

基礎地盤の動特性の等価 2 質点系置換モデル (その 2)

——応答計算例——

安井 讓 宮本 明倫
(本社 技術本部 原子力部)

白浜 健二
(本社 技術本部 原子力部)

Equivalent Two-Mass Model for Dynamic Ground Stiffness Functions (Part 2)

——Dynamic Response Analysis——

Yuzuru Yasui Akinori Miyamoto
Kenji Shirahama

Abstract

Dynamic stiffness functions of a foundation obtained from elastic half-space theory are dependent on frequencies. In the preceding work¹⁾ one of the authors proposed an equivalent two-mass model simulating those dynamic stiffness functions, and showed the validity of this method. In this report the authors confirm again the validity of this method by a dynamic response analysis of the elastic interaction system on a typical nuclear power reactor building. Moreover, taking advantage of the feature that the two-mass model is constituted of constant parameters, a dynamic analysis of an interaction system in which the superstructure is elastoplastic is conducted.

概 要

半無限弾性波動理論解より求められた基礎の並進と回転振動に関するばね係数と地下逸散減衰を表わす粘性減衰係数は振動数に依存して変化する。前報¹⁾ではこれらの係数で表わされる動特性と等価な特性を持つ定数係数からなる 2 質点系モデルを提案した。前報では、更にこの等価 2 質点系置換モデルを組み込んだ建物—基礎—地盤連成系モデルの複素固有値計算を行ない本方法の妥当性を示した。本報告はこれらの成果を踏まえ、典型的な原子炉建家を選んで動的応答計算を行ない本方法の妥当性の再確認を行なう。また等価 2 質点系を組み込んだ連成系モデルは定数係数からなる質点系モデルであり、上部構造物の非線形性を考慮した応答計算も従来の時系列応答計算法を用いて計算することができる。本報告では、これについても示すこととする。

1. 序

原子炉建家のように地盤に比べてその剛性が大きい場合、基礎および地盤との相互作用の効果を考慮する必要がある。ところで、基礎の並進と回転に関するばね係数と地下逸散減衰に由来する粘性減衰係数は振動数に依存して変化する。前報¹⁾ではこの相互作用係数で表される基礎地盤の動特性を定数係数からなる 2 質点系モデルで置換する方法を提案した。前報では更に本等価置換モデルを取り入れた建物—基礎—地盤連成系モデルの複素固有値計算を行ない、その結果を正解値と比較することによりこの方法の妥当性を確認した。前報で提案した等価 2 質点系置換モデルの特長は次のようである。即ち従来の等価 1 質点系置換モデルと比較し、より高い振動数まで適用可能であること、振動モデル自体は定数係数で表現できるため従来用いられている時系列の応答解析が利

用できること、更に上部構造の弾塑性を考慮した応答解析も可能であること等の特長を有している。本報告では、等価 2 質点系置換モデルを用いて建物—基礎—地盤連成系の地震応答解析を行ない本法の妥当性を再確認するとともに、相互作用の効果が上部建物の弾塑性応答に及ぼす影響を検討する。検討に際し、半無限弾性波動理論解より得られる基礎地盤動特性を考慮したモデルの他に、複素定数で表わされる地盤ばねを用いた従来型定数ばねモデルの応答解析を実施し、これらの応答結果を相互に比較した。

なお解析対象建物として原子炉建家を考えた。

2. 解析モデルとその条件

2.1. 対象建物と地盤

PWR 型 4 ループ 110 万 kW 級原子力発電所原子炉建家を解析の対象とする。PWR 型原子炉建家の上部構造は、

ふつう原子炉格納容器 (PCCV), 内部コンクリート (I/C) および外周建家 (EXB) で構成される。これらの建家は基礎盤で1体となりその上部は各々独立した構造体となる。剛体と仮定される基礎盤は、半径 $a=42\text{ m}$, 盤厚 $2s=8\text{ m}$ の円盤で半無限弾性体上に支持されるものとする。

半無限弾性体の諸定数は次のように仮定した。即ちS波速度 V_s を $1,000\text{ m/sec}$, ポアソン比 (ν) を $1/3$, 単位体積重量 γ を 2.6 t/m^3 とした。

2.2. 解析モデル

解析モデルとして、図-1に示す三つを考えた。三つのモデルは、基礎地盤の動特性のモデル化の方法に違いがある。即ち基礎に前報で提案した等価2質点系置換モデルを連結したもの (モデルA), 基礎に半無限弾性波動理論解²⁾により求められた並進ばね $K_x (k_1 + ia_0c_1)$ と回転ばね $K_\varphi (k_2 + ia_0c_2)$ を直接連結させたもの (モデルB) 材料減衰 h_x, h_φ を有する複素定数ばね $K_x (1 + i2h_x)$, $K_\varphi (1 + i2h_\varphi)$ を用いたもの (モデルC) の三つの場合である。ここに $k_i, c_i (i=1, 2)$ はそれぞれ動的ばね係数, 逸散粘性減衰係数と呼ばれるもので, 無次元化振動数 $a_0 (=a\omega/V_s)$ とポアソン比の関数となる。また K_x, K_φ はそれぞれ並進と回転に関する静的ばね定数である。これらのばね定数は, 地盤のせん断弾性係数を $G (= \rho V_s^2)$ とし, $K_x = 8Ga/(2-\nu)$, $K_\varphi = 8Ga^3/\{3(1-\nu)\}$ と表わせる。ちなみに本解析モデルの場合 $K_x = 5.34 \times 10^5\text{ t/m}$, $K_\varphi = 7.85 \times 10^{12}\text{ t}\cdot\text{cm}$ となる。

念のため図-2に等価2質点系置換モデルを用いたモデルAの基礎地盤系のモデル図を示し, 表-1に諸係数値を示した。更に図-3には半無限弾性理論解による k_i, c_i とこれらを模擬した等価2質点系置換モデルによる \bar{k}_i, \bar{c}_i の比較を示しておいた。横軸は無次元化振動数 a_0 である。

さて, 次に上部構造について概説する。上部構造は, 原子炉格納容器 (PCCV), 内部コンクリート (I/C) および外周建家 (EXB) からなる並列型の3本棒でモデル化する。これらの棒モデルは剛な円形基礎に接続される。また各々の棒モデルの各質点は曲げせん断変形するはり材で連結されるものとする。表-2にこれらの上部構造の諸元を示しておいた。

なお説明の都合上, Aモデルを等価2質点系置換モデル, Bモデルを振動数依存モデル, Cモデルを従来

型定数モデルと呼ぶこととする。

2.3. 減衰マトリックスの作成方法

部材別の材料減衰は次のように設定した。上部構造については, 内部コンクリートと外周建家に対して5%, 原子炉格納容器に対して3%をそれぞれ与えた。また基礎地盤系に与える減衰は次のように考えた。A, Bモデルの地盤自身の材料減衰は零とし, 地下逸散減衰に由来

K_{S1} (t/cm)	5.90×10^5
K_{S2} (t/cm)	56.18×10^5
C_{S1} (t·sec/cm)	1.443×10^4
C_{S2} (t·sec/cm)	12.963×10^4
M_{S1} (t)	3.83
M_{S2} (t)	18.67×10^5
K_{R1} (t·cm)	7.42×10^{12}
K_{R2} (t·cm)	0.83×10^{12}
K_{R3} (t·cm)	7.11×10^{12}
C_{R1} (t·cm·sec)	1.66×10^{11}
C_{R2} (t·cm·sec)	7.78×10^{10}
C_{R3} (t·cm·sec)	-0.33×10^{11}
I_{R1} (t·cm ²)	-1.304×10^{10}
I_{R2} (t·cm ²)	2.43×10^{12}

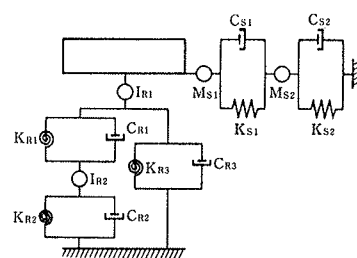


図-2 等価2質点系置換モデル

表-1 等価2質点系置換モデルの諸元

	節点名	W (ton)	A _s (m ²)	I (m ⁴)	E (t/cm ²)	ν
I/C	IC01	7000	102.0	1.15×10^4	230.	0.167
	IC02	5000	134.0	1.52×10^4		
	IC03	3000	147.0	1.74×10^4		
PCCV	PV01	1700	76.0	1.348×10^4	305.	0.167
	PV02	3000	76.0	2.924×10^4		
	PV03	3400	83.0	3.978×10^4		
	PV04	4700	90.0	4.42×10^4		
	PV05	3600	90.0	4.42×10^4		
	PV06	3600	90.0	4.42×10^4		
	PV07	3600	90.0	4.42×10^4		
	PV08	3600	90.0	4.42×10^4		
EXB	EX01	25000	460.0	26.8×10^4	230.	0.167
	EX02	30000	610.0	35.9×10^4		
基礎	W _H = 130,000 (ton) I _R = 6.0×10^{10} (t·cm ²)					

表-2 上部構造の諸元

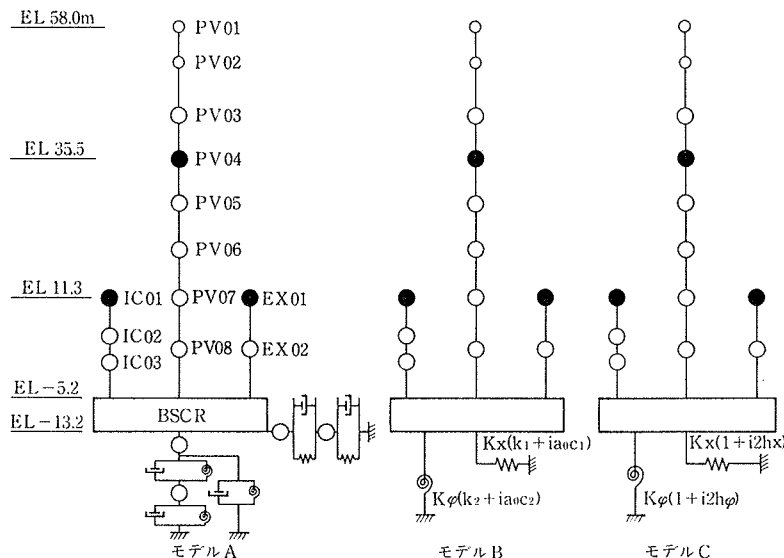


図-1 解析モデル

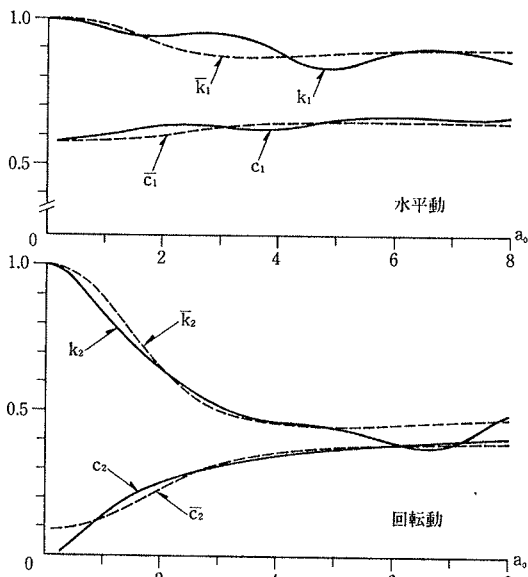


図-3 k_1, c_1 とその近似

する粘性減衰のみを考える。Cモデルの基礎地盤系の減衰は材料減衰型とし、通産省改良標準化委員会の提案値⁴⁾を参考にして、並進に対して $h_x=20\%$ 、回転に対して $h_\phi=7.5\%$ を与えた。上記のような部材別減衰をもとに全体系の減衰マトリックスは以下の要領で作成した。

最初にAモデルについて説明する。まず上部構造—基礎—地盤系の非減衰の場合の実固有値問題を解く。この場合、相互作用ばねは振動数依存性を考慮したことになる。その結果得られる固有モードと上部構造の材料減衰を用いて、歪エネルギー比例法⁵⁾によって各次のモード減衰を求める。これら各次のモード減衰から全体系の粘性減衰マトリックスを作成する。但しこの粘性減衰マトリックスは基礎地盤系の粘性減衰を零として求める。地下逸散減衰を考慮した全体系の粘性減衰マトリックスは、上記マトリックスに等価2質点系置換モデルの粘性減衰項を加えることによって得られる。

モデルBについてもAと同様で2段階に分けて作成する。但しモデルAの場合と較べて、モデルBの場合は、非減衰の固有値問題を解くとき基礎地盤系のばねは静的ばねを用いることが異なる。地下逸散減衰を考慮した全体系の粘性減衰マトリックスは、基礎地盤系の減衰を零として求めた減衰マトリックスに波動理論から得られる粘性減衰係数を加えることによって得られる。

モデルCについては次のようである。即ち上部構造—基礎—地盤系の非減衰の実固有値問題を解く。その結果得られる固有モードと、上部構造及び基礎地盤系の材料減衰を用いて得られる各次のモード減衰から全体系の粘性減衰マトリックスを作成する。このモデルの減衰マトリックスの作成方法はモデルA、Bに較べて、基礎地盤の減衰を上部構造の減衰と同等且つ同時に取り扱うこと

に特徴がある。

3. 弾性応答解析

本章では、モデルA、Bについて建家が弾性的場合の地震応答計算を行ない、これらの結果を比較することにより等価2質点系置換モデルの妥当性を確認する。更に参考のために従来型定数モデルCについての応答計算を行ないモデルA、Bの応答値と比較する。

入力地震動は、米国C.I.T.作成のELCENTRO波および、GOLDENGATE波を用い、入力最大加速度は300galに統一した。モデルA、Cについては時刻歴応答解析とし、数値積分刻みは、0.005秒とした。モデルBについては周波数応答解析とし、振動数刻み25/512Hzとした。この時入力地震動の記録時間15秒の後に零データを追加して継続時間が20.48秒の地震波とし、その地震波をフーリエ変換の計算に用いた。

3.1. 応答加速度波形とその最大値

A、Bモデルの主要質点(IC01, PV04, BSCR)の応答加速度波形を比較した例を図-4に示した。この図-4から、応答波形全般についてモデルAとモデルBは非常によく一致しており、等価2質点系置換モデルの妥当性が確認される。図-5にはモデルA、Cの主要質点の応答波形を比較したものである。これら二つのモデルの応答波形には、ピーク値及び波形に明瞭な差が見受けられる。

主要質点の最大加速度応答値を表-3に示した。AモデルのBモデルに対する差は、ELCENTRO波に比べ、

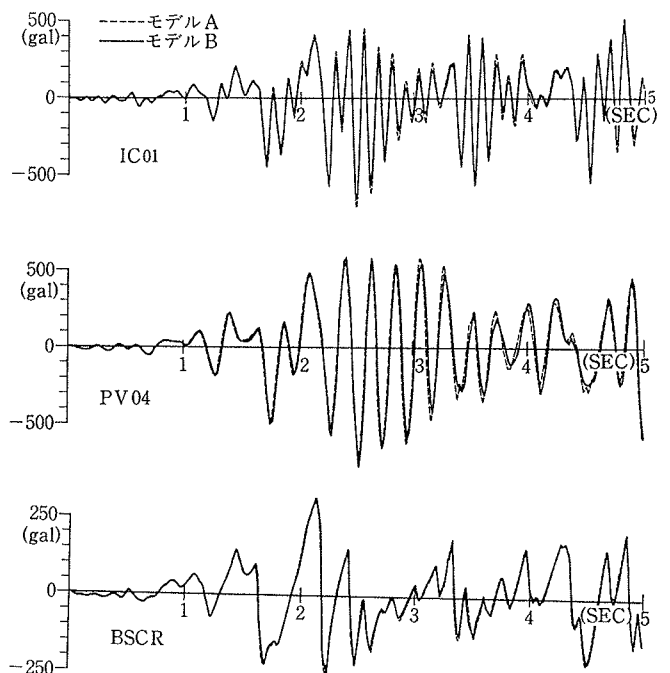


図-4 応答波形の比較 (Elcentro, 弾性)

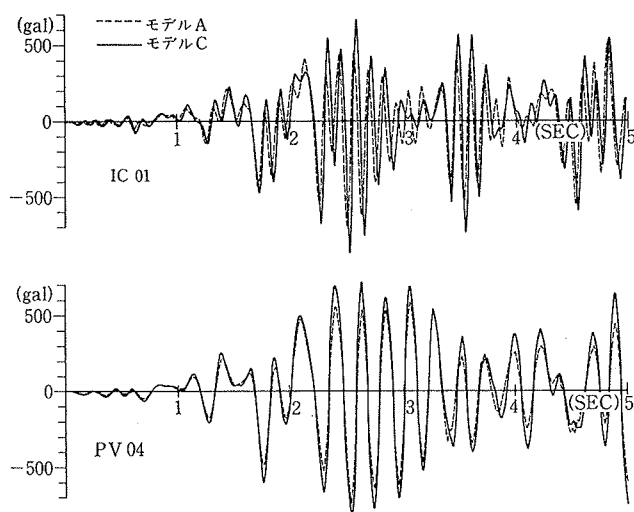


図-5 応答波形の比較 (Elcentro, 弾性)

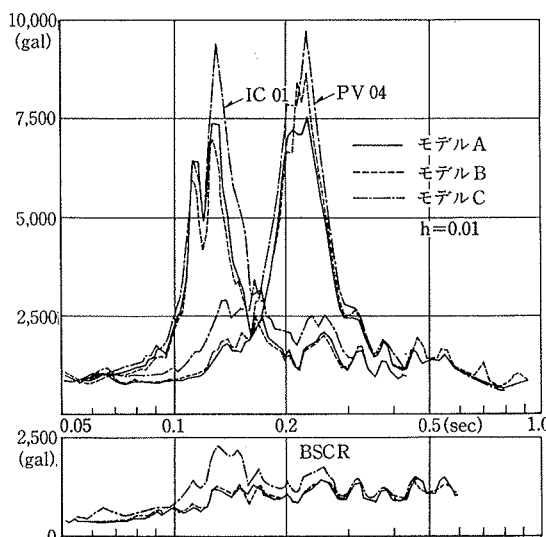


図-6 床応答スペクトルの比較 (Elcentro, 弾性)

Bのピーク値はモデルCに対し、短周期側に移行する。

4. 弾塑性応答解析

振動数依存型の基礎地盤動特性を考慮し、且つ上部構造の非線形性を考慮した連成系応答解析を実施した例は少ない。本章では、等価2質点系置換モデルを用いた連成系モデル(モデルA)の弾塑性解析を実施する。

本方法は、既往の方法⁵⁾に比べより高い振動数範囲にわたって信頼性が高いこと、計算方法が容易で、従って計算時間が短いこと等の利点を有している。

本章では比較のためにモデルAの弾塑性解析のほかに従来型定数モデル(モデルC)についても解析を行なう。入力地震動はELCENTRO波で最大入力加速度は750 galとした。数値積分刻みは0.002秒である。

4.1. 復元力特性

上部構造の材料非線形性は、せん断力成分のみとし、曲げに対しては常に弾性とした。スケルトンカーブを図-7に示す。弾性限度以上は黒正博士の提案式⁹⁾により決定した。また履歴特性は原点指向型とした(図-8)。

4.2. 解析結果

応答解析の結果、上部構造の塑性化はPCCVのみに生じた。PCCV脚部における弾性限変形に対する塑性率は、モデルA、モデルCでそれぞれ1.33、1.78であった(図-7参照)。

図-9は、加速度応答波形の例を示したものである。同図の上段はIC01質点、下段はPV04質点の応答波形である。PV04の応答波形に注目すると、A、Cモデル間には、位相ずれが見られる。これは、二つのモデルの塑性化状態の違いがPCCVの固有値特性の相違となって現われたと見ることができる。この推察は、PV04弾性応答波形(図-5)と比較すれば妥当であることがわか

解析種別	弾性応答解析						弾塑性応答解析	
	ELCENTRO			GOLDENGATE			ELCENTRO	
入力波								
質点	モデルA	モデルB	モデルC	モデルA	モデルB	モデルC	モデルA	モデルC
	IC01	693. (1.08)	641. (1.0)	873. (1.36)	1218. (1.003)	1214. (1.0)	1574. (1.30)	1723.
PV01	991. (0.96)	1029. (1.0)	1284. (1.25)	2403. (1.02)	2341. (1.0)	2764. (1.18)	2558.	3174.
PV04	740. (0.94)	789. (1.0)	835. (1.06)	1550. (1.03)	1508. (1.0)	1813. (1.20)	1829.	2041.
EX01	399. (0.91)	439. (1.0)	543. (1.24)	461. (1.08)	427. (1.0)	1731. (1.71)	1005.	1368.
BSCR	310. (0.98)	316. (1.0)	361. (1.14)	315. (0.99)	318. (1.0)	491. (1.54)	778.	901.

注) () 内数値はモデルBに対する比率を表わす。

表-3 主要質点の最大応答値

GOLDENGATE波の方が小さく、EX01の8%を除けばほぼ3%内に納まる。最大9%の差(EX01)を生じるELCENTRO波の場合でも全質点を平均すれば5%程度である。これらのBモデルに対するAモデルの差は、基礎地盤動特性の等価2質点系置換により生じたのではなく、他の要因例えば解析時間刻みの違い、あるいは作成過程で生じた全体減衰係数マトリックスの若干の差等によるものとする。一方CモデルのBモデルに対する最大応答値の差は、ELCENTRO波で平均7% (最大36%) GOLDENGATE波の場合で平均14% (最大71%)程度大きい。

3.2. 床応答スペクトル

主要質点の床応答スペクトル(減衰定数 $h = 1\%$)を図-6に示した。モデルA、Bの床応答スペクトルは、ELCENTRO波PV04のピーク値を除いてよく一致している。モデルA、BのモデルCに対する床応答スペクトルの形の違いは概して次の様である。(1)最大ピーク値が小さい。特にCモデル基礎の応答値には、モデルA、Bに表われない卓越したピークが見られる。(2)モデルA、

ろう。主要質点の最大応答値は表-3に示してある。A, Cモデル間の応答比率は、概ね1.25倍である。

基礎盤下の最大転倒モーメントは、モデルA, Cで、それぞれ 298.1×10^4 , 439.0×10^4 t・mを得た。AIJ鉄筋コンクリート構造計算規準⁷⁾に従って浮き上り率を求めるとそれぞれ18%, 46%である。この時上向鉛直地震力は0.24gである。

図-10には主質点(IC01, PV04)の床応答スペクトル(減衰定数 $h=1\%$)を示した。その傾向は弾性的の場合と同じ傾向を示す。

5. まとめ

典型的な原子炉建家を例にとって等価2質点系置換モデル(Aモデル), 振動数依存モデル(Bモデル), 従来型定数モデル(Cモデル)について地震応答解析を実施した結果, 次の様なことが明らかになった。(1)弾性応答解析の結果, AモデルとBモデルの応答波形は非常によく一致する。また応答解析手法の違いにも拘わらずA, Bモデル間の差は, 平均で5%内に納った。従って等価2質点系置換モデルの妥当性が確認できたと考える。(2)CモデルとA, Bモデルの弾性応答解析を比較した。その結果最大応答値, 波形及び床応答スペクトルについて耐震設計上有意と考えられる差が表われた。(3)弾塑性解析をモデルA, Cについて実施した。その結果二つのモデル間で, 最大応答値, 波形, 床応答スペクトル, 更には塑性率, 浮き上り率等に明確な差が現われた。

以上で明らかになったように, 上部構造が弾性あるいは弾塑性状態でもあっても, 基礎地盤動特性は, 上部構造の地震応答性状に重要な影響を与えることがわかる。今後上部構造-基礎-地盤連成系の地震応答特性を明らかにするため本法による応答解析例を蓄積したいと考える。

謝辞

本研究に際し, 本社電子計算センター三橋英二氏から貴重な意見を頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 安井, 藤谷, 松本: 基礎地盤の動特性の等価2質点系置換モデル, 大林組技術研究所報, No. 21, (1980), pp. 27~32
- 2) A. S. Veletsos, Y. T. Wei: Lateral and Rocking Vibration of Footing, A. S. C. E., Vol. 97, SM 9, (Sept. 1971), pp. 1227~1248
- 3) J. M. Roësset, R. V. Whittman, R. Dorby: Modal Analysis for Structures with Foundation Inter-

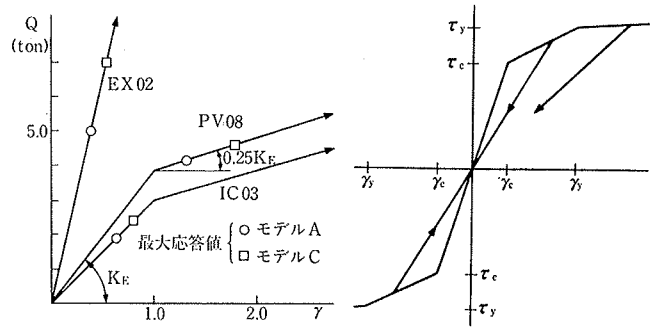


図-7 Q~r 関係 図-8 履歴特性(原点指向型)

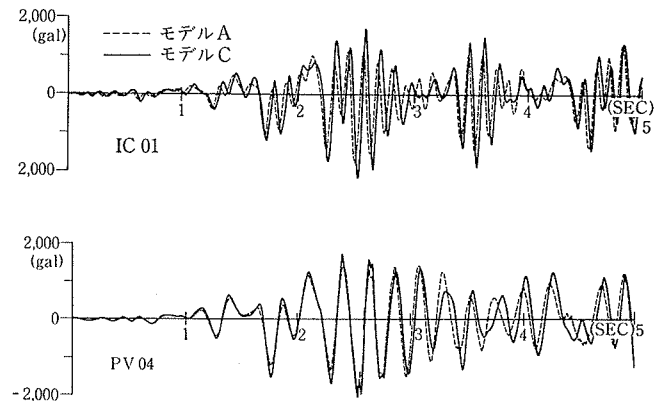


図-9 応答波形の比較 (Elcentro, 弾塑性)

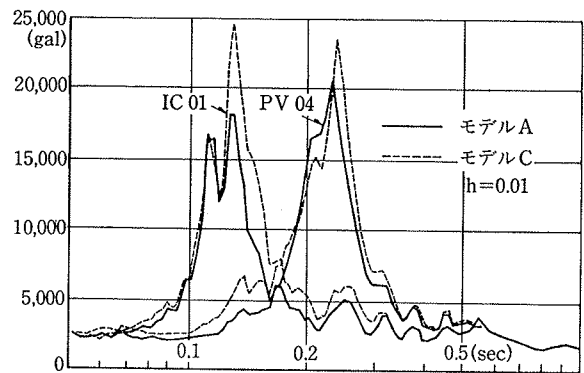


図-10 床応答スペクトルの比較(Elcentro, 弾塑性)

ction, A. S. C. E., Vol. 99, ST3, (Mar. 1973), pp. 399~416

- 4) 軽水炉改良標準耐震設計小委員会: 昭和54年度耐震設計の標準化に関する調査報告書別冊1(建屋系)
- 5) 対馬, 他: 原子炉建屋の弾塑性地震応答解析(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭53.9), pp. 863~866
- 6) 梅村: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法, 技報堂, pp. 327~330
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, (1975), p. 254