

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560508

研究課題名（和文） 水平2方向地震力を受ける高速道路鋼製橋脚のハイブリッド耐震性能実験

研究課題名（英文） Seismic Performance Hybrid Experiment for Highway Bridge Steel Piers Subjected to Horizontally Bi-directional Earthquake Forces

研究代表者

青木 徹彦（AOKI TETSUHIKO）

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70064946

研究成果の概要（和文）：高速道路橋脚の現在の耐震設計は水平1方向地震力による耐震性能評価となっているが、実際の水平2方向地震力によるハイブリッド耐震実験を行って、合理的で、安全な耐震設計法を提案した。実験の結果、地盤種1、2（固い、中間地盤）では水平1、2方向載荷で大差なかったが、柔らかい地盤種3（日本の大都市沿岸部の大部分）では、1方向載荷では倒壊しなかった橋脚が2方向載荷で倒壊した。種々の地震波に対して耐震性能が得られる数値解析モデルも開発した。

研究成果の概要（英文）：Present seismic design for highway bridge piers is specified based on the structural behavior in the single directional seismic excitation. In this study, rational seismic design is proposed by conducting hybrid test using actual earthquake excitation data in horizontally two directions. As a result, it is found that there is no much difference in the structural behavior between one and two directional earthquake excitations on ground level 1 (hard) and 2 (medium). However, the experimental pier models under two directional loading on ground level 3, where most cities in Japan locate, failed though they did not failed in one directional loading. Numerical analysis model for the hybrid test had developed as well.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学

キーワード：鋼製橋脚、水平2方向載荷実験、ハイブリッド実験、繰り返し載荷実験、高速道路橋脚、耐震設計、耐震性能実験、正方形断面鋼製橋脚

## 1. 研究開始当初の背景

1995年に発生した阪神大震災では都市内の重要構造物である高架高速道路が橋脚の破壊により倒壊し、地震直後の人命救助、救援物資、復旧車両の通行が不能であったばかりでなく、一般道、鉄道の交通妨害、遮断

等、わが国の社会経済活動に長期にわたり甚大な被害を与えた。高速道路の橋脚に関しては、その後に行われた多くの実験データを基に設計基準の見直しが行われ、より安全性の高い耐震設計基準となったが、実験データのほとんどは1方向地震入力に対する構造物

の地震応答であり、実地震のような水平2方向からの実験結果は用いられていない。

ところが、その後本研究者らによって行われた初期段階の実験で、水平2方向荷重の地震力を、円形や正方形等の6種のパターンに単純化し、断面寸法450mm x 450mmのリブ付き正方形断面鋼製橋脚モデルを用いて繰り返し荷重を行ったところ、特に円形荷重パターンでは耐力が半減するという現象が見られた。実地震では従来の1方向直線パターンでも今回の円形パターンでもなく、それらの複合した複雑な荷重入力となるから、必ずしも構造強度が半減することにはならないが、現在の基準では安全性を欠く恐れがある。

橋脚の合理的な設計基準を確立するためには、実地震波を2方向から入力した、より実際に近い状態での地震時挙動を把握する必要がある。そこで本研究では、2方向実地震波を入力したハイブリッド実験を行い、橋脚の地震時挙動を明らかにする。ハイブリッド実験とは、高速道路等の全体構造はコンピュータによる地震応答計算を行い、複雑な弾塑性非線形挙動をする橋脚は数値解析ではその挙動の把握が困難であるためモデル供試体による荷重実験を行って、そこで生じる反力、変位等を数値計算システムに順次取り込むもので、より実際に近い地震時挙動が把握できる。

## 2. 研究の目的

実地震波に対する構造物の応答を知るためにハイブリッド実験を行えば実挙動に近い特性が得られたため、供試体断面寸法450x450mm、高さ250mmの比較的大きな正方形断面鋼製橋脚を用いて、水平2方向からの入力地震波によるハイブリッド実験を行う。

また異なった地震波の特性を考慮した2方向地震波を入力時の履歴特性や応答性状を解明するためには、少なくとも現行示方書に規定する3種の地盤種に対応する各3種類の地震波を入力するハイブリッド応答実験が必要である。本研究ではこれに対応する地震波のNSとEW方向成分を用いて、従来の1方向独立入力および新たな水平2方向の地震波を同時に入力するハイブリッド実験を行い、両者の比較を行って、耐震性能を実験的に明らかにする。

初年度に、実験供試体9体を用いて異なった地盤種別ごとの2方向地震波を与えたハイブリッド実験を行い、実地震波に近い状態における橋脚の地震時挙動を明らかにする。また単調変位増加繰り返し荷重実験も併せて行って結果との比較検討を行う。次年度では、前年度までに用いた供試体諸元と同じ正方形断面を基本寸法とするが、補剛材剛比 $\alpha$ を3種変え、異なった強度を有する橋脚

のそれぞれに、3種の異なった地震波を入力した2方向ハイブリッド実験を行う。最終年度では、ハイブリッド実験結果を従来の1方向荷重実験結果と比較、検討し、合理的設計法の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

(1)実験供試体：実験に用いる供試体は、材質SM490、板幅450mm、板厚6mmの正方形補剛箱型断面で、基部から荷重点までの高さは $h=2400\text{mm}$ とし、高さ方向に225mmの間隔でダイヤフラム( $t=6\text{mm}$ )を設けた。供試体側面図を図-1(a)に、断面図を図-1(b)に示す。

(2)実験システム：本研究の実験システムは、荷重装置および計測装置、制御装置で構成される。荷重装置には、図-2に示す水平2方向荷重用および上部構造重量を想定した鉛直荷重載荷用の3方向にそれぞれ1000kNアクチュエータ1基ずつ用いる。供試体の頭部には各軸3方向回転できる荷重伝達装置を設ける。この装置ではX、Y方向の荷重高さの中央に荷重点を置く。実験制御システムの構成を図-3示す。

制御用PCには、Visual Basic 6.0によるプログラムを作成して組み込み、アクチュエータの作動を制御しながら、振動解析の演算を行う。

(3)水平1方向静的繰り返し実験：

ハイブリッド実験に先立ち、実験で用いる鋼製橋脚供試体の初期剛性、降伏点、最大荷重点および劣化挙動などの基本履歴特

性を調べるために、供試体2

体を用いて、水平1方向静的繰り返し実験を行う。一定鉛直荷重 $P$ は想定軸力比を $P/P_y=0.15$ 、 $P=648\text{kN}$ と設定した。ただし $P_y$ 公称降伏軸力。水平荷重は降伏変位 $\delta_0$ を基準とした漸増変位を正負交番に与える。

(4)水平1方向および2方向ハイブリッド応答実験：入力地震波として、1995年兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台地盤上(I種地盤)のJMA、JR西日本鷹取構内地盤上(II種地盤)のJRT、およびポートアイランド内地盤上(III種地盤)のPKBを用いる。地盤種別I、II、III(JMA、JRT、PKB)ごとの3つの地

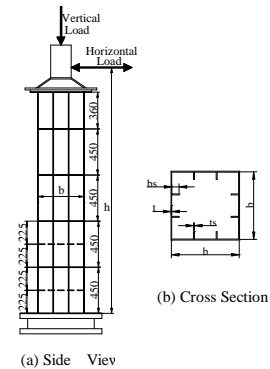


図-1 実験供試体

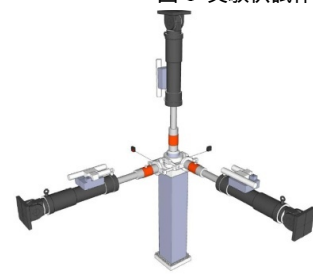


図-2 3方向荷重装置

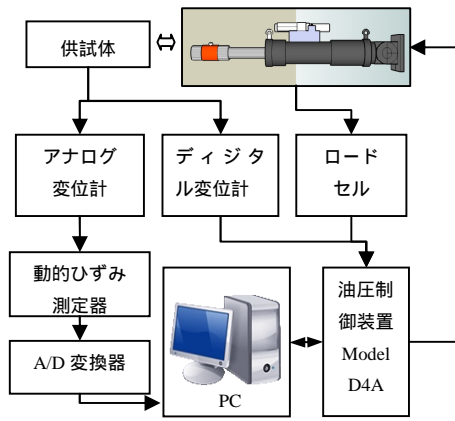


図-3 実験の制御システム

震波(NS, EW, 2D)を用い、各NS方向とEW方向の成分を独立に入力する1方向載荷2種と、2方向同時に入力する1種の計9種のハイブリッド応答実験を行い、両者の違いを明らかにする。供試体は各1体、合計9体を用いる。

実験モデルは、すべての質量が上部加力点に集中する1質点系の1自由度および2自由度モデルとし、相似率を $S=4$ とした。実験記号は地震波名のあとに、NS、EW方向成分の記号を付し、記号2DはNS方向成分とEW方向成分を同時に入力する2方向載荷実験である。解析に用いる実橋脚の質量 $m$ 、1方向載荷の際の初期剛性 $k_0$ 、減衰係数 $c$ 、弾性固有周期などの値は、1方向静的繰返し実験に基づき、 $m=1058(t)$ 、 $k_0=64(kN/mm)$ 、 $T=0.807(\text{秒})$ とした。減衰係数 $c$ は、減衰定数 $h=0.05$ を用い、 $c=2h\sqrt{k_0 m}$ より、 $c=0.823$ を得た。

#### (5)変位制御の手順

水平2方向ハイブリッド実験の運動方程式は一般に次式のように表わされる。

$$[M]\{a\}_{n+1} + [C]\{v\}_{n+1} + \{R\}_{n+1} = [M]\{a_g\}_{n+1}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix},$$

$$\{R\}_{n+1} = \begin{Bmatrix} R_x \\ R_y \end{Bmatrix}_{n+1}, \{a\}_{n+1} = \begin{Bmatrix} a_x \\ a_y \end{Bmatrix}_{n+1},$$

$$\{v\}_{n+1} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix}_{n+1}, \{a_g\}_{n+1} = \begin{Bmatrix} a_{gx} \\ a_{gy} \end{Bmatrix}_{n+1}$$

ここに $\{a\}$ 、 $\{v\}$ はモデル質点の加速度及び速度ベクトル、 $\{a_g\}$ は地震動加速度ベクトル。添字 $x, y$ はそれぞれNS方向とEW方向に関する変数。添字 $n, n+1$ は、 $n \times t$ 、 $(n+1) \times \Delta t$ 時点の値を表す。 $\Delta t$ は時間刻みで、今回の実験では $\Delta t=0.01$ 秒とし、Newmarkの $\beta$ 法( $\beta=1/6$ )により、変位を計算する。

#### (6) コンクリートを充填した鋼製橋脚の水平

2方向載荷ハイブリッド実験：前記と同じ実験供試体を用い、橋脚高さの20% および40%までコンクリートを充填した供試体各9体を用いて前と同様のハイブリッド実験を行う。

#### 4. 研究成果

本研究では、当初に計画した鋼製橋脚の水平2方向載荷ハイブリッド実験に加え、新たに鋼製橋脚の内部にコンクリートを充填した橋脚の水平2方向載荷ハイブリッド実験、およびハイブリッド実験を数値解析的に求めることのできるモデルの開発を行うことができた。以下に1方向載荷と2方向載荷のハイブリッド実験結果の相違、およびコンクリート充填の影響、数値解析の内容と結果を述べる。

(1) コンクリート非充填および充填鋼製橋脚の水平2方向ハイブリッド実験の結果と考察：橋脚の耐震性能を表す主要な指標として、最大荷重、塑性率、残留応力などがある。以下ではこれらを項目ごとに述べる。

最大荷重 (図4)： 水平2方向載荷による荷重の低下は、全体平均で一方向載荷に比べわずか6%低いだけであった。よって最大荷重に関しては一方向載荷の結果を設計値の参考値として用いることができる。コンクリートを充填することにより、充填率の増加とともに若干増加していくがある一定値に近づく。

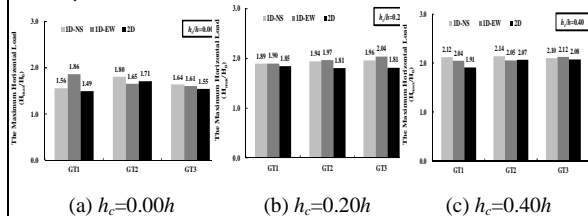


図-4 最大荷重 (1, 2方向載荷及びコンクリート充填率の違い)

最大応答変位 (図5)：地盤種(GT1, 2, 3)ごとの地震波の種類によって大きく変化し、軟弱な地盤ほど大きな変位が生じ、2方向載荷では1方向載荷の2倍から2.5倍にもなる。またコンクリート充填高さ $h_s$ が大きくなる

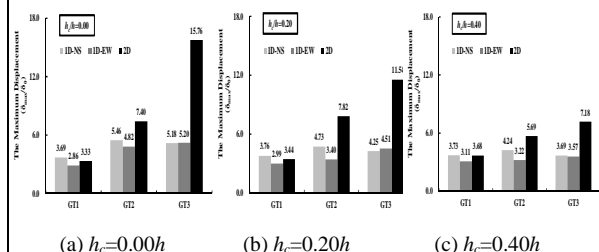


図-5 最大応答変位 (1, 2方向載荷及びコンクリート充填率の違い)

と応答変位は小さくなるが、これは水平2方向載荷のほうが顕著で、コンクリート充填の

効果は2方向載荷で特に大きい。

残留変位： 残留変位の結果は、最大応答変位とほぼ同じ傾向にあるが、一方向載荷と2方向載荷の差は数倍も大きくなった。特にコンクリートを充填していない場合、2方向載荷では1方向載荷の約5倍も大きくなった。コンクリートを充填した場合には、約1.7倍程度になる。残留変位は地震後の高速道路の使用性、機能性に関する重要な指標であるから、設計基準を定めるとき、従来の1方向載荷の結果のみを用いることは危険であり、十分な注意が必要である。

以上の問題点に対して、従来の1方向載荷に基づく設計法を改善する必要があるが、設計法の混乱を避けるため、従来の示方書に与えられた設計式に係数を付け、係数を地盤種、コンクリート充填高さで修正する形式の2方向載荷に対応する改善案を提案した。

(2)ハイブリッド数値実験の解析モデル：ハイブリッド実験は実地震波に対する橋脚の複雑な弾塑性応答を含めた挙動を把握できる現在では最も優れた実験手法であるが、一つの地震波に対して一個の実験供試体が必要となり、実設計の基準の設定に必要な多くの地震波に対する挙動を知るためには、多額の経費と時間が必要となる。

そこで、これに代わる数値解析手法を検討した。地震時の橋脚の荷重履歴曲線を3次式、または2次式で定め、解析結果とハイブリッド実験結果とのよい一致を図るため、解析モデルの諸係数を静的繰返し実験結果に基づいて決定するのが本手法の特徴である。上記(1)で述べた数多くのハイブリッド実験結果を数値解析結果と比較したところ、水平1方向載荷、2方向載荷とも非常に高い精度で一致した。この方法の欠点は、解析モデルの同定に橋脚の静的繰返し実験が必要であることであるが、長所は実地震波の非線形挙動を含む応答が精度良く求められることである。また短所も現在では、FEM等の数値解析で静的繰返し載荷が比較的精度良く求められているため、大きな問題はないと思われる。

(3)今後の課題： 今回の実験的研究によって、従来の設計法では危険となる状況が明らかとなったが、これに適切に対応する設計式を確立するには、橋脚の持つ複数のパラメータに対応するためのさらなる実験データの積み重ねが必要であり、これらの実験データが公表される必要がある。しかし主観の強く入った査読により論文として搭載されず、貴重な実験データが埋もれてしまうことがないよう、工学的意味を捉えた学術研究の評価

がなされる必要がある。

今回ハイブリッド実験に用いた地震波は1995年の神戸地震における観測波がベースになっているが、地震波の特性によって、水平2方向載荷の応答結果が異なってくると考えられ、このような異なった地震波特性に対する対応も将来は必要となる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

Ji Dang, Tetsuhiko Aoki, "An Aproximated Curve Hysteretic Simulation Model for Seismic Response of Steel Bridge Piers", (査読有) ASEC, Proceedings of the International Workshop on Advances in Seismic Experiments and Computations, march 12-13, 2012, pp237-247

党 紀, 青木 徹彦, 五十嵐 晃: 水平2方向地震動を受ける鋼製橋脚の耐震安全性に関する実験的研究, (査読有) 第31回地震工学研究発表会論文集, 31 No.22-A-2, 平成23年11月

党 紀, 中村太郎, 青木徹彦, 鈴木森晶: 正方形断面鋼製橋脚の水平2方向載荷ハイブリッド実験, (査読有) 土木学会構造工学論文集 Vol.56A, 2010, pp367-380

T.Aoki, J. Dang: Bi-directional Loading Hybrid Test of Square Section Steel Piers, (査読有) 14<sup>th</sup> European Conference of Earthquake Engineering, Skopje, Macedonia, 30 Aug. - 4 Sep. 2010

〔学会発表〕(計7件)

渡邊剛士, 小澤拓也, 党 紀, 青木徹彦, 2方向載荷実験における箱型鋼製橋脚の耐震性能に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, 平成22年9月2日, 北海道大学札幌キャンパス

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

青木徹彦 (AOKI TETSUHIKO)  
愛知工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 70064946

### (2)研究分担者

鈴木森晶 (SUZUKI MORIAKI)  
愛知工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 90273276

### (3)連携研究者

( )

研究者番号: