

◆ 報 文 ◆

地震後の残留変位を低減する橋脚の開発

堺 淳一* Stephen A. MAHIN**

1. はじめに

現行の耐震設計基準によれば、鉄筋コンクリート橋脚 (RC 橋脚) は、十分な変形性能を有するように設計される^{1), 2)}。これは、1971 年の米国サンフェルナンド (San Fernando) 地震をはじめとして、1989 年の米国ロマプリエタ (Loma Prieta) 地震、1994 年の米国ノースリッジ (Northridge) 地震、1995 年の兵庫県南部地震等において橋梁が受けた甚大な被害の教訓から、RC 橋脚の耐震性能向上のための研究が行われ、大規模地震時にも倒壊という最悪の事態を避けるためには橋脚の変形性能を重視した設計が合理的であると広く認識されるようになったためである^{3), 4)}。

しかし、橋脚の変形性能に依存し過ぎると、地震後に残留変形が過大となる可能性があることが指摘されている。倒壊は免れたとしても残留変形が大きければ、地震後に道路としての機能を失い、災害救援・復旧活動に大きな支障をきたし、また、橋梁そのものの復旧にも多大な時間と費用がかかる可能性もある。兵庫県南部地震後には、橋脚の損傷そのものは大きくなかったにもかかわらず、残留変形が大きい橋脚が 100 基以上もあり、これらは撤去・新設されたことが報告されている⁴⁾。こうした背景から、道路橋示方書においては 1996 年に改訂された際に、橋脚の変形性能を考慮した設計法が導入されただけでなく、残留変位に対する規定が設けられた。

こうした残留変位の規定をうけて、この約 10 年間に残留変位を低減させるための構造を開発する研究が行われてきた。たとえば、Ikeda は RC 橋脚に PC 鋼棒を挿入して緊張力を与える橋脚を提案し、静的および擬似動的実験からその耐震性能を検証している⁵⁾。Zatar と Mutsuyoshi も同様な構造に対して載荷実験を行い、こうした構造の非

線形履歴モデルを提案している⁶⁾。家村らは、アンボンド高強度芯材を有する橋脚 (UBRC 橋脚) を提案している⁷⁾。

こうした構造では、PC 鋼棒や高強度芯材の配置場所、PC 緊張力、軸方向鉄筋量と PC 鋼材量のバランス等によって履歴特性は変化するが、こうした点に関して深く追求した研究はなく、明確な提案は示されていない。また、このような構造の地震応答特性を振動台実験によって評価した例や水平 2 方向の地震力が作用した際の履歴特性、地震応答特性を評価した研究はない。

第一著者は、2001 年 7 月より 2005 年 4 月までポストドクター研究員 (博士研究員) としてカリフォルニア大学バークリー校にて RC 橋脚の残留変位を効果的に低減する構造を開発することを目指して、解析および振動台実験の両面からの検討を行った^{8) ~ 11)}。本報文はその結果を報告するものである。

2. 残留変位低減型 RC 橋脚の基本コンセプト

RC 橋脚の残留変位を低減する構造を開発するために、ファイバー要素を用いた静的くり返し載荷解析により RC 橋脚の履歴特性を調べた。その結果、(1) 軸方向鉄筋量を減らすこと、(2) 軸力を高めること、により RC 橋脚の残留変位を低減できることが明らかになった⁸⁾。これは、軸方向鉄筋の非線形挙動が残留変位の一要因であり、軸方向鉄筋量を減らしたり、軸力を高めると、RC 部材の履歴特性にコンクリートの挙動の影響が大きく現れるようになり、鉄筋の挙動の影響が相対的に小さくなるためである。

こうした特性に合致する構造として、軸方向鉄筋量を減らした RC 断面に PC 鋼材を配置し、その PC 鋼材によって緊張力を与える構造 (以下、残留変位低減型 RC 橋脚と呼ぶ) を本研究の対象構造とすることとした。ここで、本構造の要求性能を以下のように設定した。

Development of Reinforced Concrete Bridge Columns That Mitigate Residual Displacements after Earthquakes

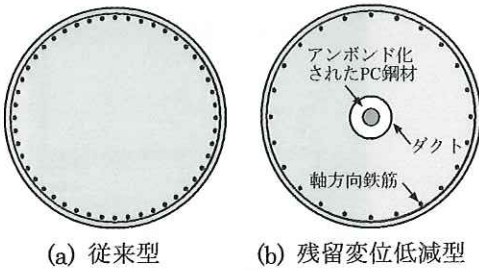


図-1 残留変位低減型RC橋脚の断面

表-1 残留変位低減型RC橋脚の設計変数

	ρ_l	ρ_{ps}	f_p
従来型RC橋脚	1.18%	—	1.7MPa
橋脚A	0.18%	0.29%	6.9MPa
橋脚B	0.35%	0.88%	5.2MPa
橋脚C	0.92%	0.88%	1.7MPa

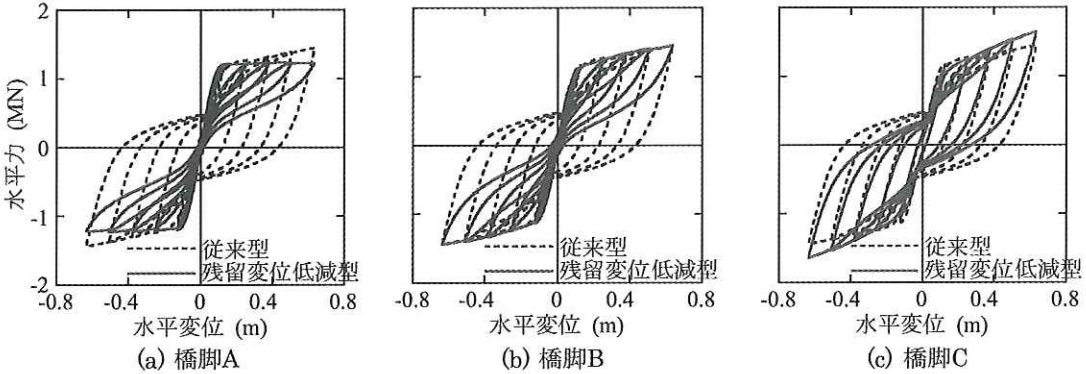


図-2 残留変位低減型RC橋脚の履歴特性の例

1. 水平力～水平変位関係の骨格曲線および終局変位は従来のRC橋脚と同程度となること
2. 残留変位が従来のRC橋脚に比べて十分小さいこと
3. エネルギー吸収性能が過度に小さくならないこと
4. PC鋼材は降伏しないこと

PC鋼材の配置位置やPC鋼材とコンクリートの付着の有無を対象とした解析から、図-1に示すようにPC鋼材を断面の中央に配置し、PC鋼材とコンクリートの付着を切る（アンボンド化する）と、上述の性能を満たすことができるため、こうした構造を基本とした。

図-2に直径1.8mの円形の残留変位低減型RC橋脚の履歴特性の例を示す。表-1は、これらの橋脚を設計する際に用いた設計変数を示している。ここで ρ_l 、 ρ_{ps} 、 f_p はそれぞれ軸方向鉄筋比（面積比）、PC鋼材とコンクリートの面積比、死荷重とPC緊張力によって橋脚基部に生じる軸応力を示している。橋脚Aは軸方向鉄筋、PC鋼材の量がともに少なく、大きなPC緊張力を与えた構造、橋脚Bは橋脚Aよりも軸方向鉄筋とPC鋼材の量を増やしてPC緊張力を小さくした構造、橋脚Cは橋脚Bよりも軸方向鉄筋の量を増やして

PC緊張力を0とした構造である。いずれの橋脚も曲げ耐力は従来型のRC橋脚と同程度であるが、上述のように設計変数を変化させた結果、橋脚Aは残留変位はほぼ0と小さいがエネルギー吸収性能および降伏後剛性が小さい、橋脚Bは従来型RC橋脚に似た骨格曲線を有し、残留変位は小さい、橋脚Cは降伏後剛性は大きいが残留変位も比較的大きいというそれぞれ異なる履歴特性を示す。このように本構造は、PC鋼材の量、PC緊張力、軸方向鉄筋量等の設計変数を様々に変化させることで、設計者が意図する性能をもつ橋脚を比較的容易に実現できる特徴を有する。

3. 振動台加震実験

上述の構造の耐震性能を実証するため、また、水平2方向加震を受けた際の地震応答特性を調べるために、橋脚模型に対する水平2方向入力による振動台加震実験を行った。

従来型RC橋脚模型は、現行の米国の耐震設計基準²⁾で曲げ破壊が先行するように設計されたRC橋脚の4.5分の1縮尺模型である。橋脚模型の断面は、直径が0.4mの円形断面であり、せん断支間比は6となるように模型高さを設定した。模

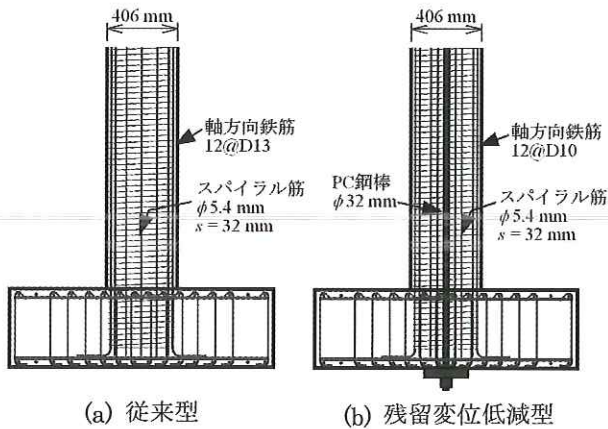


図-3 橋脚模型の塑性ヒンジ部の配筋

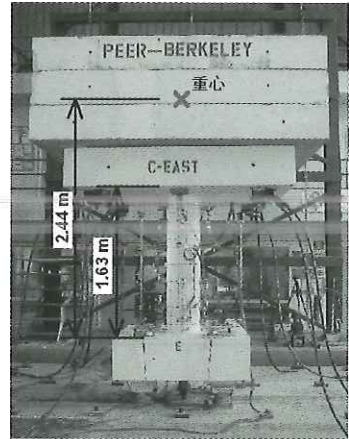


写真-1 橋脚模型の設置状況

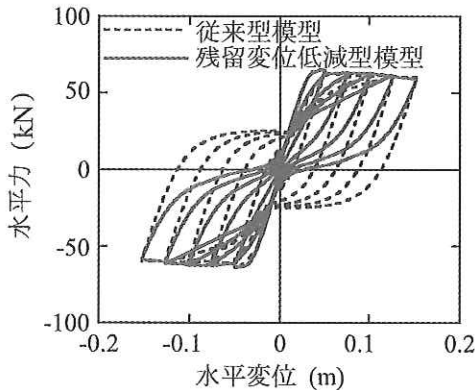


図-4 橋脚模型の履歴特性

型の頂部には、上部構造の慣性質量と死荷重による軸力を模擬するために写真-1に示すようにコンクリートブロックを載せた。柱基部に作用する軸力は291kNである。これは、2.2MPaの軸応力に相当する。

図-3に示すように従来型RC橋脚模型には、軸方向鉄筋として直径13mmの異形棒鋼 (D13) を12本配置した。軸方向鉄筋比は1.19%である。

残留変位低減型RC橋脚模型は、図-4に示すように従来型RC橋脚模型と同様の水平力～水平変位の骨格曲線を有し、残留変位は十分小さくなるように設計した模型である。ここで、図-4は、後述の材料特性を用い、 $P-\Delta$ 効果を考慮して行った静的くり返し載荷解析の結果である。

残留変位低減型RC橋脚模型には、直径10mmの異形棒鋼 (D10) を12本配置して、軸方向鉄筋比を従来型RC橋脚模型の約半分の0.66%とした。その上で、断面の中心にあらかじめ埋め込んだ塩

化ビニールパイプの中に直径32mmのPC鋼棒を挿入し、379kNの緊張力を与えた。この結果、柱基部には5.2MPaの軸応力が作用した。PC鋼材に生じる初期応力は469MPaであり、これは後述する降伏強度の46%に相当する。

横拘束筋としては、いずれの模型にも、直径5.4mmの丸鋼を32mm間隔でらせん状 (スパイラル筋) に配置した。横拘束筋比は0.76%である。本来ならば、0.5%程度の横拘束筋比で設計基準を満足するが、加震実験においてせん断破壊を生じさせないために、本模型には横拘束筋を多めに配筋した。

実験時のコンクリート強度は、41.7MPaである。用いた鋼材の降伏強度は、D13、D10、スパイラル筋、PC鋼棒に対してそれぞれ491MPa、488MP、610MPa、1024MPaである。これによれば、PC鋼材の降伏耐力は826kNとなる。

これらの材料の物性を元に従来型RC橋脚模型の変形性能を評価すると、降伏変位、終局変位はそれぞれ0.027mm、0.201mmであり、終局じん性率は7.6となる。

入力地震動には、1989年のロマプリエタ (Loma Prieta) 地震で観測されたロスガトス (Los Gatos) 記録の修正波を用いた。加震のX、Y方向に、それぞれ断層直交方向の地震動、断層平行方向の地震動を入力した。加震振幅は7%、10%、70%、100%の4段階に増加させた。最初の2段階 (7%、10%) は、弾性レベルの応答を調べるための実験であり、後半の2段階 (70%、100%) は非線形地震応答を調べるための実験である。実験は、同

一模型に対して加震振幅を増加させる手法としたため、100%加震時には70%加震によって生じた損傷や変形が残留した状態から加震されている。なお、70%加震は目標応答じん性率を4程度とした設計地震力レベルの地震動、100%加震は目標じん性率を模型橋脚の終局じん性率程度の応答を想定した地震動である。これらの振幅は事前解析に基づき設定したが、後述のように実験ではこれらの倍近くの応答が生じた。

入力地震動の時間軸は、相似則を考慮して $\sqrt{4.5}$ 分の1に圧縮した。

4. 残留変位低減型RC橋脚の地震応答

図-5は、70%、100%加震時の上部コンクリートブロックの重心位置（慣性力作用位置）での応答変位をX方向、Y方向のそれぞれにおいて比較した結果である。表-2には、70%、100%加震時における最大応答変位と残留変位を原点からの距離 d_i として表している。ここで、時刻 t における原点からの距離 d_i は、以下の式に基づき求めた。

$$d_i = \sqrt{d_{x \cdot i}^2 + d_{y \cdot i}^2} \quad (1)$$

ここで、 $d_{x \cdot i}$ 、 $d_{y \cdot i}$ はそれぞれ時刻 t におけるXおよびY方向の応答変位である。

70%加震時には、両模型ともに加震開始から4.8秒でX方向の最大応答変位を生じた。ほぼ同時刻に原点からの距離で表した応答変位が最大となる。このときの最大距離は、従来型RC橋脚模型、残留変位低減型RC橋脚模型でそれぞれ0.187m、0.189mであり、これを計算による降伏変位（=0.027m）に基づく応答じん性率で表すと約7.5となり、終局じん性率に近い応答が生じたこととなる。

ほぼ同程度の最大応答が生じた後、従来型RC橋脚模型はX、Y方向ともに負側に応答の中心が移動するのに対し、残留変位低減型RC橋脚模型では応答の中心はほぼ0に戻る。この結果、従来型RC橋脚模型では原点からの距離で0.031mと、降伏変位を超える残留変位が生じるが、残留変位低減型RC橋脚模型では0.008mと、従来型RC橋脚模型の25%程度の残留変位しか生じない。

いずれも終局変位に近い応答が生じたにもかかわらず、橋脚模型の損傷としては、図-6に示すように柱基部でかぶりコンクリートが剥落した程度であり、大きくない。かぶりが剥落した範囲は

表-2 従来型RC橋脚模型と残留変位低減型RC橋脚模型の最大応答変位と残留変位

模型名	70%加震		100%加震	
	最大応答	残留変位	最大応答	残留変位
従来型RC	0.187m	0.031m	0.349m	0.285m
残留変位低減型RC	0.189m	0.008m	0.323m	0.107m

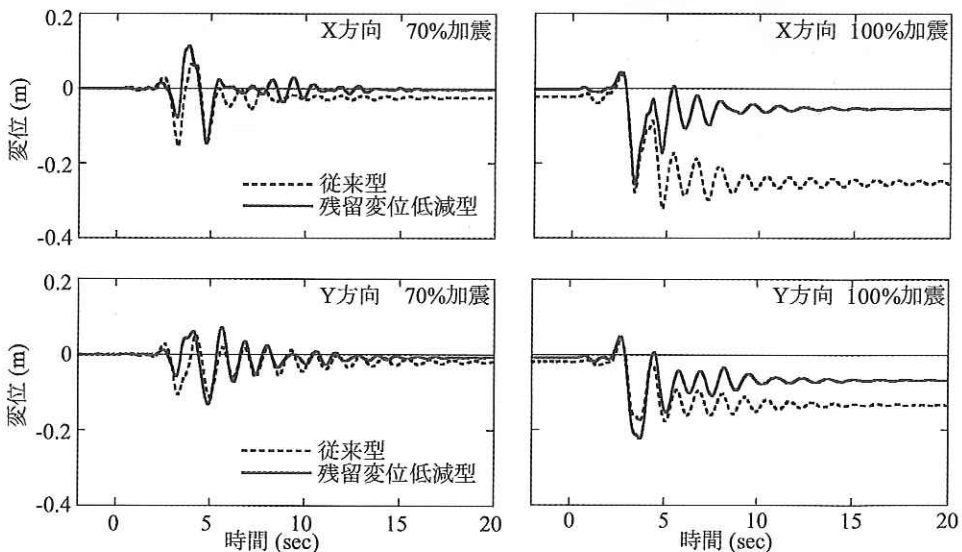


図-5 上部構造慣性力作用位置の応答変位

基部から高さ300mmの位置までと、いずれの供試体も同程度であり、従来型RC橋脚模型の2倍を上回る初期軸力を作用させたにも関わらず、残留変位低減型RC橋脚模型の損傷の程度、範囲は、目視で観察できる範囲では従来型RC橋脚模型とほとんど変わらない。これより、基部における軸

応力がPC緊張力によって大きくなる場合にも、横拘束筋を適切に配置すれば、損傷を従来のRC橋脚と同程度に抑えられることが分かる。

100%加震時には、最大応答がじん性率にして14（従来型RC橋脚模型）、13（残留変位低減型RC橋脚模型）と、計算による終局じん性率の2倍

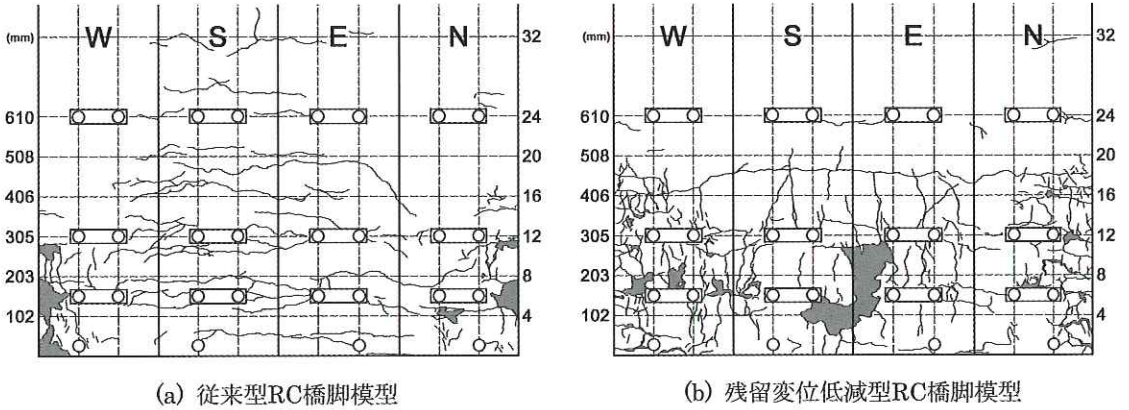
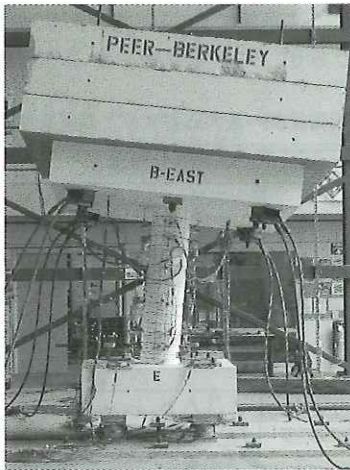
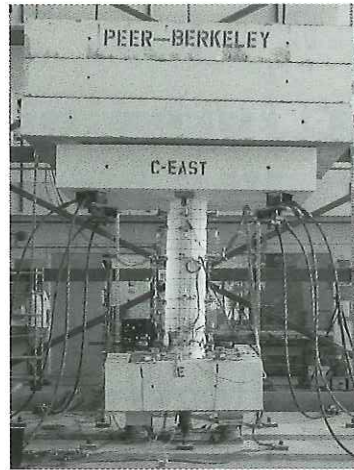


図-6 Los Gatos 記録の70%加震後に生じた損傷



(a) 従来型RC橋脚模型



(b) 残留変位低減型RC橋脚模型

写真-2 Los Gatos 記録の100%加震後に生じた残留変位

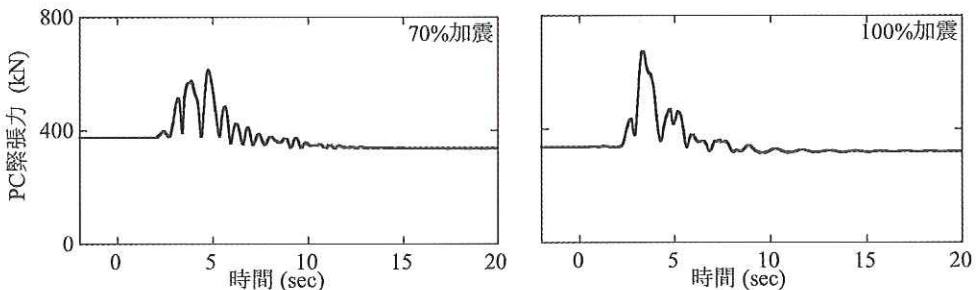


図-7 PC緊張力の変動

近い応答が生じ、写真-2に示すように従来型模型では0.285mと降伏変位の10倍を上回る変位が残留した。一方、残留変位低減型模型では残留変位は0.107mとその38%に抑えられており、本構造は残留変位を低減するのに効果的であることがわかる。

PC鋼棒の緊張力は、図-7に示すように初期緊張力の379kNから、70%加震時には613kNまで、100%加震時には675kNまで増加したが、いずれも鋼材の降伏耐力(826kN)よりは小さく、鋼材の降伏には達しないレベルであった。

5. 結論

本研究では、残留変位を低減することを目的として、軸方向鉄筋量を減らした上でアンボンドPC鋼棒を円形断面RC橋脚の断面中心に挿入し、上部構造の死荷重による軸力程度の緊張力を与えた構造を提案し、このような残留変位低減型RC橋脚の地震応答特性を振動台実験により評価した。本研究で得られた結論をまとめると以下のようになる。

- (1) 本研究で提案する軸方向鉄筋量を減らしたRC断面にPC鋼材を配置し、そのPC鋼材によって緊張力を与える構造では、PC鋼材の量、PC緊張力、軸方向鉄筋量等の設計変数を変化させることで、設計者が意図する性能をもつ橋脚を比較的容易に実現できる。
- (2) 振動台加震実験により、残留変位低減型RC橋脚は従来のRC橋脚の地震応答と比較して、同程度の最大応答変位を生じるが、残留変位を低減できる。応答じん性率が7程度生じる場合、従来のRC橋脚模型では降伏変位を超える残留変位が生じるが、残留変位低減型RC橋脚模型ではその25%程度の残留変位しか生じない。
- (3) 横拘束筋を適切に配置すれば、PC緊張力によって柱基部の軸応力が大きくなる場合にも、柱基部の損傷は従来のRC橋脚と同程度に抑えることができる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 2) California Department of Transportation: *Seismic design criteria* Ver. 1.2., 2001.

- 3) Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M.: *Seismic design and retrofit of bridges*, Jhon Wiley & Sons, Inc., 1996.
- 4) Kawashima, K.: *Seismic design and retrofit of bridges, Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM No. 2828, Auckland, New Zealand, 2000. 1.
- 5) Ikeda, S.: *Seismic behavior of reinforced concrete columns and improvement by vertical prestressing, Challenges for Concrete in the Next Millennium, Proc. of XIIIth FIP Congress*, Vol. 1, pp. 879-884, Balkema Rotterdam, Netherlands, 1998.
- 6) Zatar, W. A. and Mutsuyoshi, H.: *Reduced residual displacements of partially prestressed concrete bridge piers, Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM No. 1111, Auckland, New Zealand, 2000.
- 7) 家村浩和、高橋良和、曾我部直樹：アンボンド芯材を活用した高耐震性能RC構造の開発、土木学会論文集 No.710/I-60, pp. 283-296, 2002.
- 8) Sakai, J. and Mahin, S. A.: *Analytical investigations of new methods for reducing residual displacements of reinforced concrete bridge columns, PEER-2004/02*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, 2004.
- 9) Sakai, J. and Mahin, S. A.: *Hysteretic behavior and dynamic response of re-centering reinforced concrete columns*, 第6回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム論文集, pp. 51-56, 東京, 2003. 1.
- 10) Sakai, J. and Mahin, S. A.: *Mitigation of residual displacements of circular reinforced concrete bridge columns, Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM No. 1622, Vancouver, Canada, 2004. 8.
- 11) Sakai, J., Jeong, H. and Mahin, S. A.: *Earthquake simulation tests on mitigation of residual displacements of reinforced concrete bridge columns, Proc. of 21st US-Japan Bridge Engineering Workshop*, Tsukuba, Japan, 2005. 10.

堺 淳一*



独立行政法人土木研究所
耐震研究グループ耐震チ
ーム研究員, 工博
Junichi SAKAI

Stephen A. MAHIN**



Ph. D., Professor, Civil
and Environmental En-
gineering, University of
California at Berkeley,
USA.