

二次元地動の作用する建物の弾塑性応答に及ぼす入力と建物特性の異方性の影響

奈良岡 浩 二
(大崎研究室)

渡 辺 孝 英
(大崎研究室)

§ 1. はじめに

現行の耐震設計では超高層建物、長大橋、原子力発電所施設などの重要構造物の設計に際しては、地震応答解析を行なうこととなっている。このとき、入力地動としては原子力発電所施設を除いて強震観測記録が用いられている。原子力発電所施設では、建設地点で予想される最大速度振幅、応答スペクトル、継続時間などの地動特性を満足する模擬地震波が入力波として用いられている。一般に、地震応答解析では入力波と建屋を一次的に取り扱っている。しかし、周知のように二次元地動を受ける建物の弾塑性応答は、復元力の相互作用効果により一次元の場合と異なった様相を示す。そして、二次元入力による応答の増加度合いは、二方向復元力の相互作用の度合い、および入力地動と建物特性に密接に関係する。なお、「超高層建物設計指針」では地動直交成分の寄与として、そのエネルギーの3割加えたものを入力地動とすると示されている。

二方向復元力の塑性域での相互作用を考慮した地震応答解析に関するものとして、Pecknold¹⁾、Nigam²⁾、滝沢³⁾の研究がある。PecknoldおよびNigamは、一次元の復元力特性を二次元に拡張している。滝沢は、金属塑性論とのアナロジーにより異方性が考慮可能なモデルを示した。さらに、滝沢は既往の強震記録を用いて二次元弾塑性応答解析を行ない、RC建物の損傷と倒壊における地動直交成分の寄与の度合いを調べている⁴⁾⁵⁾。

等価線形手法を利用したものとして、Park⁶⁾と藤原⁷⁾の研究がある。Parkらは、Wenによる復元力特性の関数表現⁸⁾とUtkuとAtalikの等価線形化手法⁹⁾を組み合わせたモデル¹⁰⁾を二次元に拡張し、二次元入力効果を降伏強度の異方性の観点から検討している。

藤原⁷⁾は、Parkらの手法を基にして建物特性の異方性が考慮可能な定式化を行ない、建物特性の異方性が応答に与える影響を検討している。

市之瀬¹⁰⁾は、耐力低下型の復元力特性を二次元に拡

張したモデルを示した。また、復元力特性や入力の大きさが変化した場合の最大応答塑性率を評価する手法を、エネルギー論的観点から示している。

以上のような研究から、建物特性の異方性が二次元入力による建物の応答に及ぼす影響に関する知見は多く得られてきている。しかし、建物特性の異方性は入力地動の水平面内におけるエネルギー分布の異方性と密接に関係するため、両者の特性を踏まえた検討が必要と考えられる。

さらに、二方向復元力の相互作用を規定する降伏関数が応答結果に及ぼす影響を把握することも重要である。これらの影響について検討する場合、建物の応答量としては塑性率を用いることが妥当と考えられる。一方、入力地動に関しては、既往の研究において塑性率との関連性が最も高いと指摘されている地動加速度の2乗の時間積分値の平方根(RS値¹¹⁾)に着目する。

本研究では、二次元地動作用下での地動直交成分の寄与の度合いを、入力と建物の特性を関連づけて検討を行なった。すなわち、入力地動については水平面内におけるエネルギー分布と建物への入力角度を変化させ、これらの量と最大応答塑性率との関係を調べた。一方、建物については弾性周期と降伏強度が等方な場合と異方な場合の最大応答塑性率の関係を調べた。また、二次元入力効果を規定する降伏関数が最大応答塑性率に及ぼす影響についても検討した。

以上の結果を把握するとき、建物特性の等方な場合の結果を基準として他の結果との関係を調べることは重要である。このような場合、エネルギー量の釣り合い関係に基づき、累積塑性変形倍率¹²⁾から最大応答塑性率を推定する方法を採用することが既往の研究¹⁰⁾において有効なことが示されている。

本研究においても同様の手法により、最大応答塑性率と入力地動の大きさと水平面内におけるエネルギー分布および建物に対する入力角度、そして建物特性の異方性との関係を表わす簡易評価式の検討を行なった。

以上の検討から、等方系の応答塑性率から異方系のそれを定量的に推定できることを示した。

また、これらの結果は一般に行なわれている一次元の地震応答解析における入力地動の取り扱いにおいても有用な結果と考えられる。

さらに、二次元模擬地震動を作成する上でも、二次元地動の特性と建物の応答を関連付けた本検討は有用な資料を与えると考えられる。

§ 2. 検討条件

本検討の問題設定は、二次元地動が建物に入力し、並進運動により塑性化する場合である。このとき、地動に関しては、エネルギーに着目していることから、主軸の概念を利用することが有効である。すなわち、図-1に示すように地動の水平面内におけるエネルギー分布($E_{\theta'}$)は、強軸と弱軸成分のエネルギー量を指定すると式(1)により一義的に確定する。そして、分布形状を規定する量は、弱軸の強軸成分に対するエネルギー比の平方根(以下では r と表記)となる。

$$E_{\theta'} = [\cos \theta', \sin \theta'] \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} \\ E_{yx} & E_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \theta' \\ \sin \theta' \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

$$E_{ij} = \int_0^{\infty} a_i(t) a_j(t) dt \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 i, j は方向を表わし、 x または y となる。そして、 $a_i(t)$ は i 方向の地動加速度を示す。

一方、建物の特性に関しては、図-2に示すように復

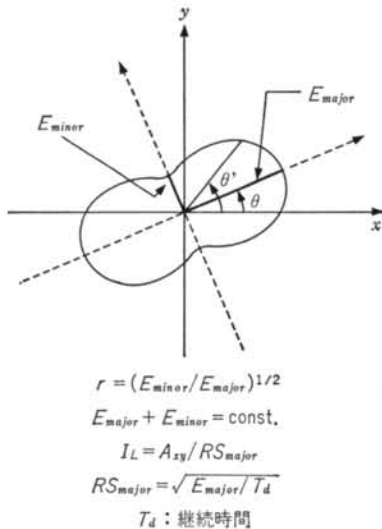


図-1 地動のパラメータ

元力特性を bilinear とすると、 x 方向の弾性周期 T_{xe} 、 x 方向の降伏強度 A_{xy} および y 方向の x 方向に対する弾性周期比 τ 、降伏強度化 η 、 x 方向と y 方向のそれぞれの弾性剛性に対する第2剛性比 β_x, β_y となる。

また、入力強度と建物の降伏強度は相対的なものであるため、地動強軸成分のRMS振幅値(RS_{major})に対する建物の x 方向の降伏強度 A_{xy} の比を入力強度指標(I_L)とする。さらに、入力地動の強軸成分と建物の x 方向とのなす角度 θ (反時計回りを正とする)と二次元時刻歴形状 $[a_{major}(t), a_{minor}(t)]^T$ も規定因子となる。

支配方程式は、弾性状態において式(3)で表わされる。

$$\{\ddot{u}\} + \left(\frac{2\pi}{T_{xe}}\right)^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\tau^2 \end{bmatrix} \{u\} = -\left(\frac{2\pi}{T_{xe}}\right)^2 \frac{1}{I_L} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\tau^2 \eta \end{bmatrix} \{f\} \quad \dots\dots(3)$$

$$\{\mu\} = \begin{Bmatrix} \Delta_x / \Delta_{xy} \\ \Delta_y / \Delta_{yy} \end{Bmatrix}, \quad \{a\} = \begin{Bmatrix} A_x / A_{xy} \\ A_y / A_{yy} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(4)$$

$$\{f\} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{major} / RS_{major} \\ a_{minor} / RS_{major} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 $[\Delta_x, \Delta_y]^T$ は変位応答ベクトル、 $[A_x, A_y]^T$ は復元力ベクトル、 $\tau = T_{ye} / T_{xe}$ 、 $\eta = A_{yy} / A_{xy}$ 、 RS_{major} は地動強軸成分のRMS値、 Δ_{xy} 、 Δ_{yy} は x, y 方向における降伏変位、 A_{xy} 、 A_{yy} は x, y 方向における降伏強度である。式(3)から、弾性応答では $1/\eta$ と r が見かけ上同じ役割を演ずることが分かる。

塑性域での剛性行列は、滝沢により提案された塑性履歴2軸曲げモデル³⁾により評価する。モデルの詳細な内容は文献3)を参照されたい。

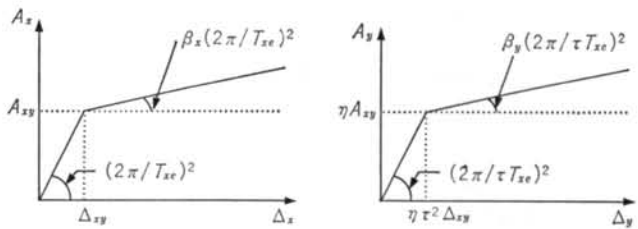


図-2 建物のパラメータ

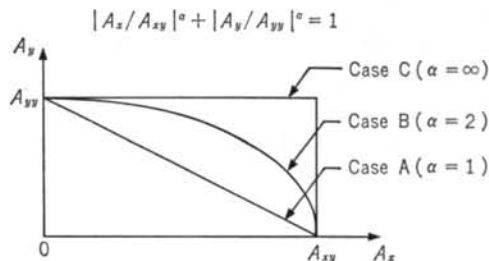


図-3 用いた降伏関数

項目	説明と値	項目	説明と値
入力	二次元定常ホワイトノイズ	スケルトンカーブ	bilinear
継続時間	20.48秒	弾性周期 T_{xe}	0.1, 0.5, 1.0
$I_L(A_{xy}/RS_{major})$	0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	降伏強度比 η	0.5, 1.0, 2.0
エネルギー分布比 r	0, 0.5, 0.75, 1.0	弾性周期比 τ	$1/\sqrt{2}, 1, \sqrt{2}$
入力角度 $\theta(\text{deg})$	0, 22.5, 45, 67.5, 90	β_x, β_y	0.01
降伏関数	図-3に示す3種類	減衰定数 ζ_x, ζ_y	0.05

表-1 塑性率の規定因子

このモデルでは降伏関数を設定する必要があり、本検討では図-3に示す Case A, B, C の3種類の関数を用いた。Case A と C は、二方向復元力の相互作用の度合いの下限と上限をそれぞれ与える。また、Case B はそれらの中間であり、一般によく用いられているものである。

用いたパラメータの値を表-1に示す。なお、入力は二次元定常ホワイトノイズとした。

あまり見られない。このことは、 $T_{xe}=0.1$ のような短周期建物では二方向復元力の相互作用効果が大きく、塑性率が入力波のエネルギーだけでなく最大振幅値にも大きく関係しているためと考えられる。

次に、 $T_{xe}=0.5$ では r と降伏関数の Case B と Case C の違いによる塑性率のばらつきは小さくなく、しかも全エネルギーの一定条件下では、一次元動($r=0$)に対する値が他の入力に対する値を包絡していることが分かる。このことから、偏心がない建物を対象とした一次元動入

§ 3. 解析結果

3.1 最大応答塑性率と入力レベルとの関係

まず、塑性率を規定する各因子の役割を明確にするため、対象とする建物を $r=1, \eta=1$ で降伏関数が Case B と Case C のものとし、二次元地動の入力角度 $\theta=0$ の場合に対象を限定する。なお、 $\beta_x(=\beta_y)$ と $\zeta_x(=\zeta_y)$ についてはそれぞれ 0.01 と 0.05 を固定値とする。

以上のことから、塑性率を規定する因子は、 x 方向の弾性周期 T_{xe} 、降伏関数、地動のエネルギー分布比 r 、入力強度指標 I_L の4種類となる。

二次元定常ホワイトノイズ入力に対する入力強度指標と最大応答塑性率との関係を、図-4に示す。これらの結果は、二次元定常ホワイトノイズ10組に対する応答結果の平均値である。上段から下段にかけて、それぞれ $T_{xe}=0.1, 0.5, 1.0$ であり、半径方向の応答変形が最大となる時の応答塑性率を示している。なお、地動直交成分の寄与をエネルギー量の尺度から調べるため、同一の I_L に対しては r の値によらず、地動の全エネルギー（地動の強軸と弱軸成分のエネルギーの和）が一定になるようにしている。

図-4から、一般に I_L と塑性率は反比例関係にあることが指摘できる。 $T_{xe}=0.1$ の Case B の場合は、 r の違いによる塑性率のばらつきが大きく、塑性率の入力エネルギー量に対する依存性が

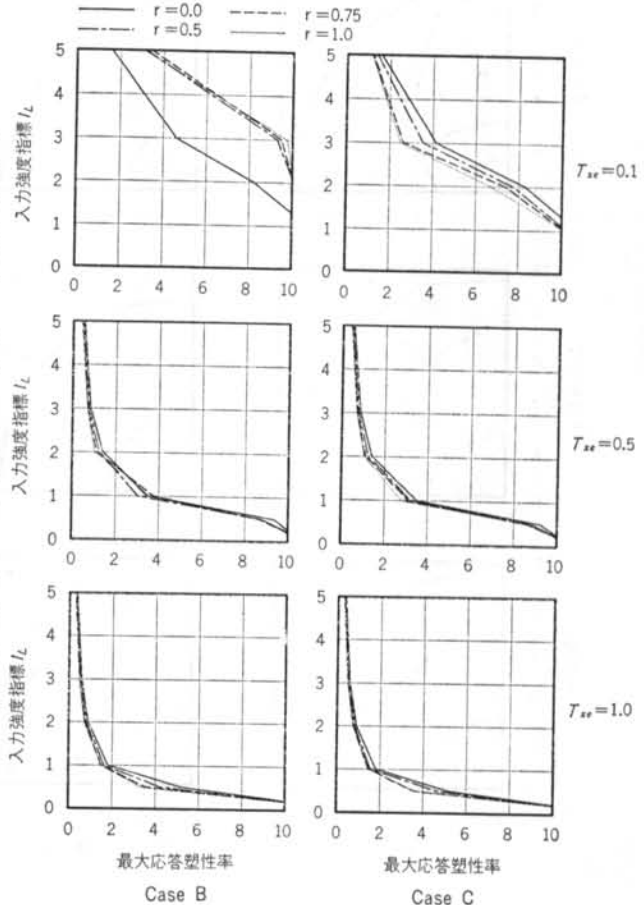


図-4 入力強度指標と最大応答塑性率との関係

力の地震応答解析では、全エネルギーが等しい一次元動を用いれば安全側の評価を与えると考えられる。

$T_{xe}=1.0$ においても、 $T_{xe}=0.5$ の場合と同様の傾向が見られる。降伏関数の塑性率に及ぼす影響に関する定量的な検討は3.5で行なう。

3.2 二次元地動の入力方向と塑性率分布との関係

次に、地動の入力方向が塑性率に及ぼす影響を調べる。入力地動の強軸成分と建物のx軸のなす角度 θ （反時計回りを正とする）を0, 22.5, 45, 67.5, 90°としたときの半径方向の塑性率分布を図-5に示す。各周期とも、二つの I_L に対するCase A, B, Cの塑性率が示さ

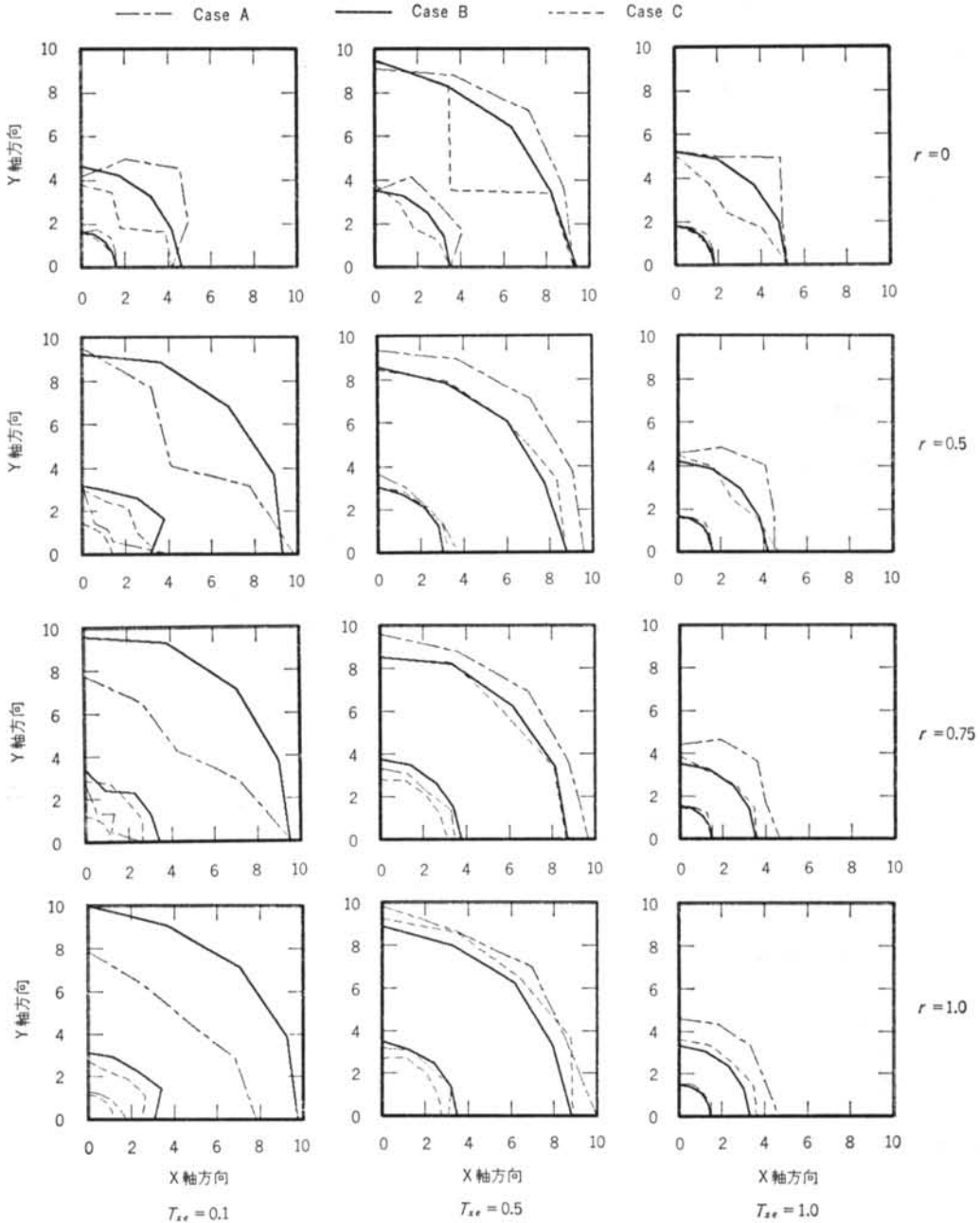
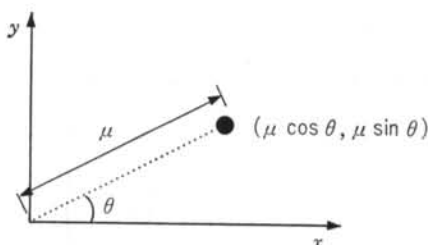


図-5 半径方向の最大応答塑性率と地動の入力方向との関係



μ：最大応答塑性率（ x, y, r 方向）
θ：入力地動強軸成分の入力方向

図-6 塑性率の表現方法

れている。\$I_L\$の値は \$T_{xe}=0.1\$ で 3.0, 5.0, \$T_{xe}=0.5\$, 1.0 で 0.5, 1.0 である。同図において、横軸と縦軸はそれぞれ建物の \$x\$ 軸と \$y\$ 軸方向に対応している。図-6 に示すように、地動強軸成分が建物の \$x\$ 軸に対して \$\theta\$ 方向に入力したときの塑性率 \$\mu\$ の値を \$(\mu \cos \theta, \mu \sin \theta)\$ の位置に示している。なお、これらの値は各ケースとも二次元定常ホワイトノイズ10組に対する応答結果の平均値である。

図-5において、\$r=0\$（一次元動）の場合は、入力方向による建物の降伏強度の違いを反映した塑性率分布となっている。すなわち、\$T_{xe}=1.0\$ の \$r=0\$ では降伏強度の逆数に似た塑性率の分布となっている。また、\$x\$ 方向および \$y\$ 方向の塑性率分布は、入力地動のエネルギー分布に対応した形状となっているのが一つの大きな特徴である。この塑性率分布の方向性は、\$r\$ の値が大きくなり入力の方向性が小さくなるにつれ見られなくなり、等方に近い分布となっている。この傾向は、周期が長いほど顕著となっている。

降伏関数による最大応答塑性率の違いに着目すると、\$T_{xe}=0.1\$ では Case C, A, B の順に塑性率が大きくなる傾向にある。\$T_{xe}=0.5, 1.0\$ では、Case B, C ではほとんど塑性率に差が見られない。Case A は、Case B, C に比べ約 1~4 割程度塑性率が大きくなっている。

3.3 等方な系を基準とした最大応答塑性率の推定

弾性周期と降伏強度に関して、異方性がある建物の塑性率を等方建物のそれを基に推定することは重要なことである。ここでは、エネルギーの釣り合い関係を基にして塑性率の推定を試みる。

まず、秋山¹²⁾と同様にエネルギーの釣り合いを次式で考える。解析結果から、\$T_{xe}=0.5\$ 以上では Case B, C 間で応答塑性率にあまり差が生じないことが判明している。このため、二方向復元力の相互作用を考慮しないで、\$x\$ 方向と \$y\$ 方向でエネルギーの釣り合いを独立に考

える。以下において、変数の添字の最初の文字は方向を示している。

$$E_{xt} = E_{xe} + E_{xp} \quad \dots\dots(6)$$

$$E_{yt} = E_{ye} + E_{yp} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、\$E_{xt}, E_{yt}\$ は入力エネルギー、\$E_{xe}, E_{ye}\$ は弾性ひずみエネルギー、\$E_{xp}, E_{yp}\$ は塑性履歴吸収エネルギーである。一般に減衰により消費するエネルギーが上式に与える影響は小さいことから、ここでは無視している。

次に、塑性率と履歴吸収エネルギーとの関係を導くため、便宜上平均塑性変位増分 \$\Delta x_p, \Delta y_p\$ を導入し、最大応答変位と塑性履歴吸収エネルギーを以下のように表わす。

$$(\Delta x)_{\max} = \Delta x_p + n_{xc} \Delta x_p \quad \dots\dots(8)$$

$$(\Delta y)_{\max} = \Delta y_p + n_{yc} \Delta y_p \quad \dots\dots(9)$$

$$E_{xp} = A_{xy} n_{xc} \Delta x_p \quad \dots\dots(10)$$

$$E_{yp} = A_{yy} n_{yc} \Delta y_p \quad \dots\dots(11)$$

上の2式から、塑性率 \$\mu_x, \mu_y\$ は以下のように表わされる。

$$\mu_x = 1 + \frac{1}{N_x} \frac{E_{xp}}{A_{xy} \Delta x_p}, \quad (N_x = \frac{n_{xt}}{n_{xc}}) \quad \dots\dots(12)$$

$$\mu_y = 1 + \frac{1}{N_y} \frac{E_{yp}}{A_{yy} \Delta y_p}, \quad (N_y = \frac{n_{yt}}{n_{yc}}) \quad \dots\dots(13)$$

\$E_{xp}/A_{xy} \Delta x_p\$ を秋山は累積塑性変形倍率と、\$N_x, N_y\$ を市之瀬らは等価繰り返し回数と呼んでいる。

また、半径方向の応答が最大となるときの塑性率 \$\mu_r\$ を次のように表わす。

$$\mu_r = 1 + \frac{1}{N_r} \left(\frac{E_{xp}}{A_{xy} \Delta x_p} + \frac{E_{yp}}{A_{yy} \Delta y_p} \right) \quad \dots\dots(14)$$

一般に、塑性率と累積塑性変形倍率との関係は比較的ばらつき、回帰係数 \$N_x, N_y\$ は累積塑性変形倍率の大きさに依存する傾向がある。このため、入力地動特性と建物特性の変化による回帰係数のばらつきを小さくするため以下では \$N_r\$ に着目し、この値をモンテカルロシミュレーションにより評価する。そして、以下の塑性率の推定においては \$N_x = N_y = N_r\$ とする。

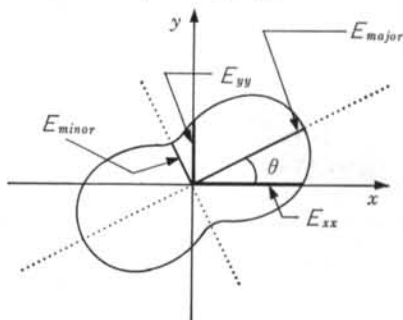


図-7 地動の入力角度と入力エネルギーとの関係

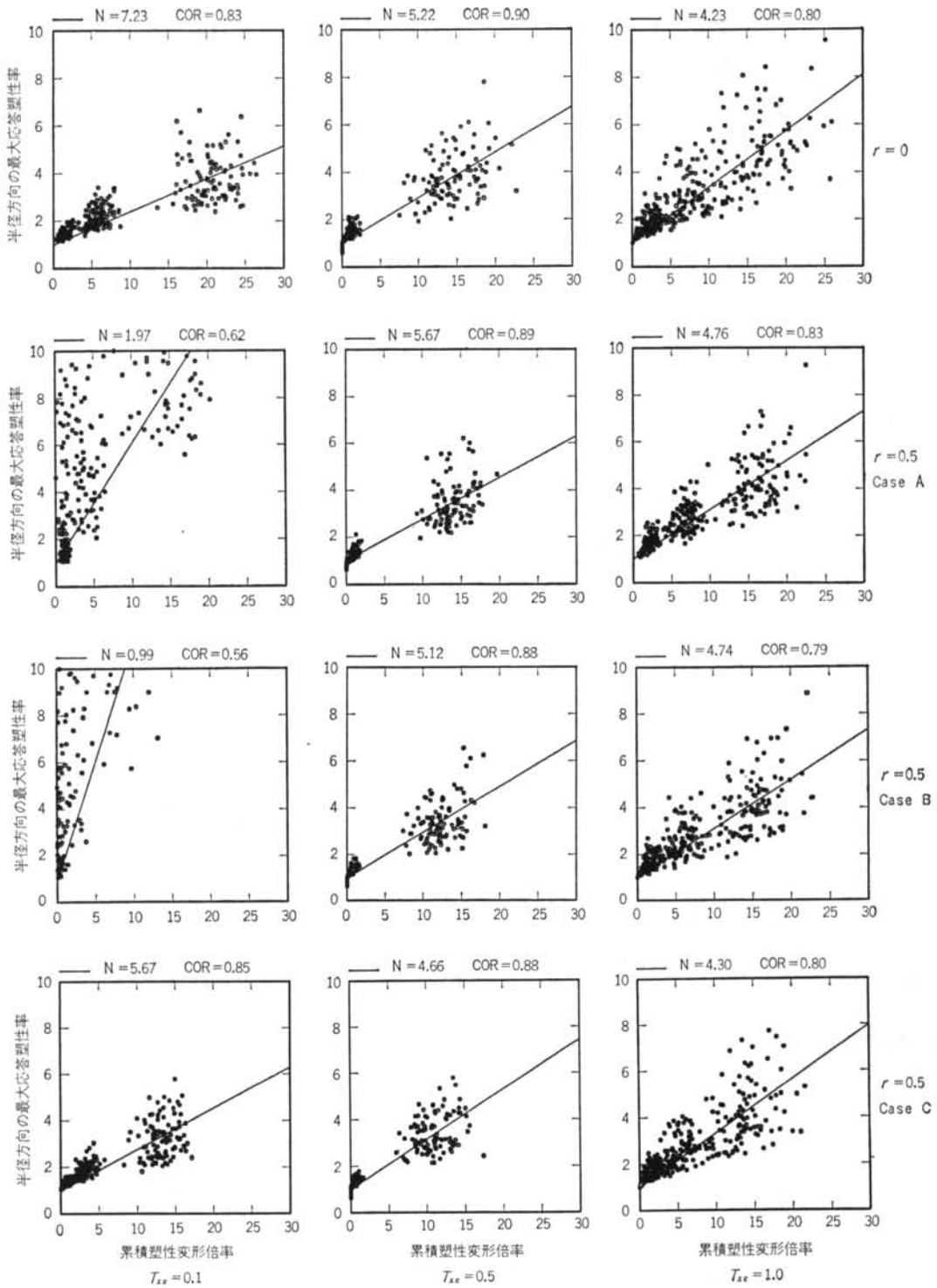


図-8 半径方向の最大応答塑性率と累積塑性変形倍率との関係 ($\tau=1, \eta=1, \theta=0$)

入力方向によるエネルギーの変化を、図-7に示すように x 軸方向と y 軸方向のエネルギーに着目して考えて降伏強度と弾性周期の違いを補正する。相互作用を考慮しないと、塑性率の推定式は次式ようになる。ここで、半径方向の塑性率は、 x 方向と y 方向のそれを基にSRSS法により求めている。

$$\mu_x(\theta) = \frac{1}{N_x} \left[\frac{E_{xt}C_x(\theta)}{A_{xy}D_{xy}} - 0.5 \right] + 1 \quad \dots\dots(15)$$

$$\mu_y(\theta) = \frac{1}{N_y} \left[\frac{E_{yt}C_y(\theta)}{A_{xy}D_{xy}\tau^{1.5}} - 0.5 \right] + 1 \quad \dots\dots(16)$$

$$\mu_r(\theta) = \sqrt{\mu_x^2(\theta) + \mu_y^2(\theta)} \quad \dots\dots(17)$$

$$C_x(\theta) = \cos^2\theta + r^2 \sin^2\theta \quad \dots\dots(18)$$

$$C_y(\theta) = \cos^2\theta + \sin^2\theta/r^2 \quad \dots\dots(19)$$

式(15)、(16)において、 $C_x(\theta)$ 、 $C_y(\theta)$ は二次元地動の入力角度の変化による x 方向と y 方向の入力エネルギーの補正係数である。 x 方向と y 方向の弾性周期が異なる場合、 D_{yy} は $D_{xy}\tau^2$ となる。このため、入力エネルギーが周期に依存しないとすれば、式(16)での τ のべき数は2.0となる。ホワイトノイズ入力の場合は弾性応答で考えると、

y 方向の入力エネルギーは弾性周期比 τ の平方根に比例するため、式(16)での τ のべき数は1.5となる。

また、 N_r の値は建物の復元力特性および入力特性に依存すると考えられる。この係数を理論的に評価することは困難と考えられる。このため、いくつかのパラメータの組合せに対して、モンテカルロ法により係数の値を求めた。参考のために、 $\beta_x = \beta_y = 0.1$ の場合についても検討を行なった。なお、サンプル数は100とした。シミュレーション結果を図-8と表-2に示す。 N_r の値に着目すると、一般に $T_{xe} = 0.5, 1.0$ ではCase A, B, Cであまり差がない。 $T_{xe} = 0.1, \beta_x = 0.01$ のCase A, Bでは N_r が1~2程度の小さい値となっている。

そして、各データのばらつきが大きいことと、ここで設定している塑性率と累積塑性変形倍率を結ぶ回帰式のため、応答塑性率が大きくなるにつれ N_r の値も大きくなる傾向にある。同様の理由から、弾性周期比と降伏強度比の変化により N_r の値が $T_{xe} = 0.1$ では約1~11、 $T_{xe} = 0.5, 1.0$ では約5~9程度の範囲でばらついている。

一方、 $\beta_x = 0.01$ と0.1に対する結果を比較すると、 β_x

周 期	弾性周期比と降伏強度比	回帰係数	$\beta_x = 0.01$			$\beta_x = 0.1$		
			Case A	Case B	Case C	Case A	Case B	Case C
$T_{xe} = 0.1$	$\tau = 1$ $\eta = 1$	N_r	1.97	0.99	5.67	8.71	4.34	7.42
		相関係数	0.62	0.56	0.85	0.84	0.78	0.87
		変動係数	0.58	0.67	0.26	0.24	0.39	0.21
	$\tau = 1/\sqrt{2}$ $\eta = 1$	N_r	0.82	0.27	5.88	7.92	3.35	7.93
		相関係数	0.43	0.59	0.82	0.78	0.77	0.85
		変動係数	0.67	0.56	0.28	0.32	0.43	0.21
$\tau = 1$ $\eta = 0.5$	N_r	2.28	1.26	8.11	9.87	4.78	11.0	
	相関係数	0.10	0.34	0.85	0.79	0.56	0.84	
	変動係数	0.69	0.59	0.31	0.36	0.54	0.26	
$T_{xe} = 0.5$	$\tau = 1$ $\eta = 1$	N_r	5.67	5.12	4.66	7.79	7.99	6.67
		相関係数	0.89	0.81	0.88	0.94	0.92	0.90
		変動係数	0.27	0.26	0.25	0.17	0.16	0.18
	$\tau = 1/\sqrt{2}$ $\eta = 1$	N_r	4.89	5.10	4.87	6.85	8.15	6.59
		相関係数	0.86	0.87	0.88	0.86	0.92	0.92
		変動係数	0.37	0.28	0.25	0.31	0.17	0.18
$\tau = 1$ $\eta = 0.5$	N_r	5.21	6.26	6.53	6.87	11.4	9.20	
	相関係数	0.90	0.82	0.88	0.88	0.88	0.90	
	変動係数	0.39	0.39	0.29	0.39	0.23	0.22	
$T_{xe} = 1.0$	$\tau = 1$ $\eta = 1$	N_r	4.76	4.47	4.30	6.06	6.41	5.49
		相関係数	0.83	0.79	0.80	0.87	0.85	0.86
		変動係数	0.27	0.31	0.31	0.21	0.23	0.23
	$\tau = 1/\sqrt{2}$ $\eta = 1$	N_r	4.66	5.17	4.60	5.70	6.92	5.91
		相関係数	0.79	0.79	0.80	0.78	0.84	0.85
		変動係数	0.34	0.32	0.31	0.33	0.24	0.24
$\tau = 1$ $\eta = 0.5$	N_r	4.43	5.74	5.99	5.36	8.10	7.60	
	相関係数	0.77	0.80	0.81	0.80	0.83	0.85	
	変動係数	0.36	0.32	0.31	0.33	0.26	0.25	

表-2 モンテカルロ法による N_r 値 ($r=0.5, \theta=0$, サンプル数=100)

$=0.1$ では 0.01 の結果に比べて N_r の値が大きく、また各シミュレーション値のばらつきが小さい傾向にある。

次に、入力地震動特性の変化に伴う塑性率分布の変化の様子を、 $T_{xe}=1.0$ に対して図-9に示す。図中には

$I_L=0.3, 0.5$ に対する塑性率を示している。なお、ここで示している塑性率の値はサンプル数10のときの平均値である。また、推定値は $r=0.5, \theta=0$ のときの μ_x を用いて式(49~(51))により評価したものである。 N_x, N_y の値

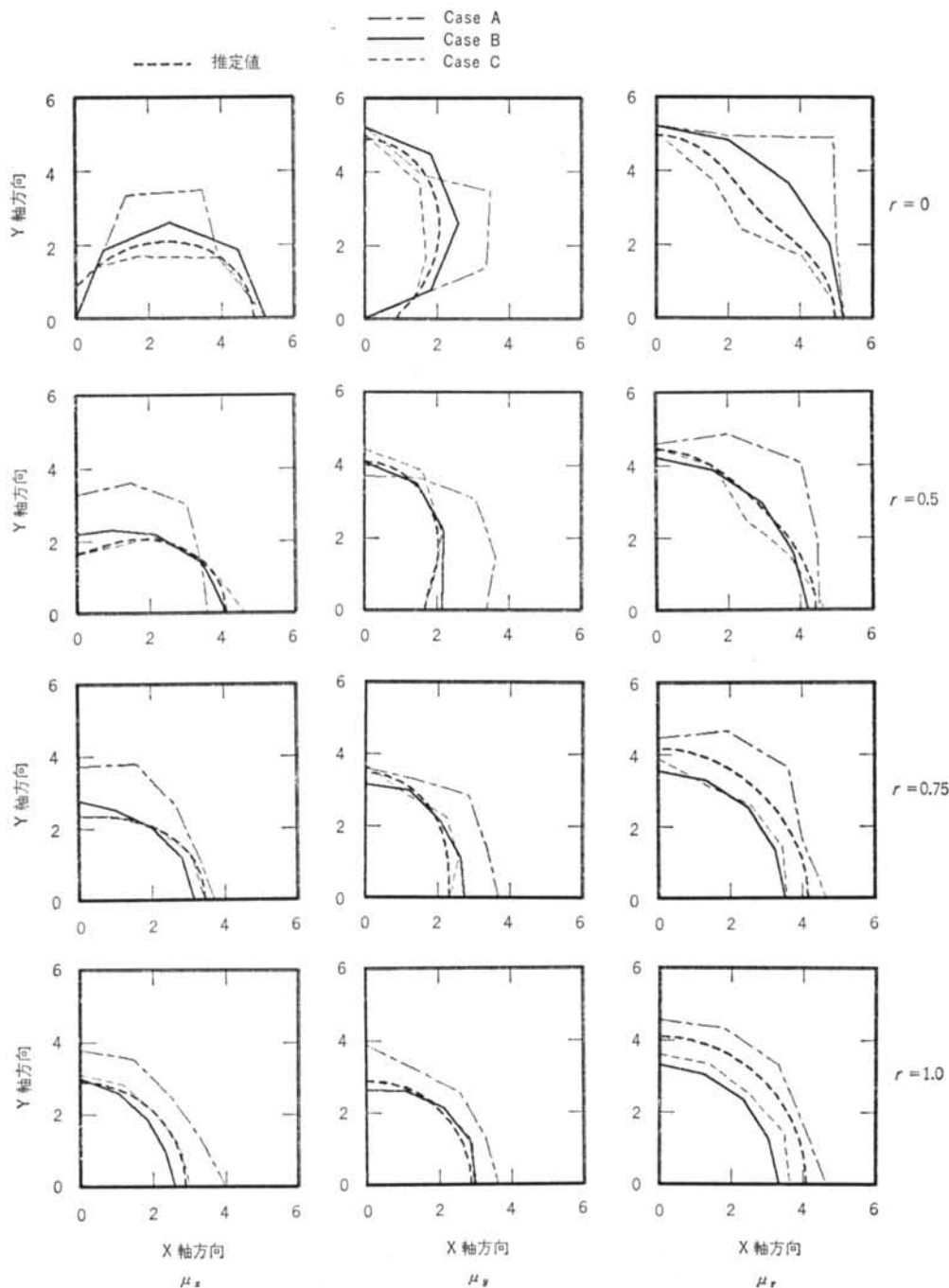


図-9 入力地震動特性の変化に伴う塑性率分布の変化とその推定 ($T_{xe}=1.0$)

はモンテカルロシミュレーション結果を参考にして4.5としている。

塑性率分布をみると、Case A, B, Cとも大きさには差があるが、 r が同じであれば θ の変化に伴う塑性率分布は相似形となっている。また、推定値とシミュレーション結果を比較すると、 μ_x, μ_y においては推定値はほぼCase B, Cの値と対応している。 μ_r においてはSRSS法で評価しているため、 $r=0.75, 1.0$ において大きめの評価となっている。

3.4 建物の降伏強度比と弾性周期比が塑性率に与える影響

次に、降伏強度比 $\eta=0.5$ と弾性周期比 $\tau=1/\sqrt{2}$ のときの塑性率分布を、 $T_{xe}=1.0$ のCase Bに対して図-10に示す。図中において、実線はシミュレーション結果の

平均値を、破線は式(5)~(7)と $N_r=4.5$ の値を用いた塑性率の推定値を示している。

$r=0$ では降伏強度が異なっているため、 y 軸方向で塑性率が大きくなるゆがんだ分布となっている。しかし、 r の値が大きくなるにつれ塑性率分布は等方に近い分布となる。

ホワイトノイズ入力に対して入力強度指標 I_L が等しいとき、塑性率は弾性周期に反比例する。このため、 $\tau>1$ のとき y 軸方向では塑性率が小さくなっている。また、 r が大きくなるにつれ塑性率分布は等方分布に近くなっている。

シミュレーション結果と推定値を比較すると、両者はよく対応しており、式(5)~(7)による簡便な評価式が有効であると考えられる。

ここで、式(5)~(7)に基づいて入力地動特性と建物特性

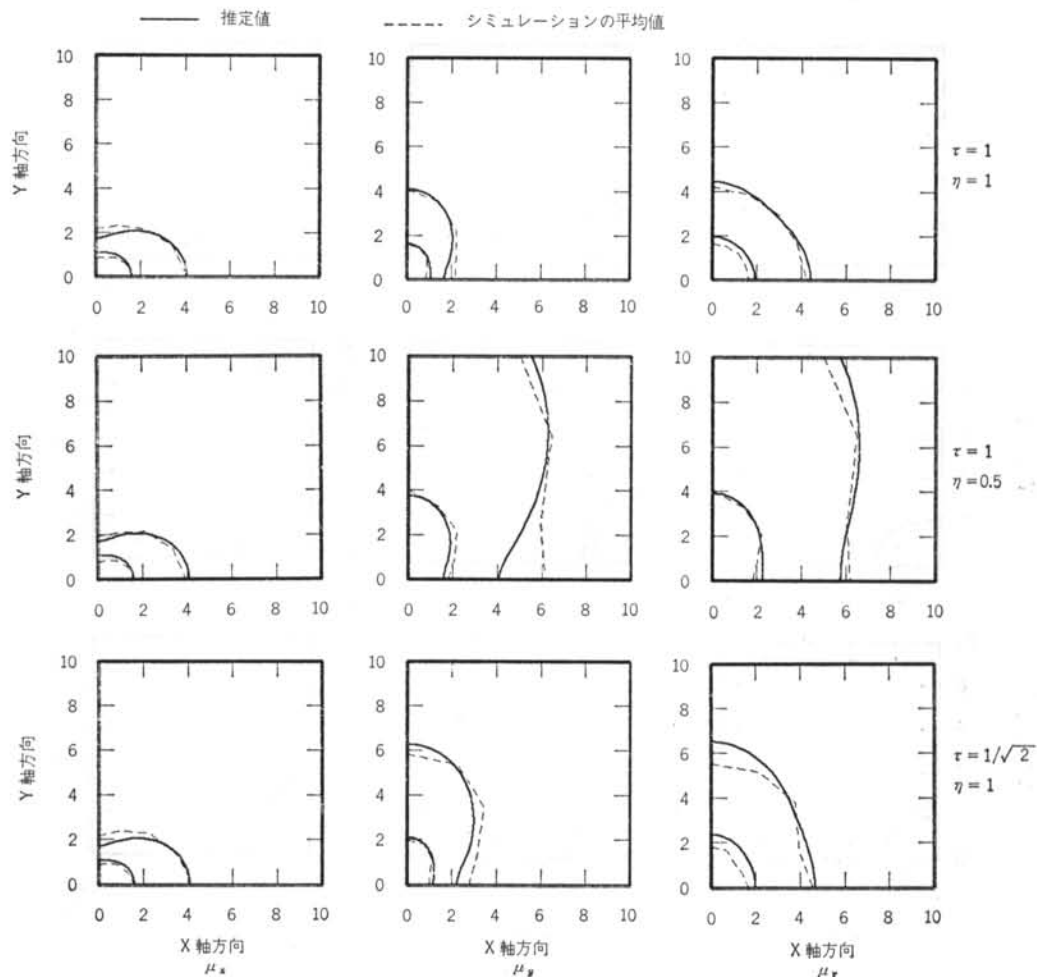


図-10 シミュレーション結果と推定値との比較 ($T_{xe}=1.0, r=0.5, N=4.5$)

の変化に伴う塑性率分布の変化を図-11に示す。

ところで、弾性最大応答値から弾塑性最大応答値を評価する方法として、他にエネルギー一定則¹³⁾と変位一定則¹⁴⁾¹⁵⁾などがある。エネルギー一定則は次式で表わされる。

$$\mu_x = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{F_{\max}}{A_{xy}} \right)^2 \right] \quad \dots\dots(9)$$

ここに、 F_{\max} は弾性時の最大応答加速度である。式(5)、(6)と式(9)を比較すると、式(5)において弾性ひずみエネルギーを $A_{xy}d_{xy}$ とした $N_r=2$ の場合がエネルギー一定

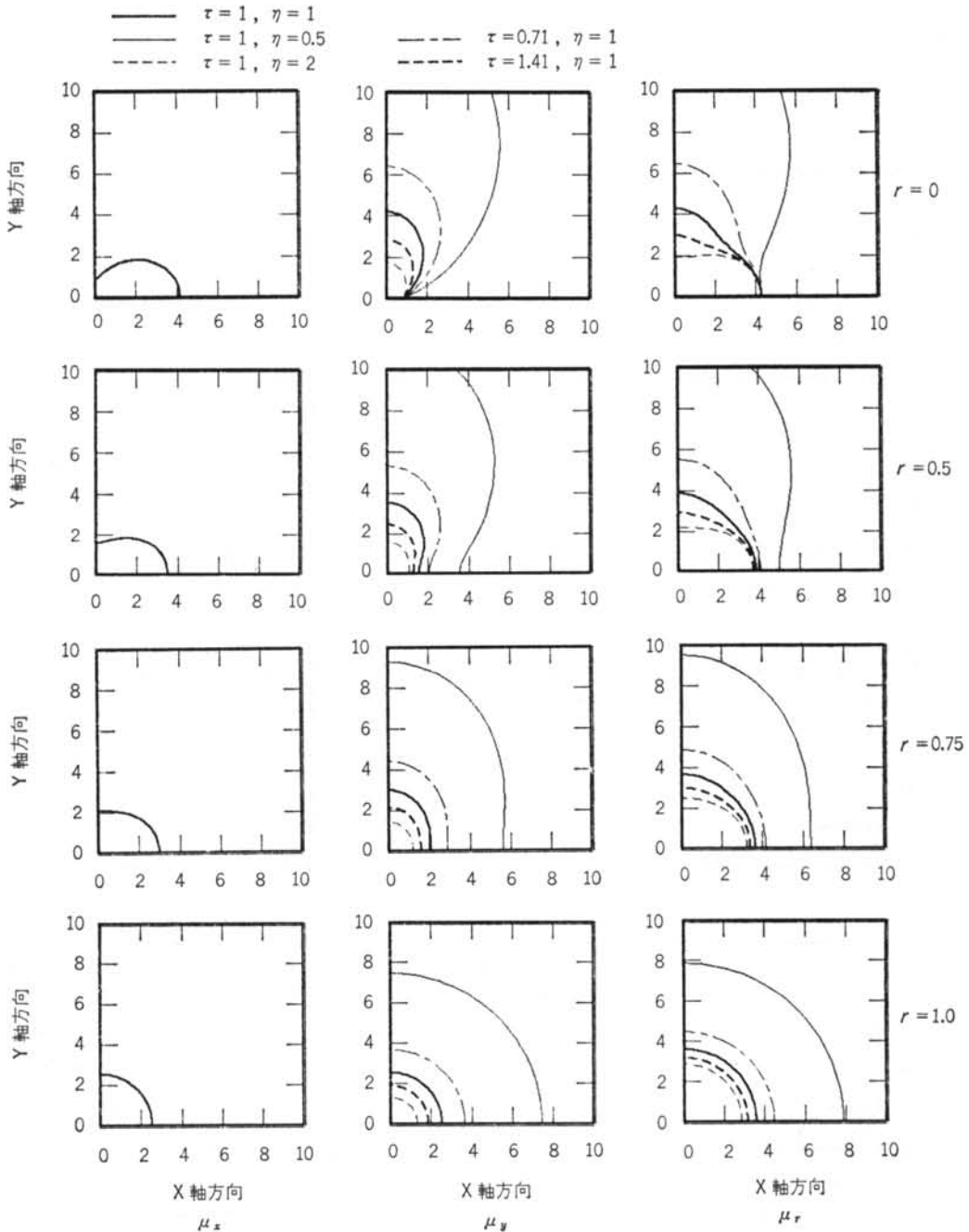


図-11 建物特性の変化による塑性率分布の変化

則と等価になる。シミュレーション結果と比較すると、 $N_r=2$ はかなり安全側の評価を与えていることになる。

同様に、変位一定則は次式で与えられる。

$$\mu_x = \frac{F_{max}}{A_{xy}} \quad \dots\dots(2)$$

式(1)と式(2)の関係を調べると、式(1)において弾性ひずみエネルギーを $A_{xy}d_{xy}$ とし、降伏変位が一定で $N_r=1$ の場合が変位一定則と等価になる。

3.5 降伏関数が塑性率に与える影響

次に、塑性率に及ぼす降伏関数の影響について調べる。まず、Case C の塑性率に対する Case A, B のその比を図-12に示す。塑性率の比の値は、 $T_{xe}=0.1$ では Case A, B とも約2~4である。 $T_{xe}=0.5, 1.0$ では Case B と Case C ではあまり差はなく、塑性率比は約0.9~1.3である。Case A においては、塑性率比は T_{xe}

$=0.5$ で0.9~1.5, $T_{xe}=1.0$ で1~2となっている。

3.6 入力エネルギー分布と建物の降伏強度の異方性の読み替え

r と降伏強度比 η は、それぞれ水平面内における二次元入力地動のエネルギー分布と建物の降伏強度を規定し、式(3)で示されているように弾性応答において類似の役割を演ずる。塑性域では二方向復元力の相互作用が生じるため、一般には r と η は読み替えができない。しかし、解析結果から弾性周期が0.5秒以上の建物で降伏関数が Case B の場合は、相互作用の影響があまり見られない。このため、エネルギーに着目した r と η のパラメータの読み替えが可能となる。

このとき、地動のエネルギー分布と建物の降伏強度は相対的な量であるため、降伏強度分布を等方なものとし、地動の分布形状を読み替えることができる。すな

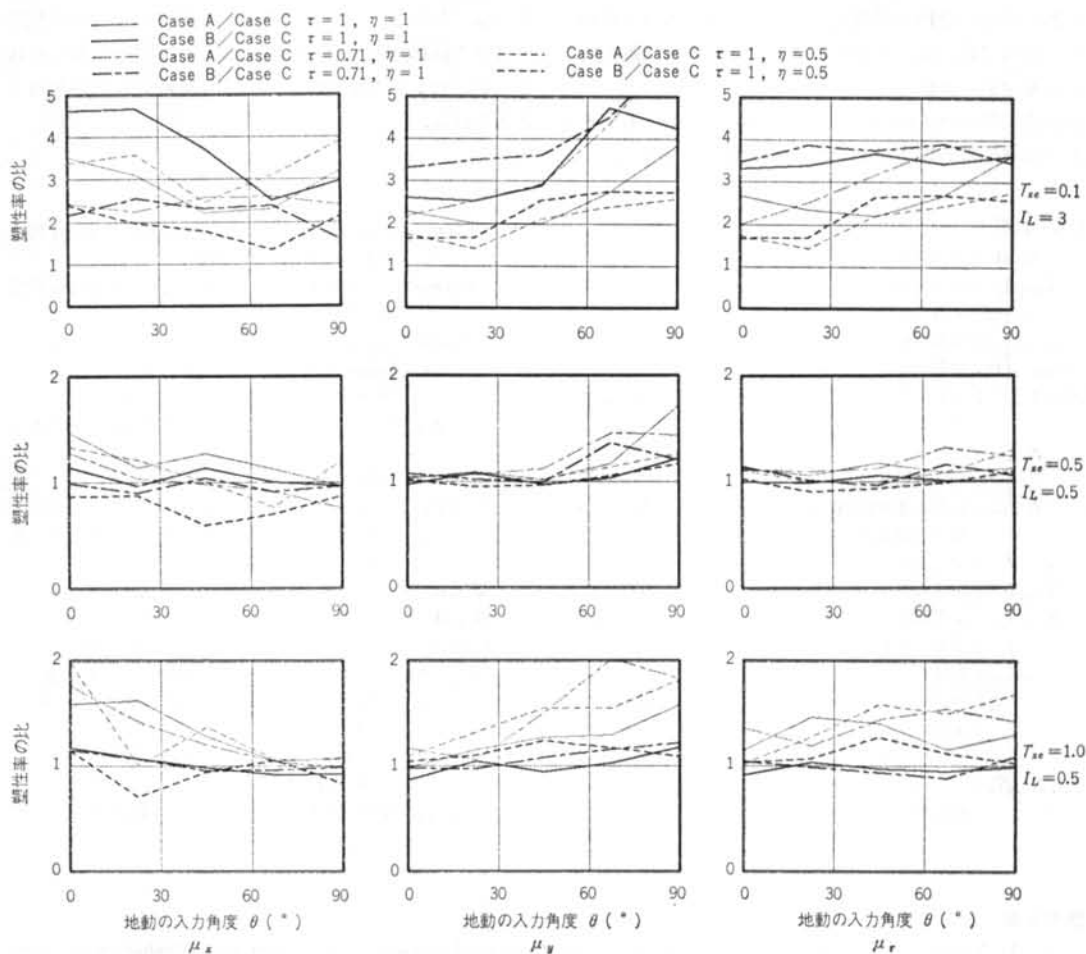


図-12 塑性率に及ぼす降伏関数の影響 ($r=0.75$)

わち、 y 方向の応答塑性率を評価するときの等価な r_{eq} は式(2)で与えられる。

$\theta=0$ のとき、 $r_{eq}=r/\eta$ となり単純な読み替えとなる。また、 $r=1$ 、 $\eta=0.5$ の建物の x 方向で一次元地震応答解析を行なう場合、 $r=0.5$ とすると $r_{eq}=1.0$ となる。このため、地動入力エネルギー量を2倍すれば安全側の評価を与えることになる。

$$r_{eq} = \sqrt{\frac{r^2}{\eta^2} + \left(\frac{1}{\eta^2} - 1\right) \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}} \quad (0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}) \quad \dots (2)$$

§ 4. 結論

二次元地動が偏心のない建物に入力する場合を対象として、塑性率に及ぼす入力と建物特性の異方性の影響を調べた。主な結論を要約すると以下ようになる。

(1) 偏心がない建物を対象として一次元動を入力した地震応答解析では、全エネルギー量が等しい一次元動を用いれば安全側の評価を与える。

(2) 弾性周期が0.1秒のような短周期建物では二方向復元力の相互作用の影響が大きく、塑性率は入力エネルギ

ーだけでなく入力波の最大振幅値にも大きく関係する。

(3) 塑性率に及ぼす降伏関数の影響は短周期建物ほど大きく、また入力の強度分布に関する異方性による塑性率のばらつきも大きい。塑性周期が0.5秒以上では、Case BとCase Cであまり差が見られない。しかし、Case AとCase Cでは有意な差が生じる。

(4) 二次元地動の建物に対する水平入力角度を変化させて得られる x 方向および y 方向の塑性率分布は、地動のエネルギー分布と密接な関係にあり、かつ類似した形となる。

(5) 降伏強度比と地動のエネルギー分布比の平方根 r は、周期が約0.5秒以上の建物では類似の役割を演じ、相互の係数の読み替えが可能である。

(6) エネルギーの釣り合いに着目することにより、等方建物の弾塑性応答結果を基に、弾性周期と降伏強度に関して異なる建物の塑性率をおおむね推定することが可能である。ただし、塑性履歴吸収エネルギーと塑性率を関連付ける係数は理論的に評価することは困難と考えられるため、モンテカルロ法などにより求める方法が有効と考えられる。

<記号の説明>

A_x, A_y : x 方向および y 方向の復元力
 A_{xy}, A_{yy} : x 方向および y 方向の降伏強度
 $a_j(t)$: i 方向の地動加速度
 $a_{major}(t)$: 地動強軸成分の加速度
 $a_{minor}(t)$: 地動弱軸成分の加速度
 $C_x(\theta), C_y(\theta)$: 地動の入力角度 θ の変化に伴う x 方向および y 方向の入力エネルギーの補正係数
 E_{major} : 地動の水平面内におけるエネルギー分布の最大値(強軸成分)
 E_{minor} : 地動の水平面内におけるエネルギー分布の最小値(弱軸成分)
 E_{xi}, E_{yi} : x 方向および y 方向の入力エネルギー
 E_{xe}, E_{ye} : x 方向および y 方向の弾性ひずみエネルギー
 E_{xp}, E_{yp} : x 方向および y 方向の塑性履歴吸収エネルギー
 E_{θ} : 地動の水平面内におけるエネルギー分布
 F_{max} : 弾性時の最大応答加速度
 I_L : 地動強軸成分の root mean square 振幅値(= $\sqrt{E_{major}/T_d}$)に対する建物の x 方向の降伏強度 A_{xy} の比「入力強度指標」(= A_{xy}/RS_{major})
 N_x, N_y, N_r : x 方向、 y 方向および半径方向の塑性率と累積塑性変形率をつなぐ係数

n_{xc}, n_{yc} : x 方向および y 方向の最大応答塑性率と平均塑性変位増分をつなぐ係数
 n_{xt}, n_{yt} : x 方向および y 方向の最大応答塑性率と累積塑性変形率をつなぐ係数
 RS_{major} : 地動強軸成分の RMS 振幅値
 r : E_{minor} と E_{major} の比の平方根(= $\sqrt{E_{minor}/E_{major}}$)
 r_{eq} : 降伏強度比との読み替えを行なった等価な r の値
 T_d : 地動の継続時間
 T_{xe}, T_{ye} : x 方向および y 方向の弾性周期
 β_x, β_y : x 方向および y 方向の弾性剛性に対する第2剛性比
 d_{xy}, d_{yy} : x 方向および y 方向の降伏変位
 d_{xp}, d_{yp} : x 方向および y 方向の平均塑性変位増分
 μ_x, μ_y, μ_r : x 方向、 y 方向および半径方向の塑性率
 θ : 入力地動の強軸成分と x 方向とのなす角度
 η : y 方向の x 方向に対する降伏強度比(= A_{yy}/A_{xy})
 τ : y 方向の x 方向に対する弾性周期比(= T_{ye}/T_{xe})
 ζ_x, ζ_y : 建物の x 方向および y 方向の減衰定数

<参考文献>

- 1) D. A. Pecknold: "Inelastic Structural Response to 2D Ground Motion" J. of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100 (1974) pp. 949~963

- 2) N.C.Nigam: "Yielding in Framed Structures under Dynamic Loads" J. of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.96 (1970) pp.687~709
- 3) H.Takizawa & H.Aoyama: "Biaxial Effects in Modelling Earthquake Response of R/C Structures" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.4 (1976) pp.523~552
- 4) 滝沢, 奈良岡: "強震地動の2次元破壊能(その1)" 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.52 (1980年3月) pp.5~8
- 5) 滝沢, 奈良岡: "強震地動の2次元破壊能(その2), (その3)" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1980年9月) pp.557~560
- 6) Y.J.Park, J.K.Wen & A.H-S.Ang: "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-directional Ground Motions" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.14 (1986) pp.543~557
- 7) 藤原, 細川: "2次元地動の作用する立体架構の弾塑性挙動(その5)" 日本建築学会大会講演梗概集 (1987年10月) pp.711~712
- 8) Y.K.Wen: "Equivalent Linearization for Hysteretic Systems under Random Excitations" J. of Applied Mechanics, ASME, Vol.47 (1980) pp.150~154
- 9) T.S.Atalik & S.Utku: "Stochastic Linearization of Multidegree of Freedom Nonlinear Systems" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.4 (1976) pp.411~420
- 10) 市之瀬, 滝口, 吉井: "耐力低下を考慮した2方向復元力モデルと地震応答" 日本建築学会構造系論文報告集 第379号 (1987年9月) pp.38~48
- 11) 滝沢: "RC建築物の強震応答と幾何学的非線形効果, 及びその動的倒壊限界" 第24回構造工学シンポジウム論文集 (1978年2月) pp.17~24
- 12) 秋山: "建築物の耐震極限設計" 東京大学出版会 (1980年)
- 13) A.S.Veletsos & N.M.Newmark: "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions" Proc. of 2nd WCEE (1960) pp.895~912
- 14) J.Penzien: "Elasto-plastic Response of Idealized Multi-story Structures Subjected to Simple System to Earthquake" Proc. of 2nd WCEE (1960)
- 15) 梅村: "高層建物の設計震度に関する一考察" 日本建築学会論文報告集 第72号 (1962年)
- 16) 奈良岡, 滝沢: "2次元地動を受ける建物の損傷条件に及ぼす入力・建物の異方性の影響" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1981年9月) pp.749~750

