

論文

[2107] 二軸応力を受ける鉄筋コンクリート造長方形断面柱の弾塑性挙動

野木村敦史*¹・北嶋圭二*²・中西三和*³・安達洋*⁴

1. はじめに

2軸曲げ応力を受ける鉄筋コンクリート造(以後RC造)柱の力学的性状を調べるための実験的あるいは解析的研究が数多く行われている。しかし、研究の対象とする柱は正方形断面で各方向等配筋を有するものが大半で、各方向の耐力や剛性が異なる長方形断面柱の力学的性状やそれが応答性状に及ぼす影響について調べた研究は少ない。筆者等はこれまで正方形断面のRC造柱を対象に静的載荷実験と振動台実験を実施し、同時に詳細な解析的検討を行い、2軸応力下におけるRC造柱の基本的性能や応答性状について調べてきた[1]。

本研究では、これら正方形断面のRC造柱で得られた成果をもとに、長方形断面を有するRC造柱に対し、ファイバー法を用いた静的2軸曲げ弾塑性解析と地震応答解析を行い、その基本的な断面性能、部材性能および応答性状の詳細な把握を目的とする。

2. 解析概要

2.1 解析対象

解析対象とした長方形断面のRC造柱は、これまで実施してきた振動台実験の試験体と関連を持たせた検討を行うために8cm角の正方形断面を基準として決定した。図1に解析対象とした正方形断面柱と長方形断面柱の断面形状、寸法及び配筋を示した。長方形断面柱は、短辺を正方形断面の1辺とし、長辺がその2倍の長さを持つ断面とした。従って短辺方向と長辺方向の曲げ

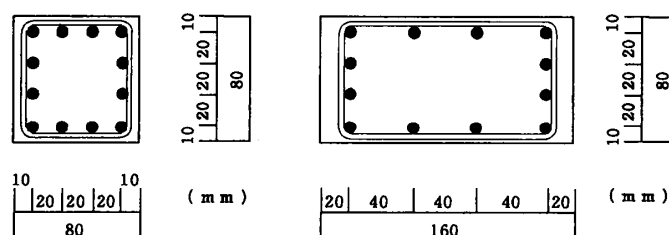


図1 断面形状および配筋

表1 解析モデル構造緒元

	解析モデル 寸法(mm) b×D×h	シスポン比 M/QD	主筋 (Pg[%])	材料強度(kgf/cm ²)	
				コンクリート	鉄筋
正方形	80×80×480	3.0	12-D3 (1.48)	210	2800 (降伏強度)
長方形	80×160×480	3.0(弱軸) 1.5(強軸)	12-D3 (0.74)		

b: 柱の断面の幅 D: 柱の断面せい h: 柱の高さ

剛性比は1:4となる。また、部材解析と地震応答解析上の柱の材長は振動台実験の試験体と同じ48cmとした。部材寸法、および使用材料等の構造諸元を表1に示した。解析に際して、部材端の回転は拘束されているとする。すなわち、水平変形時の変形状態は、上下逆対称となる。

2.2 解析手法

2軸静的弾塑性解析においては、一次元有限要素法によるファイバー法(分割要素法)を使用

*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻、 (正会員)

*2 (株)青木建設 技術本部研究所建築研究室研究員、工修 (正会員)

*3 日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科、 工博 (正会員)

*4 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科、 工博 (正会員)

した。図2に部材の材軸方向および断面の分割方法を示す。この解析法は、平面保持の仮定が成立することを前提としており、各要素は剛性が一定の一次元材とする。各要素の応力-ひずみ関係は、非線形な構成則に従い、コンクリートにはエントカニク理論[2]を、鉄筋にはCiampiのモデル[3]を用いた。

また部材のねじれ変形は生じないものとし、主筋の抜け出しや付着すべりの影響は無視した。せん断変形については線形せん断バネ($K_s = G \cdot A / \kappa \cdot h$, $\kappa = 1.2$)を水平2方向に独立に配置することにより考慮した。2方向弾塑性地震応答解析法は、Newmark- β 法($\beta = 0$)による応答計算と、静的2軸曲げ弾塑性解析による部材復元力の評価を組み合わせたものである[4]。応答解析は図3に示すように1質点2自由度系のモデルとして行った。

2.3 解析変数

静的弾塑性解析(断面解析および部材解析)および地震応答解析の解析諸元を表2、表3に示す。**断面解析:** 種々の方向の断面性能を把握するために、長方形断面の強軸($\theta = 0^\circ$)から弱軸($\theta = 90^\circ$)の方向(正方形断面では強軸・弱軸の区別はない)へ 15° 刻みで傾け、各方向ごとに単調に曲率を増加させ、最大の曲げモーメントを求める解析を行った。この際、正方形断面では、振動台実験で試験体に負荷した質点の重さ2390kgが一定の軸力(軸力比 $\eta = N/bDF_c = 0.18$)として作用するものとしている。長方形断面では軸力比が正方形断面と同じになるよう一定の軸力(4780kgf)を負荷した。また、長方形断面柱については、軸力の影響を調べるために軸力比 η を0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8と変動した解析も行った。**部材解析:** 断面性能が部材挙動に及ぼす影響を調べるために、長方形断面柱に対し、表4に示す強軸、弱軸それぞれの

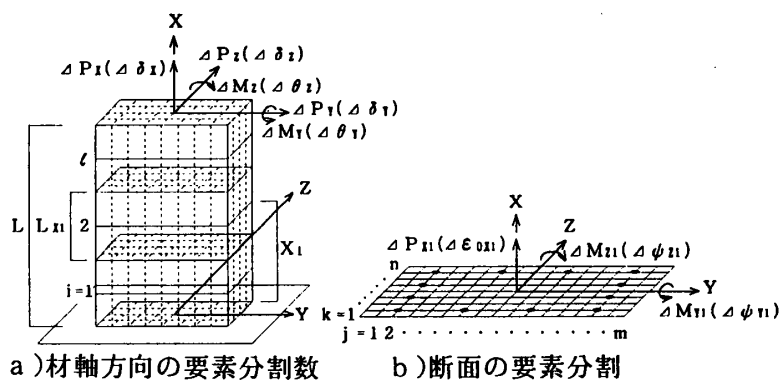


図2 柱の要素分割

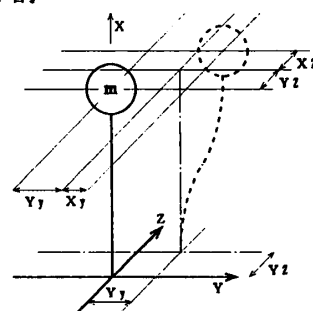


図3 応答解析モデル

表2 静的解析諸元

	形状	制御変位方向および方法	軸力($\eta = N/bDF_c$)
断面解析	長方形断面		(0.0)
			(0.2)
			(0.4)
			(0.6)
部材解析	正方形断面	1方向解析	(0.8)
		四つ葉解析	2390kgf
	長方形断面	1方向解析	強軸
		四つ葉解析	弱軸
			4780kgf

表3 応答解析諸元

入力方向	波の成分	入力倍率	質量 ($\text{kg} \cdot \text{S}^2 / \text{cm}$)	弾性固有振動数 (Hz)
1方向強軸	NS	0.8	4.88	8.8 (弱軸)
1方向弱軸	EW	0.95		
2方向	弱軸	1.1		15.9 (強軸)
	強軸	1.3		

るよう一定の軸力(4780kgf)を負荷した。また、長方形断面柱については、軸力の影響を調べるために軸力比 η を0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8と変動した解析も行った。**部材解析:** 断面性能が部材挙動に及ぼす影響を調べるために、長方形断面柱に対し、表4に示す強軸、弱軸それぞれの

方向への一方向繰り返しと四つ葉の変位経路を漸増的に与える部材解析を行った。いずれの場合とも、部材角 $\pm 1/500$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ で1サイクルずつ繰り返すものとしている。

地震応答解析： 長方形断面柱について弱軸および強軸方向への1方向入力と2方向入力の解析を行った。入力地震波は、1968年十勝沖地震(八戸港湾)のNS、EW方向の加速度記録を用い、NS成分を弱軸にEW方向を強軸に入力した。最大入力加速度の大きさは弱軸が降伏するレベル(原波形の0.8倍)を基準として、その入力倍率を0.95, 1.1, 1.3と変化させた。1.1倍の入力倍率は強軸も降伏するレベルの加速度である。

3. 静的2軸曲げ解析結果

3.1 断面解析結果

正方形断面と長方形断面の各方向で求めたそれぞれの最大モーメントを直線で結んだ2軸曲げ相関曲線を図4に示した。図中の破線は長方形断面柱の各方向に曲率を増分させた時の曲げモーメントの軌跡を示している。正方形断面柱では、与えられた曲率の方向と曲げモーメントの作用方向が一致するのに対し、長方形断面柱では、それらの方向が一致しない。この現象は図5に示した弾性範囲内に対する変形と断面力の作用方向の関係を表した概念図によって説明できる。すなわち、与えた変形の方法を 45° とした場合、弱軸・強軸に投影した変形量は等しくなるが、各方向に対する剛性比が1:4と異なるため、その合力の方向は剛性の高い強軸側に傾くことを示している。図6に軸力と2軸曲げの耐力相関曲線を示した。軸力比 η (N/bDF_c) = 0.4で弱軸、強軸ともに最大曲げモーメントを示している。図の太線は変位制御方向75度時の各軸力比に対する最大曲げモーメントを直線で結ん

表4 静的部材解析変位経路

1方向解析 (弱軸)	1方向解析 (強軸)	四つ葉解析

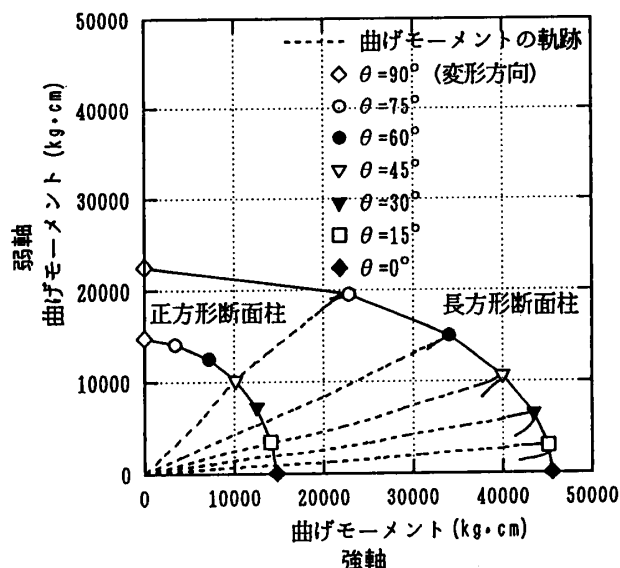


図4 2軸曲げ相関曲線

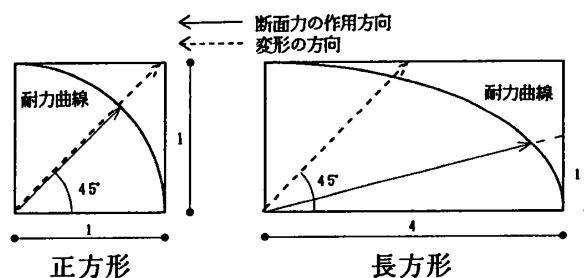


図5 変形と断面力作用方向の概念図

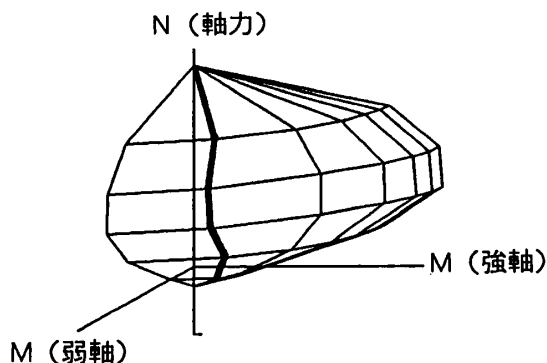


図6 3軸の耐力相関曲線

だものである。軸力の大きさによって、弱軸・強軸方向の最大曲げモーメントの比率が変化することがわかる。

3.2 部材解析結果

長方形断面柱の静的1方向解析と四つ葉解析のせん断力と変位の関係を図7に示す。部材の弱軸方向(NS)と強軸方向(EW)の剛性の比は各方向に独立な線形せん断バネを配置しているので、前節で述べた曲げ剛性比(1:4)より低下し、約(1:3)となっている。1方向、四つ葉解析結果では、弱軸(NS)、強軸(EW)ともに部材角1/200のサイクルで最大耐力近傍に達し、最大耐力比は、1:1.9である。また、1方向に比べ、四つ葉解析では履歴曲線の面積が大きくなる。これは変位経路に依存する性質である。すなわち強軸方向に最大のせん断力を経験したサイクルを例にとれば、最大耐力後その変形を保持した状態で弱軸側の変形を進めるため強軸側では耐力の低減が起こることによる。図8(a)に四つ葉解析のせん断力の軌跡を示した。図8(b), (c)には、部材角1/500、1/200のサイクルでのせん断力の軌跡を抽出して示した。図中の点線は、前節の断面解析で求めた2軸曲げ相関曲線をせん断力に換算した耐力曲線である。長方形断面柱に対して四つ葉型の変位軌跡を与えるとせん断力の軌跡は図8(b)のように各方向の剛性比に対応して強軸側に細長くなる。図8(c)では、四つ葉経路によりほぼ柱の耐力曲線に沿った挙動が得られることが確認できる。

4. 地震応答解析結果

本章では、長方形断面柱の1方向入力時と2方向入力時の弾塑性地震応答解析結果から最大応答値、応答履歴曲線、応答変位・応答せん断力の軌跡、および時刻歴応答変位を比較、検討した。

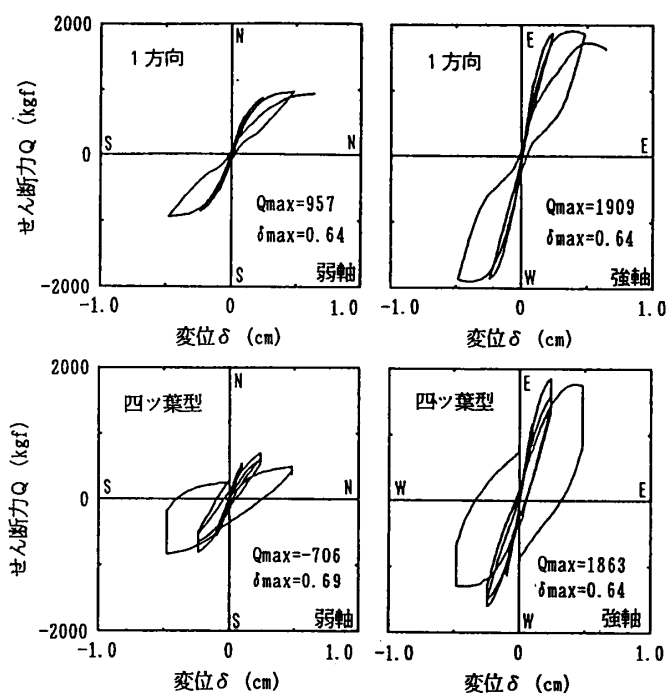


図7 せん断力と変位の関係

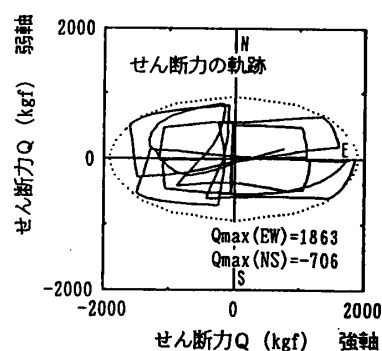


図8(a) せん断力の軌跡

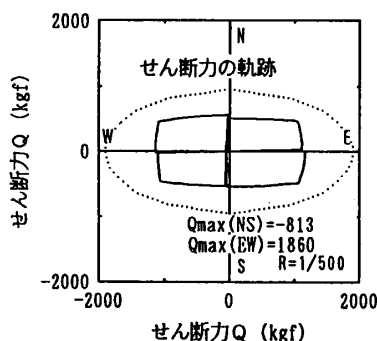


図8(b) せん断力の軌跡
1/500のサイクル

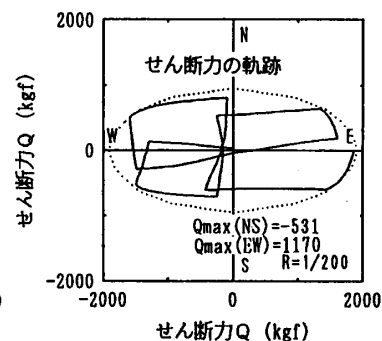


図8(c) せん断力の軌跡
1/200のサイクル

4.1 最大値の比較

各入力レベルにおける1方向入力時と2方向入力時の最大応答値を表5に、最大応答値と入力倍率の関係を図9に示す。図中に示した破線は、入力倍率に対応した応答値の上昇率を表している。図より、2方向入力時の弱軸および強軸方向の最大応答せん断力は、1方向入力時より低下するが、最大応答変位は、入力倍率0.8の強軸方向を除いて1方向入力時より増加していることがわかる。また、強軸方向の1方向解析では、入力倍率1.3で急激な応答変位の増大が起こったのに対し2方向解析では0.95で応答変位の増加が見られる。

4.2 応答履歴曲線、応答変位・応答せん断力の軌跡および時刻歴応答変位の比較

入力倍率0.95の時の1方向解析と2方向解析で得られた弱軸および強軸方向の応答履歴曲線を図10に、応答変位と応答せん断力の軌跡を図11、図12にそれぞれ示す。まず、1方向入力時と2方向入力時の応答履歴曲線を比較する。弱軸方向では、2方向入力時の最大応答変位は1方向入力時より小さな応答せん断力で生じる。これは、正方形断面柱に対する振動台実験結果と類似した挙動である[1]。また、1方向入力時と2方向入力時の履歴形状は類似している。これは応答変位の軌跡からわかるように、今回の解析では応答変位が弱軸方向に卓越したためと思われる。一方、強軸方向は、1方向入力時では塑性化がそ

表5 最大応答値

入力倍率	入力方向	せん断力 Q (kgf)		変位 δ (cm)	
		強軸	弱軸	強軸	弱軸
0.8	1方向	1832	972	0.21	0.43
	2方向	1637	915	0.20	0.53
0.95	1方向	1934	998	0.26	0.61
	2方向	1770	934	0.36	0.71
1.1	1方向	1993	998	0.30	0.76
	2方向	1869	895	0.52	0.89
1.3	1方向	2019	994	0.52	0.94
	2方向	1948	846	0.79	1.09

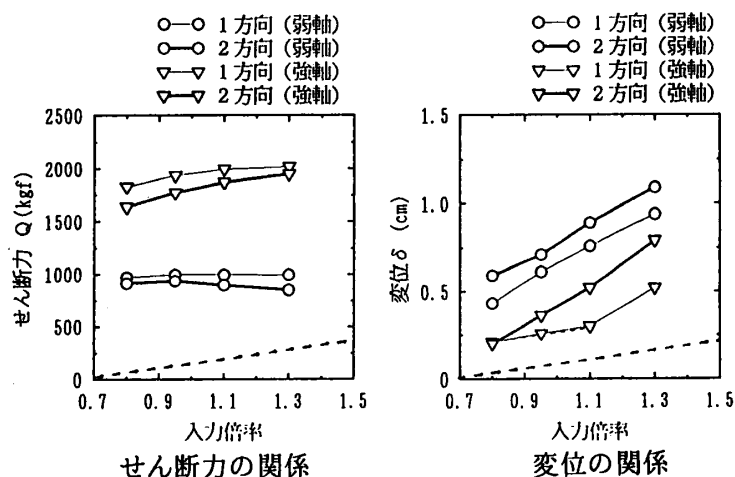


図9 最大応答値と入力倍率の関係

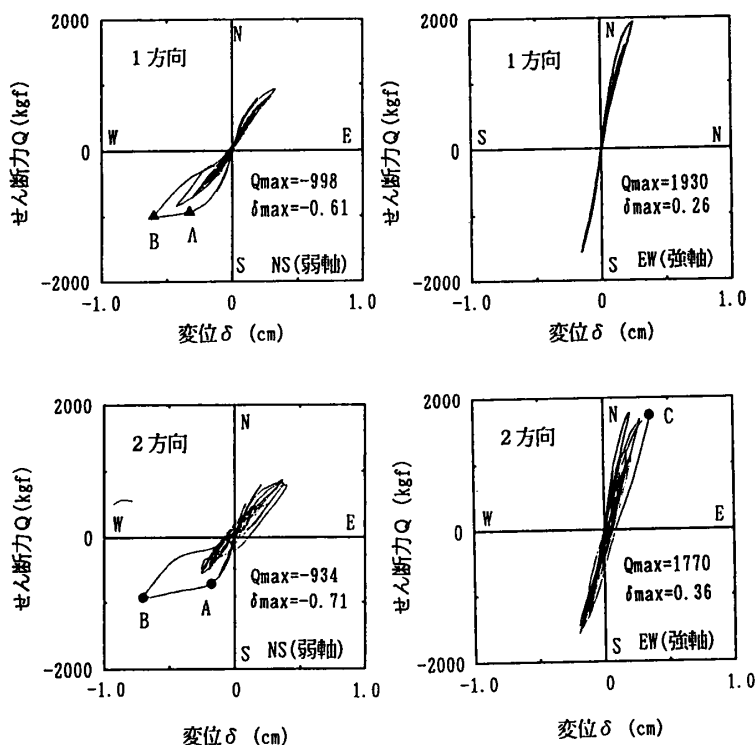


図10 応答履歴曲線

れほど進んでいないのに対して、2方向入力時では剛性が低下し、ループにも膨らみが生じている。次に、2方向解析で得られた応答変位、応答せん断力の軌跡から、応答変位は弱軸方向に卓越しているのに対し、応答せん断力の軌跡は耐力曲線内にほぼ一様に挙動していることがわかる。これは、静的解析で示したように長方形断面柱の場合は、弱軸と強軸の剛性が異なっていることに起因した現象といえる。すなわち、強軸方向では小さな変形でも応答せん断力が上昇することによる。

弱軸および強軸方向の時刻歴応答変位を、1方向解析と2方向解析で比較して図13に示す。応答履歴曲線、応答変位・応答せん断力の軌跡、および時刻歴応答変位の各図中に示したA、B、C点はそれぞれ同一時間の点である。A点までは弱軸、強軸ともに2方向入力の影響は現れておらず、1方向、2方向入力時とも同じ挙動を示している。A点での応答変位の角度に対し、剛性比の影響により応答せん断力は強軸方向に傾き、耐力曲線に達し、応答せん断力が頭打ちとなるため応答変位が増大し、最大変位(B点)に至るが、せん断力の軌跡は、耐力曲線に沿う挙動を示す。B点以降、弱軸、強軸方向ともに周期が伸びている。強軸方向では、B点での弱軸方向の塑性化の影響により剛性が低下し、C点以降の応答値が1方向入力時より増加している。

5. まとめ

以上の結果より長方形断面柱に対し以下の知見を得た。

1) 断面解析では、強軸あるいは弱軸から、ある角度を持った方向に曲率を増分した場合両軸の剛性比が異なるため、その変形の方角と曲げモーメントの作用方向に差が生ずる。

2) 部材解析では、1軸(1方向)と2軸(四つ葉)応力を受けた場合の部材挙動の違いを示した。

3) 地震応答解析では1方向入力に比較して2方向入力時に応答値が増大する理由を応答結果より示した。

参考文献

- [1]北嶋圭二、安達洋、中西三和「2方向入力を受ける鉄筋コンクリート造柱の振動台実験」日本建築学会構造系論文集 第445号 1994.1
- [2]Bazant, Z.P. et al., Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete, Proc. of the ASCE Vol.102, No EM4 August, 1976
- [3]Ciampi V. et al., Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars under Generalized Excitation, Report No.UCB/EERC-82/23. University of California, Berkeley, Nov/1982
- [4]小泉達也 北嶋圭二 中西三和 安達洋「2方向入力を受ける曲げ破壊型鉄筋コンクリート柱の応答性状に関する研究」コンクリート工学年次論文報告集, vol.14, No.2, 1992

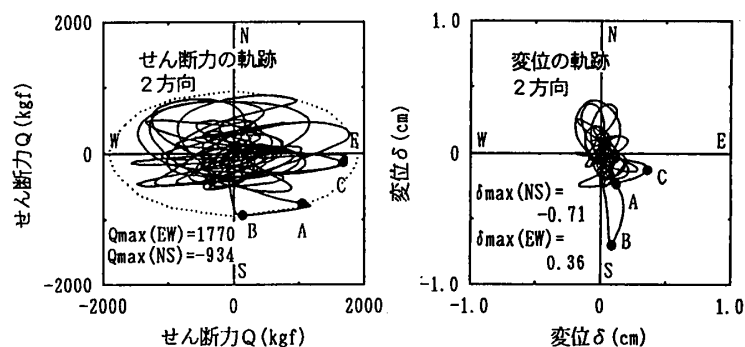


図1.1 応答変位の軌跡 図1.2 応答せん断力の軌跡

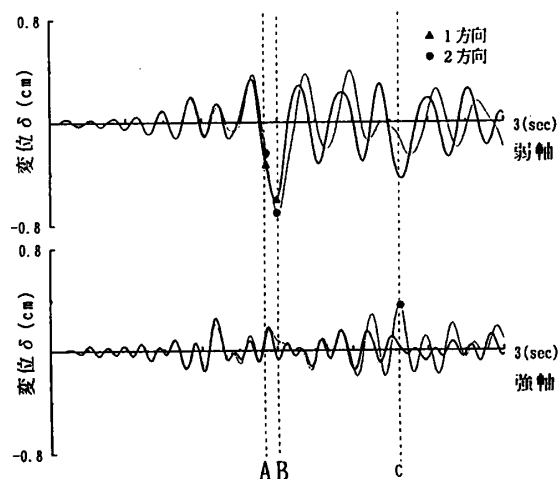


図1.3 時刻歴応答変位