

論文 擬似動の実験による水平二方向地震動に対するRC柱の挙動

奥山敦之^{*1}・Carlos Cuadra^{*2}・星 道夫^{*3}・小川淳二^{*4}

要旨：RC柱の弾塑性応答を調べるため、一定軸力下、水平二方向地震動に対する擬似動の実験を行った。復動型オイルジャッキで柱断面 40×40cm、曲げ降伏型の試験体を3段階の模擬地震波と神戸海洋気象台での地震波を用いて加力した。実験結果よりRC柱の水平二方向載荷時の柱の破壊性状を示すとともにひび割れ量による損傷評価を試みた。

キーワード：擬似動の実験, RC柱, 水平二方向加力, ひび割れ量

1. はじめに

地震時における構造物の立体的な弾塑性挙動を明らかにする為には水平二方向載荷による実験が大切である。一般的に水平二方向載荷は静的実験または振動台実験により行うことが多い。しかし擬似動の実験以外の静的実験は載荷パスを仮定すること、振動台実験は試験体が小さくなるという弱点を持つ。擬似動の実験は構造物の動的解析と静的実験を組み合わせた実験方法で、構造物の動的な応答を擬似的に得ることができる有効な手段である。二方向加力の擬似動の実験を行った例¹⁾は他にもあるが、本実験の特徴は実物に近い試験体及び復動型オイルジャッキ²⁾を用いたことである。

本論では水平二方向地震力を受ける曲げ降伏型RC柱の損傷挙動を調べるため、模擬地震波を地震入力レベルを3段階に分けて一方向及び二方向に入力させて擬似動の実験を行い、それぞれの損傷状態を比較した。また1995兵庫県南部地震(神戸海洋気象台)で記録された地震波を同試験体に入力した実験も行い、その損傷度を検討した。さらにそれぞれの地震波毎に計測したひび割れ量を数値化し、ひび割れ量による損傷評価を試みた。

2.1 試験体

本実験ではカンティレバー型、同断面の試験体(図-1)を3体用いて地震波をパラメータとし、軸力は941kN(一定)とした。試験体の断面は40×40cm、加力点高さは100cm、せん断スパン比は2.5である。使用したコンクリートの実験日の圧縮強度は3体とも約24MPa、主筋の降伏強度は392MPa、引張強度556MPa、横補強筋の降伏強度は377MPa、引張強度524MPaである。主筋は12-D16(引張鉄筋比0.49%)、横補強筋はD10、ピッチ60mm、口型配筋(帯筋比0.6%、溶接閉鎖型)とした。

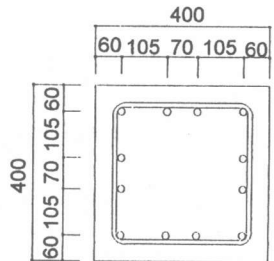


図-1 試験体断面

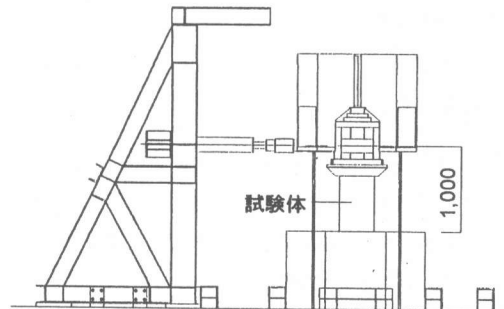


図-2 実験装置

2. 擬似動の実験

- *1 (株) 山下設計 構造オフィス (正会員)
- *2 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助手
- *3 東北大学工学部災害制御センター 助手
- *4 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 教授 (正会員)

2.2 実験システム

実験システムは、復動型オイルジャッキ、油圧ポンプ、ジャッキ制御用コントローラ、デジタル多点測定装置、コンピュータ2台から成り立っている(図-3)。コンピュータは、コントローラにターゲットとなる変位を計算してその値を送りこむなど実験全体のコントロールをするものと、変位計や歪ゲージなどのデータを取り込むためのものである。加力方法は、各ステップにつきNS方向、EW方向同時に加力を開始し、増分変位が小さい方は先にターゲット(絶対変位)に達し、ホールド状態となり、その変位を維持する。他方がターゲットに達し、両方向がホールド状態になった時点で、データを計測した。

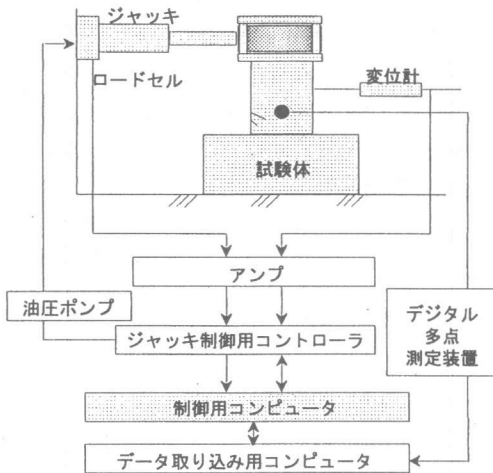


図-3 実験システム

2.3 数値解析アルゴリズム

想定構造物を2自由度1質点系でモデル化すると振動方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r_x \\ r_y \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{Bmatrix}$$

m : 質量 c : 減衰定数 r_x, r_y : 復元力

x_g, y_g : 地動加速度

本実験で用いた数値積分は、Newmark- β 法の $\beta = 0$ (陽的積分法)で、モデルの重量は274kN(初期固有周期約0.2秒)とした。既往の実験によると本実験システムの摩擦減衰は3~4%であるので本実験における減衰定数は0%とした。実

験の時間刻みは0.01秒とした。数値積分において部材の復元力をモデル化することなくロードセルより計測された復元力を直接用いることが擬似的実験の特徴である。

2.4 入力地震波

本実験ではEl Centroの地震波の位相特性を元に作成した模擬地震波と1995兵庫県南部地震の際神戸海洋気象台で記録された地震波(以下、神戸)の波を用いた。模擬地震波は入力レベルを3段階に分けた。(以下、模擬レベル1,2,3)表-1に試験体パラメータ及び入力地震波の最大加速度を示し、図-4に模擬地震波の加速度応答スペクトル($h=0.04$)と加速度波形を示す。なお、模擬レベル3は模擬レベル2の波を2倍したものである。

表-1 試験体パラメータ

試験体名	加力方向	入力地震波	最大加速度 (cm/s ²)
PSD-R1	一方向	模擬レベル1	245
		模擬レベル2	374
		模擬レベル3	747
PSD-R2	二方向	模擬レベル1	NS 245 EW 213
		模擬レベル2	NS 374 EW 386
		模擬レベル3	NS 747 EW 773
PSD-R3	二方向	神戸	NS 818 EW 617

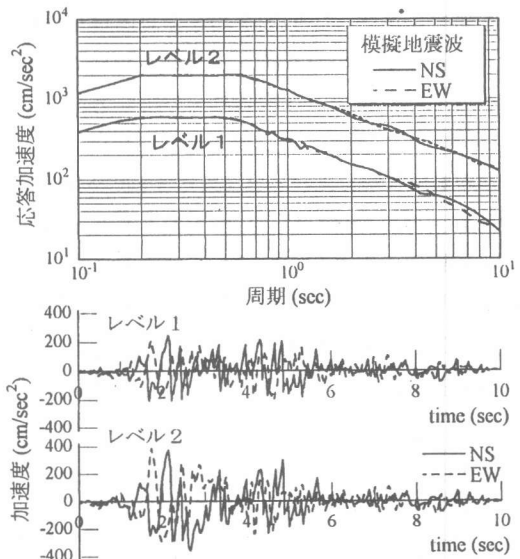


図-4 模擬地震波の加速度応答スペクトル及び加速度時刻歴

3. 実験結果

3.1 二方向载荷の影響

表-2 に最大応答変位と最大耐力を示す。応答変位は柱脚から高さ 60cm の位置で計測した値である。PSD-R1 (一方向加力, 模擬地震波) と PSD-R2 (二方向加力, 模擬地震波) の応答変位時刻歴を図-5 に、荷重-変位関係を図-6 に、各地震波入力終了時のひび割れ状況 (南面) を図-7 に、応答変位のオービットを図-8 に示す。図-6 では二方向加力の荷重-変位関係はNS成分のみ示し、図-8 では応答変位が大きかった 1.5~3.0sec の範囲のみ示す。

入力レベル1 では最大部材角は一方向加力の場合 1/415、二方向加力の場合 1/345 で両試験体とも少しひび割れが生じ剛性が低下したがほぼ弾性状態であった。

入力レベル2 では最大部材角は一方向加力の場合 1/185、二方向加力の場合 1/175 であった。両試験体とも最大耐力には至っていない。荷重-変形関係で二方向加力の場合紡錘型のループを描いており、二方向加力の方が履歴減衰が大きかったといえる。最大値、ひび割れ状態に関しては大きな差は見られない。

入力レベル3 では最大部材角は一方向加力の場合 1/50、二方向加力の場合 1/20 であった。二方向加力時は一方向加力時の最大耐力に達する前に降伏曲面に達し、その後は部材の隅角部にひび割れ・剥落が急激に生じ、それに伴い耐力が低下し、また変形が進むといった現象が 2.2 秒付近の応答から顕著に見ることができた。二方向加力の南側 (S) の降伏耐力は一方向加力時の約 75% であった。

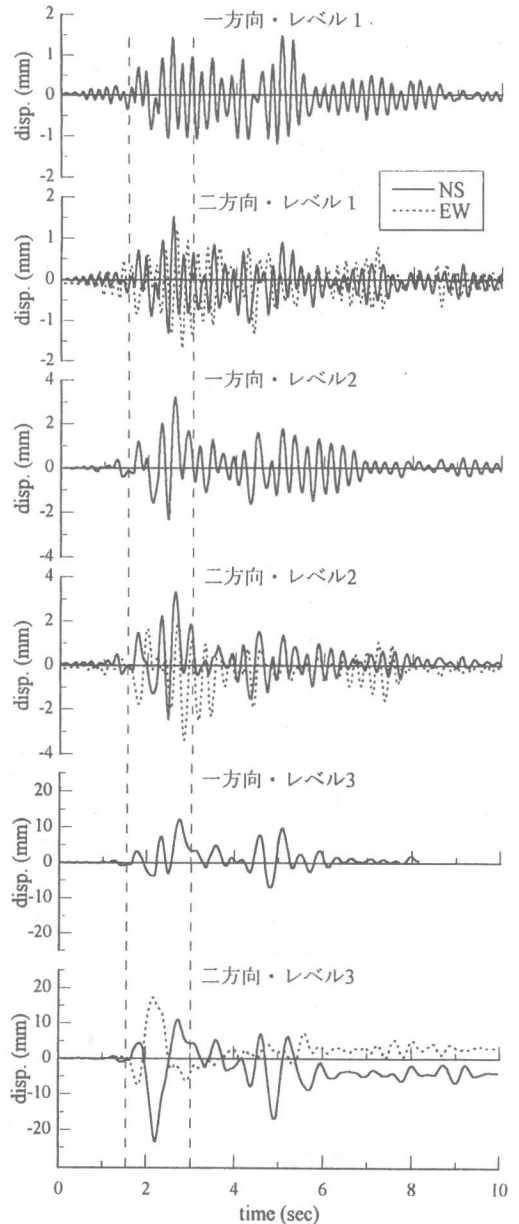


図-5 応答変位時刻歴

表-2 最大応答変位、部材角と最大耐力

試験体名	入力地震波	最大応答変位 (mm)				最大応答部材角	最大耐力 (tonf)			
		N	S	E	W		N	S	E	W
PSD-R1	模擬レベル1	1.44	1.22	-	-	1/415	16.70	13.81	-	-
	模擬レベル2	3.24	2.30	-	-	1/185	22.64	19.06	-	-
	模擬レベル3	12.25	6.96	-	-	1/50	29.34	27.97	-	-
PSD-R2	模擬レベル1	1.52	1.29	1.29	1.60	1/345	16.15	13.90	13.68	15.40
	模擬レベル2	3.27	3.27	2.11	3.23	1/175	21.53	18.72	17.36	21.25
	模擬レベル3	11.13	11.13	17.37	7.47	1/20	26.25	20.14	25.62	23.65
PSD-R3	神戸	13.46	8.74	5.86	9.53	1/40	27.62	27.53	24.40	20.39

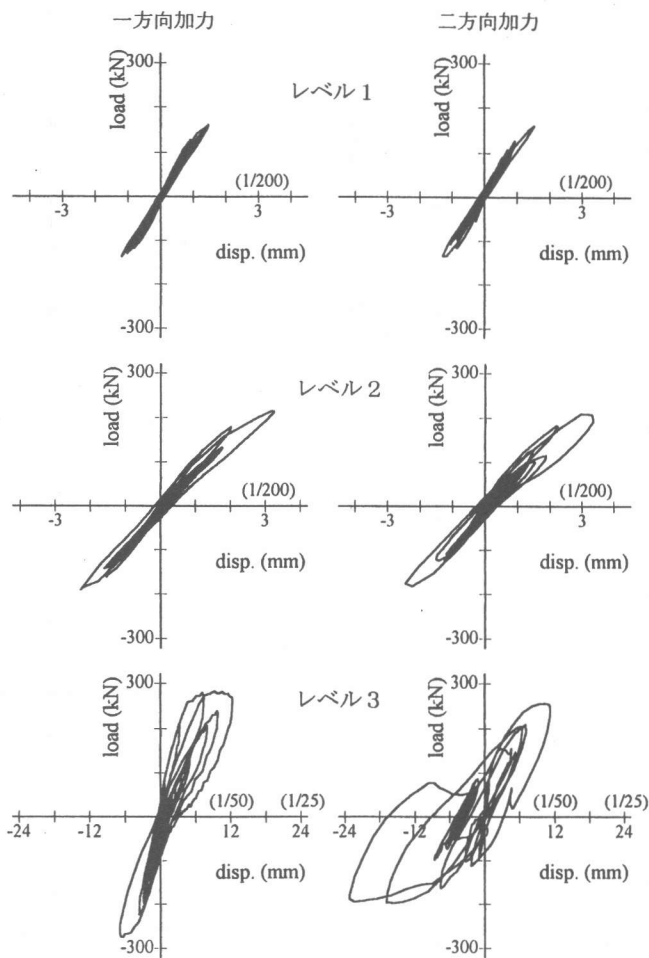


図-6 荷重-変位関係 (NS方向)

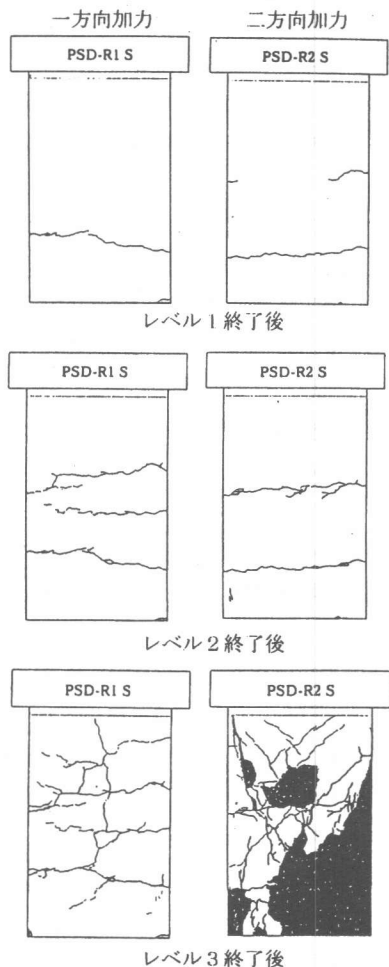


図-7 ひび割れ・剥落状況 (南面)

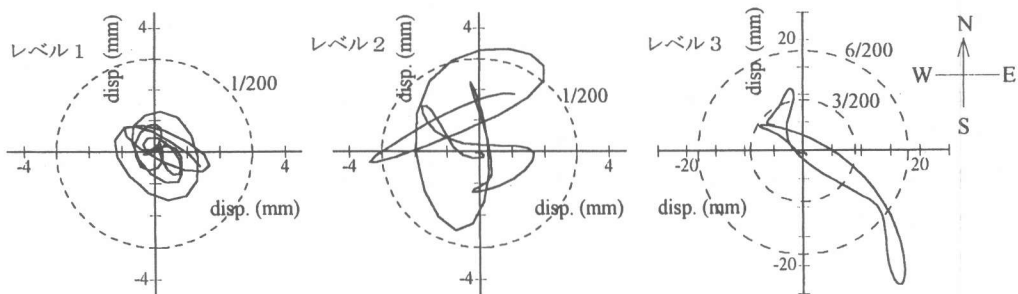


図-8 応答変位オービット (1.5~3.0sec)

ひび割れ・剥落状況についてはレベル1, 2では両試験体に大きな差は見られない。レベル3でのひび割れ・剥落状況を比較すると、二方向加力では2.0秒付近で既に圧壊が生じているが、一方方向加力では5.0秒付近まで圧壊は生じない。二方向加力では2.5秒付近で南面の約25%が、5.3秒

付近では約40%が剥落してしまっているが、一方方向加力では最後まで剥落はほとんど生じない。

3.2 神戸地震による損傷

PSD-R3 (二方向加力, 神戸地震震波) の応答変位時刻歴を図-9、荷重変位関係を図-10に、パル

ゼンウインドウを用いて平滑化した伝達関数を図-11に、応答変位オービットを図-12に、ひび割れ状況(南面、西面)を図-13に示す。

最初にひび割れが生じた時の部材角は $1/660$ であった。入力地震波の約 2.3 秒付近(図-12①)では、部材角が $1/175$ であり、その時の応答波形の軌跡は、NW 方向に斜め一方向型に近い軌跡を描いている。ES 方向でひび割れが生じ、NW 方向に圧壊が生じた。入力地震波約 3.1 秒付近(図-12②)では、剛性が低下した NW 方向に外力が入力され、応答変位が進み、部材角 $1/80$ に至りこの時点で降伏に達した。またここでの軌跡は面積を持つ紡錘形になっている。5.0~6.0 秒では、NS 方向で大きな加速度が入力され、NS 方向の応答は大きい、この時間帯では EW 方向が大きな応答をせず一方向型に近い軌跡を描いている。入力地震波約 6.4 秒付近(図-12③)での応答は軌跡が円形型をしており、最大応答値は NS 13.41 (mm)、EW -9.48 (mm) であり、部材角 $1/40$ であった。

伝達関数(図-11)からは初期周期の 0.2sec 付近に NS, EW ともピークが確認できる。NS 方向では特別なピークが見られず時刻歴全体を通して段階的に剛性が低下したようである。

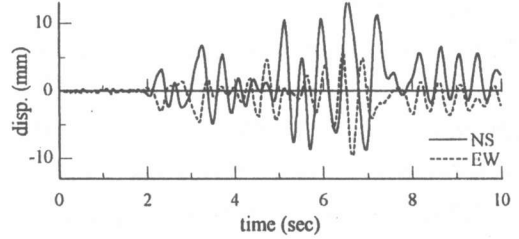


図-9 応答変位時刻歴

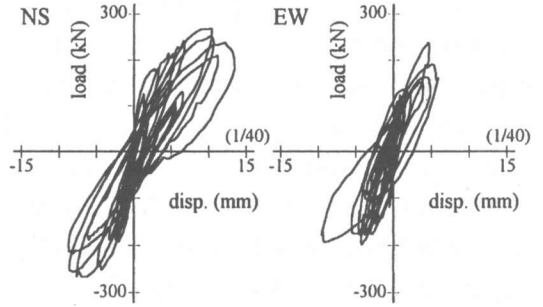


図-10 荷重-変位関係

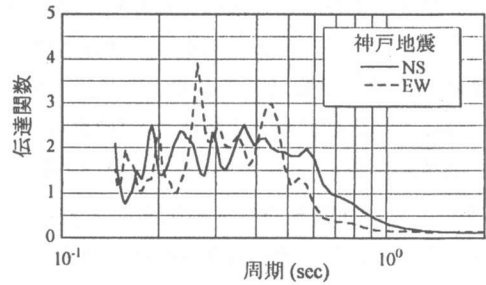


図-11 伝達関数

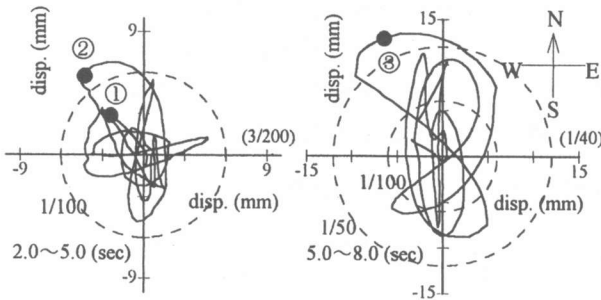


図-12 応答変位オービット

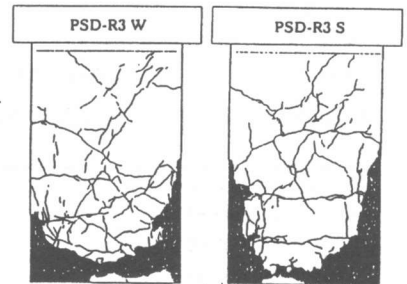


図-13 ひび割れ・剥落状況(終了後)

3.3 ひび割れ量による損傷評価

ひび割れ状況は試験体柱の南面及び西面で載荷中常時観測して、ひび割れが入り次第マークし、あるステップでアクリル板に写しとり、その図から数値化したひび割れ量を求めた。本研究では試験体のそれぞれの面で高さ 40cm (柱

幅)に入るひび割れ長さの総計を柱幅で除して基準化したものをひび割れ量と定義する。剥落が生じた部分の亀裂量は剥落が生じる前の亀裂量とした。図-14にひび割れ量(西面と南面の平均)と最大経験部材角関係図を示す。横軸の最大経験部材角は二方向加力の場合にはベクトル

合成したものである。

図-14 より 3/200 程度までは、一方向加力・二方向加力及び入力地震波に関わらずほぼ同一直線上にのっており、ひび割れ量は部材の変形量に依存しており、被害を受けた部材の変形がどの程度生じたのか推測がつくと考えられる。

しかし、本研究では復動型オイルジャッキで変位を拘束した状態でひび割れを測定しており、荷重が除荷された後（被害を受けた後の部材の状態）目視できるひび割れ量で評価ができていないという課題が残った。

また、部材角 3/200 程度からひび割れ量にばらつきが出てくる。この原因は変形が大きくなるにつれ隅角部付着割裂による縦ひび割れが生じるようになることであると思われる。（一方向の場合は圧縮による亀裂は圧縮面下部のカバーコンクリートが浮くような感じになり付着割裂は起こりにくい、二方向の場合は隅角部付着割裂による縦ひび割れが数多く生じる。）つまり引張によるひび割れと圧縮によるひび割れ（特に隅角部付着割裂ひび割れによるひび割れ量は多い）という性質の異なる亀裂をまとめて評価したため、部材角 3/200 以降は亀裂量のばらつきが多くなったと思われる。

4. まとめ

1. 最大耐力に達する以前の構造物の振動は、一方向加力、二方向加力を比較して時刻歴応答

変位全体にわたって概ね一致した。またひび割れ状況にも二軸載荷の影響はほとんどない。しかし、降伏域に入ると部材の損傷過程において2方向の相互作用の影響がでており、二方向加力の損傷が激しくなり、一方向とは異なる応答をすることを確認した。

2. 本実験で用いたモデルでは神戸地震を入力したときNW方向が早い段階で塑性化した。その後はNS方向で大きな変形が目立った。

3. 本実験の限りではあるが部材角が小さい範囲（部材角 3/200 程度まで）ではひび割れ量と最大経験部材角の間には比例関係が成り立っていた。しかし、本研究では部材のある面に生じた全てのひび割れを測定しているの、被害後の部材の状態では測定できないひび割れも評価していること、圧縮によるひび割れが生じるとばらつきが多くなるなどの課題が残った。

参考文献

- 1) 岡田恒男、関松太郎、朴永周、岡田健良: 2方向地震入力に対する鉄筋コンクリート建物の応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.1883-1886, 1977.10
- 2) 五十嵐秀一、赤沢隆士、中島正愛、岩井哲、坂口理: 準静的ジャッキを用いたオンライン応答実験(その1)オンライン応答実験システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1169-1172, 1994.9

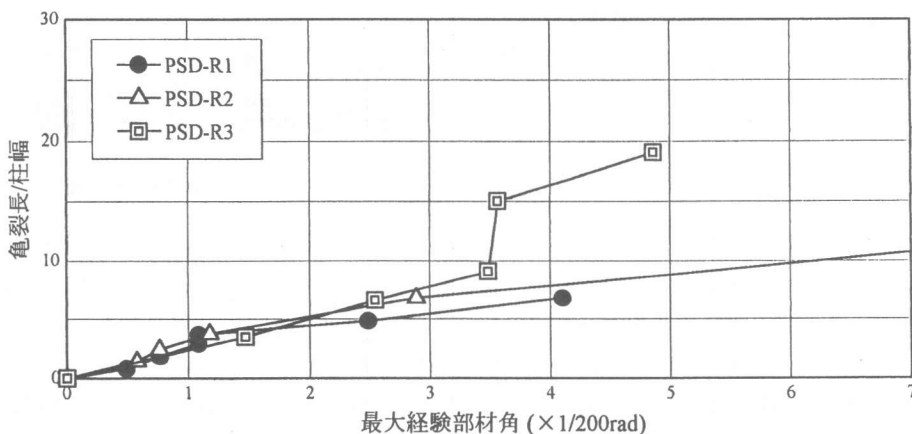


図-14 ひび割れ量・最大経験部材角関係