大きいことが課題となっていた.このよ うな問題を解決するため、著者らは実験手法の仮想化 と分散ネットワークを実現したソフトウェアフレーム ワークである OpenFresco を開発し,汎用有限要素法フ レームワークである OpenSees と協働することによる分 散ハイブリッド実験システムを提案している^{9,10)}.

(2) OpenFresco

実験手法は数値解析手法と比べものにならないほど 異種異質の要素が絡み合っており、それを制御するソ フトウェアの構築は困難であった。著者らはこのよう な問題に対してオブジェクト指向技術を適用すること により解決するアプローチを取っており6,11),地震工 学における実験手法,実験装置等を仮想化するための ソフトウェアフレームワークとして OpenFresco を開発 した. OpenFresco では実験システムをコントロール部 (ExperimentalControl), アクチュエータ等実験機器の配 置(ExperimentalSetup),そして実験施設と施設間の通信 (ExperimentalSite)の3つにモデル化し(図-10), これら を組み合わせることで様々なシステムや遠隔実験等を ソフトウェア上に実現することができる⁹⁾. OpenFresco もまたオープンソース型開発として、ホームページに おいて情報共有し開発が進められている12).

OpenFresco は OpenSees と協働することにより、実 験と解析を融合したハイブリッドシミュレーションを可 能としている. OpenSees が有する最先端の解析技術と OpenFresco が有する柔軟な実験仮想化技術により、従 来実施が困難であった高度な解析要素と複数の実験要 素を統合した分散ハイブリッドシミュレーションを容 易に実現することができる.

5. 対象橋梁システムの分散ハイブリッド地震 応答実験

(1) ハイブリッドモデル

図-1の連続橋梁をハイブリッドモデルに置き換える と,図-11のようになる. P1橋脚は先に述べたように 曲げ変形が卓越する橋脚であり、ファイバーモデルを適 用する、P2の逆L字形RC橋脚は数値モデル化するこ とが困難であるため、曲げとねじり挙動の連成を自動 的に満足できる実験モデルを用い、京都大学において2 本のアクチュエータにより載荷する。 逆L字形 RC 橋脚 模型は3章で用いたものと同じである。P3橋脚は単柱 式鋼橋脚であるため、材料構成則に基づくモデルでも 比較的精度良く応答を再現することができるが、大変



図-11 橋梁システムのハイブリッドモデル



図-12 鋼製柱塑性ヒンジ模型

形時の座屈や破断などの挙動も追跡できるよう, 鋼製 柱の塑性ヒンジ部を再現した実験モデル (図-12)を用 いた. ヒンジ部の左右につけた鋼棒が塑性化,座屈する ことで強非線形性を表現することができる. この P3 橋 脚モデルは米国カリフォルニア大学バークレー校 (UC Berkeley)において載荷実験を行った. 上部構造,反力 分散支承はそれぞれ線形はり,線形バネによりモデル 化した.

(2) 実験システム

a) ハードウェア

京都大学では,正負交番載荷実験で用いたものと同 じシステムを用いている.

UC Berkeley の載荷システムは, Sheffer 製アクチュ エータによる片持柱の水平載荷システムである. アク チュエータは MTS 社製リアルタイムコントローラによ り制御され, コントローラソフトウェア Structural-Test-System と xPC Target リアルタイム環境を組み合わせる ことにより、アクチュエータを実時間でデジタル制御で きる. 試験体は剛な柱基部に鋼棒とヒンジを組み合わ せた塑性ヒンジ構造を取り付けたものである(図-12). 鋼棒が塑性化・座屈・破断することにより、鋼橋脚の強 非線形を表現することができる.

b) ソフトウェア

図-13に本実験における OpenSees, OpenFresco オブ ジェクトの相関関係を示す. 図中の ExpSite, ExperimentalSetup そして ExperimentalControl という赤四角箱が OpenFresco オブジェクトを示し,その他の青四角が OpenSees オブジェクトを表す. 全体として大きく3つ に分けられているが,左が京都大学における実験サー バー,中央が京都大学における計算クライアント,右が UC Berkeley における実験サーバーである. 各実験施設 間は TCP/IP ネットワークにより結ばれ, ExpSite 同士 が通信している.

実験サーバーにおいては、ExpSiteの隣にアクチュエー タ配置をモデル化した ExperimentalSetup があり、次い で実験コントローラと通信するための ExperimentalControl がある.京都大学においてはアナログ信号により、 UC Berkeley においてはデジタル信号により実験コント ローラと通信している.

計算クライアントには主に OpenSees オブジェクトに より構成され, P1 橋脚をモデル化したファイバーモデ ルや運動方程式を解くためのオブジェクトが配置され ている.

本実験システムは計算クライアントではユーザーは 純粋な数値計算アプリケーションとして取り扱うこと ができるため、分散ネットワークや実験システムなど の詳細を知る必要はない.一方で実験サーバー側はク ライアントからの要求を待ち受け、命令値に従って載 荷実験を行えば良く、解析の詳細を知る必要はない.こ のように依存性の少ない構造により、柔軟で拡張性に 富んだ分散ハイブリッド実験システムを構築すること ができる.

(3) 実験結果

まずJR 鷹取記録80%入力による橋梁システムの地震 応答結果を実施した.解析条件は2章(3)と同じである. 図-14に分散ハイブリッド実験結果を示す.桁変位応答 には実験結果とともに数値解析結果(図-3)を点線で示 してある.本実験では80%入力に引き続き,100%入力 による分散ハイブリッド実験を実施するため,時間の 関係上,80%入力実験は最大応答を示した後の約13秒 で中止した.RC実験供試体にはねじりによる斜めひび 割れが生じており,P2橋脚は正負交番載荷実験結果で みたように,履歴が細く,やや逆S字形になっており, 曲げとねじりが連成した応答を示している.結果,桁



図-13 分散ハイブリッド実験システム相互作用図



図-14-d 桁変位応答

図-14 分散ハイブリッド地震応答解析結果(80%入力)

は数値解析に比べて最大応答も大きくなり,またやや 周期が長い応答性状となっている.P3橋脚は大きく塑 性化しているものの,安定した履歴を示している.

80%入力に引き続き,100%入力による分散ハイブリッ ド実験を実施した.地震応答結果を図-15に示す.P2橋 脚は80%入力による損傷のため,さらに細い履歴となっ ている.またP3橋脚モデルは大きな変形に伴い破断し, 小さな履歴へと移行しているのが分かる.このような 強非線形状態でも分散ハイブリッド地震応答実験を安 定して実施することができた.

本実験では日米間の分散ハイブリッド実験を安定し て実施するため、計算時間間隔 0.01 秒を実際には 1 秒 で進行するように設定した.この 1 秒にはファイバー モデルによる P1 橋脚モデルを用いた運動方程式の時間 積分や日米における実験の載荷・計測時間、そして日米 間のネットワーク通信時間を含んでいる.その結果 20



図-15 分散ハイブリッド地震応答解析結果(100%入力)

秒のシミュレーションを約30分のハイブリッド実験と して実施することができた.これは一つの実験機関で 実施する擬動的実験とほぼ同等の速度で実験を実施で きたことになり、地理的に分散している実験を統合し た本実験システムによる地震応答性状評価は十分実用 的であることが確認できた.

6. 結論

本研究では、逆L字形 RC 橋脚を有する二径間連続 橋梁の地震応答を評価するため、逆L字形 RC 橋脚の 正負交番実験および日米間分散ハイブリッド実験を実 施した.本研究により得られた結果をまとめると以下 の通りである.

- (a) 曲げとねじり挙動が連成すると予想される逆L字 形 RC 橋脚モデルに対して正負交番載荷実験を行い、曲げ成分とねじり成分の分離やひび割れパターンなどの基本的変形特性を把握した.その結果、本 モデルはねじり変形が大きいながらも基部に曲げ ひび割れが確認できるなど、曲げとねじりの両変 形の影響が確認できた.また得られた水平荷重-変位関係は曲げ損傷するものよりも細く、また逆 S 字形の履歴となった.
- (b) OpenFresco と OpenSees を用いた日米間ハイブリッ
 ド実験を世界で初めて実施した.実験時間は解析

時間20秒に対して約30分と、ローカルに実施する 擬動的実験と同等の時間で実施することができた.

(c) OpenFresco と OpenSees により,部材挙動の理解 度に応じた適切なモデルを選択してシミュレーショ ンを行うことができる.本研究では単柱式 RC 橋 脚を最も精度良く評価できるモデルとして三次元 ファイバーモデルを、逆L字形 RC 橋脚と強非線 形挙動下の鋼橋脚は精度良く解析することは困難 であるため,ハイブリッド実験モデルとしてモデ ル化した.従来のハイブリッド実験では,ファイ バーモデルのような高度な数値モデルの利用や複 数の地理的に離れた実験を統合することは困難で あったが,OpenFresco と OpenSees の組み合わせ により実現可能となり,その有用性が確認できた.

謝辞: 本研究は,科学研究費補助金若手研究 (A) 16686029 番の成果の一部を取りまとめたものである. また日米間ハイブリッド実験については(独)防災科 学技術研究所が進める,「実大三次元震動破壊実験施設 (E-ディフェンス)を活用した国内外共同モデル研究」 の橋梁耐震実験研究の援助にて実施しました.ここに 深く感謝の意を表します.

参考文献

- 土木学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会(編):阪 神・淡路大震災調査報告土木構造物の応急復旧,補修, 補強,丸善,1999.
- 川島一彦, 渡邊学歩, 畑田俊輔, 早川涼二: 逆L 字型鉄筋 コンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究, 土木学 会論文集, Vol. I-65, No. 745, pp. 171–189, 10 2003.
- 3) 永田聖二, 川島一彦, 渡邊学歩: 逆L 字型 RC 橋脚の地震 応答特性, 第 28 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2005.
- Ristić, D., Yamada, Y. and Iemura, H.: Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, Technical report, Kyoto University, 1986. KUCE, No.86-ST-01.
- 5) アーク情報システム: TDAP III Ver 2.01 理論説明書, 1999.
- 6) Fenves, G. L., McKenna, F., Scott, M. H. and Takahashi, Y.: An object-oriented software environment for collaborative network simulation, *Proceedings of 13th World Conference*

on Earthquake Engineering, p. No.1492, 8 2004. DVD-ROM.

- 7) OpenSees web page : http://opensees.berkeley.edu
- 8) NEES Consortium, Inc web page : http://www.nees.org
- Takahashi, Y. and Fenves, G. L. : Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, p. DOI: 10.1002/eqe.518, 8 2005. published online.
- 10) Schellenberg, A. and Mahin, S. A.: Integration of hybrid simulation within the general-purpose computational framework OpenSees, *Proc. of 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 2005.
- 高橋良和,五十嵐晃,家村浩和:オブジェクト指向構造 解析システムの分析と設計,土木学会論文集, Vol. I-57, No. 689, pp. 301–320, 10 2001.
- 12) OpenFresco web page: http://neesforge.nees.org/openfresco

(2007.4.6 受付)

US-JAPAN DISTRIBUTED HYBRID SIMULATION OF BRIDGE SYSTEM

Yoshi TAKAHASHI, Yosuke NAKANO, Hirokazu IEMURA, Steve A. MAHIN and Gregory L. FENVES

To evaluate a seismic response of bridge systems, it is important to adopt the most appropriate model for each component. In this study, the seismic response of a bridge with a C-bent and a single RC pier and a steel pier is evaluated. Whareas the single RC pier is modeled by the fiber model, the C-bent RC and the steel pier are modeld by the hybrid experimental models because any numerical models cannot take into account their strong nonlinear behavior. OpenSees and OpenFresco are used to conduct the international hybrid simulation. As the results of the international hybrid simulation between Kyoto Univ. and UC Berkeley, the nonlinear seismic response of the bridge system can be obtained and the distributed hybrid simulation is found to be a powerful tool for the evaluation of structral systems.