

2 方向水平地動を受ける立体構造物の動的崩壊過程

—その2 周波数特性の影響—

若林 實・藤原 悌三・北原 昭男

DYNAMIC FAILURE PROCESS OF SPACE STRUCTURES SUBJECTED TO BI-DIRECTIONAL HORIZONTAL GROUND MOTION

—PART 2 EFFECT OF FREQUENCY CHARACTERISTICS—

By *Minoru WAKABAYASHI, Teizo FUJIWARA and Akio KITAHARA*

Synopsis

It is necessary for the aseismic safety of building structure to consider that frequency characteristics of structure and input excitation affect dynamic failure process of space frame subjected to bi-directional ground motion.

In this paper, for the purpose of making clear the interaction effects of bi-axial restoring force characteristics in the nonlinear responses of structures, two kinds of parametric analyses were performed. One is the dimensional detailed analysis of short period range corresponding to the experimental models reported in previous paper and the other is the nondimensional analysis of middle or long period range for generalization of the effect of frequency characteristics.

From above analysis, some interesting results, such as degradation of aseismic safety and the smoothing effect of bi-directional response, were pointed out as to the interaction effect.

1. 序

強震に対する建築構造物の終局耐震安全性を評価する場合、建築物は本来、立体架構であり、地震動も3次元的な物理現象であることを考慮すると、従来の直交2方向の動的挙動を独立に評価する方法では不十分であり、立体振動として架構の挙動を把握することが必要である。特に、水平2方向の断面力間の相互作用は架構の弾塑性挙動に大きな影響を及ぼすと考えられ、この影響によって架構の応答が増大する可能性も有り得る。

しかしながら、非線形立体振動に関する既往の実験的、解析的研究は数少なく、立体架構の耐震安全性を正確に評価するための十分なデータの蓄積が得られていないのが現状である。筆者は、このデータ不足を補ない、立体架構の弾塑性応答性状を把握するため、水平2方向に独立に地震動を入力した振動台による実験を行ない、前報で報告した¹⁾。さらに、2軸曲げモーメントと軸力を含む降伏条件を考慮し²⁾、相当断面力と相当塑性変形の間 Ramberg-Osgood 型の履歴法則を導入した解析法³⁾を用いて応答解析を行ない、実験結果と比較することによって、この手法が2方向入力時の複雑な挙動を十分に追跡できることを明らかにした。その際、建築架構の弾塑性挙動は架構の固有周期や入力の周波数特性に大きく影響されるが、それに加えて、立体架構の挙動は2方向間の固有周期の違いによっても大きく左右される可能性が大きく、2方向入力時の立体架構の応答性状を解明するためには架構と入力の周波数特性に関するパラメトリックな解析が不可欠であることを指摘した。

2方向入力時の動的挙動をパラメトリックに解析した研究は非常に数少なく、滝沢、青山による正方形断面をもつ RC 部材についての研究⁴⁾があるが、2方向の周波数特性と応答との関係を把握するには不十分であり、本報では、前報において2方向水平地動の作用する動的実験によって妥当性の実証された復元力特性を持つ架構の地震応答解析手法を用いて行なった2種のパラメトリックな応答解析についての結果を報告する。解析1では地震動の入射角を変化させることによって最大応答量がどのように変化するかを、2方向間の固有周期比、入力波形などをパラメーターとして解析した。ここでは前報の実験との対応を考えて、短周期領域での相互作用の影響を考慮するため、固有周期は0.04~0.1秒を対象とした。さらに、解析2では架構の2方向の固有周期の変化が最大応答に及ぼす影響を明らかにすることによって、立体架構の振動特性を把握することを目的としており、固有周期は、中、長周期域での応答性状を考慮するため、0.3~1.0秒を対象とした。

以上の解析より、2方向入力時の弾塑性応答は、架構や外乱の周波数特性によって大きく影響され、場合によっては1方向入力時の応答に対して2倍近い値を示すことが明らかになった。また、2方向入力時の相互作用によって、架構の弱軸方向(長周期方向)の応答変位が増大する。2方向入力時の相互作用は1方向入力時の応答の小さい方向へ現れる場合が多く全体として2方向の応答が平均化される傾向にある。

2. 解 析 1

地震動が建築物に作用する場合、上下動は考慮しないとしても、入力方向は水平面内で様々に変化し、それに応じて建築物も種々の方向に地震力を受けることになる。このような現実の入力状態のもとで架構の耐震安全性を調べるためには、従来の各方向の挙動を独立に評価する方法では不十分であり、2方向の断面力間の相互作用を考慮した立体振動として応答性状を把握することが必要である。本解析は、この様な立場より、地震動の周波数特性や入力強度の変化が架構の応答性状に及ぼす影響を把握することを第1の目的としている。さらに、入力角度が変化、すなわち直交2方向の入力強度が変化することは2方向の降伏せん断力が変化することに対応し、架構の降伏せん断力及び直交2方向の固有周期が2方向入力時の応答性状に及ぼす影響を、一方向入力時の応答と比較しつつ明らかにすることを第2の目的としている。

2.1 解析方法とモデル

解析の手法としては前報までに示された方法を用いる。すなわち、部材の任意断面の2方向曲げモーメントと軸力によって定義される相当断面力と相当塑性変形との間に Ramberg-Osgood 型の履歴特性を導入し、塑性流れ則を用いて材端モーメントと部材角との関係を導びき、この関係より得られる復元力を用いて2方向水平地動の作用する架構の運動方程式を解いている。

対象とする架構モデルは両端固定の柱によって構成される1層架構で、直交する水平2方向に自由度をもつモデルである。振れ成分は既往の実験結果に見られるように影響が少ないので、解析の便宜上無視し、また軸力の変動も考慮していない。本報では、柱の断面積と高さ、及び降伏軸力比を一定とする3種のモデルを考える。モデルAは前報の実験で用いられたモデルAと同じ柱(断面寸法1cm×0.6cm、高さ8cm)と

Table 1. Fundamental properties of model structures.

MODEL	DIMENSION		l (mm)	\bar{Q} (kg)	N/\bar{N}	\bar{Q}/W	T (s)	T' (s)	P
	B, D (mm)	H (mm)							
O	7.75	80.0	0.401	52.9	0.082	0.391	0.061	0.122	1.00
A	X	6.0	80.0	0.518	0.082	0.303	0.078	0.156	1.66
	Y	10.0		0.311					
B	X	5.0	80.0	0.621	0.082	0.253	0.094	0.188	2.41
	Y	12.0		0.259					

重量 ($W=0.135\text{ton}$) から成り、架構の強軸方向に対する弱軸方向の固有周期比 p は1.67である。モデルOは正方形断面 ($p=1$)、モデルBはモデルAよりPを大きくしたもの ($p=2.4$) である。これら3種のモデルは2方向入力の影響が構造物の周波数特性の差異によると考えられる実験結果に基づいて定めたものであり、すべてのモデルについて材料の性質は実験で用いられた材に同じと仮定し、ヤング係数 $E=2100\text{t/cm}^2$ 、降伏強度 $\sigma_s=2.73\text{t/cm}^2$ 、また架構の臨界減衰比は0.01とした。各モデルの柱寸法、固有周期比 P 、弾性限変位 4 、降伏せん断力 Q 、降伏軸力に対する柱軸力の比 N/\bar{N} および降伏せん断力係数 \bar{Q}/W を **Table 1** に示す。また、モデルA, Bについては柱の弱軸方向を X 方向、強軸方向を Y 方向と表す。以下の解析では R-O 型履歴曲線の形状を定めるパラメーター c, r は実験との対応より、 $c=0.12, r=3$ とする。

2.2 入力方法

入力方法の概略を **Fig. 1** に示す。入力方法としては単一波を斜め方向に入力させることとし、入射角 θ は強軸方向 (Y 方向) からの角度で表す。**Fig. 1** に示すとおり、入射角を 0° から 90° までの13通りに変化させ、それぞれの入力に対して各方向の最大応答値を求める。また入力最大振幅は各方向のベースシアー係数に応じて次式で与えられる。

$$\sqrt{\left(\frac{A_x \cdot W}{Q_x}\right)^2 + \left(\frac{A_y \cdot W}{Q_y}\right)^2} = \text{const.} = \alpha \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 A_x, A_y は X 方向、Y 方向の入力加速度の最大振幅、 Q_x, Q_y は各方向の降伏せん断力、 W は架構の重量であり、 α は入力強度を示すパラメーターである。

この関係式より、実際には各方向の入力加速度の最大振幅は次式で示される。

$$A_y = \frac{\alpha Q_y}{W} \cos \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$A_x = \frac{\alpha Q_x}{W} \sin \theta$$

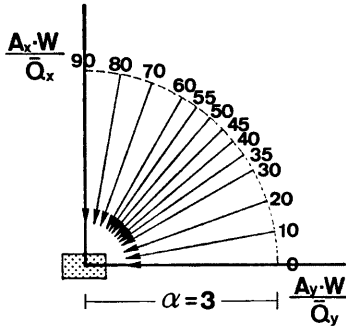


Fig. 1 Schematic presentation of input direction used in the (first half of the) analysis.

本節では、架構の崩壊時の挙動を調べるため $\alpha=3$ の場合について解析を行なうが、これは例えば外乱最大加速度振幅300 gal に対し、ベースシアー係数0.1の構造物を意味している。入力波は1940年の El Centro NS 成分、1952年の Taft S69E (EW) 成分、1968年の八戸 NS 成分の3種を用い、各波共に、架構の固有周期と入力の卓越振動数との関係、および実験との対応から時間軸を1/2に縮小して入力するが、以後の結果は、一般の解析結果との比較を容易にするため通常的时间軸に修正して表示する。これに対応して、架構の各方向の固有周期もそれぞれ2倍して表示する。換算した固有周期 T' を **Table 1** に併せて示す。本解析法を用いて、上記3波について実時間に対応する弾塑性速度応答スペクトル、および弾性速度応答スペクトルを求め、**Fig. 2** に示す。図の左より、El Centro NS, Taft EW, 八戸 NS を入力した結果であり実線が弾塑性応答スペクトルを、破線が弾性応答スペクトルを表している。さらに○印は入力強度 $\alpha=2$ の場合、△印は $\alpha=3$ の場合である。弾性応答スペクトルは、各波とも周期によって凹凸があるものの、全般には周期にほぼ比例して増加する。一方、弾塑性スペクトルは、ここに示した周期の範囲内では全般に弾性スペクトルより大きい。El Centro, Taft では弾性のスペクトルに類似したエネルギー一定型⁵⁾に近い。八戸 NS 成分では0.2秒以下の周期で応答の増加が顕著で他の2波と較べると大きな値を示している。しかし、周期の増加と共に応答の増加量は減り、変位一定型の領域に入る。

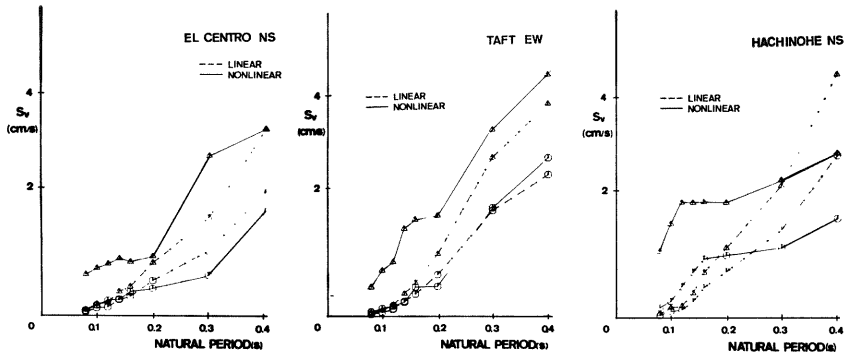


Fig. 2 Elastic and inelastic velocity response spectra of typical ground motion on the case of high frequency range.

2.3 解析結果の考察

Fig. 3 は縦軸、横軸にそれぞれ、弱軸 (X) 方向、強軸 (Y) 方向の最大値応答を示したものであり、変位を左側の図、特性率を右側の図に表す。図中で、□印は 2 方向同時入力し相互作用を考慮した場合、△印は 1 方向ずつ独立に入力した場合の各方向の応答最大値を、入射角度に応じてベクトル表示したものである。入射角の異なる各最大値を実線で結んだものがモデル O、破線で結んだものがモデル A、一点鎖線で結んだものがモデル B の結果である。El Centro NS 成分、Taft EW 成分、八戸 NS 成分を入力した場合の結果を、それぞれ Fig. 3 の (a), (b), (c) に示す。図中に示した数字は代表的な入射角度で、点線は同じ入射角に対する 2 方向入力時と 1 方向入力時の点を結んだものである。Fig. 3 より変位応答について以下の諸点を指摘できる。

モデル O, A, B, の 5 種の固有周期に対して、1 方向に $\alpha=3$ の強度で入力したときの変位応答は、El Centro, Taft で 4 mm, 八戸では Fig. 2 のスペクトルからも明らかなように、他の 2 波より大きく 7 mm 程度である。固有周期によって応答量の差はあまりみられないが、Taft の弱軸方向の応答では若干の差が生じ、周期が長い程大きい。

入力の角度を変えることは、(2)式に示すように各方向の強度を変えることに相当するが、1 方向入力時の最大応答値は El Centro, 八戸ではほぼ直線的に変化し、Taft ではやや下に凸となる傾向がみられる。対象とする架構の固有周期が比較的低いことや、降伏震度 ($s = \bar{Q}/W$) が低いレベルであることを考えると、エネルギー一定の領域にあるため、入射角の変化による入力強度の増大、言い換えると降伏震度の低下により、変位が α に増大すると考えられる。

2 方向同時入力の場合、外乱ベクトルの大きさを一定に与えているため、X, Y 方向に等しい周期をもつモデル O の最大変位応答は、外乱に比例して変化し円状となる。周期の異なる場合 (モデル A, B) では、2 方向の相互作用の影響が現れ、El Centro, Taft では周期差の大きいモデル B の方が応答が大きく、特に長い固有周期をもつ軸 (弱軸) の方向への増加量が多い。八戸では逆に、周期差の大きい程応答は小さくなる。これは、Fig. 2 の弾塑性スペクトルからも明らかなように、八戸 NS 成分では 0.12~0.2 秒の周期に対しては応答が増加しないので、モデル A, B の弱軸方向の応答がおさえられることから説明される。しかし、1 方向入力時と比較すると、やはり弱軸方向の変位が大きくなっている。

降伏曲面の形状にも関係するが、斜め方向地震に対する応答は 1 方向に個別に入力した場合よりベクトルにして 1.5~2 倍程度増大される。また周期比が大きいモデル B では、微小な角度変化によって応答が急増する場合がある。いずれも弱軸方向で応答量が急激に増加する傾向があるが、強軸方向に対する影響は少な

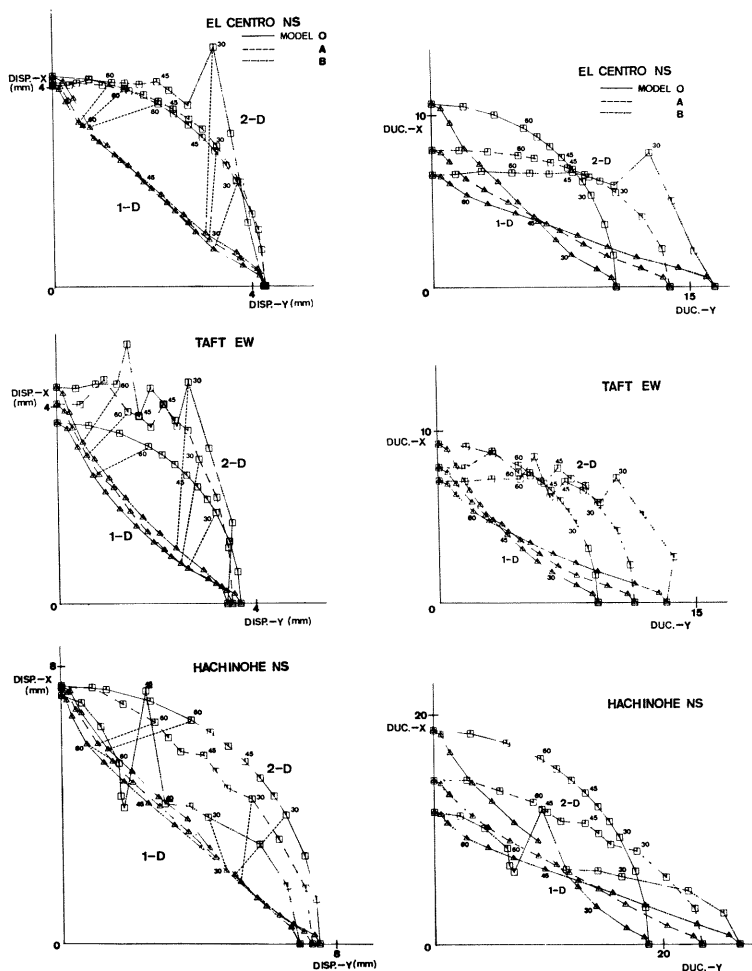


Fig. 3 Maximum displacement and ductility vectors of the models subjected to oblique ground motion. (□ : considering interaction, △ : without interaction.)

い。これらの場合については後に、時刻歴を比較して説明する。

次に、靱性率応答については、一方向入力時では、周期が短かくなると応答量は増加する。八戸の場合、他の2波と比して大きく、20を越える場合がある。入射角の変化による影響は変位の場合と類似である。また、2方向入力時では、1方向入力時の応答の小さい側に相互作用の影響が強くと現れ、逆に応答の大きい方向は抑制される傾向にある。

せん断力応答および、せん断力と降伏せん断力との比で表される無次元せん断力応答について、変位応答と同様の方法で Fig. 4 (a)~(c)に示す。せん断力応答を左側の図に、無次元せん断力応答を右側に表す。

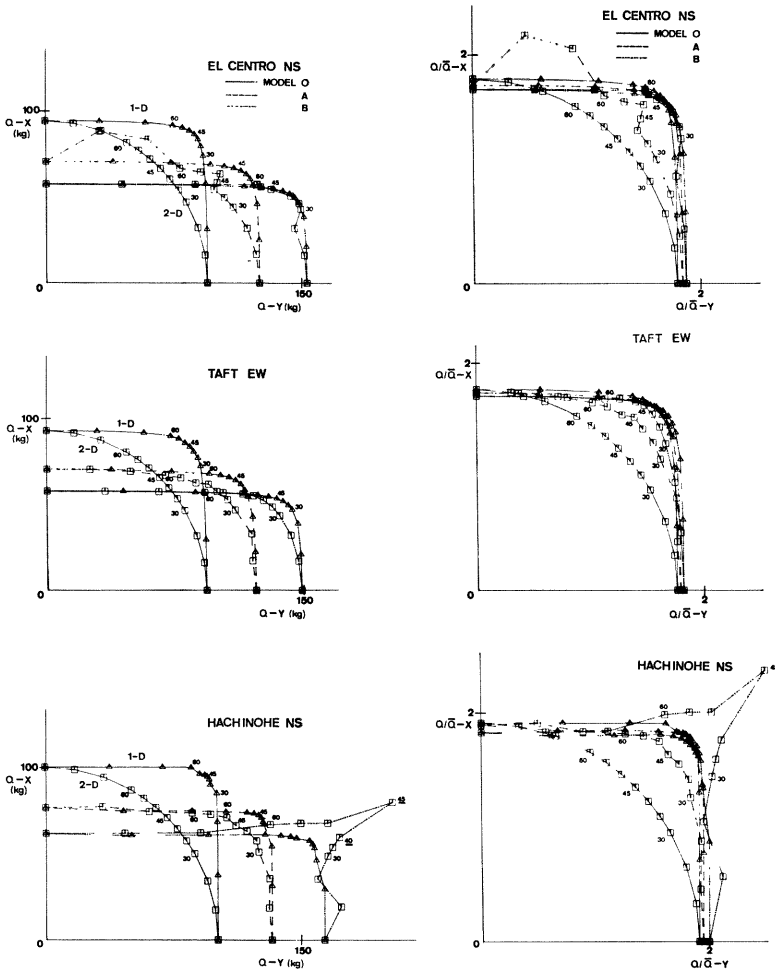


Fig. 4 Maximum shear and nondimensional maximum shear vectors of the models subjected to oblique ground motion. (□ : considering interaction, △ : without interaction)

1方向入力時では、ほとんどの入射角においていずれかの方向が大きく塑性域に入ってしまうため、ほぼ長方形の降伏曲面を描き、その結果、各入射角に対応するせん断力ベクトルを結んだ曲線も長方形に近い形となる。せん断力応答では、固有周期が短い程、応答量は大きくなるが、無次元せん断力では各周期ともほぼ同程度になる。しかし、変位応答で示したように、八戸の場合の応答が大きく、無次元せん断力応答もそれに対応して他の2波よりは若干大きくなる。

2方向同時入力の場合、降伏曲面を円に仮定していることから、相互作用の影響により各方向とも1方向入力時より応答が減少して、モデルOの場合には仮定した降伏曲面と類似の円を描く。2方向で周期の異

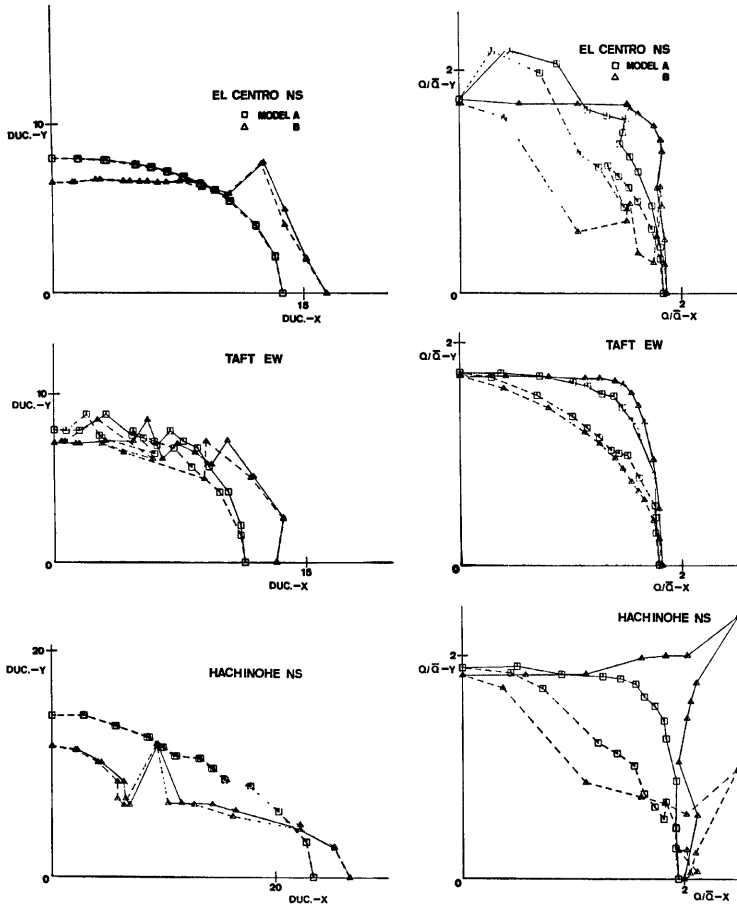


Fig. 5 Nondimensional maximum shear vectors and maximum ductility vectors of equivalent force subjected to oblique ground motion considering interaction effect.

なる場合、周期比 P が大きくなると共にせん断力応答ベクトルは、1方向入力時の応答に近づく。しかし、El Centro 入力に対するモデル A の入射角 70° 、 80° の場合や、八戸入力に対するのモデル B の入射角 $30^\circ \sim 60^\circ$ の場合のように、各方向の無次元せん断力が急増する場合がある。これは相当断面力と相当塑性変形の間で履歴法則を与えているため各方向でせん断力が大きくなる時刻が異なるために生じ、必ずしもそのときに変位応答が大きくなるのは Fig. 3 の変位応答に示すとおりである。

以上の図では各方向の最大値のベクトルについて示したが、次に応答の同時性を考慮するために、応答ベクトルが最大となる点について Figs. 3, 4 と同様の方法で Fig. 5 に示す。□印がモデル A、△印がモデル B について示したもので、破線は、応答のベクトルが最大となるときの値を表したものであり、併せてそれに対応するケースの最大応答のベクトルを実線で示す。靱性率応答を左側に、無次元せん断力を右側に表

した。これらの図より以下の傾向が指摘される。

ベクトルの最大値は当然、最大応答値のベクトルよりは小さくなる。無次元せん断力に関しては、ベクトルの最大値と、最大値同志のベクトルとの差が顕著であり、一般にはモデル B の方がモデル A よりも差が大きい。それに対し、靱性率では大きな差異は見られない。すなわち、靱性率(変位)の最大値が2方向ではほぼ同時に生じる場合が多いのに対し、せん断力の最大値は異なる時間に生じる場合が多い。このことは相当断面力上で降伏曲面を定義しているために、或る方向に急激に変位を増加させるような入力作用した場合、その直交方向のせん断力応答は小さい場合があり、その方向にせん断力が増加し、その結果、変位の増加が抑制されていることを示すものである。これは、応答を平均化することにつながり⁶⁾、耐震安全上、好ましい結果を与え得るが、両方向とも同時刻に応答が大きな値をとる場合には増加することも考えられる。

角度変化によって2方向入力の影響が量的にどの程度になるかを明らかにするため、横軸に入射角、縦軸に1方向入力時の応答に対する2方向入力時の応答の比をとった図を Fig. 6 に示す。左側の図は、各方向の最大変位応答の比を個々にプロットしたもので、○印が強軸、△印が弱軸方向の応答比を示し、実線、破線、1点鎖線はそれぞれモデル O, A, B の結果を示す。

弱軸側では角度の大きいとき、強軸側ではその逆の時に、2方向の影響が強く現れる。すなわち、応答の絶対量が比較的小さい時に2方向入力の影響が大きく、応答が大きい場合は影響はあまり小さくなく、応答がそれ以上に増幅される恐れは少ない。El Centro, Taft では、周期比が大きくなる程、強軸方向で応答比は小さくなり、弱軸方向ではその逆の現象を生じている。これは周期比が大きくなる程、弱軸方向への変位増加が大きくなることを示しており、Fig. 3 で示された傾向と一致する。八戸の入力の場合は、強軸、弱軸方向共に、周期比の大きい方が2方向入力の影響が小さいが、これも Fig. 3 で示された通りであり、入力スペクトルに関係すると考えられる。

右の図には、縦軸に最大値のベクトルの大きさの比をとったものを同様に示す。1方向入力時に対する2方向入力時の最大値ベクトルの比は、明らかに30°~60°の範囲で大きくなる。この傾向は、八戸の場合のモデル B を除き、構造物の周期比、外乱の波形を問わず現れ、中には2倍程度になる場合もある。従って、構造物ないしは柱個材の安全性は1方向入力時の安全性よりは相当低くなり得ることを考慮して設計する必要がある。しかし、八戸の場合のモデル B では入射角45°を除いて、増幅の割合は小さく、1方向入力時より減少する場合もある。この傾向はこれまでの図にも現れており、地震波および構造物の周波数特性の関係より2方向入力時において、弾塑性応答が必ずしも増加しないことに対応すると考えられる。

最後に、2方向入力の影響によって応答が急変するケースの時刻歴及び復元力特性を、その他の入射角に対する一般的な応答を示すケースと比較し、その特徴を調べる。Fig. 7 にはモデル B に入射角45°で八戸 NS 成分を入力した時の変位、せん断力の時刻歴及び復元力特性を、弱軸(X)方向については左図に、強軸(Y)方向については右図に示す。Fig. 8 には、同じモデルに同じ波を入射角40°で入力した場合について Fig. 7 と同様に示す。

2方向入力によって応答が急増する入射角45°の場合と、平均的な値を示す40°の場合の時刻歴を比較すると、最大変位応答の生起時刻が、45°入力時では2方向共に解析の最終時間の近傍であるのに対し、40°入力時では3~4秒であり、微小な角度変化で最大値が急変する場合、最大値の生起時間はその他の入射角の場合とは異なっていると考えられる。45°入力時において弱軸方向の変位が急増する理由は、せん断力の時刻歴、履歴特性も併せて判断すると以下の如くであると思われる。

$\theta=40^\circ$ と 45° の場合の Y 方向のせん断力を比較すると 45° の場合、 40° よりも Y 方向の入力強度が小さいにもかかわらず、3秒付近の最大値前後(矢印)だけは 40° の場合よりも大きな値をとり、それに応じて Y 方向の変位は 40° の場合より抑制される。この影響が X 軸へ現れ、変位が大きく流れるものと考えられる。しかし、相互作用の影響はこのように複雑であるので、より多くの解析例を比較することによって一般的な結論が導かれるものと考えられる。

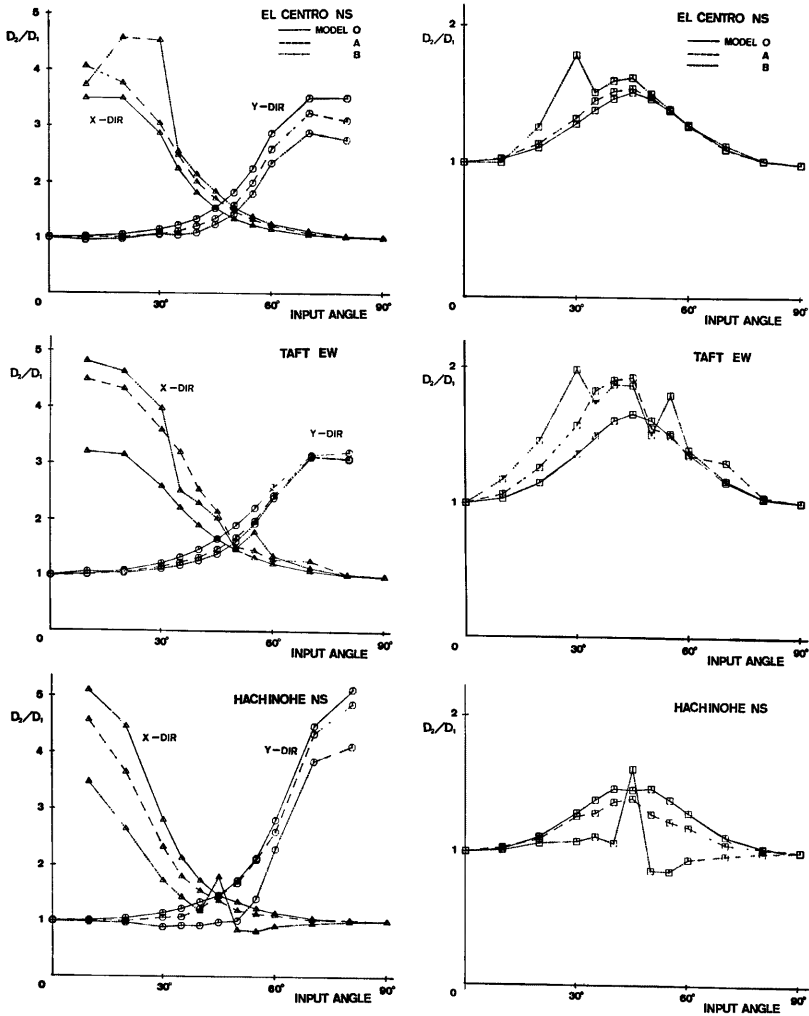


Fig. 6 Fraction of the maximum displacement of x or y components and maximum displacement vectors with interaction to the value without interaction subjected to oblique motion with different input angle.

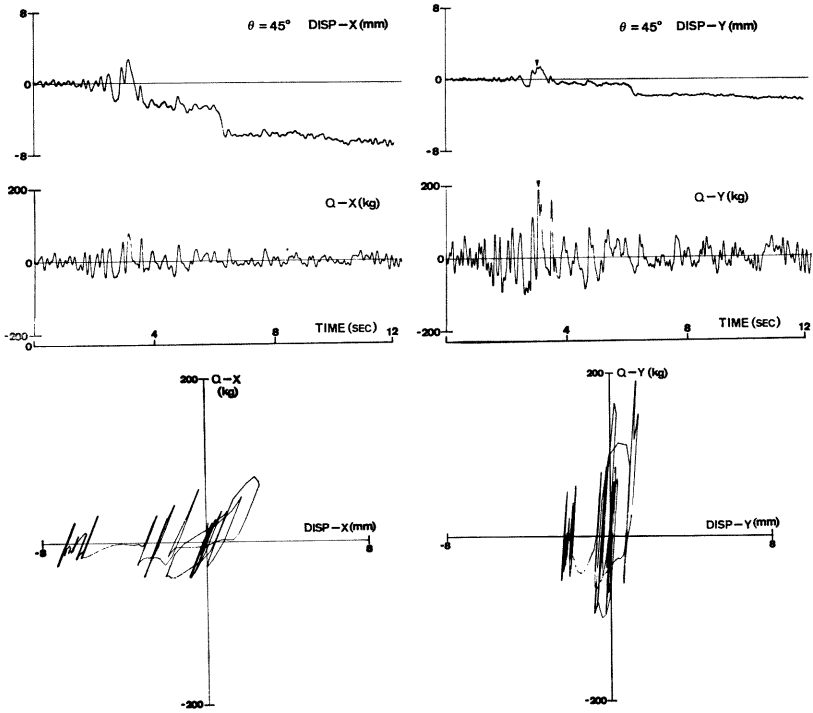


Fig. 7 Time history of Model B subjected to Hachinohe ground motion in the case of 45° input angle.

3. 解析 2

前報及び本報の前節での解析からも明らかなように、2方向入力時における弾塑性応答性状は、架構の2方向間の周波数特性や入力の卓越振動数などに大きく影響される。前節では、固有周期が0.08~0.2秒の限られた周波数範囲についての応答を詳細に検討したが、本節では、固有周期が0.3~1.0秒の周波数領域を対象として2方向入力時の非線形応答スペクトルを求め、立体振動における周波数特性の応答性状に及ぼす影響をより一般的に明らかにする。

3.1 解析方法

解析手法はこれまで用いてきた手法をそのまま踏襲するが、多くのパラメーターが存在する中で2方向の応答スペクトルを評価するために、ここでは、運動方程式を以下の如く無次元化する。

直交する2方向に水平地動加速度 \ddot{X}_0, \ddot{Y}_0 の作用する1層弾塑性システムの運動方程式を次式のように表現する。

$$\begin{aligned} M_X \ddot{X} + C_X \dot{X} + Q_X(X, Y) &= -M_X \ddot{X}_0 \\ M_Y \ddot{Y} + C_Y \dot{Y} + Q_Y(X, Y) &= -M_Y \ddot{Y}_0 \end{aligned} \quad (3)$$

上式で $M_X = M_Y = M$ は質量, C_X, C_Y は減衰係数, Q_X, Q_Y は2方向の相互作用を考慮した復元力である。

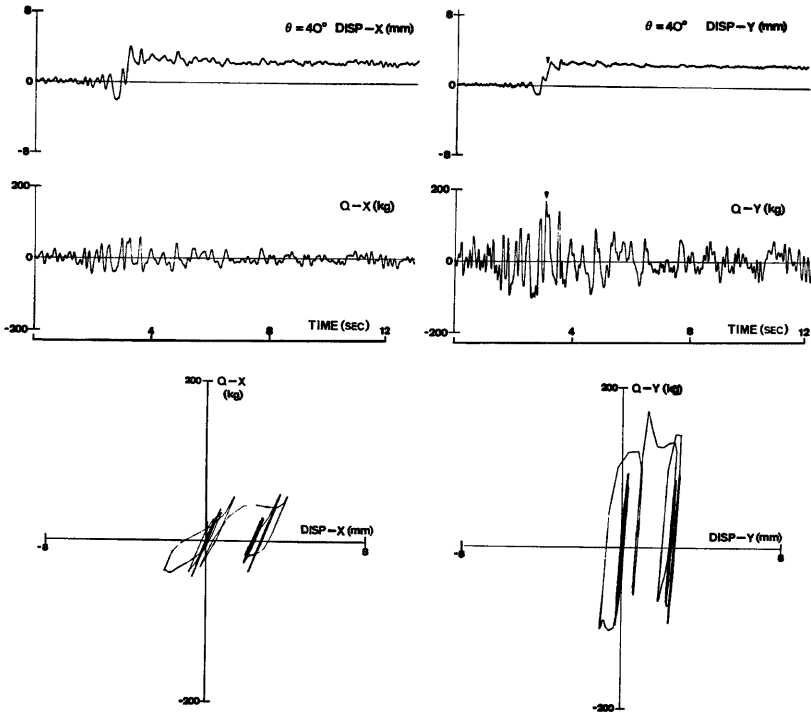


Fig. 8 Time history of Model B subjected to Hachinohe ground motion in the case of 40° input angle.

X 方向の固有周期 1 秒のモデルを基準とし、その時の部材の剛度を K_0 、質量を M_0 、降伏せん断力を Q_0 、降伏変位を $d_0 = Q_0/K_0$ とし、Y 方向に対する X 方向の固有周期の比 T_x/T_y を p とし上式を無次元化すると次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\delta}_x + 2h\dot{\delta}_x\sqrt{mk_{0x}} + q_x q_{0x} &= -\alpha_x \alpha_x(\tau) q_{0x} \dots\dots\dots(4) \\
 m\ddot{y}\delta_x/p + 2h\dot{y}\sqrt{mk_{0x}}\delta_x + q_y \cdot p q_{0x} &= -\alpha_y \alpha_y(\tau) \cdot p \cdot q_{0x}
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 \frac{M}{M_0} &= m, \quad \frac{X}{d_x} = x, \quad \frac{Y}{d_y} = y, \quad \frac{Q_x}{Q_0} = q_x, \quad \frac{Q_y}{Q_0} = q_y \\
 \frac{\tau^2}{T^2} &= \frac{K_0}{M_0}, \quad \frac{C_x}{\sqrt{M_x K_x}} = \frac{C_y}{\sqrt{M_y K_y}} = 2h \\
 \delta_x &= \frac{d_x}{d_0}, \quad q_{0x} = \frac{Q_x}{Q_0}, \quad k_{0x} = \frac{K_x}{K_0} \\
 \frac{A_{xmax}}{Q_x/M} &= \alpha_x, \quad \frac{A_{ymax}}{Q_y/M} = \alpha_y
 \end{aligned}$$

であり、 \bar{Q}_x, \bar{Q}_y は X, Y 方向の降伏強度、 α_x, α_y は外乱の強度パラメーター、 $\alpha_x(\tau), \alpha_y(\tau)$ は基準化外乱波形関数を表している。

さらに上の(4)式の両辺を m で除して

$$\frac{T_x}{T} = \frac{T_x}{1} = \frac{2\pi\sqrt{M_x/K_x}}{2\pi\sqrt{M_0/K_0}} = \sqrt{\frac{M_x K_0}{M_0 K_x}} = \sqrt{\frac{m}{k_{0x}}} \dots\dots\dots(5)$$

の關係を用いると、最終的に以下の形に表現できる。

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2h\dot{x}/T_x + q_x/T_x^2 &= -\alpha_x \alpha_x(\tau)/T_x^2 \\ \ddot{y}/p + 2h\dot{y}/T_x + q_y \cdot p/T_x^2 &= -\alpha_y \alpha_y(\tau) \cdot p/T_x^2 \end{aligned} \dots\dots\dots(6)$$

このとき、 α_x, α_y は外乱強度 A_x, A_y を以下の形で無次元化したことに対応する。

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \frac{A_x}{Q_x/M} = \frac{A_x}{d_x(T_0/T_x)^2(2\pi)^2} \\ \alpha_y &= \frac{A_y}{Q_y/M} = \frac{A_y}{d_y(2\pi)^2/T_y^2} \end{aligned} \dots\dots\dots(7)$$

従って、各方向の降伏変位 d_x, d_y は以下の如く表現できる。

$$\begin{aligned} d_x &= \frac{A_x}{\alpha_x} \left(\frac{T_x}{2\pi}\right)^2 \\ d_y &= \frac{A_y}{\alpha_y} \left(\frac{T_y}{2\pi}\right)^2 \end{aligned} \dots\dots\dots(8)$$

α_x, α_y は外乱加速度の最大値を構造物の降伏せん断力で無次元化したことに相当するため、外乱強度 A を一定とした有次元の応答を比較する場合、降伏変位は周期の2乗に比例することになり、変位、速度、加速度の有次元量と無次元量は以下の如く対応する。

$$\begin{aligned} X &= x d_x &= x \frac{A_x}{\alpha_x} \left(\frac{T_x}{2\pi}\right)^2 \\ \dot{X} &= \frac{d}{d\tau} \left(\frac{X}{d_x}\right) d_x \sqrt{\frac{K_0}{M_0}} &= \dot{x} \frac{A_x}{\alpha_x} \cdot \frac{T_x^2}{2\pi} \\ \ddot{X} &= \frac{d^2}{d\tau^2} \left(\frac{X}{d_x}\right) d_x \frac{K_0}{M_0} &= \ddot{x} \frac{A_x}{\alpha_x} \cdot T_x^2 \\ Y &= y d_y &= y \frac{A_y}{\alpha_y} \left(\frac{T_y}{2\pi}\right)^2 \\ \dot{Y} &= \frac{d}{d\tau} \left(\frac{Y}{d_y}\right) d_y \sqrt{\frac{K_0}{M_0}} &= \dot{y} \frac{A_y}{\alpha_y} \frac{T_y^2}{2\pi} \\ \ddot{Y} &= \frac{d^2}{d\tau^2} \left(\frac{Y}{d_y}\right) d_y \frac{K_0}{M_0} &= \ddot{y} \frac{A_y}{\alpha_y} \frac{T_y}{2\pi} \end{aligned}$$

外乱周波数パラメーター ϕ を構造物の固有周期 T_x と外乱継続時間 T_d の比として

$$\phi = \frac{\tau_x}{\tau_d} = \frac{T_x}{T_d} = \frac{\tau_x}{N \cdot d\tau}$$

と定義すると、数値計算上の時間刻みは、

$$d\tau = \frac{2\pi\sqrt{m/k_{0x}}}{N} \cdot \frac{T_d}{T_x} = \frac{2\pi T_d}{N}$$

となり、ここでは各固有周期に応じた $d\tau$ を採用して計算精度を向上させている。

3.2 入力方法及びモデル

入力地震波は1940年 El Centro の NS 成分及び EW 成分であり、X, Y 方向共に NS 成分を入力する場合 (case A) と、X 方向に NS 成分、Y 方向に EW 成分を入力する場合 (case B) の2通りの方法で入力する。また、入力強度はそれぞれのケースについて、 α_x, α_y 共に2の場合、 $\alpha_x=2, \alpha_y=1$ の場合、

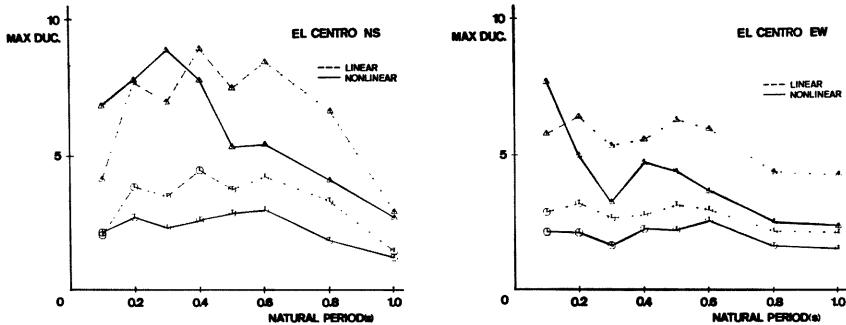


Fig. 9 Elastic and inelastic ductility response spectra of El Centro NS and EW earthquake in the case of middle frequency range.

$\alpha_x=1, \alpha_y=2$ の場合の3通りの組み合わせを用いる。無次元強度パラメーター α を各固有周期に対して一定値に与えるということは、上記に示すように周期に比例した有次元の外乱強度を与えることを意味する。すなわち、異なる周期の構造物に対しても安全率を一律に与えることによって長周期側の塑性挙動を明らかにしようとしている。対象とする架構の固有周期は両方向共に、0.3~1.0秒までの6通りとし、2方向としては計36通りの組み合わせについて、継続時間を20秒として応答計算を行ない、応答最大値を求める。

本解析法を用いて一方向のみ入力した場合の非線形粘性率応答スペクトルを0.1~1.0秒の範囲で Fig. 9 に示す。左の図が El Centro EW 成分、右が NS 成分を入力した結果である。図中□印は $\alpha=1$ 、△印は $\alpha=2$ の場合を示す。また、それぞれに対応する線形の粘性率応答スペクトルを併せて破線で示している。短周期領域で検討した前節と異なり、本節では0.3~1.0秒の周期を適用範囲としており、この範囲では弾性スペクトルの方が弾塑性スペクトルよりも大きく、所謂変位一定の領域に入る。0.4~1.0秒の範囲では、弾性スペクトルと弾塑性スペクトルは類似の傾向を示し、EW 成分の応答が NS 成分より大きい。一方、短周期域では様相が異なり、 α の大きい場合、弾塑性応答が弾性応答より大きくなる場合も生じる。固有周期0.3秒の点では、弾塑性応答は NS 成分で減少し、EW 成分では増加しており、以後の解析結果にもその影響が現れる。

3.3 解析結果の考察

Fig. 10 は X 方向に NS 成分、Y 方向に EW 成分を入力し (case B)、強度パラメーターを両方向共

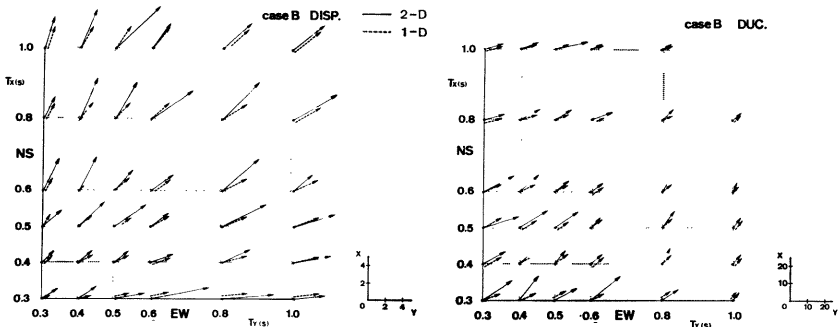


Fig. 10 Maximum displacement and ductility ratio vectors of the model with and without interaction under two component of El Centro earthquake.

に $\alpha=2$ とした場合の変位及び靱性率の最大値ベクトルを示す。ここで、両方向の最大値の同時性は考えていない。左が変位、右が靱性率のベクトルで、●印が固有周期の組み合わせを示し、矢印がその固有周期の組み合わせでの変位及び靱性率ベクトルの方向及び大きさを表している。併せて、1方向独立に入力した場合の最大値を破線の矢印で示す。ベクトルの大きさの縮尺は右下に示している。

靱性率応答については、Fig. 9 のスペクトルから明らかなように、短周期の領域で大きな値を示す。2方向入力時の靱性率応答は短周期側に増加する傾向にある。また2方向の周期が等しい場合、2方向入力時のベクトルの大きさは1方向のスペクトルに近い傾向となるが、応答が両方向で平均化されるため、ベクトルの方向は 45° に近くなる。1方向入力時と2方向入力時を比較すると X 方向の靱性率が増加する傾向にあるが、これは Fig. 9 の応答スペクトルから明らかなように、NS 成分の応答が EW 成分に比して小さいためと考えられる。

変位応答の場合、1方向の応答スペクトルは周期が長くなるほど、大きくなる傾向にあることから明らかなように、2方向入力時においても、長周期側で大きな値を示す。2方向の固有周期が等しい点ではベクトルはほぼ 45° の方向であるが、周期比 μ が大きくなるほど、長周期の方向へ変化する。また、1方向入力時と2方向入力時のベクトルを比較すると、EW 成分の1方向のスペクトルが NS 成分よりも概して大きいにもかかわらず、X 方向 (NS 成分入力) が長周期側となる点では、2方向入力時のベクトルが1方向時のベクトルより長周期側を向いている。このことは、2方向相互作用の影響によって長周期側の変位が増加していることを表す。

Fig. 11 には1方向のスペクトルの影響を除くために、1方向入力時の変位応答最大値に対する2方向入力時の最大値の比を各方向について求め、そのベクトルを同様の方法で表示している。これは同じ降伏変位を採用しているため、靱性率の比を表すことにもなる。左側の図は X, Y 方向ともに NS 成分を入力した場合 (case A)、右側の図は X 方向に NS 成分、Y 方向に EW 成分を入力した場合 (case B) の結果で、図中、上段は X, Y 方向の強度パラメーターが等しく $\alpha=2$ の場合、中段、下段はそれぞれ、強度パラメーターの異なる $\alpha_x=2, \alpha_y=1$ 及び $\alpha_x=1, \alpha_y=2$ の場合である。

El Centro の2成分を入力したとき (case B) では、入力強度が等しい場合、2方向の相互作用の影響により、応答は1～3倍程度増加する場合がある。しかし、周期の変化による傾向はこの図でははっきりしない。一方、 $\alpha_x=2, \alpha_y=1$ の場合は、入力強度の小さい Y 方向に相互作用の影響が現れる。また T_x が $0.8, 1.0$ 秒かつ T_y が $0.3 \sim 0.6$ 秒の範囲では長周期側の1方向入力時の靱性率応答は Fig. 9 を見ても明らかなように小さいために、逆の傾向を示し X 方向への増加が大きくなる。 $\alpha_x=1, \alpha_y=2$ の場合は、 $\alpha_x=2, \alpha_y=1$ の場合とは逆の傾向となり、相互作用を考慮することにより、応答の小さい方向で応答量が増加し、2方向の応答が平均化される傾向を示している。

2方向に NS 成分を入力した場合 (case A) では、入力強度が同じ場合は周期 0.3 秒を除いて増加量は case B に較べて小さい。周期の異なる場合、概して周期の長い方へ応答が増加する傾向がある。周期 0.3 秒の場合、1方向のスペクトルが急変するため、顕著な傾向はみられない。2方向で入力強度の異なる場合、固有周期の 0.3 秒の場合を除いて、case B と同様に入力強度の小さい側の応答が増加する傾向がある。また長周期領域では2方向入力時の応答が減少する場合もみられるが、これは1方向の応答スペクトルにみられるように、弾性応答よりも弾塑性応答の方が周期の変化に対する減少量が大きいためと考えられる。

4. む す び

架構および外乱の周波数特性が、2方向入力時の弾塑性応答に及ぼす影響を明らかにするために、短周期領域で入力角度を変化させる方法と、長周期領域で2方向入力時の応答スペクトルを求める方法の2通りについて解析を行なった。これらの解析結果より、2方向入力時の相互作用について、以下の諸点が明らかにされた。

- 1) 短周期域では2方向入力時の変位 (靱性率) 応答は1方向入力時の応答に較べると概して大きく、そ

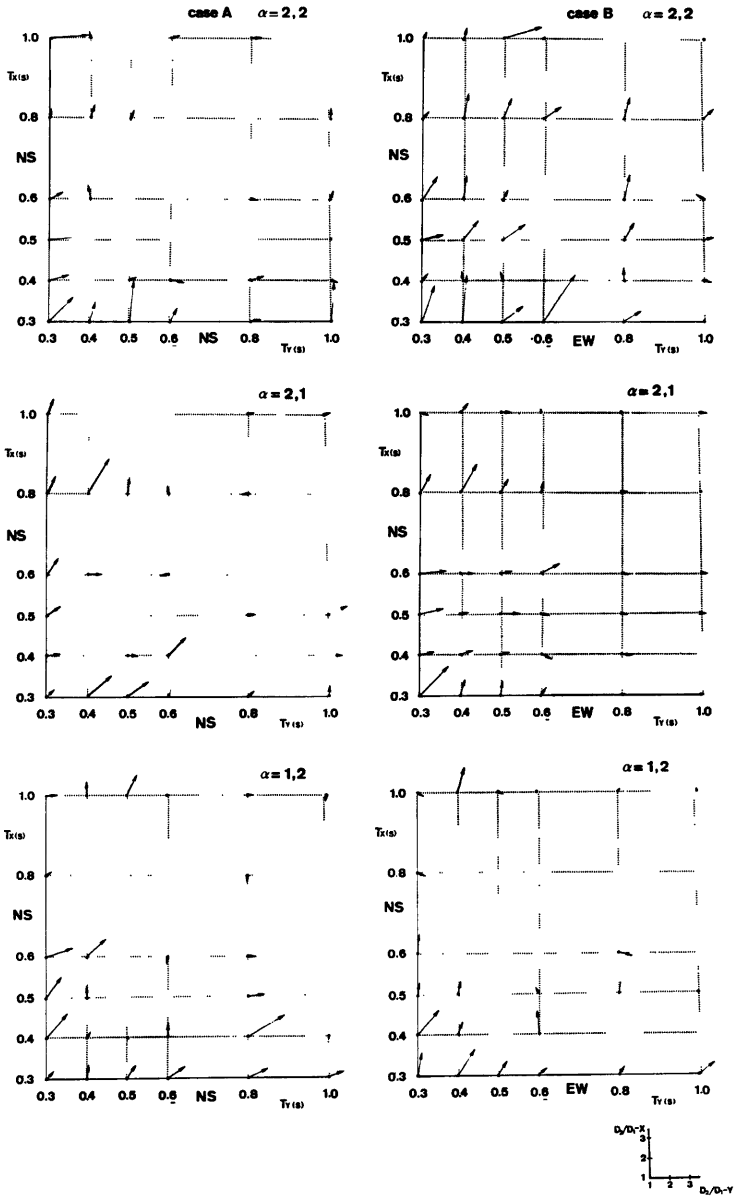


Fig. 11 Amplification factor of maximum ductility response due to interaction effect under two component of input motion.

の増加量は入射角が $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ のとき最大となり、場合によっては2倍近くなる。このことは2方向入力時の構造物の耐震安全性は、1方向入力時の安全性よりは相当低くなることを示しており、設計に際して考慮する必要がある。

2) 2方向入力時の相互作用の影響は、架構の固有周期の長短にかかわらず大略弱軸方向(長周期方向)に現れる。しかし、靱性率応答ではその傾向は弱められる。

3) 長周期域では、入力強度に差がある場合、強度の小さい方へ2方向入力の影響が現われることが多いが、相互作用の影響よりも各方向の外乱の周波数特性の影響が強い場合もあり、この場合は概して1方向入力時の弾塑性応答スペクトルの傾向から2方向入力時の応答は類推され、2方向の応答が平均化される傾向をもつ。

4) 入射角度の微小な変化によって応答が急変する場合がある。特に固有周期比が大きい場合にその傾向が強い。その原因は必ずしも明らかではないが、弱軸方向に変形し易いことも一因であると考えられる。

2方向入力時の弾塑性挙動を支配するパラメーターは数多く、これらの影響を正確に把握するためには、これだけの解析では不十分であり、より数多くのケースについて解析を行ない、結果を比較する必要がある。今後は、解析1及び2について、入力波形、入力強度、架構の固有周期など、これまでのパラメーターを拡張して解析すると共に、全入力エネルギーと消費エネルギーの関係や相互作用に及ぼす軸力の影響などについても明らかにしたい。

本研究に関して、京大大学院生桑名斉君をはじめ研究室の皆様にも多大な御協力を得たことを心より感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 若林 實・藤原悌三・北原昭男：2方向水平地動を受ける立体構造物の動的崩壊過程，その1，京大防災研究所年報，第25号 B-1，1982，pp. 129-149.
- 2) 小堀鐸二・南井良一郎・藤原悌三：降伏曲面を考慮した構造物の捩れ応答，京大防災研究所年報，第13号 A，1970，pp. 287-301.
- 3) 小堀鐸二・南井良一郎・藤原悌三：R-O 型弾塑性建築架構の応答解析，京大防災研究所年報，第14号 A，1971，pp. 301-313.
- 4) Takizawa, H. and H. Aoyama: Biaxial Effects in Modeling Earthquake Response of R/C Structures, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, 1976, pp. 523-552.
- 5) 大沢 胖，紫田明徳：地震動に対する1質点系非線型レスポンスの特性—最大変形に関する既往の研究の整理と考察，日本建築学会論文報告集第69号，昭和36年10月，pp. 401-404.
- 6) Kobori, T., R. Minai and T. Fujiwara.: Earthquake Response of Frame Structures Composed of Inelastic Members, Proc. of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, June, 1973, pp. 1772-1781.