

論文 任意方向地震力を受ける RC 建物の降伏機構と変形方向

木原 祥智*1・芳村 学*2

要旨：柱の2方向曲げ相関を考慮した非線形解析を行うことにより、任意方向地震力を受けるRC建物の降伏機構と機構時の変形方向について検討した。その結果、1)加力方向及び建物全体に占める柱耐力の割合(柱耐力比)によって1方向の梁に降伏ヒンジが生じる1方向降伏機構もしくは2方向の梁に降伏ヒンジが生じる2方向降伏機構となる、ことを明らかにするとともに、2)加力方向と柱耐力比より降伏機構及び変形方向を求める式を導いた。

キーワード：任意方向地震力、降伏機構、降伏曲面

1. 序論

近年、水平2方向地震に対するRC建物の非線形解析が行われるようになり、主として柱応力の増大程度の解明を中心とした検討が進められてきた[1]。しかし、2方向地震下における降伏機構の形成状況や機構時の変形方向については、これらが終局状態での構造特性として重要であるにもかかわらず、従来ほとんど検討されなかった。本研究では、構面方向以外からの1方向地震力(任意方向地震力)を受ける場合を2方向地震の簡単な場合と考え、これに対するRC建物の降伏機構と変形方向について論じるものである。

2. 解析方法

2.1 部材のモデル化

2方向無限均等骨組から内柱1本とそれに取り付く2方向の梁を反曲点から切り出した部分架構(図-1)を解析対象建物とし、任意方向地震力に対応させるため、柱の復元力特性には2方向曲げ相関を考慮した。RC柱の2方向曲げ相関に塑性力学における塑性流れ則が成り立つことが、最近の研究により確認された[2]ことより、1方向でのDegrading-Tri-Linearモデルを塑性力学に基づいて2方向に拡張したモデル[3,4]を、柱の2方向復元力特性として用いた。Y方向の1方向応答を受けたときのモーメント平面上での降伏曲面等の移動とY方向のモーメント-回転角関係を図-2に示す(図は加力後除荷時の様子を表している)。柱の部材モデルには材端塑性回転バネモデルを用いた。梁の復元力特性には1方向のDegrading-Tri-Linearモデルを用いた(梁は逆対称変形を受けるので部材モデルは不要である)。

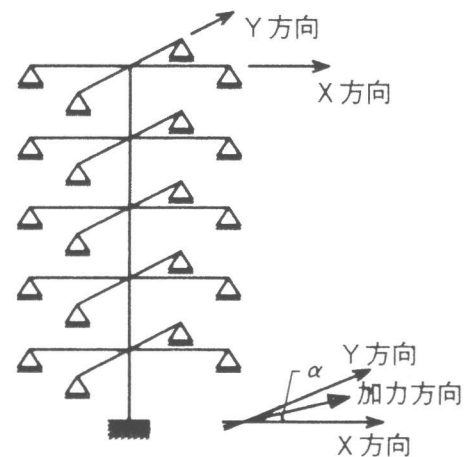


図-1 解析対象建物

*1 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻(正会員)

*2 東京都立大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)

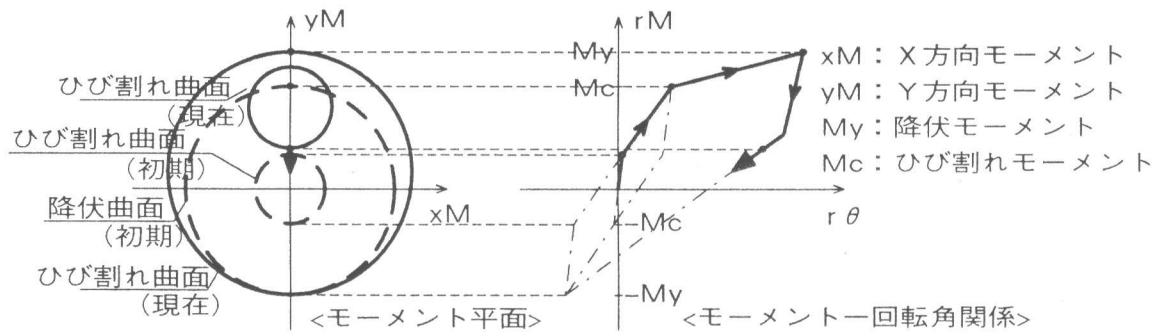


図-2 柱の2方向復元力特性

2. 2 解析対象建物

解析対象建物は5階建てとし、簡単のため、柱及び梁の性状をX方向とY方向で同一とした。建物諸元を表-1に示す。設計は終局強度型耐震設計指針・同解説[5]により行った。すなわち、設計用ベースシャ係数を0.25、設計用外力分布を震度逆三角形分布(5階建てであるので頂部集中荷重は考慮しない)として、建物が全体降伏機構となるように設計した。

ヒンジ部(1層柱脚と5層柱頭及びR F階を除く梁端)の降伏モーメントは弾性解析による設計用地震力に対するモーメントとし(図-3)、非ヒンジ部の降伏モーメントは充分大きく取った。ひび割れモーメントは、ヒンジ部では降伏モーメントの1/3とし、非ヒンジ部では弾性解析による設計用地震力に対するモーメントに応力割増し係数[5]をかけた値の1/3とした。ひび割れ時剛性と降伏時剛性は、各々初期剛性の0.182倍、0.001倍とした。

2. 3 地震力方向をパラメータとした解析ケース

検討は、主に静的漸増荷重解析により、X方向に対して一定の角度 α (10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 45°)から地震力が作用するものとして行った(このときの外力分布は逆三角形)。また、 $\alpha = 30^\circ$ の場合についてのみ、地震応答解析を行った。

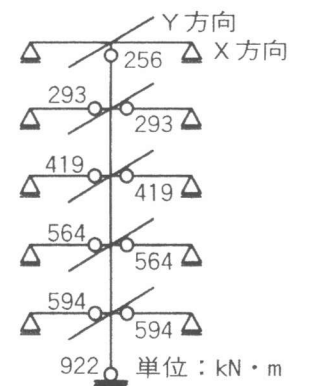
3. 解析結果

3. 1 静的漸増荷重解析

一定方向に荷重を漸増荷重した場合の最上階水平変形の軌跡を、変形角(最上階水平変形/全階高)の形で図-4に示す。変形方向は、弾性時には加力方向と一致するが、塑性時には一致しない(45° 方向を除く)。すなわち、X方向変形が0.6%を過ぎるあたりから、それまで加力とほぼ同一方向に進んでいた変形がX方向に傾き、以後 40° 方向加力を除いてほぼX方向に進む。 40° 方向加力ではX方向変形が2.5%あたりで再び変形がY方向に向く。以下、 30° 方向及び 40° 方向加

表-1 建物諸元

層数	5
階高(cm)	1階:330, その他の階:300
梁 $b \times D$ (cm × cm)	R ~ 4階:40 × 70 3 ~ 1階:45 × 75
柱 $B \times D$ (cm × cm)	5 ~ 3階:65 × 65 2 ~ 1階:70 × 70
柱支配面積(cm × cm)	600 × 600
単位床面積当たり重量(kN/m ²)	10.79
各階重量(kN)	388.48
弾性1次固有周期(sec)	0.47



(X, Y方向の性状は同一)

図-3 ヒンジ部の

降伏モーメント

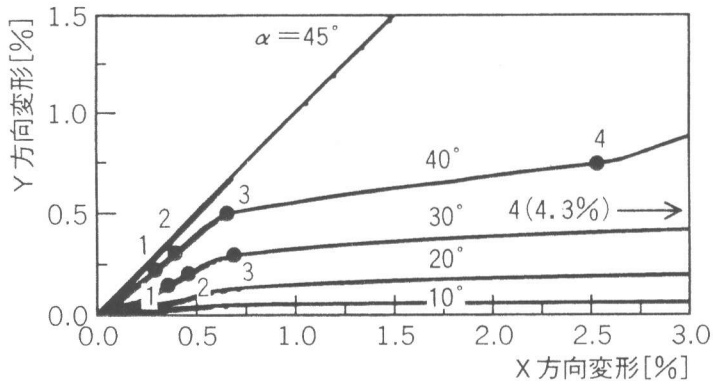


図-4 最上階水平変形の軌跡

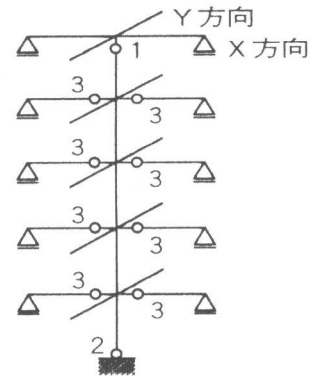


図-5 降伏状況 (30°方向加力)

力について詳しく検討する。

30°方向加力時の降伏状況を図-5に示す。降伏ヒンジは5層柱頭、1層柱脚、X方向の梁端(各階ではほぼ同時)の順に発生する。5層柱頭と1層柱脚のモーメントの軌跡を図-6に示す。なお、図-4、6中の数字は図-5の降伏ヒンジ発生時点に対応している。降伏状況からは、時点3で1方向(X方向)の降伏機構が形成されたように見える。しかし、柱モーメントは、その後も降伏曲面(モデルの性質上、初期の状態から少しずつ膨らんでゆく)上をX軸に向け移動し、時点4ではほぼX軸上に達する。1方向(X方向)の降伏機構となるためにはX方向剛性が完全に失われる必要があるが、塑性流れ則に従うと時点3では柱のX方向剛性は完全には失われていないことに留意すると、時点3はいわば見かけの降伏機構点であり、時点4に至って初めて降伏機構が形成されたことになる。この降伏機構を、5層柱頭、1層柱脚及び1方向の梁に降伏ヒンジが生じるので1

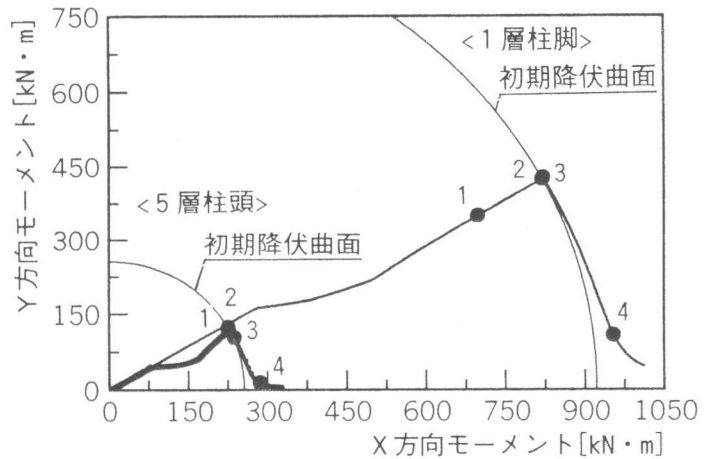


図-6 柱モーメントの軌跡(30°方向加力)

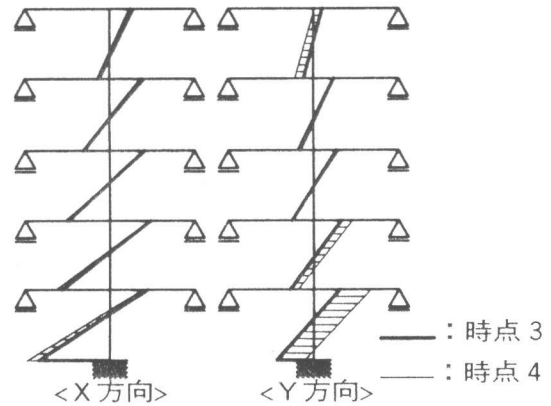


図-7 柱モーメントの分布(30°方向加力)

方向降伏機構と呼ぶ。1方向降伏機構となる場合の機構以降の変形方向はX方向である。時点3、4でのX方向とY方向の柱モーメントの分布を図-7に示す。2つの時点での柱モーメントは、X方向ではあまり変わらないものの、Y方向では大きく違う。最上階水平変形と1層せん断力の関係を、2方向成分のベクトル和の形で図-8に示す。時点3は、厳密には機構形成以前であるが、この点で水平剛性をほぼ失っており、実質的には建物としての降伏点と考えてよい。

40°方向加力時の降伏状況を図-9に示す。降伏ヒンジは5層柱頭、1層柱脚、X方向の梁端、Y方向の梁端の順に発生する。5層柱頭と1層柱脚のモーメントの軌跡を図-10に示す。なお、図-4、10中の数字は図-9の降伏ヒンジ発生時点を表している。時点3、4でのX方向とY方向の柱モーメントの分布を図-11に示す。40°方向加力時には、時点3が見かけの降伏機構点で

あることが、30°方向加力時より一層明瞭である。すなわち、時点3と4では、柱モーメントが変化だけでなく、降伏状況が異なっている。

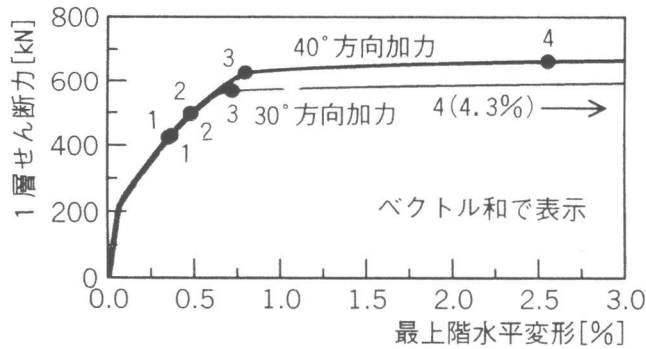


図-8 荷重-変形曲線

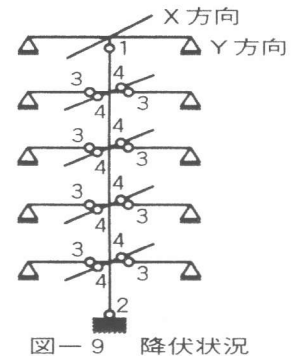


図-9 降伏状況 (40°方向加力)

時点4が真の降伏

機構点であり、この降伏機構を、5層柱頭、1層柱脚及び2方向の梁に降伏ヒンジが生じるので2方向降伏機構と呼ぶ。このときの変形方向(図-4の矢印方向)は、時点4での5層柱頭と1層柱脚の降伏曲面に垂直な方向(図-10の矢印方向、2つの矢印方向は等しい)と一致する。なお、図-9において、時点4は過崩壊の様に見えるが、そうではなくて、2方向降伏機構が形成されるためには2方向の梁が降伏する必要があるのである。図-8に示すベクトル和の形で表した最上階水平変形と1層せん断力の関係は、30°方向加力の場合と大差ない。

以上の検討より、 α が30°以下では1方向降伏機構、40°以上では2方向降伏機構となることがわかる。

3.2 加力方向と降伏機構及び機構後の変形方向との関係

以下に、加力方向と降伏機構及び機構後の変形方向との関係について論じる。建物の降伏曲面の概念図を図-12に示す。同図は解析建物の梁と柱の耐力に即して描いてあり、軸の単位はモーメントである。点線とX軸、Y軸で囲まれた正方形は、

辺の長さが1方向でのRF階以外の梁の降伏モーメントの和(梁ヒンジ耐力和)として定まる梁の降伏曲面を、円は、半径が5層柱頭と1層柱脚の降伏モーメントの和(柱ヒンジ耐力和)として定まる柱の降伏曲面を、そして、外側の実線は、柱の降伏曲面の中心が梁の降伏曲面上を移動したときに描く図形の外側包絡線として定まる建物の降伏曲面を表している。建物の降伏曲面は、隅が1/4円状に欠けた正方形をしている。同図において、加力方向を表す線が建物の降伏曲面と交わる点が降伏機構点であり、この点が正方形の直線部分にあれば、柱と1方向の梁に降伏ヒンジが生じるので1方向降伏機構、隅の円弧上にあれば、柱と2方向の梁に降伏ヒンジが生じるので2方向降伏機構となる。図から明らかなように、10°~30°方向加力時には1方向降伏機構、40°、

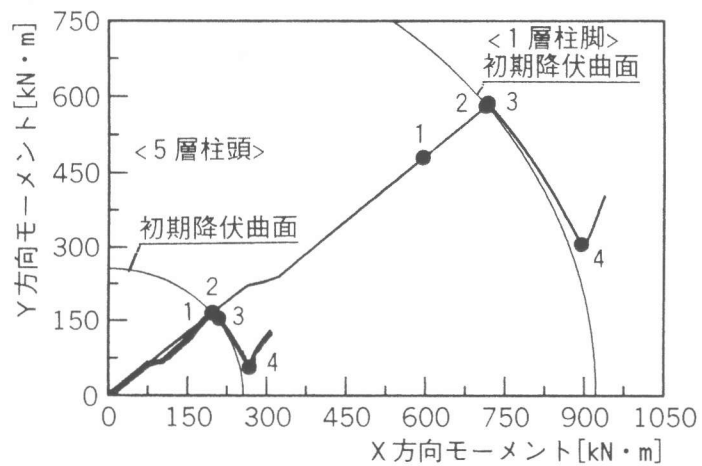


図-8 柱モーメントの軌跡

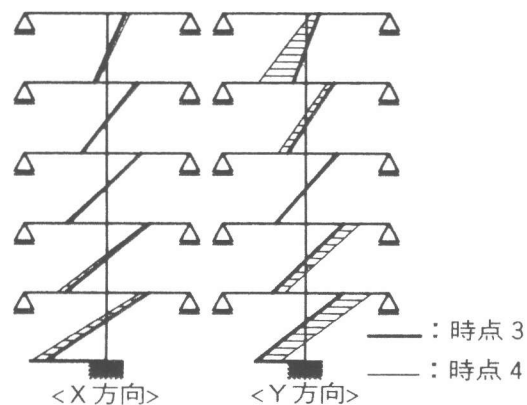


図-7 柱モーメントの分布(30°方向加力)

45°方向加力時には2方向降伏機構となる。なお、厳密には、部材端部の剛域長(前述の解析では考慮した)が以上の議論に関係するが、その影響は小さいとしてここでは無視している。

次に、加力方向と機構後の変形方向の関係について検討する。3. 1節において、1方向降伏機構となる場合には変形方向はX方向となり($\alpha = 30^\circ$ の場合がこれに相当)、2方向降伏機構となる場合には変形方向は柱の降伏曲面に垂直な方向($\alpha = 40^\circ$ の場合がこれに相当)となる、様子を示した。すなわち、図-12において、降伏機構点での建物の降伏曲面に対する法線方向が変形方向を表すことになる。

変形方向を β 、1方向での建物全体の耐力(梁ヒンジ耐力和+柱ヒンジ耐力和)に占める柱の耐力(柱ヒンジ耐力和)の割合を柱耐力比 p 、降伏機構が1方向、2方向降伏機構となる境界の加力方向 α を $\bar{\alpha}$ とすると(図-12)、 $\bar{\alpha}$ は次のようになり、

$$\tan \bar{\alpha} = 1 - p \quad (1)$$

α と $\bar{\alpha}$ の大小に応じて、 β は次式で表される。

$$0^\circ < \alpha \leq \bar{\alpha} \text{ のとき} \quad \beta = 0^\circ \quad (2)$$

$$\bar{\alpha} < \alpha \leq 45^\circ \text{ のとき} \quad \tan \beta = \frac{t + \sqrt{t^2 - (p^2 - s^2)(t \cdot \tan \alpha - s^2)}}{p^2 - s^2} \quad (3)$$

$$\text{ただし、} t = p^2 \tan \alpha, \quad s = (1 - p)(\tan \alpha - 1)$$

ここで、式(3)は、図の幾何学的関係より得られる、

$$\tan \alpha = \frac{(1 - p) + p \sin \beta}{(1 - p) + p \cos \beta} \quad (4)$$

において、 $\cos \beta$ 及び $\sin \beta$ を $\tan \beta$ で表し、これを解いた結果である。

柱耐力比 p をパラメータとして求めた加力方向 α と変形方向 β の関係を、図-13に示す。ここで、 $p = 100\%$ は機構が形成される層数が1の場合(単独層での層降伏)を表しており、 p が小さくなるにつれて機構が形成される層数が多い場合に相当している。 $p = 100\%$ の場合は、 α に関係なく2方向降伏機構となるが、 p が小さくなるにつれて $\bar{\alpha}$ が大きくなり、1方向降伏機構になりやすくなることがわかる。解析建物の場合、 $p = 24.0\%$ で、 $\bar{\alpha} = 37.3^\circ$ である。高層建物で全体降伏形となる場合には、 p の値がさらに小さくなり、実質的にはほとんどの場合に(α が 45°

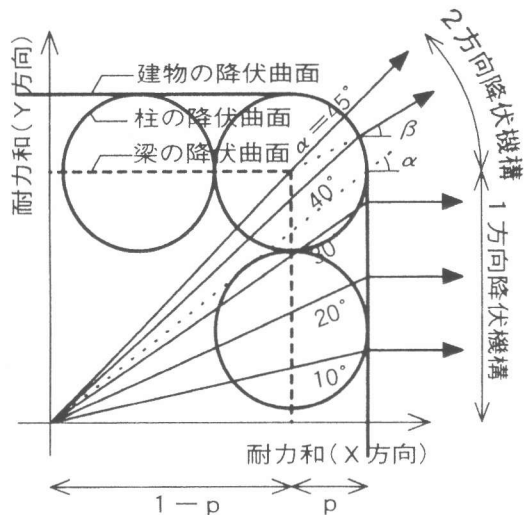


図-12 建物の降伏曲面の概念図

にごく近い場合を除いて)、1方向降伏機構となる。なお、以上の議論は機構形成以後についてであり、解析建物では大きな変形角を対象としたものであった(40°方向加力時では、約2.5%)。しかし、これは全体降伏形の場合であり、部分降伏形となる場合には、変形の集中によりその部分での変形角は十分この程度に達するものと考えられる。

3.3 地震応答解析

El-Centro NS波(最大速度=70kine)をX方向から30°の方向に入力した場合の最上階水平変形の軌跡を図-13に示す。静的解析における時点3に相当する点を▼で表す。▼以前では約30°方向に進んでいた変形が、それ以降X方向に向きを変えていることが分かる。このような挙動は、他の大変形時にも生じており、結局、大変形時にはすべて時計回りに変形が進行している。

4. 結論

任意方向地震力を受けるRC建物の降伏機構と機構後の変形方向に関して、以下の知見を得た。

- 1) 加力方向がX方向に近いときには1方向降伏機構(変形方向はX方向)となるが、加力方向が45°に近いときには2方向降伏機構(変形方向はX方向からある角度を持つ)となる。
- 2) 柱耐力比が大きいとき(機構を形成する層数が少ないとき、その極端な例が単独層での層降伏)は、2方向降伏機構となりやすいが、柱耐力比が小さくなるにつれて(極端な例が全体降伏形の高層建物)、1方向降伏機構となりやすくなる。
- 3) 上記に関して、加力方向と柱耐力比より降伏機構及び変形方向を求める式を導いた。

参考文献

- [1] 青山博之編：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計法、技報堂出版、1990.8
- [2] 黒田雄一、津村浩三、芳村学：鉄筋コンクリート柱の3方向変形特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No2, pp.357~362, 1995.6
- [3] 滝沢春男：Tri-Linear Modelの二軸曲げ問題への拡張及びその強震応答性状、日本建築学会学術講演梗概集、pp.783~784, 1973.10
- [4] 芳村学、青山博之、川村満：2方向外力を受ける鉄筋コンクリート構造物の解析 その1 2軸曲げを受けるRC柱の解析、日本建築学会論文報告集、第298号、pp.31~41, 1980.12
- [5] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.10

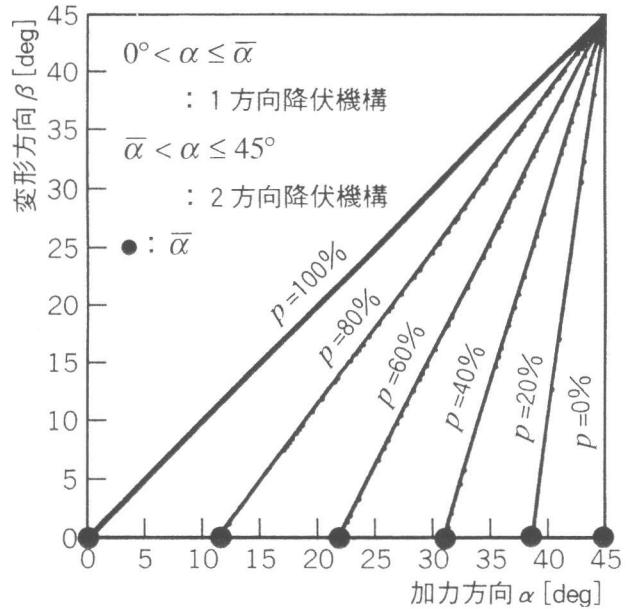


図-13 加力方向 α と変形方向 β の関係

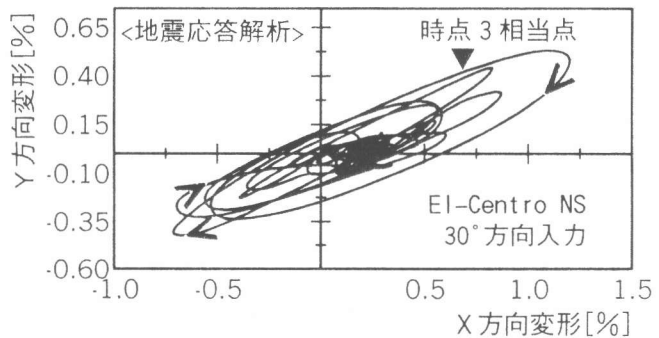


図-14 最上階水平変形の軌跡