様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ５ 月 ２９ 日現在

機関番号：１３９０３
研究種目：基盤研究(A)
研究期間：2011～2014
課題番号：２３２４６０８４

研究課題名（和文）多方向同時加振実験による連続高架橋全体系の限界状態の解明と動的耐震照査法の確立

研究課題名（英文）Investigation on ultimate behavior of continuous elevated-girder highway bridges by multi-directional shake table test and development of advanced seismic performance verification method

研究代表者
後藤　芳顕（GOTO, Yoshiaki）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：９０１４４１８８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　37,100,000円

研究成果の概要（和文）：橋軸と橋軸直角方向に独立に入力した水平１方向地震動成分に対して近似的に耐震性を照査する現行の都市内高架橋の耐震設計法の改良を目指し，支配的な水平2方向地震動成分の同時入力に対して高架橋システムを照査する精緻な手法を検討した．まず，実構造を再現した過去最大級の高架橋模型の水平2方向同時加振実験を中国同済大学の橋梁用マルチ振動台を用いて実施した．この実験結果をもとに，鋼製橋脚，CFT橋脚，ゴム支承，上部構造の連成が高架橋システム全体系の終局挙動に与える影響を解明するとともに，高架橋の高度解析モデルを構築した．さらに，橋脚頂部に作用する等価水平復元力2成分の相関式による耐震安全性照査法を提示した．

研究成果の概要（英文）：A large scale bidirectional shake table test was carried out on a 1/6.7 scale 2-span continuous elevated-girder bridge model by using the shake table array at Tongji University. Based on the test results, it was investigated how the ultimate behavior of the bridge system are affected by the interaction between the components such as steel or CFT piers, rubber bearings and a superstructure. In addition, an advanced FE model that precisely expresses the behavior of the entire bridge system was developed by appropriately modeling the interaction and behavior of the components. Finally, a reliable safety verification method for elevated-girder bridges were presented under the simultaneous input of horizontal bidirectional seismic acceleration components. In this method, the ultimate state of the steel and CFT piers are expressed by the interaction equation expressed in terms of the equivalent horizontal force components acting at the top of the piers.

研究分野：構造工学，耐震工学

キーワード：耐震構造　耐震設計法　動的応答解析　連続高架橋　振動台実験　終局挙動　積層ゴム支承

１．研究開始当初の背景

現行の都市内高架橋の耐震設計では，通常，橋軸方向と橋軸直角方向に独立に地震波の水平１方向成分を入力して耐震性が照査されるが，実際の地震波は 3 方向成分を持っており，鉛直地震動の影響が小さいとしても，少なくとも水平 2 方向地震動成分の連成の影響を受けるので，現行の設計法は実情からかなり乖離したものとなっている．このため，近年の地震動研究の進展を背景に，実情に即して想定された 3 方向地震動成分を用いて直接的に構造物の耐震性を照査する手法を確立しようという大きな流れがある．この場合，高架橋の限界状態にはその非線形性に起因した載荷経路依存性が大きく，現行の１方向繰り返し載荷で評価された限界状態は不十分である．信頼性のある高架橋の耐震性の照査法を確立するには，多方向地震動下での，橋脚のみならず，支承，上部構造など主要な構成要素の連成が高架橋システム全体系の終局挙動に与える影響を解明し，耐震解析や限界状態評価に適切に反映することが重要である．このためには，実構造を再現した大型高架橋模型の多方向地震動入力による加振実験を実施し，終局挙動の実態を解明することが必須である．残念ながら，このような高架橋の大型加振実験が可能な橋梁用マルチ振動台は国内になく，我が国の橋を対象とした実験は皆無である．近年橋梁用マルチ振動台は米国ネバダ大学や中国同済大学で建設されたが，橋全体系を対象とした実験はいまだ非常に少ないのが現状である．したがって，多方向地震動下の高架橋システム全体系を対象とした信頼性のある耐震照査法の確立にはほど遠い状態であった．

２．研究の目的

高架橋システムを対象にした大型加振実験により多方向地震動連成下での限界状態と照査基準を明らかにするとともに，耐震解析に用いる全体系の精緻な解析モデルを構築することで，合理的でかつ信頼性のある耐震照査法を提示する．

３．研究の方法

多方向地震動下での高架橋全体系の大型模型の振動台実験とこれをもとに開発する高精度有限要素モデルによる数値解析により，橋脚，支承，上部構造などの構成要素の連成を考慮した高架橋全体系の限界状態とその照査基準を検討する．構成要素である橋脚，支承，上部構造，制震部材などは，加振実験に先行して，3 次元載荷実験により力学特性を把握し，実情に即した有限要素モデルを構築する

４．研究成果

(1) <u>世界最大級のマルチ振動台による高架橋大型模型の水平 2 方向加振実験の実施：</u>高架橋全体系の終局挙動に及ぼす橋脚の終局状態到達後の橋脚－支承－上部構造の連成挙動の解明ならびに，他の構成要素に比べ地震時に非常に大きな変形をし，橋脚への地震慣性力の伝達に支配的な影響を及ぼすゴム支承の高架橋に設置された状態での挙動を解明するために高架橋における橋脚－支承－上部構造をなるべく実状に即した形で再現した過去最大級の 2 径間連続高架橋模型(1/s=1/6.7()図-1)の終局状態までの水平 2 方向同時加振実験を中国同済大学のマルチ振動台の振動台 3 基を用いて実施した．この模型では 5 種類の異なった鋼製橋脚(CFT 脚含む）を対象とした．

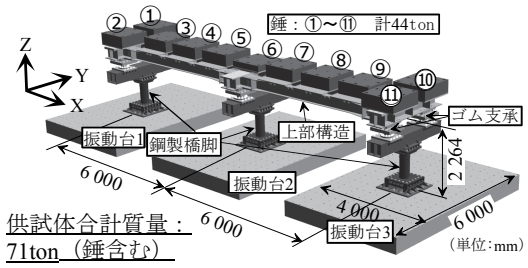


図-1 連続高架橋模型供試体

まず，上部構造は支間長 40m の 2 径間連続構造を対象として，加振実験に用いる振動台の制約から縮尺比 1/s=1/6.7 と設定するとともに，簡単のため 2 主桁構造とした．この上部構造に対して，橋脚の損傷で高架橋が終局状態に到達するように橋脚とゴム支承の諸元と入力地震動の振幅拡大倍率を決定した．

ゴム支承は，実験模型では一般的な形状係数の範囲内で最大応答せん断ひずみが 175% 以内となるように設計した．上部構造は簡単のため 7 主桁から 2 主桁へ減少させているため，相似則を考慮した 1 支承線上の全支承のせん断剛性と鉛直軸まわりでの回転剛性の総和が等しくなるように，支承諸元と支承間隔を決定した．

橋脚については端部・中央の 3 橋脚とも同一幾何形状とし，無次元構造パラメータが過去の単柱の加振実験に整合するように設定した．軸力比は中央橋脚 P2 が端部橋脚(P1, P3)より大きくなるように錘を配置し，損傷が中央橋脚から発生し，両端橋脚に伝播した後に，高架橋全体系が終局状態に到達し倒壊するシナリオを想定した．

入力地震動には比較的多くの繰り返しが作用するという理由から Tsugaru 波(日本海中部地震津軽大橋観測波)の水平 2 方向(lg+tr 成分)を用いる．時間軸を相似則に従い $1/\sqrt{s}$ に縮小した上で，終局挙動に至る振幅拡大倍率を無充填円形断面橋脚(以下 HLC 橋脚)で 270%，CFT 円形断面橋脚(以下 CFC 橋脚)では 450%と設定した．

(2) <u>高架橋の有限要素解析モデルの構築：</u>HLC 橋脚を有する 2 径間連続高架橋模型の精緻な FE モデルを構築した．鋼製橋脚のパネル，リブ，ダイアフラムは 厚肉シェル要素

(S4R)で離散化し，板厚ならびに幾何学的初期不正については事前に実施した形状計測の結果に基づく値を用いた．残留応力については無視した．鋼材の材料構成則である三曲面モデルのパラメータは鋼材の 1 軸引張試験をもとに決定した．減衰は橋脚の弾性加振実験より求め，剛性比例型の粘性減衰として導入した．橋脚基部の固定度を表す回転バネ剛性は，FE モデルの 1 次固有周期が橋脚の弾性加振実験と一致するように決定した．

ゴム支承は，計測された加振実験での支承の反力と相対変形に関する 6 自由度の履歴挙動と FE 解析をもとに，独立な線形バネ，ダッシュポットで表した．

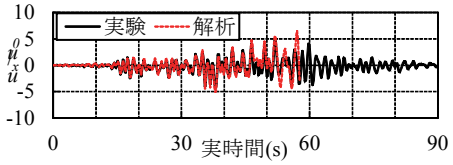
上部構造，橋脚横梁は弾性シェル要素で表現した．上部構造に設置した各錘はその重心位置に等価な集中質量と回転慣性を考慮した．支承反力計測用の 6 分力計は剛なはり要素で表現し，重心位置に集中質量を設置した．上部構造の減衰は 0 としている．

以上のモデルにより加振実験を対象とした数値解析を実施し，モデルのキャリブレーションを行った後，その妥当性と精度について検討を行った．

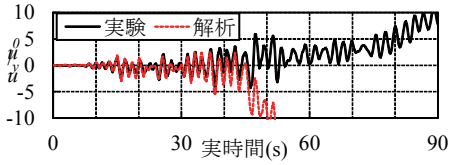
(3) 高架橋を支える橋脚の挙動の解明：

① HLC 橋脚：中央橋脚 P2 での橋脚頂部水平変位成分と等価水平復元力合力の時刻歴を図-2 に，等価水平復元力－変位関係を図-3 に示す．ここで，等価水平復元力合力は Pushover 解析により定められた最大復元力を限界値として無次元化を行っている．軸力比の高い中央橋脚 P2 がはじめに復元力の限界値へ到達し，それに続き端部橋脚 P1，P3 が限界値に到達したのちに，全体の変位が増大していく．ただし単柱の加振実験と異なり，変位増大は緩やかである．これより，橋脚の Pushover 解析で定めた水平復元力の限界値が工学的にも終局状態への到達を表すと考えられる．変位増大が緩やかであるのは単柱実験では局部座屈変形が片側に偏るのに対して，高架橋模型の橋脚にはほぼ軸対称の提灯座屈が生じ耐力低下が小さいためと考えられる．また，FE 解析は橋脚が限界値に到達し全体系が終局状態に至るまでは実験をよく再現する．一方，全体系が終局状態を越えて倒壊状態に至る領域では実験結果との差が見られる．すなわち，図-4(a)に示すように解析では局部座屈変形の進展が早く，図-2(b)のように，水平変位が急増し，橋軸直角の倒壊方向も逆になる．

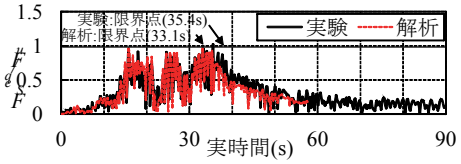
次に，各橋脚に作用する鉛直軸力の変動を図-5 に示す．これによると，実験，解析ともに加振に伴い初期軸力の大きい中央橋脚での座屈による圧縮変形が両側の橋脚に先行することで，中央橋脚から両端部橋脚への軸力の再配分が生じている．高架橋モデルでは中央橋脚の圧縮軸力が低減することで，単柱に比べて耐力低下が緩やかであると考えられる．解析でもこの傾向は捉えているが実験に較べ軸力の再配分が急速に進行する．これは，先に述べたように中央橋脚の座屈変形の進展が解析では大きいことによる．



(a) 変位(橋軸方向)

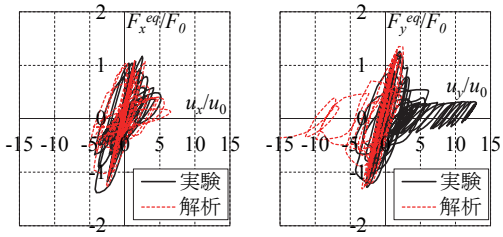


(b) 変位(橋軸直角方向)



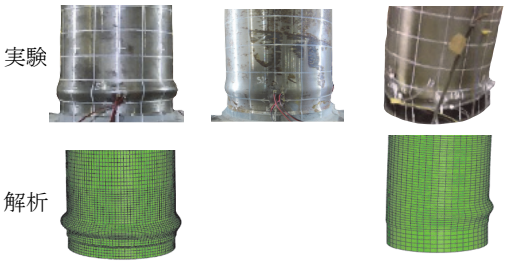
(c) 等価水平復元力合力

図-2 時刻歴応答(HLC)



(a) 橋軸方向　　(b) 橋軸直角方向

図-3 等価水平復元力－水平変位関係(HLC)



(a) HLC 橋脚　(b)CFC 橋脚　(c)単柱実験

図-4 橋脚基部の局部座屈変形

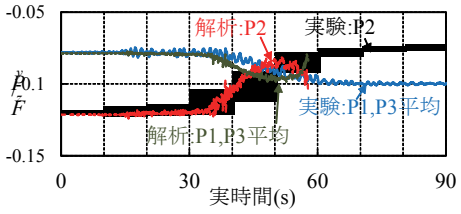
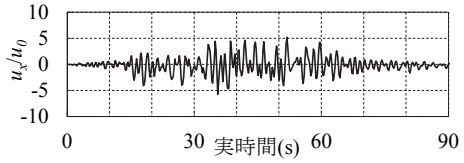


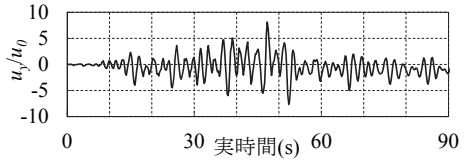
図-5 鉛直軸力変動(HLC)

② CFC 橋脚：中央橋脚 P2 での橋脚頂部水平変位成分と等価水平復元力合力の時刻歴を図-6 に示す．無充填の HLC 橋脚を持つ高架橋の 1.7 倍の振幅を持つ地震動を入力したにもかかわらず，CFT 橋脚では局部座屈変形は限界値到達前に生じるものの，図-4(b)に示す

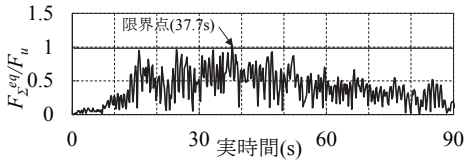
ようにその進展は HLC 橋脚に較べ遅く，最終的な変形量も小さい．これは CFT 橋脚での局部座屈発生後の座屈拘束と自己修復の挙動が有効に発現することによるものと考えられる．この効果により，局部座屈が発生し，復元力が限界値に到達した後においても，耐力低下は見られず，残留変位も非常に小さくなっている．



(a) 変位(橋軸方向)



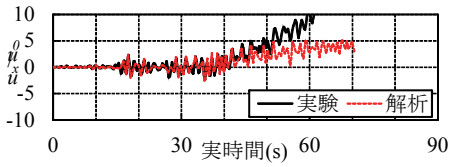
(b) 変位(橋軸直角方向)



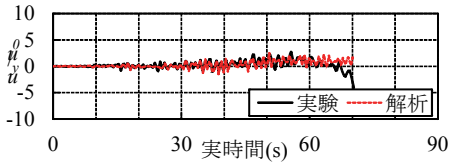
(c) 等価水平復元力合力
図-6 時刻歴応答(CFC)

③単柱加振実験との比較:単柱加振実験(Tsugaru 225%(lg+tr))と連続高架橋加振実験とを比較するために，単柱実験における橋脚頂部水平変位成分等価復元力合力の時刻歴を図-7 に等価水平復元力合力－吸収エネルギ関係を連続高架橋実験の中央橋脚と比較して図-8 に示す．図-8 より，単柱実験での倒壊に至るまでの橋脚 1 本当たりの吸収エネルギは連続高架橋の約 1/2 になっている．これは，高架橋加振実験では各橋脚が支承を介して上部構造に拘束されることで基部の局部座屈変形は図-4(a)のようにほぼ軸対象な提灯座屈モードになっているのに対し単柱加振実験では図-4(c)のように一方に偏り，軟化域での剛性低下が大きいことに起因していると考えられる．

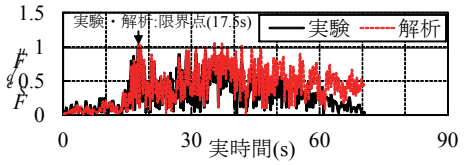
単柱における FE 解析の精度として，実験での応答と比較した図-7 より，FE 解析は，橋脚が終局状態到達以後においても，倒壊が進行する 45 秒付近までは実験とよく一致している．これは，単柱供試体が静定構造であり応力の再配分がなく，橋脚への作用地震力の評価精度が低下しないことによると考えられる．なお，高架橋では不静定構造のため終局状態到達以降の軟化域での各橋脚の応答の予測誤差が橋脚間の荷重の再配分に大きく影響を与える．



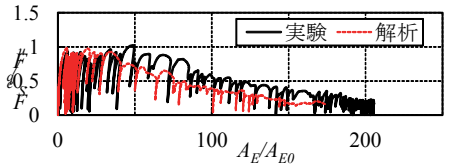
(a) 変位(橋軸方向)



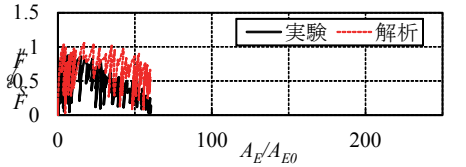
(b) 変位(橋軸直角方向)



(c) 等価水平復元力合力
図-7 時刻歴応答(単柱実験)



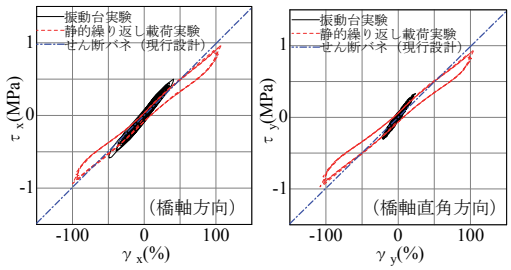
(a) 連続高架橋実験(HLC)



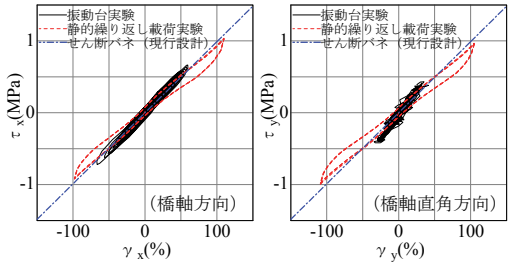
(b) 単柱実験
図-8 等価水平復元力合力
－吸収エネルギ関係

(4) 高架橋に設置された支承の挙動の解明:
①せん断挙動:各高架橋加振実験の中央橋脚 P2 上のゴム支承の水平荷重－水平変位関係を図-9 に示す．また，事前に実施した支承単体の一定振幅(平均せん断ひずみ(以後「せん断ひずみ」と呼ぶ)γ=100%)の 1 方向繰り返し載荷実験の結果および現行設計で用いられるせん断バネの荷重変位関係を同図に示す．せん断ひずみの振幅の小さい HLC 橋脚ではせん断剛性が静的載荷試験や設計値と比べやや高くなっており，振幅の大きさにせん断剛性が依存する傾向を確認できる．また，加振実験ではいずれの供試体においてもゴム支承のせん断ひずみは橋軸直角方向に較べ橋軸方向の応答が大きく生じている．これは，入力波の特性が影響していることも考えられるが，橋脚柱の水平慣性力の作用位置(柱の曲げモーメントが 0 となる位置)が橋軸方向よりも橋軸直角方向の方が高い位置にあるため，ほぼ終局状態に到達している橋脚基部の終局モーメントとつり合う水平力が橋

軸直角方向において小さくなることによることも考えられる．



(a) HLC 橋脚

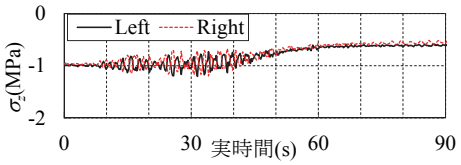


(b) CFC 橋脚

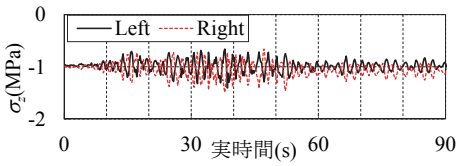
図-9 水平荷重－相対変位関係

②鉛直方向の挙動:中央橋脚 P2 上の左右のゴム支承に作用する鉛直方向平均応力の時刻歴応答を図-10 に示す．図より左右の支承に作用する鉛直方向平均応力は上部構造の死荷重による平均圧縮応力を振動中心として振幅のほぼ等しい逆位相の変動をしている．これは上部構造に作用する橋軸直角方向の地震力により生じる橋軸回りの転倒モーメントに左右の支承が鉛直方向偶力で抵抗することによる．鉛直方向平均応力の変動範囲は圧縮領域に留まるが，支承に作用する曲げモーメントにより無視できない局部的な引張り応力が支承に生じる．なお，実構造の橋脚横ばり上にある支承は 7 基であり，両端部支承では鉛直方向平均応力の振幅は模型の 1.5 倍程度大きくなるのでさらに引張り応力は発生しやすいと考えられる．

HLC 橋脚では図-10(a)のように，15～20s にかけて中央橋脚 P2 上の支承の平均圧縮応力の低下がみられる．これは(4)で述べたように軸力比が大きい中央橋脚が局部座屈により両端の橋脚に比べて沈下し，死荷重分担が減少したことによる．



(a) HLC 橋脚



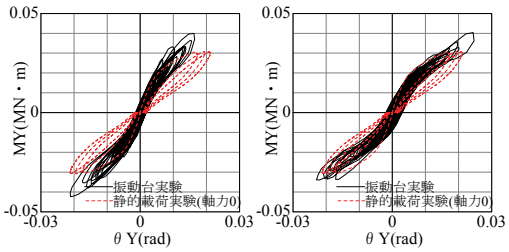
(b) CFC 橋脚

図-10 鉛直方向平均応力の時刻歴応答

③相対回転:中央橋脚上のゴム支承の支承高さ中央位置における橋軸直角軸まわりのモーメントと相対回転角の関係を図-11 に示す．参考として同図に軸力ゼロでの支承単体の静的繰り返し曲げ載荷実験の結果も示す．HLC，CFC 橋脚ではそれぞれ最大 0.021rad，0.025rad という大きな相対回転角が生じている．一方，曲げ剛性の大きい高強度橋脚では支承にはせん断変形が支配的で相対回転は小さい．

支承の回転剛性については，無充填橋脚において最も大きく，高強度橋脚では最も小さい．回転剛性に差異が生じた原因としてはせん断変形による 2 方向せん断変形による有効面積の減少が関与していると考えられる．支承の有効面積の最小値は HLC 橋脚では A_e/A_0=0.93 であるのに対し，CFC 橋脚では A_e/A_0=0.90 となっており，有効面積の減少と，支承の回転剛性低下の傾向が整合している．

静的載荷実験による軸力ゼロでの支承単体の相対回転挙動は図-11 のように加振実験での支承の履歴挙動と明確な差がある．これは曲げ引張り領域の載荷によるゴム剛性の劣化に起因している．②で述べたように鉛直方向力は実際の高架橋の橋脚横ばりの端部支承では大きく変動するので，支承の履歴挙動はより大きな影響を受ける可能性がある．以上のように，変形しやすい鋼製橋脚で支持された連続高架橋のゴム支承では現行の設計で考慮していない相対回転への配慮が必要である可能性がある．



(a) HLC 橋脚　　(b) CFC 橋脚

図-11 橋軸直角軸まわりの
モーメント－相対回転角関係

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計１４件）

① Yoshiaki Goto, Seismic Performance and Safety Verification of Thin-walled Steel and CFT columns under Bi-directional Horizontal Seismic Ground Motions, Proc. of The international workshop on advances in seismic experiments and computations ASEC2012, pp.129-144, 査読無(招待論文), 2012.

②後藤芳顯，海老澤健正，3 方向地震動を受ける正方形断面鋼製橋脚の限界状態の評価

法，構造工学論文集，Vol.58A，399-412，査読有，2012.
③Goto, Y., Mizuno, K., Kumar, G. P., Nonlinear Finite Element Analysis for Cyclic Behavior of Thin-Walled Stiffened Rectangular Steel Columns with In-Filled Concrete, J. Struct. Engineering, ASCE, Vol.138, No.5, 571-584, 査読有，2012.
④後藤芳顯，関一優，海老澤健正，呂西林，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.1，101-120，査読有，2013.
⑤水野剛規，後藤芳顯，水平２方向繰り返しを受けるアンカー部の損傷が鋼製橋脚の終局挙動に及ぼす影響，土木学会論文集 A1，Vol.69，No.2，pp.295-314，doi:10.2208/jscejseee.69.295, 査読有，2013.
⑥後藤芳顯,海老澤健正,奥村徹,松澤陽,小畑誠,Jianzhong Li,Yan Xu, 水平２方向加振を受ける連続高架橋模型における橋脚，ゴム支承，上部構造の連成とその終局挙動について，性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，Vol.17，pp.431-438，査読有，2014.
⑦M. Assad Alamiri，後藤芳顯，地震時に 3 方向の力の成分と 3 方向のモーメント成分が作用する円形断面鋼脚柱の終局限界状態の評価，土木学会論文集，Vol.71，No.1，20-36，doi: 10.2208/jscejseee.71.20，査読有，2015.
⑧Goto, Y., Ebisawa, T., Lu, X. and Lu, W., Ultimate State of Thin-Walled Circular Steel Columns Subjected to Biaxial Horizontal Forces and Biaxial Bending Moments Caused by Bidirectional Seismic Accelerations, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.141, No.4, 04014122-1 -12, doi:10.1061(ASCE)ST.1943-541X.0001067, 査読有, 2015.

〔学会発表〕（計２５件）
①後藤芳顯，構造設計における FEM 解析の高度化と信頼性の向上，第 15 回鋼構造と橋に関するシンポジウム(基調講演)，2012 年 8 月 3 日，法政大学(東京都千代田区).
②後藤芳顯，鋼橋の耐震設計の現状と想定外の被害の軽減に向けて，日本橋梁建設協会橋梁技術発表会および講演会(基調講演)，2013 年 12 月 06 日, 東建ホール(愛知県名古屋市).
③後藤芳顯，耐震設計の現状と今後の巨大地震での被害の軽減に向けて，メモリアル・コンファレンス･イン神戸 2015(招待講演), 2015 年 01 月 20 日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市).

〔図書〕（計１件）
①Yoshiaki Goto，Chapter 10 Seismic Design of Thin-Walled Steel and CFT Piers, Seismic Design, Bridge Engineering Handbook (second edition) edited by Wai-Fah Chen, Lian Duan, CRC Press Taylor &Francis Group, pp.337-379, 2014.

〔産業財産権〕
○出願状況（計３件）

①名称：3 次元構造物載荷における平行維持装置
発明者：後藤芳顯，小畑誠，海老澤健正
権利者：名古屋工業大学
種類：特許
番号：特願 2012-063746
出願年月日：2012 年 3 月 21 日
国内外の別：国内

②名称：高架橋の崩壊防止構造
発明者：後藤芳顯
権利者：名古屋工業大学
種類：特許
番号：特願 2014- 138360
出願年月日：2014 年 7 月 4 日
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ：多方向同時加振実験による連続高架橋全体系の限界状態の解明と動的耐震照査法の確立(http://kozo4.ace.nitech.ac.jp/Shaking_Table_Test/)

テレビ放送：防災減災今できること 巨大地震の揺れに耐えられるか, NHK ニュース「ほっとイブニング」，2014 年 9 月 22 日.

６．研究組織
(1)研究代表者
後藤　芳顯(GOTO, Yoshiaki)
名古屋工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：９０１４４１８８

(2)研究分担者
小畑　誠(OBATA, Makoto)
名古屋工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：３０１９４６２４
張　鋒(CHO, ho)
名古屋工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：７０３０３６９１
海老澤　健正(EBISAWA, Takemasa)
名古屋工業大学・工学研究科・助教
研究者番号：９０３３２７０９
奥村　徹(OKUMURA, Toru)
名古屋工業大学・工学研究科・助教
研究者番号：４０３３２０２７

(3)連携研究者
堀　宗朗(HORI, Muneo)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：００２１９２０５