

論文

[2056] 2方向入力を受ける鉄筋コンクリート造柱の実験的研究

正会員 安達 洋 (日本大学海洋建築工学科)

同 上 中西 三和 (日本大学海洋建築工学科)

同 上 北嶋 圭二 (日大大学院、青木建設研究所)

同 上 〇小泉 達也 (日大大学院)

1. はじめに

本論文は、2軸曲げ・せん断応力を受ける鉄筋コンクリート造柱(以後RC柱)の動的な挙動を把握する為に行った、2方向振動台実験並びに2方向静的載荷実験についてまとめたものである。これまでの実験[1][2]では、試験体の断面寸法(8cm×8cm)に対して比較的太径の主筋(4-D6)を用いたために1方向入力で曲げ破壊を起こしたものが、2方向同時入力の場合には付着割裂破壊を起こし、破壊モードに変化が見られた。本実験では試験体の縮尺比にほぼ即した主筋とコンクリートを用いて作製した曲げ破壊型のRC柱によって、2主軸各1方向入力、同時2方向入力の振動台実験を行った。また、試験体の基本的な部材性能や、破壊経過を調べるために静的載荷実験もあわせて行った。試験体のせん断補強筋には、口型及び囲型の帯筋(中子筋挿入)を用い、その効果についても検討を行った。

表1 調合表

設計強度 (kg/cm ²)	W/C (%)	単位重量 (kg/cm ³)			細骨材率* $\frac{S}{S+G}$ (%)
		セメント	水	骨材	
210	65	318	207	1449	60

* S : 粒径が1.2mm未満の砂
G : " 5.0mm以下、1.2mm以上の砂

表2 コンクリートの材料諸元

圧縮強度 (kg/cm ²)	圧縮歪 (μ)	ヤング係数 (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)
230	1970	1.72×10^5	24.5

2. 実験概要

2.1 使用材料

コンクリートは、圧縮強度(210kg/cm²)・割裂強度(1.8 $\sqrt{\sigma_b}$ = 26kg/cm²)・ヤング係数(2.1 $\times 10^5$ kg/cm²)を目標値と定め、調合設計を行った。表1にコンクリートの調合表を表2にコンクリートの材料試験結果を示す。コンクリートは、普通ポルトランドセメント、骨材に土木学会の標準粒度分布[3]に適合した砂を用い、粒径が5mm以下1.2mm以上の粒度の砂を粗骨材としてみなし、調整することによって目標値を得た。主筋には、冷間加工ののち焼き入れ焼きなまし加工を行ったD3の異形鉄筋[4]を使用した。D3鉄筋の形状及び寸法を表3に示す。鉄筋の材料試験結果を表4に示す。主筋(D3)は、明瞭な降伏現象を示した。

2.2 試験体

試験体形状を図1に、試験体の構造諸元を表5

表3 D3鉄筋の形状及び寸法

r	l _n	h	a	b
1.43	1.38	0.175	0.45	0.53

単位:(mm)

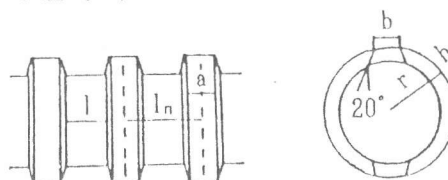


表4 鉄筋の材料諸元

D3			1.3 ϕ
降伏強度 (kg/cm ²)	降伏歪 (μ)	ヤング係数 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)
2911	1471	1.97×10^6	3442

に示す。試験体は実物の約1/9の模型とした。柱の断面寸法は8cm×8cm、主筋は12-D3 ($P_g=1.33\%$)、せん断補強筋は $1.3\phi-\textcircled{10}$ ($P_w=0.33\%$, $P_w=0.66\%$)、シアスパン比は2.0とした。

2.3 実験装置

振動台実験は、実地震波の各1方向及び同時2方向入力が再現可能な水平2軸振動台を用いて行った。

静的載荷実験は、試験体の頂部にオイルジャッキを水平2方向に設置し、変位制御による加力を行った。両実験とも、1質点2自由度のモデルを想定した。

2.4 入力地震波及び載荷則

振動台実験及び静的載荷実験を行った試験体名を表6に示す。なお、名称末尾のNは囲型のせん断補強筋を施した試験体である。実験は、振動台実験が6体、静的載荷実験が6体の合計12体に対して行った。振動台実験で用いた入力地震波諸元を表7に示す。入力地震波は1968年十勝沖地震(八戸港湾)NS、EW各成分の加速度を原波形の3倍とし、弾塑性レベルでNS方向に675gal、EW方向に549galに補正した。1方向入力を行った試験体をDX-12, DX-12N, DY-12, DY-12N、2方向入力を行った試験体を、DXY-12, DXY-12Nとする。入力波の時間軸は相似則にしたがって試験体の縮尺率1/9から1/3に圧縮した。

静的載荷実験では、振動台実験で得られた応答変位と同経路の変位履歴を与えた試験体をSY-12, SY-12N, SXY-12、1方向繰返し載荷を行った試験体をSY-12C、図2に示す様な四つ葉型の2方向繰返し載荷を行った試験体をSXY-4D, SXY-4DNとした。SY-12C, SXY-4D, SXY-4DNの繰返し載荷則を表8に示す。四つ葉載荷では、図2に示す

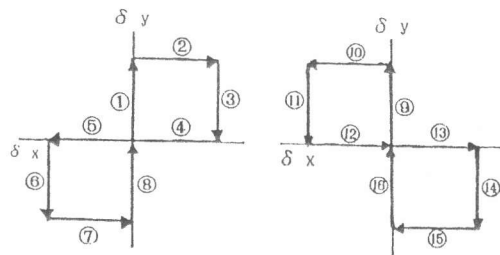


図2 変位履歴

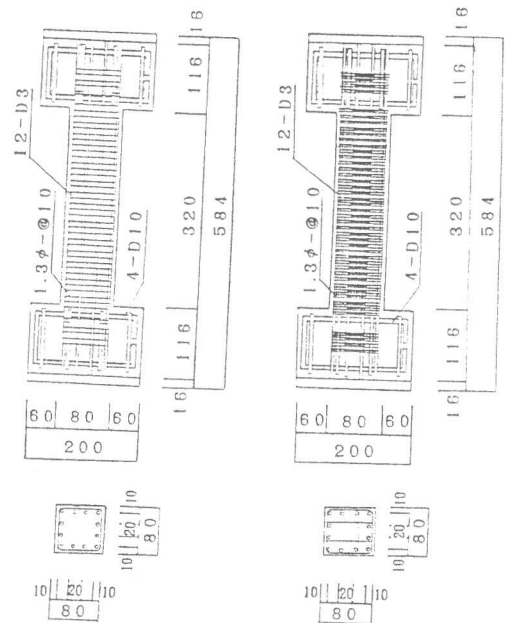


図1 試験体形状

表5 試験体の構造諸元

主筋		帯筋		シアパン比	軸力比
n-D	$P_g(\%)$	$\phi-\textcircled{\hspace{0.5em}}$	$P_w(\%)$	M/QD	N/BDFc
12-D3	1.33	2- ϕ 1.3- $\textcircled{10}$	0.33	2.0	0.14
12-D3	1.33	4- ϕ 1.3- $\textcircled{10}$	0.66	2.0	0.14

表6 試験体名

振動台実験		静的載荷実験	
試験体名	入力地震波成分	試験体名	加力方法
DX-12	NS成分	SY-12C	漸増繰返し
DY-12	EW成分	SY-12	DY-12応答変位
DXY-12	NS-EW成分	SY-12N	DY-12N応答変位
DX-12N	NS成分	SXY-12	DXY-12応答変位
DY-12N	EW成分	SXY-4D	四葉型載荷
DXY-12N	NS-EW成分	SXY-4DN	四葉型載荷

表7 入力地震波諸元

試験体名	入力地震波	
DX-12 DX-12N	1968年 十勝沖地震(八戸港湾)	NS成分 675gal
DY-12 DY-12N		EW成分 549gal
DXY-12 DXY-12N		NS-EW成分 675-549gal

表8 載荷則

サイクル数	部材角
1 (2)	1/500 (0.64mm)
2 (2)	1/200 (1.6mm)
2 (2)	1/100 (3.2mm)
2 (2)	1/75 (4.27mm)
2 (2)	1/50 (6.4mm)
2 (2)	1/30 (10.7mm)
1 (2)	1/20 (16.0mm)

①～④、⑤～⑧の変位経路を経験して1サイクルとすると⑨～⑫、⑬～⑯の経路を完了すると2サイクルの繰り返し載荷を行ったことになる。表8のカッコ内のサイクル数はこれに相応する。なお、SY-12Nに関しては、応答変位と同経路の載荷を終了後（SY-12N1と呼ぶ）、部材角1/100以後の繰り返し載荷を表8の部材角について各1回行い（SY-12N2と呼ぶ）、基本的な部材性能の確認とSY-12Cとの比較を行った。

3. 振動台実験結果

3. 1 破壊状況

破壊が最も進んだ東側側面の破壊状況を図3に示す。1方向入力では曲げひび割れ発生程度の損傷にとどまっているが、2方向入力では柱頭及び柱脚にかなりの範囲でコンクリートの圧壊が起こり、とくに中子筋のないものは各面とも圧壊が激しく、主筋や帯筋が露出し、主筋も座屈している。

3. 2 応答履歴曲線

DX-12の変位の軌跡を図4に、せん断力の軌跡を図5に示す。なお、DX-12NについてはSXY-12とほぼ同様の結果であった。実験では、質点の前後に配置したピンサポートによって軸力が変動する。図5の破線は、実測された軸力の最大値（軸力比 $N/BDF_c \approx 0.4$ ）に近い釣合軸力比での軸力（5632kg）を用いファイバー法[5]により求めた各試験体の耐力曲線である。図4より、試験体の挙動は主に南東－北西の方向であったことがわかる。また、図5よりDX-12、DX-12N共に、せん断力の軌跡は北西方向で耐力曲線に平行に動いており耐力の限界であることがわかる。

1方向入力時（DY-12, DY-12N）と

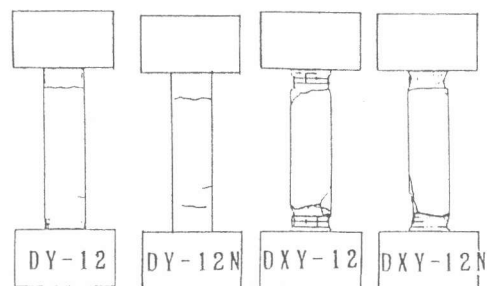


図3 東側最終破壊図

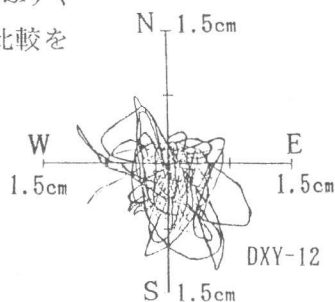


図4 変位の軌跡

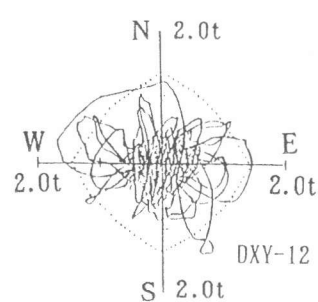


図5 せん断力の軌跡

表9 最大応答値

試験体名	DX-12	DY-12	DXY-12	
方角	NS	EW	NS	EW
最大入力加速度 (gal)	608	624	589	520
最大応答加速度 (gal)	770	793	633	754
最大応答変位 (mm)	4.11	7.26	12.22	10.84
最大せん断力 (kg)	1640	1749	1381	1673

試験体名	DX-12N	DY-12N	DXY-12N	
方角	NS	EW	NS	EW
最大入力加速度 (gal)	667	406	584	---
最大応答加速度 (gal)	679	578	697	761
最大応答変位 (mm)	2.58	3.05	9.17	7.37
最大せん断力 (kg)	1301	1272	1528	1718

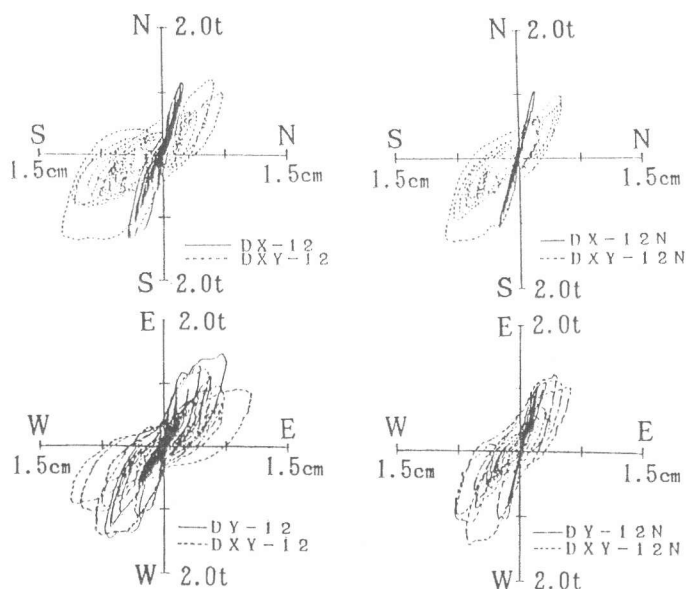


図6 応答履歴曲線

2方向入力時 (DXY-12, DXY-12N) のNS,EW各方向の最大応答値を表9に、応答履歴曲線を図6に示す。表9より2方向入力によって、各方向とも応答変位が増大することがわかる。また、図6より、2方向入力を受ける試験体は耐力低下が著しいことがわかる。中子筋の影響は、1方向入力時では応答変位を抑える効果があるのに対し、2方向入力時では1方向入力時ほど効果が見られない。

3.3 周期特性

各試験体のEW方向の時刻歴応答変位を図7に示す。2方向入力時には入力初期の段階で大きな応答を受け、試験体の動きの卓越したE側へ変形が残留した。

DY-12, DXY-12 (EW成分) の入力加速度に対する応答加速度の伝達関数を図8に、入力波のEW成分のフーリエスペクトラム[6]を図9に示す。なお、図8には試験体の弾性剛性より求めた弾性固有周期 (13.9Hz) をあわせて示す。両図より、2方向入力時の卓越周期は、1方向入力時より長周期化し、入力波の卓越周期に近づいているのがわかる。このことが、2方向入力時の応答値は増大し、破壊が進行した原因の1つと考えられる。

4. 静的載荷実験結果

4.1 破壊経過

最終破壊図を図10に示す。各試験体の破壊経過は、次の通りであった。

SY-12, SY-12N1, SXY-12: 1方向加力のSY-12, SY-12N1では、柱頭・柱脚に曲げひび割れが発生した程度であるが、SY-12で主筋の降伏も観測された。これらのひび割れの発生状況は、振動台実験結果に比べひび割れが明瞭であり、ひび割れ本数も若干多い。1方、2方向加力のSXY-12では曲げひび割れ発生後、主筋降伏、コンクリートの圧壊が生じ最終的にはかぶり部分の剥落

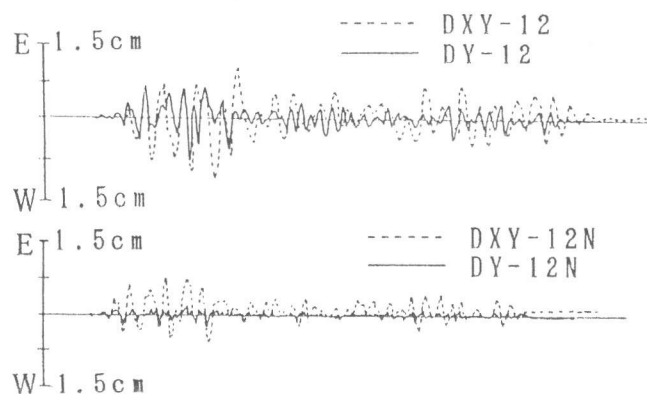


図7 時刻歴応答変位

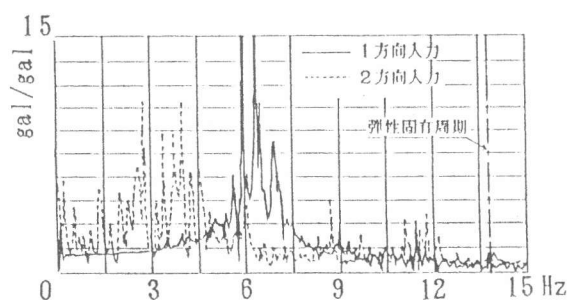


図8 伝達関数

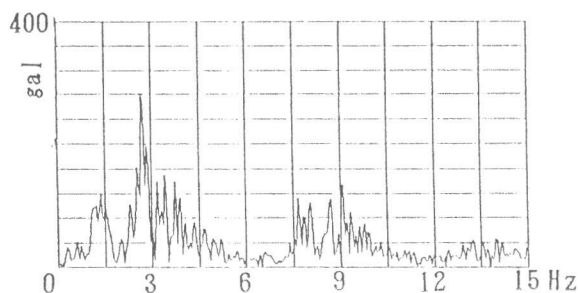


図9 入力波のフーリエスペクトラム

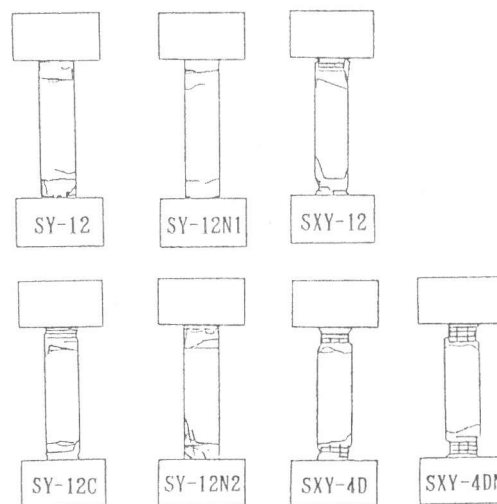


図10 東側最終破壊図

が起こり、主筋が露出するほどの破壊を起こした。この最終破壊状況は振動台実験結果と同様である。

SY-12C, SY-12N2, SXY-4D, SXY-4DN: いずれの試験体とも、上述の破壊経過と同様である。最終的には中子筋の無いSY-12Cは、コア部分のコンクリートにも明瞭な破壊が認められ、軸力の保持が不可能となった。一方、中子筋のあるSY-12Nでは圧壊がかなり顕著ではあったものの、コア・コンクリートは健全であり軸力を保持していた。また、四つ葉载荷を行った両試験体では、破壊面が全面にわたるため、全方向で圧壊、剝離が激しく、中子筋の無いSXY-4Dでは主筋の座屈がみられた。

4. 2 セン断力の軌跡

SXY-12, SXY-4D, SXY-4DNのせん断力の軌跡を図11に示す。SXY-12のせん断力の軌跡は振動台実験と類似し、耐力曲線上を沿う様な動きを示した。また、SXY-4D, SXY-4DNでは最初に荷重経路をたどる北側のせん断力は、耐力曲線より大きめであるが、各方向の荷重経路を経験している南側では、耐力曲線の内で挙動している。

4. 3 荷重-変位関係

SY-12, SY-12N1, SXY-12: 各試験体の荷重-変位曲線を図12に、最大せん断力及び、最大せん断力時の変形量を表10に示した。各試験体とも荷重-変位曲線は、振動台実験の応答履歴曲線と比較すると、履歴ループの膨らみはやや大きく最大耐力は若干下回った。この最大耐力の差は、振動台実験ではひずみ速度の影響による材料の強度上昇により、部材の最大耐力が上昇した為と考えられる。

SY-12C, SY-12N2, SXY-4D, SXY-4DN: 漸増変位繰返し载荷を行った各試験体の荷重-変位曲線を図13に、表11に主軸方向の最大せん断力とその変形を示した。ただし、SY-12Nの実線は応答変位と同経路の载荷部分で点線はその後の漸増载荷部分である。

2方向载荷を行った各試験体は、1方

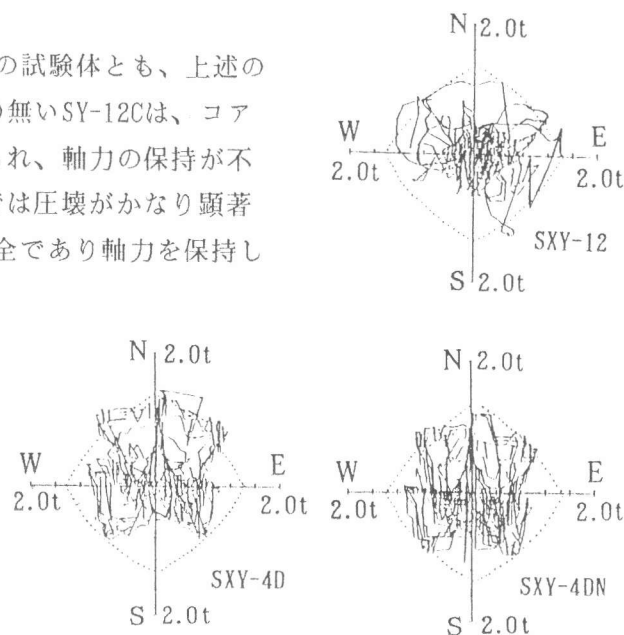


図11 セン断力の軌跡

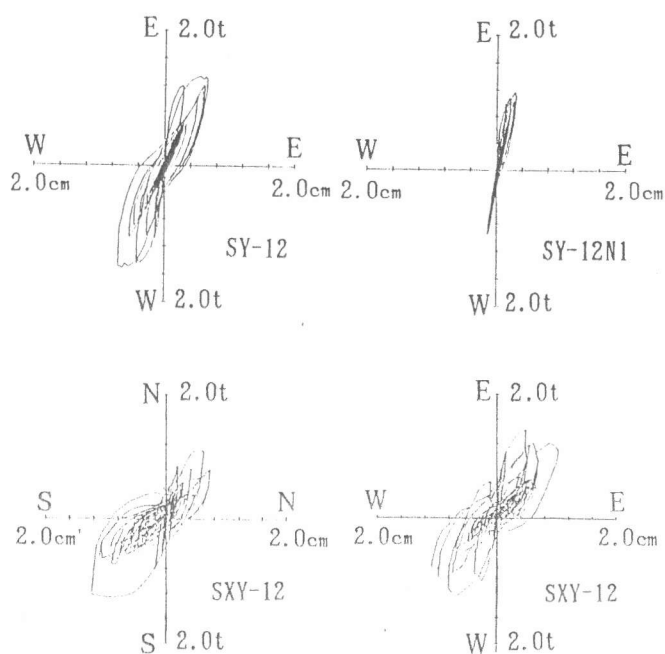


図12 荷重-変位曲線

表10 最大せん断力

試験体名	SY-12	SY-12N	SXY-12	
方角	W	E	S	E
最大せん断力(kg)	1528	1128	1269	1422
同上 変位(mm)	7.64	3.36	8.58	4.82

向载荷を行った各試験体に比べ各主軸方向とも最大せん断力が下回った。また、口型配筋の試験体と囲型配筋の試験体の比較においても、最大耐力以後の耐力低下に若干の差がみられた。

4. まとめ

2方向入力を受けるRC柱の振動台実験と、振動台の履歴を追跡した静的载荷実験、及び繰り返し载荷を行った静的载荷実験より次の様な知見を得た。

- 振動台実験より、2方向入力時では部材の固有周期は伸びる。
- 2方向入力の影響により、部材は耐力低下や剛性低下を生じ、塑性化は進む。
- 2方向入力時にはかぶりコンクリートの剥落や、鉄筋の降伏が顕著である。
- 静的载荷実験を行うことにより、振動台実験での試験体の破壊経過を明確にした。
- せん断補強筋量の違いによる影響は、振動台実験ではあまり現れないが、静的载荷実験では破壊が進行した後のコア・コンクリートの軸力保持能力に違いが現れた。

謝辞

本研究を行うに当たり、鉄筋を提供して頂いた鹿島建設(株)技術研究所 村山八州雄氏、コンクリートの材料提供並びに試験体製作にご協力いただいた藤沢薬品工業(株)の各位に感謝致します。

参考文献

- [1] 安達 洋、中西 三和也：2方向入力を受けるRC柱の応答性状に関する研究
日本コンクリート工学年次論文報告集 1990 PP.131-136
- [2] 安達 洋、中西 三和也：2方向入力を受けるRC柱の応答性状に関する研究
(その3. 静的実験概要及び実験結果) 日本建築学会大会学術講演梗概集 1990 PP.879-880
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書解説
- [4] 村山他：RC構造物の縮小実験に関する基礎的研究 鹿島建設技術研究年報 1982
- [5] 梅村 魁 編著：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続(中層編) 技報堂出版
- [6] 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門 鹿島出版会 1976

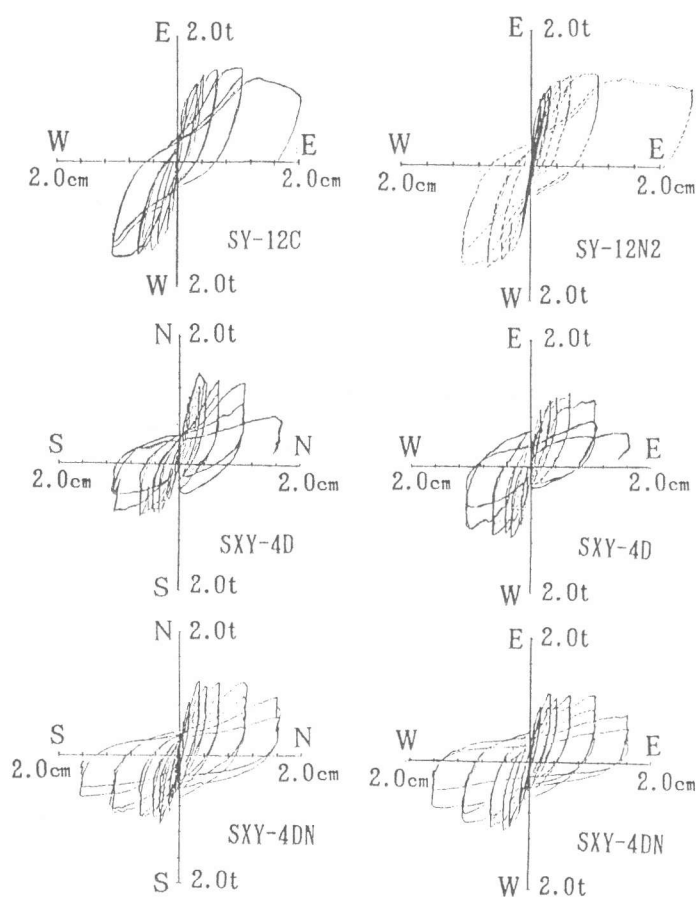


図13 荷重-変位曲線

表11 最大せん断力

試験体名	SY-12C	SY-12N	SXY-4D		SXY-4DN	
方角	W	W	N	E	N	E
最大せん断力(kg)	1550	1488	1430	1172	1200	1119
同上 変位(mm)	8.82	6.28	3.20	6.49	3.19	3.02