

2 方向弾塑性キャパシティスペクトル法による 矩形断面柱の地震応答値予測の試み

井上 和真¹・五十嵐 晃²

¹正会員 群馬工業高等専門学校 助教 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

E-mail: inoue@cvtl.gunma-ct.ac.jp

²正会員 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

本研究は、構造モデルの水平 2 方向の弾塑性挙動を考慮した加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルからなる弾塑性 S_a - S_d 曲線を考案し、それを用いて矩形断面の水平 2 方向応答特性の分析を行った。

中空の矩形断面をファイバー要素でモデル化した 1 本柱モデルと 1 本柱モデルの荷重-変位関係と整合するように弾性固有周期と降伏震度を調整した等価 MSS モデルを対象に地震応答解析を行った。その結果、正方形断面では 1 方向および 2 方向入力に対して最大応答変位を等価 MSS モデルによって予測することが可能であることが示された。一方、長方形断面では、等価 MSS モデルの最大応答変位と差があることが示された。また、正方形断面、長方形断面、等価 MSS モデルにおいて、1 方向および 2 方向入力による最大応答変位の順序は等しくなる傾向が示された。

Key Words: bi-directional input, multi shear spring model, rectangular cross section column, elastic-plastic response, S_a - S_d curve

1. はじめに

昨今の解析環境の発達により、3 次元モデルによる構造物や地盤を対象にした地震応答解析が行われつつある。従来の構造物や地盤の地震応答解析は、水平 1 方向入力によって行われていることもあり、水平 2 方向入力と構造物や地盤の多次元応答の関係に着目した研究は多くは無く、不明な点が多い。実際の地震動が水平 2 方向に複雑に挙動することに基づけば、従来の水平 1 方向入力に加えて、水平 2 方向入力による地震応答解析を行い、構造物や地盤の地震時挙動の把握をすることが望ましいと考えられる。

これまでに、著者らは、水平 2 方向入力と構造物・地盤の非線形応答の関係に着目し、研究を続けている^{1),2),3),4),5)}。これらの研究は、水平 2 方向の弾塑性応答の連成を考慮できる MSS (Multi shear spring) モデルやファイバーによって構造物をモデル化しているが、対象にした構造物は弾性時に等方モデルである。

実際の構造物に着目すると、鋼製橋脚や RC 橋脚などは矩形断面となる場合が多く、方向別に剛性が異なるため、地震時に複雑な挙動を示すことが予想される。

地震時の応答を予測する方法として、縦軸に加速度応

答スペクトル、横軸に変位応答スペクトルを示した S_a - S_d 曲線(デマンドスペクトル)と構造モデルのプッシュオーバー解析から得られる荷重-変位関係(キャパシティスペクトル)の交点から、地震応答を予測し耐震性能照査を行うキャパシティスペクトル法がある^{6),7)}。キャパシティスペクトル法によって得られた応答値は、地震ハザード分析に用いられることもあるが、構造モデルの弾塑性を考慮した時刻歴地震応答解析を行わずに設計・性能照査用地震動に対する応答値を容易に算出することができる。2 方向挙動を考慮した S_a - S_d 曲線に関する既往研究としては、Gavin・Dickinson⁸⁾による研究があるが、応答スペクトルの算出に弾塑性挙動は考慮していない。

本研究では、構造モデルの 1 質点系モデルの水平 2 方向の弾塑性応答の特徴を整理したうえで、水平 2 方向の弾塑性挙動を考慮した S_a - S_d 曲線(デマンドスペクトル)を考案する。

続いて、ファイバー要素による矩形断面の鋼製橋脚を模擬した 1 本柱モデルと、1 本柱モデルの荷重-変位関係と整合するように弾性固有周期と降伏震度を調整した等価 MSS モデルを対象に、時刻歴地震応答解析を実施した。さらに、地震応答解析に用いた入力地震動の曲線の水平 2 方向の弾塑性挙動を考慮した S_a - S_d 曲線と 1 本

柱モデルの荷重-変位関係の重ね書きを行い、地震応答結果を含めた応答特性の分析を行った。ファイバー要素を用いた矩形断面1本柱と等価MSSモデルの応答特性が近ければ、矩形断面に対しても適用できる2方向弾塑性挙動を考慮した $S_a - S_d$ 曲線を適用することができる。

2. 2方向地震動の評価指標

(1) 2方向応答スペクトル

時間を t 、水平面を $x-y$ 座標系で定義した場合に、与えられた2方向入力に対する固有周期 T を変数にした等方な水平2次元線形弾性1質点振動子（図-1）の水平2次元応答値の x 方向成分、 y 方向成分を $a_x(T, t)$ 、 $a_y(T, t)$ とする。水平2次元応答の動径方向の最大値 $S_{Ra}(T)$ と、固有周期 T の関係を2方向応答スペクトルと呼び、この定義を式(1)に示す。1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における観測記録（以下、JMA神戸波）の加速度軌跡を図-2に示す。また、JMA神戸波を例に、減衰比 h を0.05とした場合の2方向加速度応答スペクトルとNS成分、EW成分の加速度応答スペクトルを図-3に示す。なお、図-2の破線は、加速度軌跡の主軸方向⁹⁾であり、主軸方向は加速度軌跡を構成する離散データの分散が最大となる方向としている。図-2の加速度軌跡と主軸方向から、主軸方向は北北西-南南東の方向を示しておりNS成分と近いことがわかる。図-3から、固有周期0.6秒以下の短周期領域では、2方向応答スペクトルとNS成分の応答スペクトルの大きさが近いことがわかる。固有周期0.6秒～1.0秒の周期帯においては、NS成分、EW成分のそれぞれの応答スペクトルと2方向応答スペクトルと差があり、2方向入力の影響が大きい周期帯と分析できる。

また、いずれの固有周期においても2方向応答スペクトルが、NS成分、EW成分それぞれの応答スペクトルを上回っている。2方向応答スペクトルは、方位角を回転させて得られる軸方成分入力に対する応答最大値で作成された応答スペクトルと等価な意味を持つ性質があり、2方向応答スペクトルは1方向の応答スペクトルを包絡する¹⁾。

$$S_{Ra}(T) = \max_t \sqrt{a_x(T, t)^2 + a_y(T, t)^2} \quad (1)$$

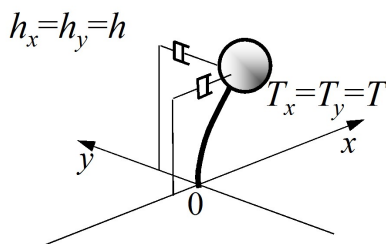


図-1 水平2次元線形弾性1質点振動子

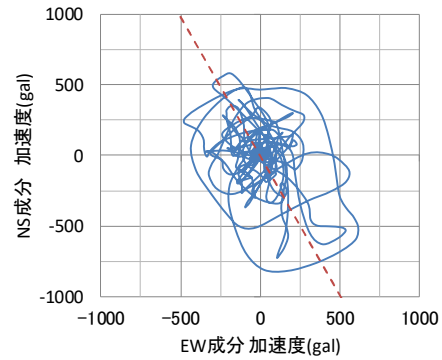


図-2 JMA神戸波の加速度軌跡と主軸方向

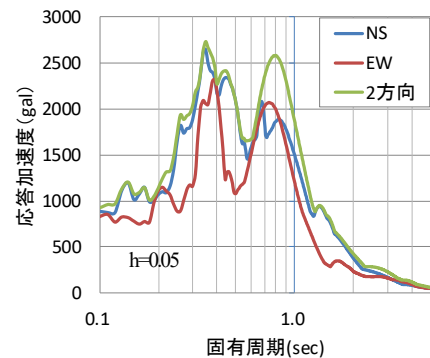


図-3 JMA神戸波の2方向応答スペクトル

(2) $S_a - S_d$ 曲線

加速度応答スペクトル S_a を縦軸に、変位応答スペクトル S_d を横軸とした図を $S_a - S_d$ 曲線といい、デマンドスペクトルとも呼ばれている。加速度応答 S_a と変位応答 S_d の間には、式(2)のような関係があり、固有周期 T を一定とすると加速度応答 S_a と変位応答 S_d の間には式(2)のような比例関係が成立する。

$$S_a = (2\pi / T)^2 S_d \quad (2)$$

$S_a - S_d$ 曲線は、縦軸が加速度、横軸が変位であることから、構造モデルのプッシュオーバー解析などから得られる荷重-変位曲線のうち、荷重を質量で除すことで加速度の次元に変更し、重ね書きすることが出来る。重ね書きした場合の荷重-変位関係はキャパシティースペクトルや耐力スペクトルと呼ばれる、構造物の耐震設計・耐震性能照査においては、デマンドスペクトルとキャパシティースペクトルの交点から設計用地震動に対する構造モデルの応答値を推定する方法が用いられている。

また、図-4にJMA神戸波の $S_a - S_d$ 曲線を示す。2方向応答スペクトルの性質と同様に、 $S_a - S_d$ 曲線においても、2方向入力の $S_a - S_d$ 曲線が、1方向入力の $S_a - S_d$ を包絡していることがわかる。

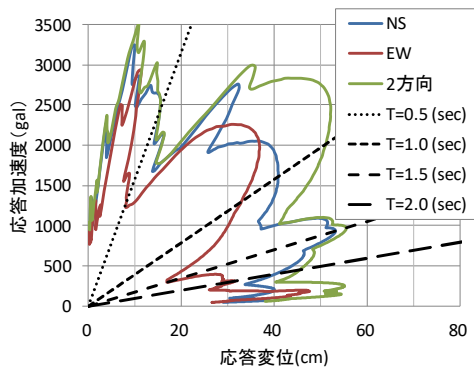


図-4 JMA神戸波の $S_a - S_d$ 曲線

(3) 水平2方向弾塑性挙動を考慮した $S_a - S_d$ 曲線

例えば、家村らは必要変位-強度スペクトル(弾塑性挙動を考慮したデマンドスペクトル)に着目して、建設予定の構造物の設計地震動に対する同スペクトルを算出し、RC ラーメン橋脚の模型実験によるキャパシティー曲線(荷重-変位曲線)を比較することによる構造物の耐震性能照査方法について検討した¹⁰⁾。

また、著者らは水平2方向入力に対する弾塑性応答スペクトルとして、2方向非線形応答スペクトルを提案している⁴⁾。2方向非線形応答スペクトルは、従来の1方向の非線形応答スペクトルと同様に、横軸に固有周期 T 、縦軸に降伏震度 k_y (降伏耐力 Q_y と質点重量 W の比)をとり、水平2次元の応答を考慮した応答塑性率 μ ごとに固有周期と降伏震度の関係を図示したものである。2方向非線形応答スペクトルを算定する解析モデルは、水平2方向の非線形応答の相互作用を考慮できるモデルを使用した。そのため、複数のせん断ばねで構成されるMSSモデルによる簡便な水平2自由度を有する1質点系モデルとした。MSSモデルの概念図を図-5に示す。

図-6にJMA神戸波の応答塑性率 $\mu=2$ とした場合の弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線を示す。縦軸は、算出した降伏震度に重力加速度981(gal)を掛けることで、加速度の次元に変換した。弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線の解釈として、縦向きに着目すると、同一の応答変位を(例：縦の破線、応答変位10cm)を実現するために必要な降伏震度を示している。横向きに着目すると同一の降伏震度に対して(例：横の破線、応答加速度600gal)、生じる応答変位を示している。言い換えれば、 $S_a - S_d$ 曲線において加速度が大きいほど、応答変位が大きいほど、地震動の強度が大きいと言える。JMA神戸波の弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線($\mu=2$)、長周期側において2方向入力よりも1方向入力(NS成分)の方が応答が大きい領域が存在する。この現象については、次章にて分析を行う。

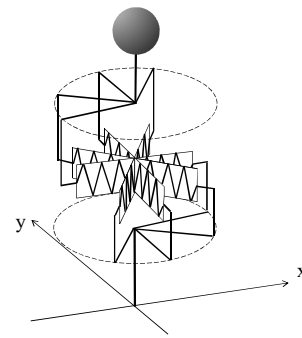


図-5 MSSモデルの概念図

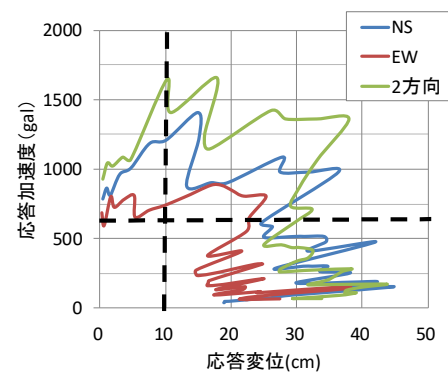


図-6 JMA神戸波の弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線($\mu=2$)

3. 構造モデルの水平2方向応答特性

(1) 対象構造モデルおよび解析条件

特徴の異なる3種の1質点系構造モデルを対象とした地震応答解析により、水平2方向応答特性を算出する。対象とする構造モデルは、図-1に示す2方向応答スペクトルの対象モデルである水平2次元線形弾性1質点振動子(以下、弾性モデル)、水平2方向の弾塑性挙動の連成挙動を考慮しない独立ばねモデル、水平2方向の弾塑性挙動の連成を考慮するMSSモデルの3種とする。独立ばねモデルはMSSモデルにおいて、x方向とy方向の直交2方向に、ばねを1本ずつ配置したモデルである。構成する2本のばねは、直交しているためそれぞれの弾塑性挙動を連成することが出来ない。対象とした3種の構造モデルの諸元を表-1に示す。弾性モデルと弾塑性の独立ばねモデルの解析結果を比較することで、弾性と弾塑性挙動の比較を行い、独立ばねモデルとMSSモデルの解析結果を比較することで、水平2方向弾塑性応答の連成の有無を比較する。

また、入力地震動はJMA神戸波とし、1方向入力と2方向入力時の応答軌跡を比較することで、構造モデルの水平2方向応答特性の特徴を把握する。解析ケースを表-2に示す。

表-1 解析モデルの諸元

構造モデル	弾性	独立ばね	MSS
		非連成	連成
弾性固有周期(sec)	0.8		
減衰比	0.03		
ばねの本数(本)	2		8
降伏震度	-	0.5	0.5
二次剛性比	-	1/1000	1/1000

表-2 入力地震動のケース

Case		x 方向	y 方向
1	1 方向	EW 成分	-
2	1 方向	-	NS 成分
3	2 方向	EW 成分	NS 成分

※JMA 神戸波

(2) 地震応答解析結果

JMA 神戸波の 1 方向入力および 2 方向入力に対する弾性モデル、独立ばねモデル、MSS ばねモデルの応答変位軌跡を図-7～図-9 にそれぞれ示す。各図中の黒の破線は、1 方向入力時の最大応答変位(正側)および最小応答変位(負側)の値を延長したものである。

図-7、図-8 より、弾性モデル、独立ばねモデルともに 1 方向入力時の最大応答変位および最小応答変位は、2 方向入力時の x 方向、y 方向の最大応答変位および最小応答変位と等しいことがわかる。このことより、弾性モデル、独立ばねモデルの 2 方向入力時の最大合成応答変位は、1 方向入力時よりも最大応答変位が大きくなる。

図-9 より MSS モデルの 1 方向入力時の最大応答変位および最小応答変位は、2 方向入力時の x 方向、y 方向の最大応答変位および最小応答変位と差があることがわかる。このことより、MSS モデルの 2 方向入力時の最大合成応答変位は 1 方向入力時と比べて、大きくなることもあれば小さくなることが示される。2 方向入力時の最大応答が 1 方向入力時と比べて変化する理由として、多方向の弾塑性応答に伴う長周期化、エネルギー吸収量の増大などの要因があげられる。

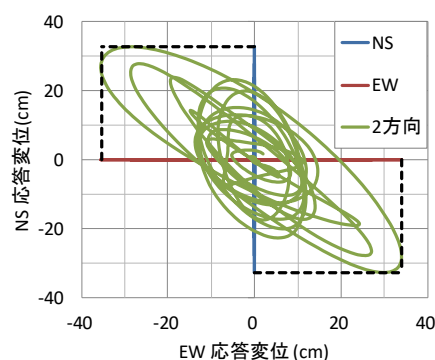


図-7 弾性モデルの応答変位軌跡

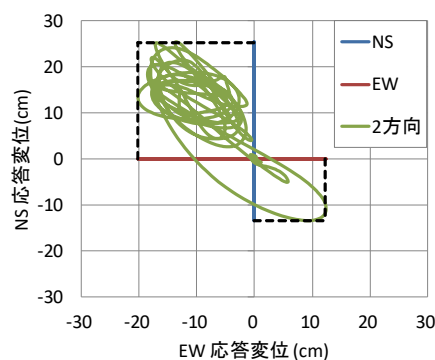


図-8 独立ばねモデルの応答変位軌跡

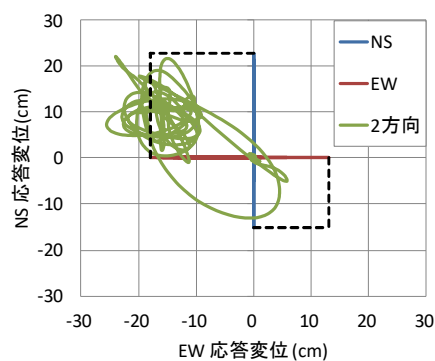


図-9 MSS モデルの応答変位軌跡

4. 矩形断面の水平 2 方向弾塑性応答特性の分析

既往研究および 2、3 章では、等方なモデルを対象に水平 2 方向応答特性の傾向を調査した。本章においては、矩形断面の水平 2 方向応答特性を数値解析によって調査する。

(1) 分析の方針および手順

ファイバー要素によって矩形断面をモデル化した 1 本

柱モデルと等価な MSS モデルの最大応答変位の差が小さい場合、MSS モデルによって中空矩形断面の水平2方向弾塑性挙動の予測が可能となり、2方向の弾塑性 $S_d - S_d$ 曲線の適用が可能となる。

分析の手順は以下の通りである。

- ①ファイバー要素によって中空矩形断面をモデル化した1本柱モデルのプッシュオーバー解析を行い、荷重 - 変位関係を算出する。
- ②算出した荷重 - 変位関係と整合するように、弾性固有周期と降伏震度を調整した等価 MSS モデルを設定する。
- ③ファイバー要素による1本柱モデルと等価 MSS モデルの1方向および2方向入力による地震応答解析を行い、最大応答変位を比較する。
- ④地震応答解析に用いた入力地震動の曲線の $S_d - S_d$ 曲線と1本柱モデルの荷重-変位関係の重ね書きを行い、地震応答結果を含めた応答特性の分析を行う。

(2) 解析条件

a) ファイバー要素を用いた矩形断面の1本柱モデル

ファイバー要素は、梁や柱などの線部材を対象にした構造要素の一つであり、材料非線形解析を行うことができる。具体的には、部材の断面を微小要素に分割し、分割要素に応力-ひずみ関係と面積を与えることで、弾塑性特性を設定することができる。各々の分割要素に対して、材料の応力-ひずみ関係を直接与えるため、軸力変動や2軸曲げの影響を考慮することができる。本検討においては、矩形断面の鋼製橋脚を模擬した2種の中空断面を対象とするが、鋼製部材の局部座屈などの局所的な変形は考慮しない。1本柱モデルでは、モデル底面から上部構造を模擬した質点までをファイバー要素を10等分したモデルとし、それぞれの要素長を0.5mおよび1.0mとすることで、モデルの高さを5.0mおよび10mとした。ファイバー要素による1本柱モデルの概念図を図-10に示す。

また、1本柱ファイバーモデルの諸元を表-3に示す。断面形状は、正方形断面と長方形断面の2種類とした。

検討に用いる地震動は、JMA 神戸波とし、NS成分のみ1方向入力、EW成分のみ1方向入力、2方向入力の3種類とした。また、断面形状が矩形断面であることから、入力地震動の方位角を15°ずつ変化させて地震動の入力を行った。図-11に矩形断面と座標軸および方位角の関係を示す。なお、図-9中の断面寸法を示すBとHは、表-3中の寸法と対応する。

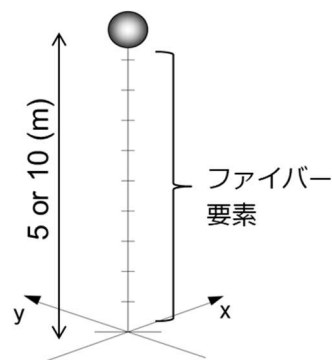


図-10 ファイバー要素による1本柱モデル

表-3 1本柱ファイバーモデルの諸元

断面	形状	正方形		長方形	
	幅B(m) (x方向)	1.0		1.4	
	高H(m) (y方向)	1.0		0.7	
モデル高さ L(m)		5	10	5	10
板厚 t(mm)		30			
弾性固有周期 (sec)	x方向	0.38	1.05	0.3	0.8
	y方向	0.38	1.05	0.5	1.35
減衰比		0.03			
弾性係数 (kN/m ²)		2.0×10 ⁸			
降伏応力 (N/mm ²)		345			
二次剛性比		1/1000			

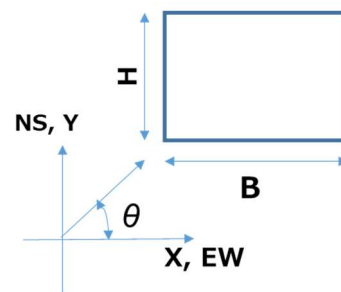


図-11 矩形断面と座標軸および方位の関係

b) 1本柱モデルを置き換えた等価 MSS モデル

ファイバー要素を用いた矩形断面の 1 本柱モデルと MSS モデルの弾塑性挙動を比較するために、等価 MSS モデルを設定する。

具体的には、ファイバー要素を用いた矩形断面の 1 本柱モデルのプッシュオーバー解析結果より得られる荷重-変位関係が等価となるように、MSS モデルの弾性固有周期と降伏震度を設定する。等価 MSS モデルの諸元を表-4 に示す。正方形断面の場合、任意の方向の断面二次モーメントが等しいため方向に依って弾性固有周期は等しいが、方向に依って降伏震度が異なる。本検討においては、降伏震度が最も大きい x , y 方向 (0° , 90° 方向) と最も降伏震度が小さい 45° 方向の等価 MSS モデルを設定する。長方形断面の場合、 x 方向 (0° 方向) が最も短周期とかつ降伏震度が大きくなり、 y 方向 (90° 方向) が最も長周期かつ降伏震度が小さくなる。本検討における等価 MSS モデルは、各断面の 1 本柱モデルの降伏震度が最大および最小、弾性固有周期が最も短周期および長周期に対して等価になるように諸元を設定した。

なお、MSS モデルは地震動の入力方向によって最大応答変位が変化しないため、1 本柱モデル時のように地震動の入力方向は変化させていない。

表-4 等価 MSS モデルの諸元

1本柱モデル のケース			等価MSSモデル の諸元	
断面 形状	モデル 高さ (m)	方向	弾性 固有 周期 (sec)	降伏 震度
正方形 断面	5	x, y	0.38	1.05
		45°	0.38	0.98
	10	x, y	1.05	0.52
		45°	1.05	0.48
長方形 断面	5	x	0.30	1.35
		y	0.50	0.88
	10	x	0.80	0.68
		y	1.35	0.43

(2) 解析結果

表-5、表-6 に正方形、長方形断面の 1 本柱の地震応答解析結果として最大応答変位をそれぞれ示す。同様に、表-7、表-8 に正方形、長方形断面の等価 MSS モデルの地震応答解析結果として最大応答変位をそれぞれ示す。

正方形断面かつモデル高さ 5 m の場合、解析の結果、1 本柱モデル、MSS モデルともに、全方位入力時の最大応答変位は 2 方向入力時、NS 成分入力時、EW 成分入力時の順番となっている。同様に、正方形断面かつモデル高さ 10 m の場合、解析の結果、1 本柱モデル、MSS モデルともに、全方位入力時の最大応答変位は NS 成分入力時、2 方向入力時、EW 成分入力時の順番となっている。正方形断面の場合、入力地震動の方向に依らず最大応答変位が近いことがわかる。本検討においては、降伏震度の差が最大応答変位に及ぼす影響が小さいことが確認できる。また、1 本柱モデルと等価 MSS モデルを比較した場合、両者の最大応答変位の差は小さい。よって、正方形断面であれば簡易な MSS モデルで応答を予測することができる可能性が示された。

長方形断面かつモデル高さ 5 m の場合、解析の結果、1 本柱モデル、MSS モデルともに、全方位入力時の最大応答変位は 2 方向入力時、NS 成分入力時、EW 成分入力時の順番となっている。同様に、長方形断面かつモデル高さ 10 m の場合、解析の結果、1 本柱モデル、MSS モデルともに、全方位入力時の最大応答変位は NS 成分入力時、2 方向入力時、EW 成分入力時の順番となっている。

長方形断面の場合、入力地震動の方向に依って最大応答変位の変動が大きいことがわかる。また、1 本柱モデルと等価 MSS モデルを比較した場合の最大応答変位を比較すると、最大応答変位に差があることが確認できる。

図-12～図-15 に JMA 神戸波の応答塑性率 $\mu=2$ とした場合の弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線に、各ケースの 1 本柱モデルのプッシュオーバー解析を重ね書きした図をそれぞれ示す。

モデルの高さが 5 m であるケースの図-12、図-14 に着目すると、1 本柱の荷重-変位関係が、EW 成分の 1 方向入力、NS 成分の 1 方向入力、2 方向入力の弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線の順番で交わっていることがわかる。また、モデルの高さが 10 m であるケースの図-13、図-15 に着目すると、1 本柱の荷重-変位関係は、EW 成分の 1 方向入力、2 方向入力、NS 成分の 1 方向入力の順番で弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線と交わっていることがわかる。

表-5 正方形断面の1本柱モデルの地震応答解析結果

断面形状	モデル高さ	入力角度(°)	最大応答変位 (cm)		
			NS	EW	2方向
正方形断面	5 (m)	0	6.32	5.39	9.22
		15	6.35	5.38	9.46
		30	6.56	5.32	9.39
		45	6.72	5.28	9.13
		60	6.56	5.32	9.03
		75	6.35	5.38	9.09
		90	6.32	5.39	9.22
	10 (m)	0	29.5	21.0	24.9
		15	29.1	20.6	24.8
		30	28.4	19.6	24.5
		45	28.1	19.1	24.3
		60	28.4	19.6	24.4
		75	29.1	20.6	24.7
		90	29.5	21.0	24.9

表-6 長方形断面の1本柱モデルの地震応答解析結果

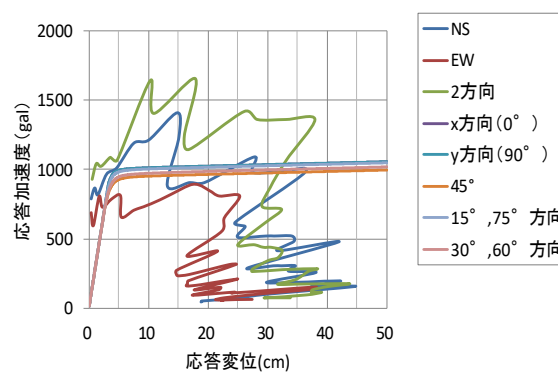
断面形状	モデル高さ	入力角度(°)	最大応答変位 (cm)		
			NS	EW	2方向
長方形断面	5 (m)	0	16.5	2.28	16.8
		15	15.6	2.28	13.6
		30	12.9	3.08	9.94
		45	9.84	4.34	7.26
		60	6.55	5.11	6.20
		75	3.42	5.46	5.62
		90	3.31	5.65	7.35
	10 (m)	0	37.0	19.5	33.0
		15	32.6	19.2	36.4
		30	27.2	18.1	35.8
		45	24.8	16.0	33.9
		60	24.9	15.5	30.9
		75	25.8	18.0	29.7
		90	26.0	20.6	29.3

表-7 等価MSSモデルの解析結果(正方形断面と等価)

1本柱モデルのケース			MSSモデルの諸元		最大応答変位 (cm)		
断面形状	モデル高さ (m)	方向	弾性固有周期 (sec)	降伏震度	NS	EW	2方向
正方形断面	5	x, y	0.38	1.05	8.28	5.81	11.7
		45°	0.38	0.98	9.04	5.74	13.1
	10	x, y	1.05	0.52	29.0	19.9	24.7
		45°	1.05	0.48	27.7	17.9	25.2

表-8 等価MSSモデルの解析結果(長方形断面と等価)

1本柱モデルのケース			MSSモデルの諸元		最大応答変位 (cm)		
断面形状	モデル高さ (m)	方向	弾性固有周期 (sec)	降伏震度	NS	EW	2方向
長方形断面	5	x	0.30	1.35	4.59	2.56	4.73
		y	0.50	0.88	15.57	8.36	30.5
	10	x	0.80	0.68	26.6	19.3	27.9
		y	1.35	0.43	33.4	18.9	30.3

図-12 正方形断面のプッシュオーバー解析(L=5m)と弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線 ($\mu=2$) の重ね書き

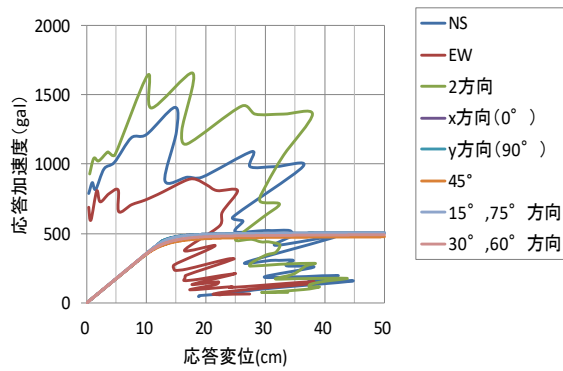


図-13 正方形断面のプッシュオーバー解析($L=10\text{m}$)と弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線($\mu=2$)の重ね書き

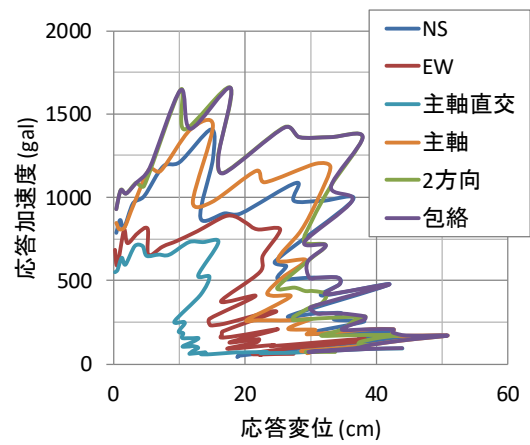


図-16 包絡した弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線($\mu=2$)の重ね書き

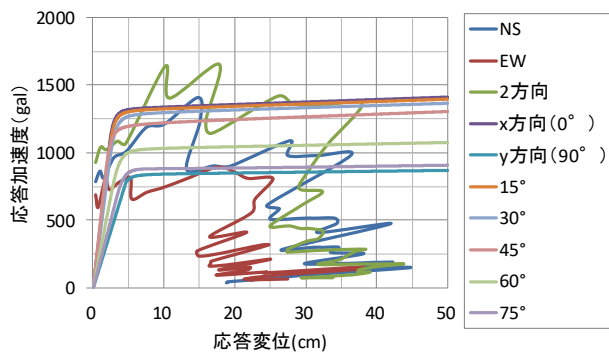


図-14 長方形断面のプッシュオーバー解析($L=5\text{m}$)と弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線($\mu=2$)の重ね書き

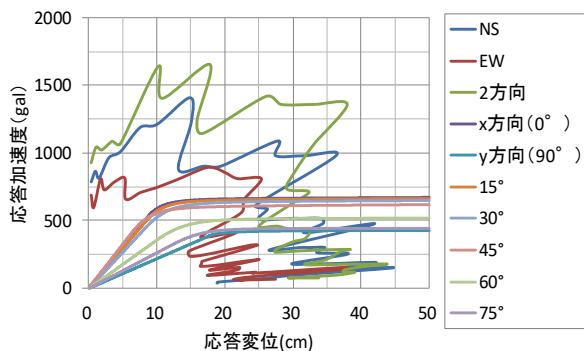


図-15 長方形断面のプッシュオーバー解析($L=10\text{m}$)と弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線($\mu=2$)の重ね書き

向の設計用地震動がある場合、耐震設計における不確実性へ配慮や危機耐性の観点から次のような $S_a - S_d$ 曲線を設定することが望ましい。

線形の $S_a - S_d$ 曲線を設定する場合、2 方向応答スペクトルの要領で計算することで、1 方向成分の $S_a - S_d$ 曲線を包絡した $S_a - S_d$ 曲線を設定することが出来る。

弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線を設定する場合、1 方向入力よりも 2 方向入力の方が応答が大きくなる、あるいは応答が小さくなることへの配慮が必要である。手順としては、2 方向地震動に対して、任意の方位角方向の 1 方向地震動および 2 方向地震動に対して弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線を作成し、それらの弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線を包絡する。包絡した弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線は不確実性の強い 2 方向入力に対して安全側の要求性能と言える。

図-16 に JMA 神戸波の応答塑性率 $\mu=2$ とした場合の弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線とその包絡戦を示す。今回の計算においては、従来の NS 成分、EW 成分に加えて、図-2 の赤色の破線である主軸方向とその直交方向の弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線も算出し包絡した。主軸方向の算出は、加速度軌跡の分散が最大になる方向を算出したものであり、地震動が持つ周期特性は反映されていない。主軸方向の算出に、地震動の周期特性を反映することも、今後の課題のひとつである。

6. まとめ

本研究では、構造モデルの 1 質点系モデルの水平 2 方向の弾塑性応答の特徴を整理したうえで、水平 2 方向の弾塑性挙動を考慮した $S_a - S_d$ 曲線(デマンドスペクトル)を考案した。

続いて、ファイバー要素による矩形断面の鋼製橋脚を模擬した 1 本柱モデルと、1 本柱モデルの荷重-変位関

5. 包絡した弾塑性 $S_a - S_d$ 曲線の提案

前述したように、構造物のプッシュオーバー解析と $S_a - S_d$ 曲線の交点から、構造物の地震応答を推定し、耐震設計・性能照査を行う場合がある。

例えば、断層震源モデル等により作成された水平 2 方

係と整合するように弾性固有周期と降伏震度を調整した等価 MSS モデルを対象に、時刻歴地震応答解析を実施した。さらに、地震応答解析に用いた入力地震動の曲線の水平 2 方向の弾塑性挙動を考慮した $S_a - S_d$ 曲線と 1 本柱モデルの荷重-変位関係の重ね書きを行い、地震応答結果を含めた応答特性の分析を行った。

本研究によって得られた知見は次の通りである。

- ・正方形断面の場合、あらゆる方向も同じ断面二次モーメントになり、断面特性の差としては降伏震度のみである。よって、1 方向入力、2 方向入力においてファイバー要素でモデル化された 1 本柱と MSS モデルで最大応答変位に差は大きくない。
- ・長方形断面の場合、1 つの固有周期および降伏震度でモデル化した等価 MSS モデルとの地震応答解析結果を比較すると、最大応答変位は差がある。

また、今後の課題を以下に示す。

- ・長方形断面の場合、等価 MSS モデルの間で、最大応答に差がでる要因を分析する必要がある。
- ・2 方向地震動の主軸方向の決定に、周期特性を反映する必要がある。

謝辞：1995 年兵庫県南部地震での神戸海洋気象台での観測記録を使用させていただきました。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 五十嵐晃, 井上和真, 古川愛子, 宇野裕恵, 松田宏: 標準波-相補直交成分波の組合せによる橋梁の耐震照査用水平 2 方向入力地震動, 土木学会論文集 A1

- (構造・地震工学), Vol. 68, pp. I_458-I_469, 2012.
- 2) 五十嵐晃, 儀久昂: 楕円偏極指標を規定したスペクトル適合水平 2 方向地震動の作成, 土木学会構造工学論文集 vol.62A, pp.273-279, 2016.
- 3) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃: 水平 2 方向地震動の軌跡特性が構造物の 2 方向弾塑性応答に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, pp. I_122-I_134, 2017.
- 4) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃: 2 方向弾塑性応答スペクトルによる加速度軌跡の異なる 2 方向応答スペクトル適合波の評価, 第 20 回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, pp.77-83, 2017.
- 5) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃: 水平 2 方向地震力に対する構造モデルの 2 方向応答特性に関する検討例, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, 2018. (印刷中)
- 6) 吉川弘道, 若林裕子, 坪田正紀, 大滝健: キャパシティスペクトル法と EFM 法を援用した RC ラーメン高架橋の地震イベントリスク評価, コンクリート工学論文集, 第 22 巻第 1 号, pp.33-42, 2011.
- 7) 神田亜希子, 三田彰: 評価システムのモデル構造に着目した低層建物の損傷確率評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 588 号, pp.57-61, 2005.
- 8) Gavin, H.P. and Dickson, B.W.: Generation of uniform-hazard earthquake motion, *ASCE Journal of structural Engineering*, Vol.137, No.3, pp.423-432,
- 9) 日本建築学会: 多次元入力地震動と構造物の応答, 丸善出版, pp.108-109, 1998.
- 10) 家村浩和, 柳川智史, 岩田秀治: 必要変位-強度スペクトルとキャパシティー曲線による弾塑性耐震設計法に関する曲線, 第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部(B), pp.32-33, 2001.

ATTEMPT TO PREDICT SEISMIC RESPONSE OF RECTANGULAR CROSS-SECTION COLUMN BY BI-DIRECTIONAL ELASTIC-PLASTIC CAPACITY SPECTRUM METHOD

Kazuma INOUE and Akira IGARASHI

In this research, the elasto-plasticity $S_a - S_d$ curve consisting of spectral acceleration and spectral displacement in consideration of the elasto - plastic behavior of structural model was devised, it was analyzed horizontal bi-directional response characteristic of the rectangular cross section column.

Seismic response analysis was carried out on an equivalent MSS model in which elastic natural period and yield seismic coefficient were adjusted so as to be consistent with rectangular cross section with fiber elements and their load-displacement relationship.

As a result, it was shown that the maximum response displacement of a square cross section column for uni-directional input and bi-directional input can be predicted by equivalent MSS model. On the other hand, it was shown that there is a difference in the maximum response displacement of equivalent MSS model with rectangular cross section column. It was also confirmed that order of the maximum response displacement due to uni-directional inputs and bi-directional inputs is same in square cross section, rectangular cross section, and equivalent MSS model.