

論文 水平 2 方向地震動の軌跡特性が立体 RC 骨組の層崩壊を防ぐために必要な柱梁耐力比に及ぼす影響

堀田 久人^{*1}・上野 百^{*2}

要旨：本研究では、水平 2 方向地震動の軌跡特性が立体 RC 骨組の層崩壊を防ぐための柱梁耐力比に及ぼす影響について検討した。1 方向スペクトル適合波を直交 2 方向に位相をずらして重ね合わせることで加速度軌跡が線形、楕円形、円形となる波と観測波の位相特性を保持した 2 方向スペクトル適合波と観測波について入力角度ごとの必要強度係数を求めた結果、必要強度係数は、加速度軌跡の線形性の強い地震波では、最大成分方向が梁架構方向入力時に 1.2~1.3 程度、45° 方向入力時に 1.8~1.9 程度で、その比は 1.5 程度であるのに対し、円形軌跡に近づくと入力角度によらず概ね 1.5~1.7 に収まった。

キーワード：RC 骨組、ファイバーモデル、水平 2 方向、柱梁耐力比、塑性率、地震応答解析、層崩壊

1. はじめに

大地震時に構造物の耐震安全性を高めるためには、損傷が特定層に集中する層崩壊機構より、損傷が建物全体に分散する梁降伏型全体崩壊機構を形成することが望ましく、耐震設計では強震時に梁降伏型全体崩壊機構を形成するように設計することが多い。梁の全塑性モーメントに対する柱の全塑性モーメントの比である柱梁耐力比は、崩壊機構を制御するために重要な要素である。

RC 平面骨組の水平 1 方向地震動に対する層崩壊を防ぐために必要な柱梁耐力比については、既往研究¹⁾で検討されているが、立体 RC 骨組に対して水平 2 方向応答解析を用いた研究はまだ多くない。しかし、立体 RC 骨組では、梁は 2 方向で独立であるのに対し、柱は 2 軸相関により、曲げ耐力がすべての方向で等しい円形曲面となるとすると、建物の梁架構方向への静的な加力に対して、45° 方向への加力では、必要柱梁耐力比が $\sqrt{2}$ 倍となる。立体骨組においても平面骨組と同様に高次モードの影響などがあることから、動入力に対する検討が必須であろう。その際、地震動の 2 方向の軌跡特性として、方向性が著しいものからほとんど方向性のないものまで様々であり、軌跡特性の影響についても検討する必要がある。

そこで、本研究では水平 2 方向地震動に対して、立体 RC 骨組の層崩壊を防ぎ、梁降伏型全体崩壊機構を形成するために必要な柱梁耐力比について検討する。

入力地震波は、前述の様々な加速度軌跡形状を再現するため、観測波の 1 方向成分を直交 2 方向に位相をずらして重ね合わせることで加速度軌跡が線形、楕円形、円形となるものを作成し、入力角度を変化させて水平 2 方向応答解析を行った。その際、必要柱梁耐力比は地震動

の大きさに依存するため、最大方向成分を設計用応答スペクトルに適合させた。

また、実際の地震動のような複雑な加速度軌跡をもつ地震波が必要柱梁耐力比に及ぼす影響についても検討するため、観測波の位相特性を保持し、2 方向応答スペクトルを設計用応答スペクトルに適合させた地震波と観測波の最大速度が 1.0[m/s]になるよう拡張または減幅させた地震波についても同様の解析を行い、比較する。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

水平 2 方向の柱スパンがともに 7[m]、階高 4[m]、各階重量 627[kN]の 6 層の無限均等純ラーメン構造の中柱を取り出した魚骨骨組を解析対象とし、水平 2 方向で同一の構造特性とした。図-1 に示すように、柱は弾性部材と材端をファイバーモデルで、梁は同一構面の 2 本が逆対称挙動をするため 1 つの回転ばねでモデル化した。

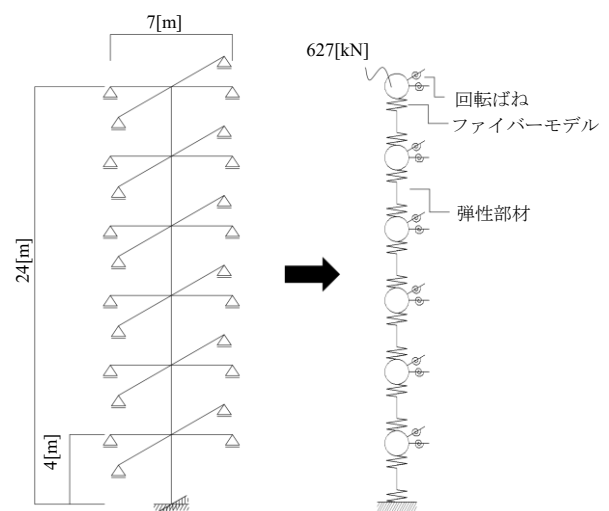


図-1 解析モデル

^{*1} 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院建築学系准教授 工博 (正会員)

^{*2} 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院建築学系建築学コース

回転ばねの復元力特性は、図-2 に示すようなトリリニア型の Clough モデルとし、降伏時剛性は、初期剛性の 0.3 倍とし、ひび割れ強度は曲げ強度の 1/3 倍とした。

柱断面は、図-3 に示すように外周に 16 本の鉄筋を配した正方形形状とし、断面寸法は、後述の断面二次モーメントから設定し、後述する曲げ強度になるように鉄筋断面を変化させた。柱の材端に設けたファイバーモデルは、柱を縦横 9 分割ずつし、コンファインド効果を考慮し、プレーンコンクリートとコアコンクリートに図-3 のように区別した。ファイバーモデルの軸歪と曲率を、軸方向変位と回転角に変換する際のヒンジ長さは、柱せいとした。ファイバーモデルに用いた材料特性を表-1 に、コンクリート要素と鉄筋要素の応力-歪関係をそれぞれ図-4 の (a)、(b) に示す。

各階の柱と梁の断面二次モーメントは、既往研究¹⁾ に倣い、 A_i 分布によって定まる層せん断力の分布に比例させ、ベースシア係数が 0.2 となるときの、建物の全体変形角が $1/1000[\text{rad}]$ となるように定めた。その際、ヤング係数は $2.1 \times 10^4 [\text{N/mm}^2]$ を用い、梁の断面二次モーメントは、直下の柱の 2 倍とした。

柱・梁の曲げ強度は以下のように設定した。最上階以外の梁、最上階の柱頭及び 1 階の柱脚については、構面 1 方向に外力分布を A_i 分布とした水平力を加える静的弾性解析により、ベースシア係数が 0.3 となるときの曲げモーメントを曲げ強度とした。また、最上階の梁の曲げ

強度は、直下の階の梁の 1.5 倍とし、柱の中間部 (1 階の柱脚と最上階の柱頭以外) の曲げ強度は、各階柱頭、柱脚の静的弾性解析より求めた曲げモーメントの平均とした。表-2 に以上の手順で設定した各層の柱・梁の曲げ強度、柱梁耐力比、柱せいを示す。表中の柱梁耐力比は、「(節点上下の柱強度の平均値) / (梁強度)」である。

表-2 に示す解析モデルを基準モデルとして、1 階の柱脚と最上階の柱頭を除いた各階の柱強度に強度係数 ψ_i を乗じ、柱梁耐力比の異なるモデルを作成した。

2.2 解析方法

上記のモデルを対象に、水平 2 方向時刻歴応答解析を行った。運動方程式の数値積分には Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用い、減衰は初期剛性比例型で、減衰定数 h は文献¹⁾ に倣い、1 次固有モードに対し 5% とした。

3. 1 方向スペクトル適合波の重ね合わせ (Case1)

3.1 入力地震波 (Case1)

表-3 に示す観測波 6 波の東西成分を K-NET より引用し、下記の手順で最大方向成分の応答スペクトル形状が「国土交通省告示 1461 号に定める極めて稀に発生する地震動 (レベル 2) の開放工学的基盤における応答スペクトル」に適合し、かつ地動の最大速度を $1.0[\text{m/s}]$ として、加速度軌跡が線形、楕円形、円形となる地震動を作成した。

観測記録の東西成分についてフーリエ変換により分解

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度	28[N/mm ²]
鉄筋	ヤング率	205000[N/mm ²]
	降伏強度	345[N/mm ²]

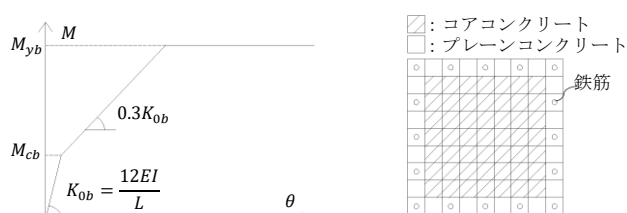


図-2 回転ばねの復元力特性

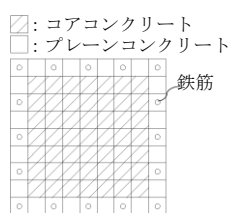


図-3 柱断面

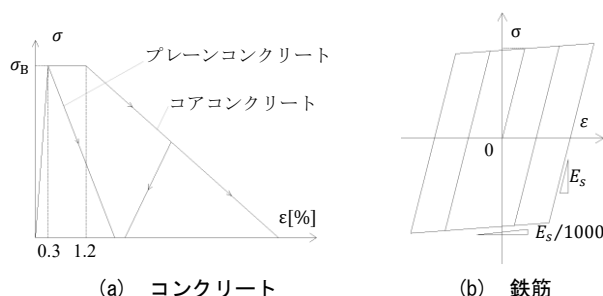


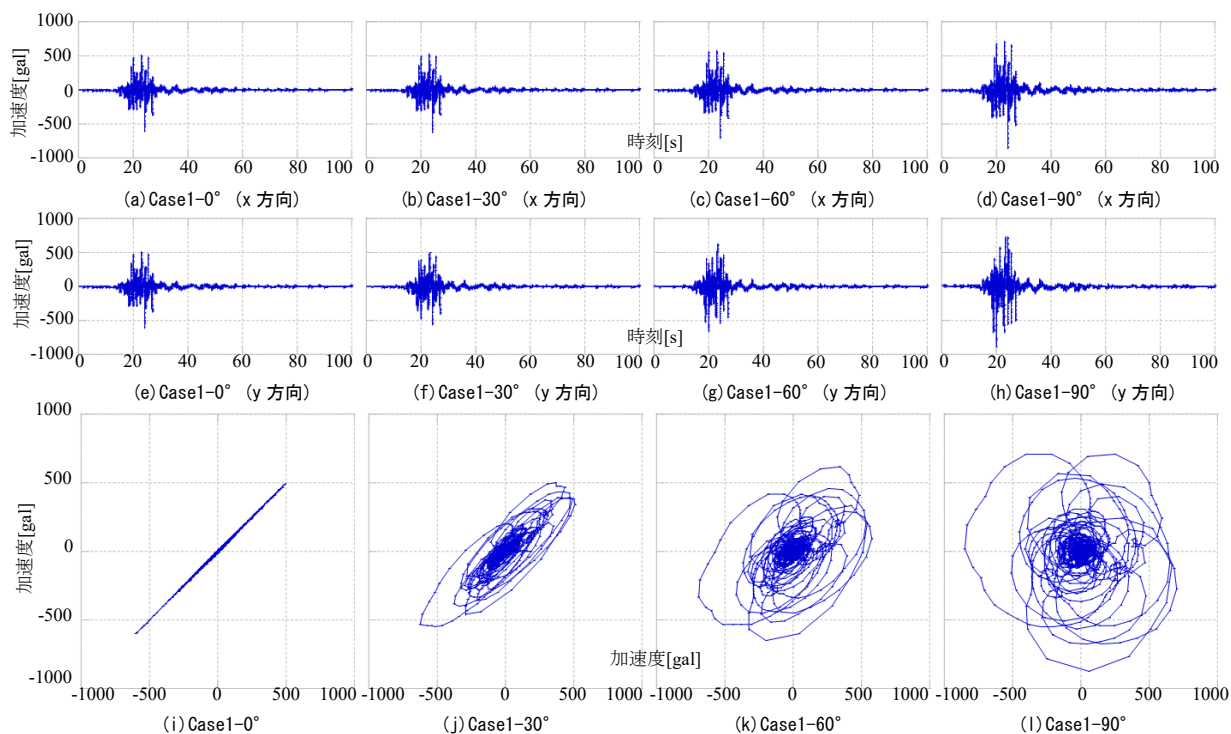
図-4 応力-歪関係

表-2 解析モデル諸元

	曲げ強度 [kNm]		柱梁耐力比	柱せい [mm]
	柱	梁		
6	743 717	1400		752
5	1170 1170	937	1.01	850
4	1540 1540	1350	1.00	910
3	1840 1840	1690	1.00	952
2	2080 2080	1950	1.01	981
1	2270 2530	2050	1.06	1002

表-3 観測波リスト (Case1)

地震名	日時	観測地点
十勝沖地震	2003/9/26, 4:50	広尾 (HKD100)
十勝沖地震	2003/9/26, 4:50	直別 (HKD086)
宮城県沖地震	2011/4/7, 23:32	牡鹿 (MYG011)
新潟県中越沖地震	2007/7/16, 10:13	柏崎 (NIG018)
能登半島沖地震	2007/3/25, 9:42	穴水 (ISK005)
鹿児島県北西部地震	1997/3/26, 17:31	出水 (KGS002)



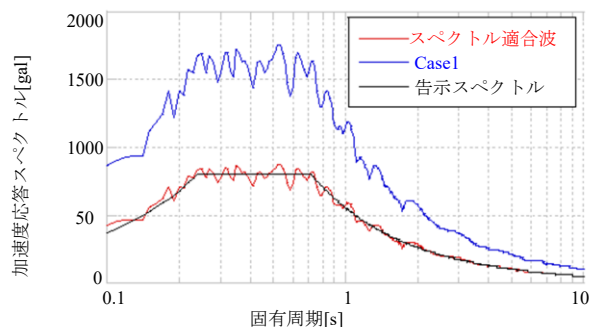
図－5 加速度時刻歴，加速度軌跡 (Case1)

された各振動数成分の振幅を1方向スペクトルの適合度に応じてそれぞれ拡幅または減幅することで、設計用応答スペクトルに適合させた波を作成した。適合の度合いは図－6の赤線で示す通りである。作成した波を1つの方向の成分波とし、直交方向成分波として同じ波の位相を一樣に θ 変化させることで、加速度軌跡が線形 ($\theta = 0^\circ$)、楕円形 ($\theta = 15^\circ \sim 75^\circ$)、円形 ($\theta = 90^\circ$) となる7種類の地震波を作成した。その際、各方向成分波の振幅を $\sqrt{2} \cos(\theta/2)$ で除して、最大方向成分を目標応答スペクトルに適合させ、さらに地動の最大速度を1.0[m/s]に基準化するため、文献1)に倣い、作成した地震波を2倍に拡幅した。以上の位相を θ ずらして作成した地震波をCase1- θ と呼ぶこととする。

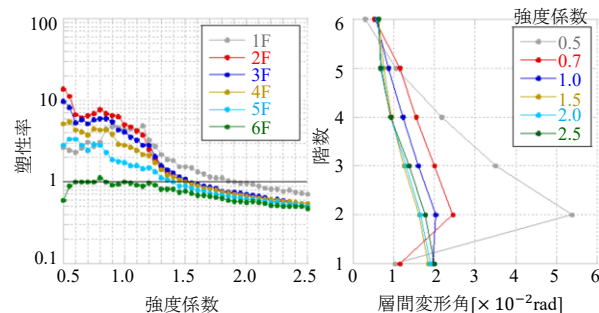
新潟県中越沖地震(2007,M6.8)の柏崎記録(以下NIG018)の東西成分から作成した入力地震波Case1- 0° 、 30° 、 60° 、 90° のx、y方向の加速度時刻歴と重ね合わせた加速度軌跡を図－5に示す。位相を一樣に変化させることによって主要動の継続時間に大きな変化はなく、加速度軌跡形状の異なる地震波を作成できることを示した。

3.2. 解析事例

図－7, 8は、NIG018-EWから作成したCase1- 0° を 45° 方向入力した時の各階の柱の塑性率と強度係数の関係と地震応答解析から得られた最大層間変形角を幾つかの強度係数ごとに示したものである。塑性率は、各階の柱頭、柱脚のうち小さい方の値であり、塑性率が1以下ならば単層崩壊が生じていないことを意味する。強度係数の増



図－6 加速度応答スペクトル



図－7 柱の塑性率-強度係数 図－8 最大層間変形角

加に伴い概ね塑性率は減少し、層間変形角より、2層の層崩壊から全体崩壊に移行する様子が見てとれる。層崩壊を防ぐための強度係数の最小値(以下、必要強度係数)は、最も大きい1階の塑性率が1以下となる1.85となった。また、図－9に強度係数 $\psi_i = 2.0$ の時にける各階の柱頭、柱脚のファイバーモデルと梁の回転ばねの回転角とモーメントの関係を示す。また、図中の赤線は正負の降伏強度を表す。1階柱脚、最上階の柱頭、1～5階の梁で塑性化し、梁降伏型全体崩壊の様子が見てとれる。

3.3 入力角度と必要強度係数

図-10に、地震動を最大加速度成分方向と梁架構方向の成す角度を 5° ずつ変化させ、 $0^\circ \sim 85^\circ$ の角度で入力した際の入力角度と必要強度係数の関係を示す。(b)～(g)が観測波6波の東西成分から作成したCase1の7種類の地震動について、(a)が6波の平均値についての結果を表す。加速度軌跡の線形性の強いCase1- 0° 、 15° 、 30° では観測波に依らず、 0° 方向入力時に対して、 45° 方向入力時に必要強度係数が大きな値となった。Case1- 0° 、 15° の結果は概ね一致し、必要強度係数は観測波に依らず、 0° 方向入力時に1.2～1.3程度、 45° 方向入力時に1.8～1.9程度となり、その比は1.5程度を示した。一方、Case1- $60^\circ \sim 90^\circ$ では、必要強度係数は入力角度に依らず概ね1.5～1.8を示し、Case1- 30° 、 45° では、必要強度係数の入力角度による差がCase1- 0° 、 15° での結果に近いものからCase1- $60^\circ \sim 90^\circ$ での結果に

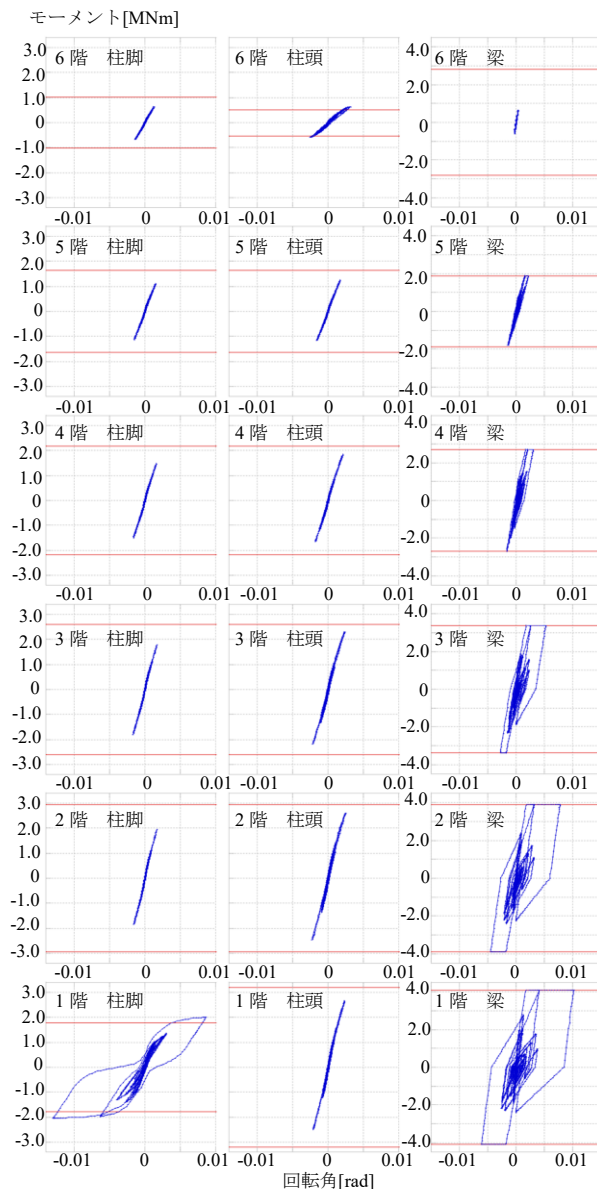


図-9 各ばねの回転角—モーメント関係

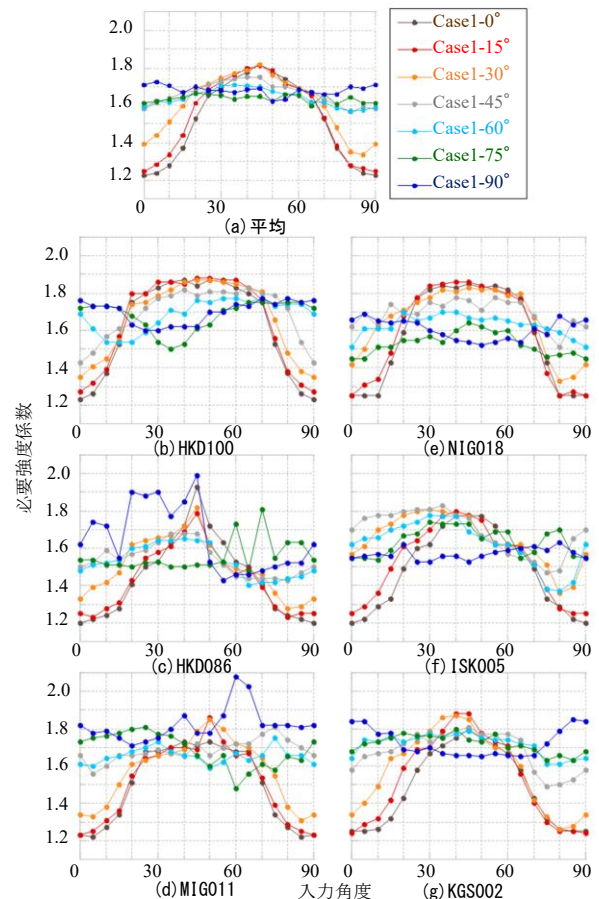


図-10 入力角度-必要強度係数の関係

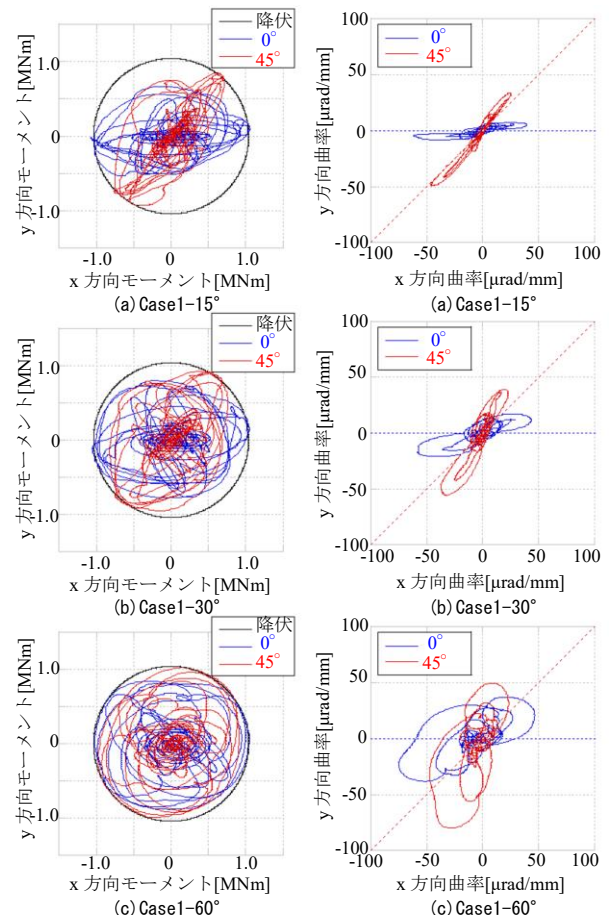


図-11 モーメントの軌跡

図-12 曲率の軌跡

近いものまで地震波によるばらつきがあった。

Case1-0°、15°では、加速度軌跡の線形性が強いいため、入力角度と同じ方向に塑性化が生じることで0°方向入力時に対し45°方向入力時の必要強度係数が1.5倍程度になったのに対し、Case1-60°～90°では、加速度軌跡が円形に近づくため、入力角度に依らず45°方向周辺で塑性化が生じることで、入力角度による必要強度係数の差が小さくなったものと考えられる。

強度係数 $\psi_i=0.5$ のモデルにNIG018-EWから作成したCase1-15°、30°、60°をそれぞれ0°方向と45°方向に入力した時のモーメントと曲率の軌跡を塑性化の生じた2階柱脚について、それぞれ図-11、図-12の(a)～(c)に示す。また、図-11の黒線は降伏曲面を表す。

加速度軌跡の線形性が強い場合では、0°方向入力時に梁架構方向、45°方向入力時に45°方向にモーメント、曲率ともに軌跡を描き、入力方向と同じ方向で塑性化が生じる一方、加速度軌跡形状が円形に近づくにつれ、モーメント、曲率ともに軌跡が円形に近づき、曲率は0°方向入力時、45°方向入力時ともに入力角度から反時計回りにずれ、どちらも45°方向周辺に軌跡を描く傾向が見られ、上述の考察に沿う結果を示している。

4. 2方向スペクトル適合波 (Case2) と観測波 (Case3)

4.1 入力地震波

既往研究²⁾に倣い、K-NETより引用した観測波20波に対し、位相特性を保持した2方向スペクトル適合波を作成した。

観測記録の水平直交2成分についてフーリエ変換により分解された各振動数成分に着目すると、直交2方向の成分波は同じ振動数で位相差を有している2つの単振動であるので、水平面内で楕円軌跡を描く。楕円の長軸長を2方向応答スペクトルの大きさとみなし、2方向応答スペクトルの適合度に応じて直交2方向の成分波の振幅を振幅比を一定のまま拡幅または減幅することで、楕円形状を保持したまま長軸長を設計用応答スペクトルに適合させ、さらに地動の最大速度を1.0[m/s]に基準化するため、作成した地震波を2倍に拡幅した。以上の手順で作成した地震波をCase2と呼ぶこととする。

また、K-NETより引用した表-4に示す観測波5波について最大速度が1.0[m/s]になるよう加速度記録を拡幅または減幅して入力した。以下、Case3と呼ぶ。

表-4 観測波リスト (Case3)

地震名	日時	観測地点
十勝沖地震	2003/9/26, 4:50	広尾(HKD100)
新潟県中越沖地震	2004/10/23, 17:56	十日町(NIG021)
新潟県中越沖地震	2004/10/23, 17:57	小千谷(NIG019)
新潟県中越沖地震	2007/7/16, 10:13	柏崎(NIG018)
能登半島沖地震	2007/3/25, 9:42	穴水 (ISK005)

4.2 解析結果

図-13に、代表として表-4の観測波5波から作成したCase2とCase3における入力角度と必要強度係数の関係を示す。位相特性が同じCase2とCase3では、入力角度による必要強度係数の増減に同じ傾向が見られ、Case3の方がCase2に比べ増減の幅が1.05～1.2倍程度大きくなった。NIG021、NIG018のように入力角度により必要強度係数の差が大きくなるものから、他の3波のように必要強度係数が入力角度によってあまり変化しないものがあった。入力角度により必要強度係数の差が大きくなる地震波では、最大値をとる入力角度と最小値をとる入力角度では30°～50°差があり、45°に近い値を示した。また、観測波20波から作成したCase2は、地震波や入力角度に依らず必要強度係数は1.3～1.9程度に収まった。

5. 加速度軌跡と必要強度係数の関係

5.1 楕円偏極指標による加速度軌跡の分析

水平2方向地震動の軌跡特性が必要柱梁耐力比に及ぼす影響について検討を行うため、既往研究³⁾に倣い、楕円偏極指標 $P_E(t)$ による地震動の加速度軌跡分析を行った。 $P_E(t)$ は、粒子運動の楕円偏極成分における扁平度を0と1の間の範囲の実数値で表現したものとなっており、

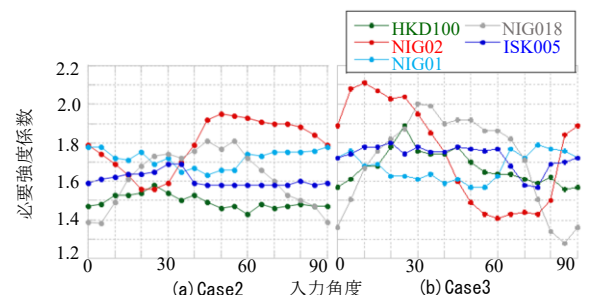


図-13 入力角度-必要強度係数

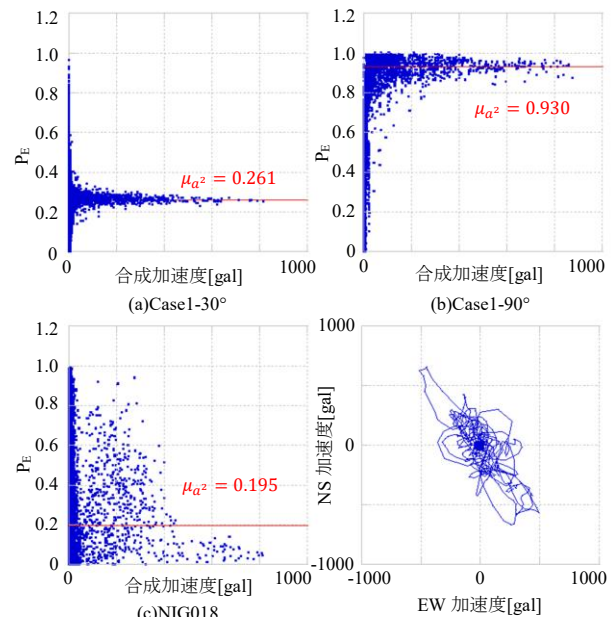


図-14 合成加速度- P_E 関係 図-15 加速度軌跡

$P_E(t)=0$ は直線運動に、 $P_E(t)=1$ は円運動に対応している。 $P_E(t)$ の算出法の具体については、文献3)を参照されたい。2 方向地震動の加速度軌跡に適用し P_E の値を時間変化で得ることで、各時刻における粒子加速度の直線運動と円運動の間での特性の時間的変動を評価することができる。NIG018-EW から作成した Case1-30°、90° と観測波 NIG018 について楕円偏極指標 $P_E(t)$ —合成加速度関係を図-14 に、NIG018 の加速度軌跡を図-15 に示す。Case1 の場合、楕円偏極指標 $P_E(t)$ は合成加速度の大きさに依らず、ほぼ同じ値を示している。一方で、観測波の場合、 $P_E(t)$ は時々刻々と変化し、合成加速度が小さい範囲においては、 $P_E(t)$ が 0~1 の広範囲に分布している。そのため、加速度に関する重みを付けた平均 μ_{a^2} を式(1)に定義した。その際、参考文献³⁾では合成加速度の 1 乗を重みとしていたが、加速度の大きい領域の影響をより大きくするため合成加速度の 2 乗を重みとした。

$$\mu_{a^2} = \frac{\int_0^T P_E(t) \{a_x(t)^2 + a_y(t)^2\} dt}{\int_0^T \{a_x(t)^2 + a_y(t)^2\} dt} \quad (1)$$

ここに、

$a_x(t), a_y(t)$: 地震波の加速度

dt : 観測記録の時間刻み

T : 継続時間

5.2 解析結果

図-16 に、Case1,2,3 について、入力角度ごとの必要強度係数の最大値と最小値の比 γ_{CB} と μ_{a^2} との関係をそれぞれ赤色、青色、黄土色で示し、Case2,3 については位相特性が同じものを同じ形で表した。また、図の赤線は Case1-0° ~90° についての 6 波の平均値を示す。 γ_{CB} は、地震波のケースに依らず μ_{a^2} の増加に伴い減少する相関があった。

Case1 に着目すると、 γ_{CB} は、Case1-0°、15° が対応する $0 \leq \mu_{a^2} \leq 0.2$ で概ね 1.4~1.6 となり、Case1-60° ~90° が対応する $0.4 \leq \mu_{a^2} \leq 1.0$ で概ね 1.05~1.25 となる一方で、

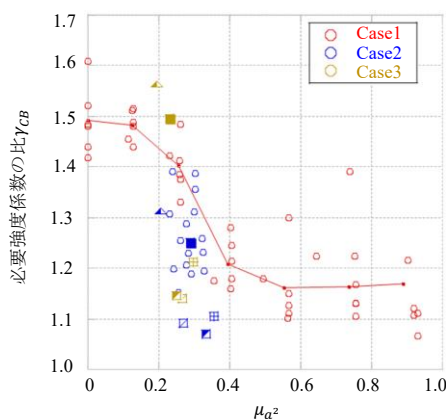


図-16 $\gamma_{CB} - \mu_{a^2}$ 関係

Case1-30°、45° が対応する $0.2 < \mu_{a^2} < 0.4$ で概ね 1.15~1.5 と取りうる値の幅が大きくなり、 μ_{a^2} の増加に伴い大きく減少する様子が見てとれる。

Case2,3 の場合 μ_{a^2} は、Case1 で γ_{CB} の値が大きく変化する $0.2 < \mu_{a^2} < 0.4$ の値となり、 γ_{CB} は 1.1~1.4 程度の値を示した。また、位相特性の同じ Case2,3 を比較すると、位相特性に依らず Case3 の方が μ_{a^2} が小さくなるのに伴い、 γ_{CB} が 1.05~1.2 程度大きくなった。この事は、振幅調整により Case2 では Case3 に比べて、若干ながら加速度軌跡の線形性が弱くなった事を示している。

6. まとめ

本研究では、立体 RC 骨組の水平 2 方向地震動に対し、層崩壊を防ぎ、梁降伏型全体崩壊させるために必要な柱梁耐力比について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 加速度軌跡が線形、楕円形、円形である Case1 を入力した場合、必要強度係数は観測波に依らず、線形軌跡では梁架構方向入力時に 1.2~1.3 程度、45° 方向入力時に 1.8~1.9 程度で、その比は 1.5 程度であるのに対し、円形軌跡に近づくとも入力角度に依らず概ね 1.5~1.7 に収まる。
- (2) 観測波の位相特性を保持した Case2 を入力した場合、必要強度係数の最小値に対する最大値の比 γ_{CB} は 1.1~1.3 程度で、その入力角度の差は 30° ~50° 程度である。
- (3) 観測波の最大速度を 1.0[m/s]となるよう定数倍した Case3 地震波の場合、必要強度係数の最小値に対する最大値の比 γ_{CB} は、Case2 に比べて 1.05~1.2 倍程度大きくなる。
- (4) 必要強度係数の最小値に対する最大値の比 γ_{CB} は、楕円偏極指標の加速度の重み付き平均 μ_{a^2} と相関があり、 $0 \leq \mu_{a^2} \leq 0.2$ で概ね 1.4~1.6、 $0.4 \leq \mu_{a^2} \leq 1.0$ で概ね 1.05~1.25 となり、Case2 と Case3 が分布する $0.2 < \mu_{a^2} < 0.4$ で大きく変化する。

参考文献

- 1) 日比野陽, 市之瀬敏勝: RC 骨組の地震時塑性率に及ぼす柱梁耐力比の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.20, No.2, 2005
- 2) 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, No.4 (地震工学論文集第 36 巻), I_122-I_134, 2017.
- 3) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃, 畑明仁: 強震動の観測記録の水平 2 方向特性の分析と水平 2 方向応答スペクトルに適合する入力地震動の作成法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地盤工学), Vol.72, No.4 (地震工学論文集第 35 巻), I_555-I_568, 2016.