

論文 パルス性地震動を受けるドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティ建築物の応答特性

袁 士宇*1・中山 輝郁*2・竹内 崇*3・孫 玉平*4

要旨：ドリフト硬化型 RC 柱を有する層崩壊形ピロティ建築物がパルス性地震動を受ける場合の応答性状を調べるため、同じ断面と配筋率のドリフト硬化型 RC 柱と靱性型 RC 柱をそれぞれ有する二つのピロティモデルについて、3つのパルス性地震波を用いて、動的増分解析を行った。強いパルス性地震動を受ける場合、ドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティモデルは靱性型 RC 柱を有するピロティモデルよりも最大応答変形角を小さく抑制するケースがある。ピロティ建築物に正の第三勾配を持つドリフト硬化型柱を用いることで、ピロティ階の片方向に大きく塑性変形する現象を抑えられることが分かった。

キーワード：ドリフト硬化型 RC 柱, ピロティ, パルス性地震動, 動的増分解析

1. はじめに

RC 造ピロティ建築物は、兵庫県南部地震や熊本地震など、過去の大地震において顕著な被害があったため、当構造形式の耐震性能は問題視されている。「基準解説書」¹⁾ではピロティ層部材の塑性変形でエネルギー吸収する働きにより倒壊を免れ、人命を保護するように、靱性の確保と耐力の割増しに着目した設計法が提案されている。しかし、大地震後の残留変形が大きくなるため、修復困難になり、撤去される可能性もあり、持続使用性や修復性における課題が残されている。

一方、高い復元性の RC 柱部材の開発が進んでいる。規格降伏強度 1275N/mm² の超高強度鉄筋 SBPDN 1275/1450 (以後 SBPDN 筋と称す) を主筋に用いた柱部材に対する静的繰返し载荷の実験結果より、この部材は大変形域でも残留変形を小さく抑えるとともに、耐力が上昇し続けるドリフト硬化型履歴性状を有することが明らかになった²⁻⁶⁾。

さらに、著者ら⁷⁾は SBPDN 筋を主筋に用いたドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティ建築物と同配筋率の靱性型 RC 柱を有するピロティ建築物モデルに対して、記録波 El Centro NS, Taft NS, JMA Kobe NS を用いた動的増分解析を行った。大地震を受ける場合でもピロティ階の残留変形は小さく抑えられる一方、エネルギー吸収性能が乏しいので最大変形は靱性型ピロティモデルより大きくなることを示した。しかし、パルス性の強い JMA Kobe の場合、ドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティモデルの最大応答変形は逆に靱性型柱を有するピロティモデルより小さくなる結果となった。

このような応答結果はパルス性地震動を受ける場合

に共通して生じる性状なのか、それとも JMA Kobe NS 波を受ける場合のみの特別な性状なのかを調べることを目的とする。文献 7) の検討で使われた同配筋率の靱性型柱を有するピロティモデルと高い第三剛性と原点指向型に近い除荷剛性をもつドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティモデルを利用し、速度応答スペクトルの卓越周期が異なる3つのパルス性地震動を用いた動的増分解析を行い、パルス性地震動を受ける場合、靱性型柱の代わりに同配筋率のドリフト硬化型柱を用いることで、ピロティ層の最大変形および残留変形はどのように変化するかを考察する。

2. 対象建築物およびモデル化手法の概要

検討対象とする建築物は文献 7) と同じものを採用する。対象建築物は RC 造の純ピロティである。骨組みモデルは図-1 に示す。変数はピロティ階柱の主筋材のみであり、それぞれ異形鉄筋 SD345 と超高強度の SBPDN 筋とする。異形鉄筋 SD345 を柱の主筋に用いる建築物モ

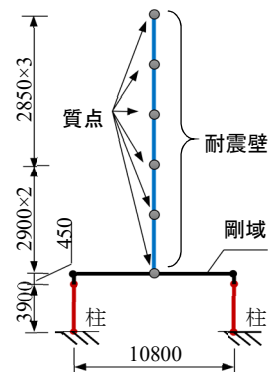


図-1 骨組みモデル⁷⁾

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

デルは靱性型柱ピロティ (Ductile-type Column Piloti) を意味する DCP モデルと呼び, SBPDN 筋を柱の主筋に用いる方はドリフト硬化型柱ピロティ (Drift-hardening-type Column Piloti) を意味する DHCP モデルと呼ぶ。

解析プラットフォームは OpenSees⁸⁾を用いる。ピロティ階柱部材は軸方向と曲げ方向の力学性状を表現できる線材要素である Force-Based Beam-Column⁹⁾でモデル化した。柱の下端は固定端とし, 上端には1階の強い梁を考慮し, 0.45mの剛域を設けた。柱の初期軸力比は0.14である。柱部材変形は Scott ら⁹⁾が提案した数値積分法 Endpoint Hinge Integration に従って計算する。軸方向は弾性剛性で表現する。ヒンジ領域における断面の曲げモーメント-曲率関係はトリリニア形の Hysteretic Material⁸⁾モデルを用いた。表-1 にまとめている骨格曲線のパラメーターは中野らが提案した手順¹⁰⁾で求めた。当モデルは剛性低減型であり, 除荷時の剛性低下係数 β の値は, 従来の靱性型を代表する DCP モデルは0.4, 原点指向型に近い系を代表する DHCP モデルは0.5とした。再負荷は最大点指向型である。

柱の復元力特性を比較するために, 両モデルの柱部材モデルに対して4%までの静的繰り返し載荷解析を行った。解析結果の水平力-部材角関係を図-2 に, 除荷時の残留部材角の比較を図-3 に示す。DHCP モデルの柱部材は DCP モデルより高い第二, 第三剛性を持ち, DCP モデルよりも残留変形角を小さく抑えられる履歴性状を有することが分かる。

表-1 柱 M- ϕ 関係モデルの包絡線パラメーター

	M_1 kMm	ϕ_1 1/mm	M_2 kMm	ϕ_2 1/mm	M_3 kMm	ϕ_3 1/mm
DCP	2400	3.5E-6	2730	1.4E-5	2720	5.6E-5
DHCP	1970	3.5E-6	3690	1.4E-5	6410	5.6E-5

表-2 壁部材モデルの剛性に関する係数

E_c (MPa)	A (m ²)	I_{rc} (mm ⁴)	G_c (MPa)	κ_e
24683	2.62	4.8E13	10578	1.64

ここで, E_c はヤング係数, A は断面積, I_{rc} は鉄筋の影響を考慮した断面二次モーメント, G_c はせん断弾性係数, κ_e はせん断形状係数である。

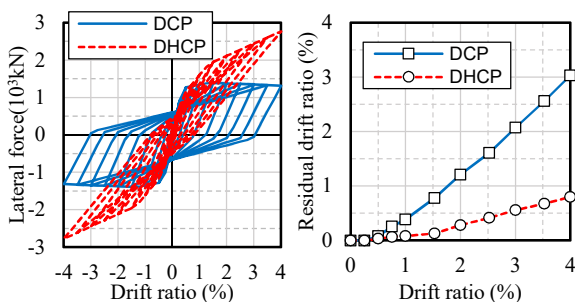


図-2 水平力-部材角関係

図-3 残留部材角

なお, 両モデルとも理想的な靱性性能を持つことを前提として, 大変形領域時でも柱部材はせん断破壊生じないと仮定する。また, 2階の梁は剛体と仮定する。2階~6階の耐震壁は Timoshenko Beam¹²⁾要素でモデル化する。表-2 に曲げとせん断剛性に関する係数をまとめた。

動的応答計算は Newmark- β ($\beta=0.25$) 法を用いる。減衰はレーリー型とし, 減衰定数は3%とする。両モデルの初期剛性に微差があるため, 固有値解析による DCP モデルの固有周期は0.377secであり, DHCP モデルの固有周期は0.411secである。

3. 入力用のパルス性地震動

“大震研”大阪府指針¹¹⁾で提示したパルスタイプの設計用地震動から UMTD6_B2NS1(略称: UMTD6), IKMF3_B2NS3(略称: IKMF3), UMTA3_B2NS2(略称: UMTA3)の3波を選出した。地震波諸元を表-3 にまとめた。図-4 に50kineに基準化した3波の速度波形を示す。パルス性地震動の周期特性に関する指標であるパルス周期 T_p は鈴木ら¹²⁾の定義を参考し, 擬似速度応答スペクトル値 pSv が最大となる周期とする。図-4 に記の通り, UMTD6 は0.74sec, IKMF3 は1.57sec, UMTA3 は4.09secである。

最大地動加速度 PGA, モデル固有周期 T_1 における加速度応答スペクトル値 $Sa(T_1)$ および擬似速度応答スペクトル値 $pSv(T_1)$ のいずれの値も入力波 UMTD6 が一番大きい値となっている。2章の最後に記述した通り, 両モ

表-3 50kineに基準化した地震動の諸元

地震動	PGA (cm/s/s)	$Sa(T_1)$ (cm/s/s)		$pSv(T_1)$ (cm/s)	
		DCP	DHCP	DCP	DHCP
UMTD6	436.6	572.1	745.0	34.4	48.7
IKMF3	249.3	370.3	362.3	22.2	23.7
UMTA3	134.4	427.1	491.7	25.7	32.2

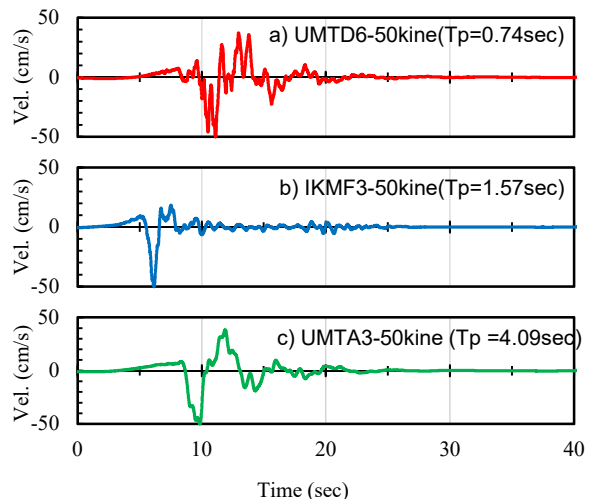


図-4 入力地震動の速度波形

デルの固有周期が少し異なるため、UMTD6 の場合の $Sa(T_1)$ と $pSv(T_1)$ は DHCP モデルの方が DCP モデルより約 3 割大きい値となっている。

入力の強さの増大に伴う応答結果の変化を調べるために動的増分解析を行った。3 つの入力地震動をそれぞれ最大地動速度 PGV が 12.5kine から 200kine まで、12.5kine 刻みで漸増させるように基準化した。

4. 応答結果および考察

4.1 応答時刻歴の比較

(1) UMTD6

図-5 に UMTD6 波を PGV=50kine, 75kine, 100kine に基準化した入力ケースにおける DCP モデルと DHCP モデルのピロティ階の層間変形角の時刻歴を示す。それに合わせて図-6 にピロティ階の層せん断力と層間変形角の関係を示す。

PGV=50kine 時、図-5a) に示す通り DHCP モデルの応答履歴にはほぼ左右対称の最大層間変形角（両方向とも $R_{max}=1.05\%$ ）が見られるのに対して、DCP モデルはプラス方向に少し大きめの応答層間変形角（プラス方向 $+R_{max}=0.72\%$ 、マイナス方向 $-R_{max}=0.44\%$ ）が生じた。また、図-8a1) と a2) に示す通り、両モデルとも第二勾配領域までの応答変形しか発生しておらず、残留変形が小さかった。ピロティ階の層せん断力も最大応答変形と同様、DHCP モデルの方が DCP モデルより大きい。理由

は DHCP モデルの $Sa(T_1)$ の方が DCP モデルより少し大きいためだと考えられる。

PGV=75kine に到達する時、両モデルとも最大層間変形角は 2% 以上に到達した。DHCP モデルは図-5a) に示す通りほぼ左右対称の最大層間変形角を経験する特徴を保持し、最大応答（プラス方向 2.24%、マイナス方向 2.53%）を経験後、減衰によって徐々に振動が止まるような挙動を示し、残留変形もほぼ 0 になった。DCP モデルの最大応答はプラス方向 1.28%、マイナス方向 2.25% と少し偏った応答を示し、残留変形角は 0.72% になった。

PGV=100kine 入力時、図-5c) に示す通り、DHCP モデルのピロティ階の応答性状は、PGV=75kine 入力時と同様に、正負側にほぼ等しい振幅を持ち（プラス方向 $+R_{max}=4.15\%$ 、マイナス方向 $-R_{max}=-4.14\%$ ）、減衰によって徐々に振動が止まるような挙動を示し、残留変形もほぼ 0 になった。DCP モデルは、10.82 秒でマイナス方向に一回 -1.92% を経験し、その後 11.65 秒でマイナス方向に最大応答変形 4.27% を経て、片振りの応答性状を示した（プラス方向 $+R_{max}=1.45\%$ 、マイナス方向 $-R_{max}=4.27\%$ ）。2 回分けて最大応答に到達した応答は第 3 章の図-4a) に示す UMTD6 の速度波形の 10~12 秒辺りに 2 つのピークが存在するためと考えられる。

図-6c2) に示す通り、DHCP モデルは履歴モデルにおける第三勾配が高く、図-6c1) に示すような第三勾配が負である DCP モデルに見られた速度パルスによる大き

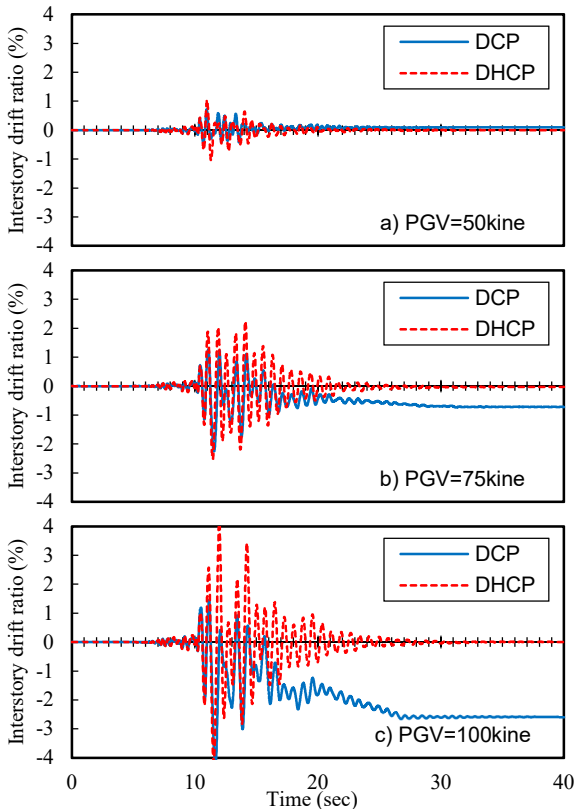


図-5 1F 層間変形角の時刻歴 (UMTD6)

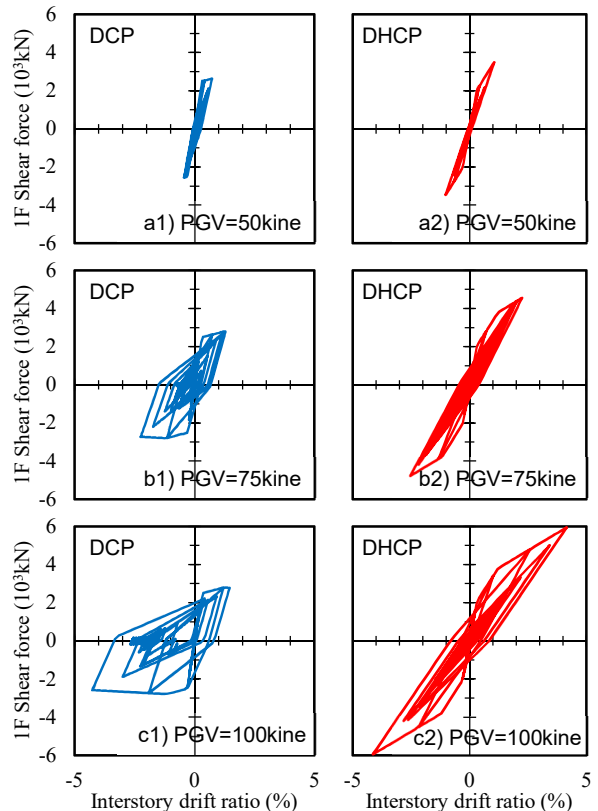


図-6 1F 層せん断力-層間変形角 (UMTD6)

な塑性流動を抑えたことによって、最大応答も DCP モデルより小さく抑えたと考えられる。

DHCP モデルは原点指向型に近い除荷勾配を有し、除荷する際に残留変形を小さく抑えたいうえ、エネルギー吸収量が小さいため、除荷点から反対側に向けて応答し始める際の動的エネルギーが DCP モデルよりも大きく、応答の偏りを抑えたと考えられる。また、第 3 章の図-4a)に示す UMTD6 の速度波形において、11.65 秒以降に最大応答の逆方向に PGV の 6 割程度を有する波形が存在することも、DHCP モデルが反対側にも最大応答とほぼ同程度の応答が発生した一因であると言える。

15 秒以後、DCP モデルのピロティ階の応答が層間変形角 2%程度から小さい振幅を描きながら徐々に片方向に累積するような挙動を示した。27 秒前後で変形が安定し、40 秒解析終了時における残留変形角は 2.59%となった。この現象は同じ DCP モデルを用いた先行研究⁷⁾では、第三勾配の低い剛性低減型の履歴特性を持つことと P- δ 効果を考慮することによって発生すると分析している。また、出水ら¹³⁾の P- δ 効果を考慮した剛性劣化型の復元力特性を持つ一質点系を用いた時刻歴応答解析の結果にも同様な挙動が見られる。

(2) IKMF3

図-7a)に示す通り、PGV=100kine 入力に対する両モデルの最大応答値は UMTD6 の PGV=50kine 入力時よりも少し小さい。これは IKMF3 波における Sa(T₁)が UMTD6 より小さいためだと考えられる。また、両モデルの最大応答変形はほぼ弾性範囲であり、ほぼ同じ値となっている。IKMF3 入力における両モデルの Sa(T₁)がほぼ一緒であるためだと考えられる。

IKMF3 入力を PGV=150kine に増幅させると、両モデルの応答は図-8b1) b2)に示すように、両モデルとも骨

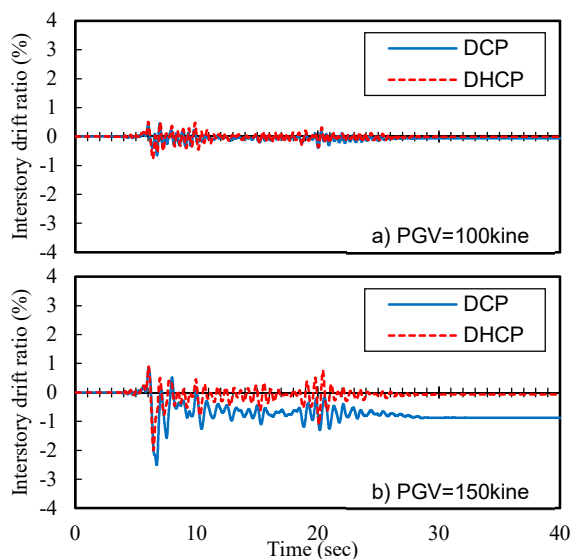


図-7 1F 層間変形角の時刻歴 (IKMF3)

格曲線に沿って片方向に一度のみ大きな変形が生じ、最大変形に到達した形になっている。DHCP モデルの最大変形 (-2.00%) は DCP モデル (-2.50%) より小さい。これは UMTD6 の応答についての考察と同じく、第三勾配を高くすることで強いパルス波による塑性流動を抑えられることを示唆している。

応答の偏りに関しては、UMTD6 (PGV=100kine) と異なり、DHCP モデルの応答も同じマイナス方向に偏っていた (プラス方向+Rmax=0.89%, マイナス方向-Rmax=-2.00%)。これは、第 3 章の図-4b)に示す通り、IKMF3 の速度波形は典型的な指向性パルスであり、波形のピーク (6.15 秒) 後、反対側に PGV の 3 割程度の残波しかなく、マイナス方向で発生した最大 2%ほどの応答を反対側にさせられなかったと考えられる。残留変形については、DHCP モデルはほぼ 0 となっている。DCP モデルは-0.88%となり、UMTD6 の PGV=100kine 入力時に見られた小さい振幅でも徐々に片方向に累積するような挙動は、UMTD6 より不明瞭であった。これは最大応答変形が UMTD6 の PGV=100kine 入力時より小さく、再負荷剛性の低減の程度が低く、また、24 秒辺りからの微動開始時の位置 (0.7%程度) は UMTD6 の PGV=100kine 入力時の微動開始時の位置 (2%程度) より小さく、P- δ 効果の影響がより小さかったためと考えられる。

(3) UMTA3

図-9a)に示す通り、UMTA3 の PGV=100kine 入力に対する両モデルの最大応答値は IKMF3 の PGV=100kine 入力時 (図-7a) より少し大きい結果となっていた。両モデルの応答は IKMF3 の PGV=150kine 時と似ており、図-10a1) a2)に示すように、マイナス方向に骨格曲線に沿って一度の大きな変形で最大変形に到達した形になっており、少し偏った応答となっていた。最大応答変形につ

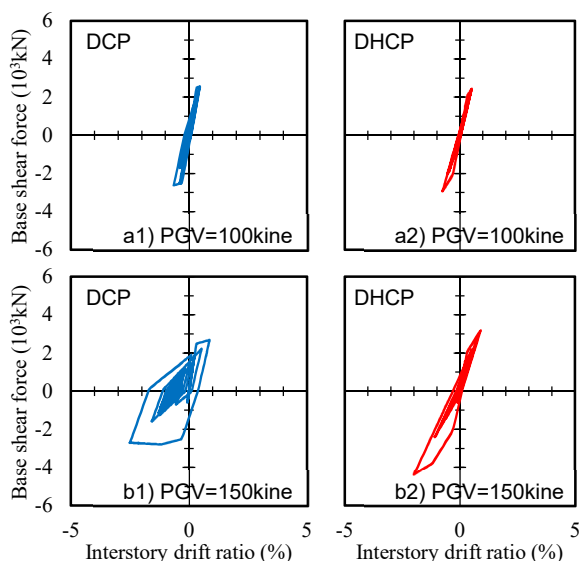


図-8 1F 層せん断力-層間変形角 (IKMF3)

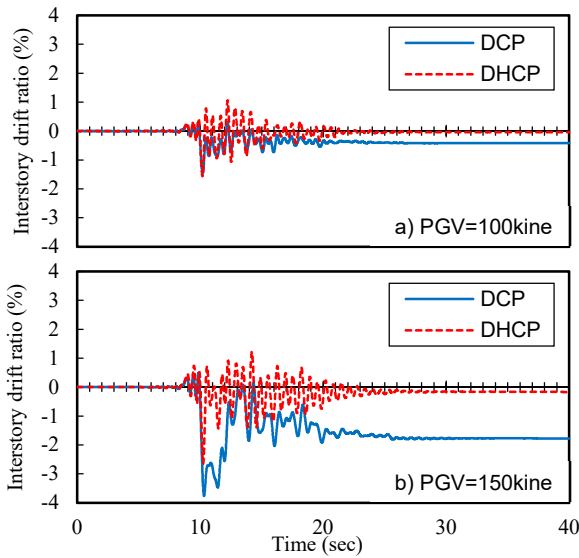


図-9 1F 層間変形角の時刻歴 (UMTA3)

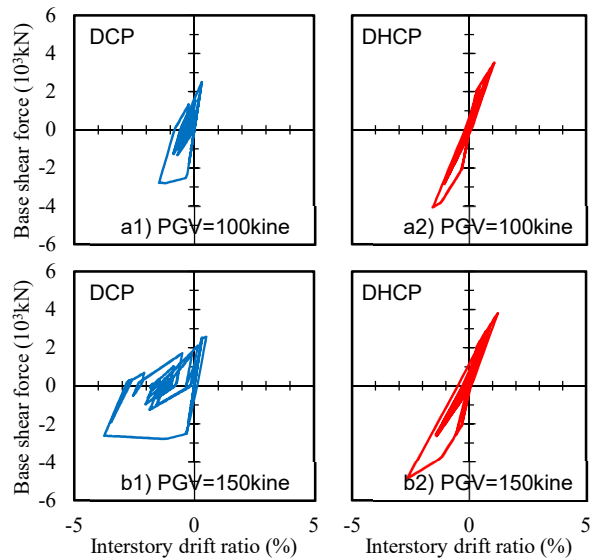


図-10 1F 層せん断力-層間変形角 (UMTA3)

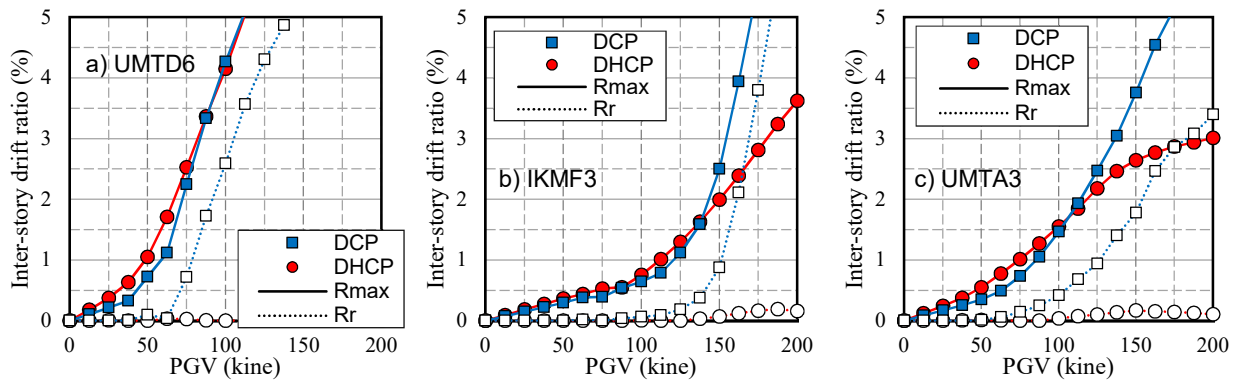


図-11 最大地動速度 PGV とピロティ階の最大層間変形角 Rmax と残留変形角 Rr

いて、DHCP モデル ($R_{max}=1.55\%$) は DCP モデル ($R_{max}=1.47\%$) より少し大きい。DHCP モデルの残留変形はほぼ 0、DCP モデルは 0.42% となった。

UMTA3 入力を $PGV=150kine$ に増幅すると、両モデルの応答は図-9b)および図-10b1)b2)に示すように片方向に一度の大きな変形で最大変形に到達することや、応答変形は両モデルとも片方向に偏るなど、IKMF3 の $PGV=150kine$ 時と似たような応答特性を示すことが分かる。また、DCP モデルの応答における小振幅で変形が累積する量は IKMF3 の $PGV=150kine$ 時よりは大きく、最後に 1.78% の残留変形角になった。DHCP モデルの残留変形は本章で示した例の中で一番大きく、 0.17% となった。

4.2 入力地震動の強さと周期特性の影響

全ての入力ケースにおいて、両モデルの最大および残留変形角を比較するために、図-11 には入力地震波の最大地動速度 PGV 値とピロティ階の最大層間変形角と残留層間変形角の関係を示す。

図-11a)に示す通り、UMTD6 の $PGV < 50kine$ のケースでは、両モデルとも最大応答層間変形角が 1% 以下の変

形領域に留まる。この領域で両モデルの最大応答の差はモデルの固有周期における $S_a(T_1)$ の差による影響だと考えられる。 $PGV \geq 67.5kine$ では両モデルとも最大層間変形角が 1% 以上の領域に達した。DCP モデルの最大応答の増加傾向が大きくなり、残留変形も単調増大するようになる。一方、DHCP モデルは正の第三勾配を有し、前節で示した片方向に大きな塑性変形を抑制する特性の影響より、入力波強さの増大に伴う応答変形の増大傾向を DCP モデルより少し低く抑制した。 $PGV = 100kine$ 入力の時、DHCP モデルの最大応答層間変形角は DCP モデルより少し小さい結果となった。DHCP モデルは DCP モデルより最大応答を小さく抑える傾向は、図-11b)c)で示す通り、ほかの2つの入力 IKMF3 と UMTA3 ケースでも共通であることは確認できる。最大応答が逆転するタイミングに関しては、3波に明瞭な傾向は見られなかった。

DCP モデルの最大応答増大傾向については、 T_p との関係性が見られず、IKMF3 ケースにおける $PGV > 150kine$ の領域では単位 PGV 増幅に対する最大応答の増大傾向が一番大きい。前節でも考察したように、靱性型系における強いパルス波による塑性流動が最大応答を支配する

ので、指向性パルス性が一番強い IKMF3 の方が最大応答を増大させるのに一番効率的とも考えられる。一方、DHCP モデルはパルス周期 T_p が一番長い UMTA3 入力に対して、線形的に増大する入力強さに対する最大応答の増大傾向を一番よく抑えられる。図-11c)における $PGV=150\sim 200\text{kine}$ の領域では、増大傾向を最大応答 $R_{max}=3\%$ 程度に収束させる傾向も見られる。

5. まとめ

ドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティモデルと同配筋率の靱性型ピロティモデルに対して、3 つのパルス性地震動を用いて、動的増分解析を行い、パルス地震動に対するドリフト硬化型ピロティ建築物の応答特性を考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) JMAKobeNS 波以外の3つの強いパルス性地震動を受ける場合でも、ドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティモデルは靱性型モデルよりも最大応答変形角を小さく抑制することができる、履歴性状における第三勾配が正であり、靱性型モデルのような塑性流動は生じさせないためと考えられる。
- (2) ドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティモデルはパルス周期 T_p が長いほど、入力強さの増大に伴う応答変形角の増大傾向をより小さく抑制できる。
- (3) パルス性地震動入力を受けても、ドリフト硬化型ピロティモデルは高い復元性を発揮し、最大応答が少し偏っても、最大応答を経験後には方振りせず、残留変形角も小さく抑えられる。

また、本論における最大変形 4%程度の解析ケースでは、柱の軸力比は DCP モデルでは 0.3~0、DHCP モデルでは 0.4~0.1 になる程度で変動するが、本論で用いた柱モデルは軸力変動の影響を反映しておらず、今後の課題として、SBPDN 筋を主筋に用いた RC 柱の耐震性能における軸力変動の影響を反映できる部材モデルの構築があげられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (22H01642) の助成をうけたものです。ここで記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2020年版建築物の構造関係技術基準解説書，2020.10
- 2) 谷昌典，孫玉平，藤永隆，折田考：高復元性を有する高強度 RC 柱部材に関する実験的研究，コンクリ

- ート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.565-570，2009.7
- 3) 仲井士門，橋高将義，谷昌典，孫玉平：主筋比及び軸力比が超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱の耐震性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.157-162，2011.7
- 4) 船戸佑樹，孫玉平，竹内崇，蔡高創：スパイラル溝を有する超高強度鉄筋の付着特性のモデル化と柱部材の履歴解析への応用，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.157-162，2012.7
- 5) 孫玉平，竹内崇，奥田隼也，大畑雄俊：レジリエントなコンクリート柱の耐震性能に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.1501-1506，2013.7
- 6) 大仲菜保子，竹内崇，藤永隆，孫玉平：二方向荷重を受ける付着強度の低い超高強度鉄筋を用いた RC 柱の耐震挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.103-108，2017.7
- 7) 袁士宇，竹内崇，孫玉平：ドリフト硬化型 RC 柱を有するピロティ建築物の地震応答特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.91-96，2022.7
- 8) OpenSees Development Team: OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, U.S.A., <http://opensees.berkeley.edu/>.
- 9) Scott, M. H. and Fennes, G. L.: Plastic hinge integration methods for force-based beam-column elements, Journal of Structural Engineering, Vol.132(2), pp244-252, Feb.2006
- 10) 中野魁人，竹内崇，孫玉平：付着強度の低い超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱部材を有するラーメン構造の耐震性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，2018.7
- 11) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針，2015.2
- 12) 鈴木恭平，川辺秀憲，山田真澄，林康裕：断層近傍のパルス性地震動特性を考慮した設計用応答スペクトル，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.647，pp.49-56，2010.1
- 13) 出水俊彦，北村春幸，増田和暉：P- δ 効果を考慮した超高層 RC 造建築物の残留変形の評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.81，No.722，pp.703-712，2016.4