

構造物の復元力特性の形状が動的応答に 及ぼす影響について (その 2)

若林 實・藤原悌三・中村 武・田中 宏

ON THE INFLUENCE OF THE SHAPES OF HYSTERESIS LOOP OF STRUCTURES ON THEIR DYNAMIC RESPONSES (PART 2)

By Minoru WAKABAYASHI, Teizo FUJIWARA,
Takeshi NAKAMURA and Hiroshi TANAKA

Synopsis

It is well-known that the restoring force characteristics of reinforced concrete structures have a tendency to deteriorate on the stiffness and strength under repeated loading. In this paper, the influence of the shapes of the hysteresis loop on the dynamic responses of the structure are discussed.

Two types of fundamental hysteresis models and four parameters representing a combination between degrading model and slip model and the effects of the stiffness degradation under unloading are considered here. The results of earthquake responses of the structure having above hysteresis show the importance of modeling of the hysteresis loop on the aseismic safety of the structures.

1. 序

耐震構造設計においては、損傷を受ける部材には、靱性に富み、履歴によるエネルギー消費能力の大きい、曲げ挙動が卓越するような復元力を与えることが望ましい。しかし、耐震壁や短柱のように太短かい部材では、曲げ耐力に比してせん断耐力が低くなる傾向にあるため、このような部材を含む構造物の復元力特性はせん断破壊の影響を受け、以下のような特徴を示す。

- 履歴によるエネルギー消費能力が比較的小さい。
- 比較的低いレベルで耐力軸に添ったスリップ状態領域をもつ履歴ループを描く。
- 大変形領域における繰返し載荷において耐力の劣化や剛性の低下等が生ずる。

一質点系の弾塑性地震応答解析については、今までに数多くの研究が行われ耐震資料が蓄積されている。前報²⁾においては文献¹⁾によって示された定式化履歴ループを用いて、履歴特性の幾何的形狀を規定するパラメータのそれぞれが一質点系構造物の弾塑性地震応答にどのような影響を与えるかについて考察がなされた。しかし、文献¹⁾では、前述の繰返し加力に伴う履歴性状の劣化に関してはパラメトリックには考察されていない。構造物の破壊に至る過程を検討する場合には繰返し作用による復元力特性の劣化性状が応答挙動に及ぼす影響の検討も重要であるので、本論文では、前報²⁾の定式化履歴ループを用いて一質点系を対象に弾塑性地震応答解析を行うことによって、これらの検討を試みた。

2. 解析方法

入力地震は、0~10 Hz において一定のパワースペクトル密度 (400 gal²·sec) をもつ、継続時間10秒の人工

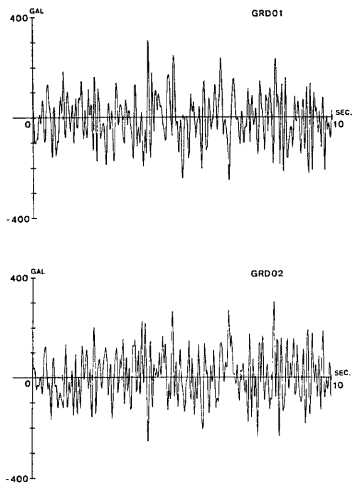


Fig. 1 Samples of artificial earthquakes

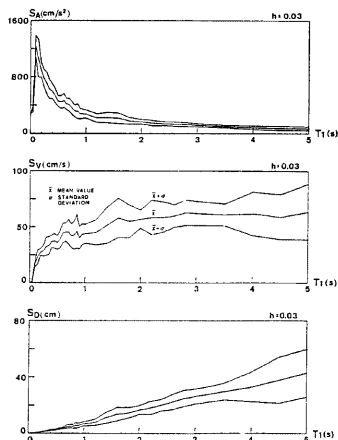


Fig. 2 Response spectra of artificial earthquakes

Table 1 Data of artificial earthquakes

	GRD01	GRD02	GRD03	GRD04	GRD05	GRD06	GRD07	GRD08	GRD09	GRD10
INITIAL No.	13	57	213	319	379	481	549	631	779	913
S0(gal ² *sec)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
FL (Hz)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FL (Hz)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
DT (sec)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
T1 (sec)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ACC.MAX (gal)	309.5	306.0	284.5	311.6	300.7	312.2	297.4	301.1	282.1	272.2
MAX.T1 (sec)	3.86	8.12	8.26	4.60	7.88	2.90	3.74	3.80	9.26	1.30
AVERAGE OF ACC.MAX = 297.7 (gal)										
STANDARD DEVIATION OF ACC.*MAX = 13.0 (gal)										

地震波を10波作成して用いた。この10波の入力に対する種々の一自由度系構造物の応答を平均して整理したものを中心に挙動の概要を議論する。また、適宜必要に応じて応答のばらつき度合をみるために、変動係数も調べた。応答解析は Runge-Kutta 法を用いて行い、臨界減衰比は $h=3\%$ で一定とした。入力加速度波形の例を Fig. 1 に示す。また、これら10波の波形の応答スペクトルの平均値とばらつきを Fig. 2 に示す。入力地震動最大加速度の平均値は約 300 gal である。入力波形の諸元を Table 1 に示す。

3. 解析モデルについて

文献¹⁾で定式化された復元力特性の概念を Fig. 3 に示す。定式化モデルでは Degrading 型のモデルAと Slip 型のモデルBを、適当な大きさの重ね合わせパラメータDを用いて重ね合わせて全体の復元力を表わす。これらのループの形状と性質を性格づけるパラメータについて以下に簡単に述べる。

D: モデルAとモデルBの重ね合わせの割合を表わすパラメータ。

- a_s : モデル B のスケルトンカーブからの除荷時の勾配を塑性率によって制御するパラメータ。
 a_c : モデル A のスケルトンカーブからの除荷時の勾配を塑性率によって制御するパラメータ。
 C : モデル B における同一変位振幅での繰返し載荷に伴う耐力及び剛性の低下の度合いを表わすパラメータ。

復元力特性は以上の4つのパラメータによって規定される。前報²⁾においては、これらのパラメータのうち、ループの劣化剛性低下の度合いを表わすパラメータ C を固定し、残り3つのパラメータ a_s , a_c , D を変化させて、履歴ループの形状が一質点系弾塑性地震応答にどのような影響を与えるかについて、降伏震度（降伏せん断力係数） C_y を0.05～0.5、履歴系の弾性固有周期 T_1 を0.2秒～1.0秒に変化させ、パラメトリックな解析を行った。本論文では履歴ループの形状を規定する3つのパラメータ a_s , a_c , D をある程度固定し、ループの劣化の度合いをあらわすパラメータ C を変化させて、繰返し作用による劣化が動的応答に及ぼす影響について解析を行なった。解析に使用したスケルトンカーブはFigs. 4, 5 に示す2種類であり、一つは降伏点以降のスケルトンカーブの勾配がゼロで安定したスケルトンカーブ、他方は降伏点以降のスケルトンカーブの勾配をその降伏点における割線剛性に対して5%～7.5%まで変化させた直線分としたものである。Figs. 4, 5 中の各変数の関係は前報²⁾と同様以下の様に設定した。

$$Q_c = \frac{1}{2} Q_y, X_c = \frac{1}{4} X_y$$

X_c , Q_c : ひびわれ点変位及びひびわれせん断力

X_y , Q_y : 降伏点変位及び降伏せん断力

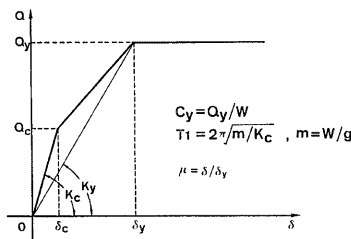


Fig. 4 Skeleton curve used in the analysis

Table 2 Parameters for analysis

D	C	a_s	a_c	C_y	T_1 (s)	r (%)
0.0	0.0	---	0.0	0.05	0.2	---
---	---	---	---	0.10	0.4	---
---	---	---	---	0.20	0.6	---
---	---	---	---	0.30	0.8	---
---	---	---	---	0.40	1.0	---
---	---	---	---	0.50	---	---

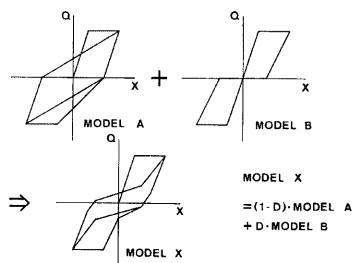


Fig. 3 Concept of superposition

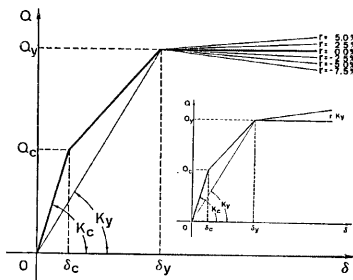


Fig. 5 Skeleton curve used in the analysis

Table 3 Parameters for analysis

D	C	a_s	a_c	C_y	T_1 (s)	r (%)
0.5	0.0	0.6	0.4	0.05	0.2	---
---	0.2	---	---	0.10	0.4	---
---	0.4	---	---	0.20	0.6	---
---	0.6	---	---	0.30	0.8	---
---	0.8	---	---	0.40	1.0	---
---	1.0	---	---	0.50	---	---

Table 4 Parameters for analysis

D	C	a _s	a _c	C _y	T ₁ (s)	r(%)
0.5	0.0	0.6	0.4	0.10	0.2	---
0.7	0.43	---	---	0.20	0.4	---
---	0.6	---	---	0.40	0.6	---
---	---	---	---	0.8	---	---
---	---	---	---	1.0	---	---
---	---	---	---	---	---	---

Table 5 Parameters for analysis

D	C	a _s	a _c	C _y	T ₁ (s)	r(%)
0.5	0.0	0.6	0.4	0.10	0.2	5.0
---	0.8	---	---	0.20	0.4	2.5
---	---	---	---	0.30	0.6	0.0
---	---	---	---	0.8	---	-2.5
---	---	---	---	1.0	---	-5.0
---	---	---	---	---	---	-7.5

また解析に使用するパラメータである降伏震度 C_y と系の固有周期 T_1 は下式で示される。

- 降伏震度 $C_y=Q_y/W$, W : 質点の重量
- 固有周期 $T_1=2\pi\sqrt{M/K_e}$, $K_e=Q_e/\delta_e$, $M=W/g$
- 塑性率 $\mu=\delta/\delta_y$, δ_y : 降伏変位

固有周期は初期弾性固有周期である。解析に用いたパラメータ群を Table 2 から Table 5 に示す。

4. 重ね合わせの基礎モデルの相違が動的応答に及ぼす影響

本検討では、文献¹⁾で定式化された履歴ループに対して、その重ね合わせの基礎モデルの1つであるモデル A (Degrading 型モデル) に、Degrading Tri-linear モデル (D-Tri モデル) と Clough モデルの2種類を考え、まずこの重ね合わせの基礎モデルの動的応答の比較を行なった。解析に用いたスケルトンカーブは Fig. 4 に示す降伏点以降の勾配がゼロのもので、解析パラメータを Table 2 に示す。

Fig. 6 は系の固有周期 T_1 に対する最大応答変位 Disp の変化を、Fig. 7 は系の固有周期に対する最大応答塑性率 μ の変化を、降伏震度 $C_y=0.05$ から0.5に対して、Clough モデルと D-Tri モデルについて図

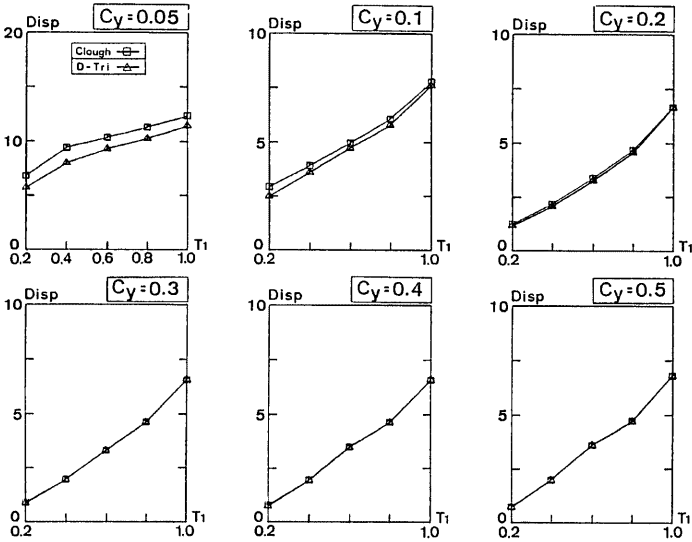


Fig. 6 Displacement spectra

示したものである。これらの図より一般に以下の傾向が見られる。

- 系の固有周期 T_1 の増大にともなって最大応答変位は大きくなるのに対して、最大応答塑性率は急激に小さくなる。また降伏震度が大きくなり、地動の入力レベルに比べて系の耐力が大きくなると、固有周期の長短にかかわらず応答は小さくなり弾性応答を示す。Fig. 6 では長周期系のものについて降伏震度が $C_y=0.3$ から $C_y=0.5$ に変化しても系の最大応答変位が変わらないにもかかわらず、Fig. 7 では系の最大応答塑性率が低下している。これは系が降伏点変位以内で振動しているにもかかわらず、降伏震度が大きくなることにより、系の相対耐力が上がり、弾性範囲の応答となるので見かけの塑性率が小さくなってみえる。
- Clough モデルと D-Tri モデルを比べた場合、降伏震度が0.3以上のもので最大応答塑性率が1以下の系がまだ降伏に達していないものについては両者の最大変位や最大応答塑性率に違いはほとんど見られない。しかし大変形の生ずる降伏震度が0.2以下の場合には Clough モデルの方が D-Tri モデルに比べて最大応答変位や最大応答塑性率が大きくなる傾向があり、特に系の固有周期の短かいものほどその傾向が大きい。

降伏震度0.1、固有周期0.6秒の系の Clough モデルと D-Tri モデルの特定の波形（GRD 02、最大加速度306 gal）に対する履歴及び応答波形を Fig. 8 に示す。入力地動レベルに比べて降伏震度が小さいので応答が大きくなり、降伏変位を越えて振動しはじめる3秒以降応答の中心が次第に一方方向に偏してゆくように移動している。また Clough モデルの方が D-Tri モデルよりも最大応答変位が大きくなっている。

降伏震度0.4、固有周期0.2秒の系の Clough モデルと D-Tri モデルの特定の波形（GRD 02、最大加速度306 gal）に対する履歴及び応答波形を Fig. 9 に示す。入力地動レベルに比べて降伏震度が比較的大きいので、両モデルともその応答は降伏域に到達しておらず、最初の6秒間において、履歴ループの形状に多少の差はあるにもかかわらず変位応答波形に大きな差はでていない。地動が始まってから6秒以降に両モデルの

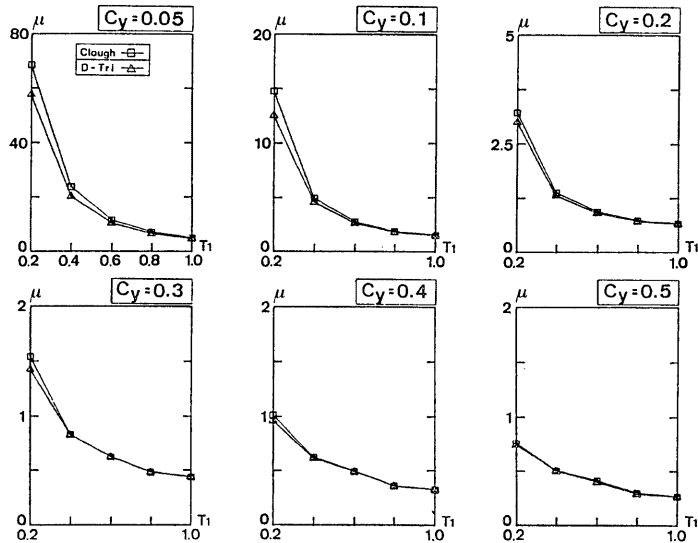
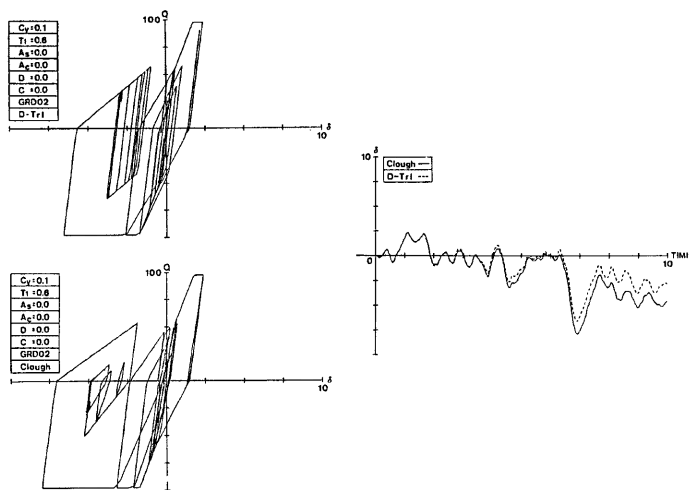
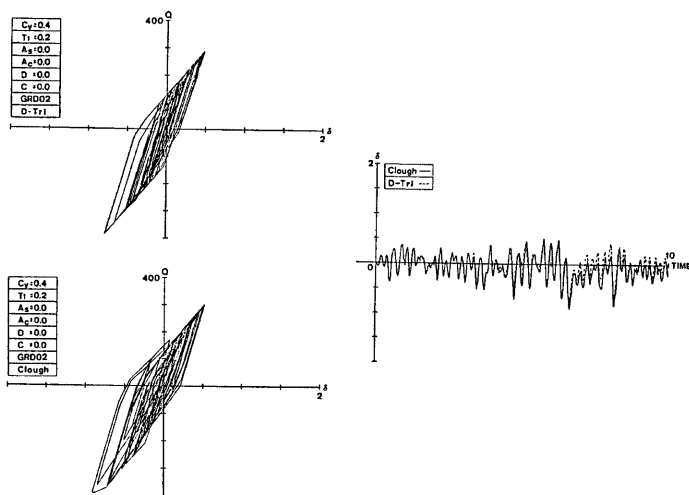


Fig. 7 Ductility ratio spectra

Fig. 8 Comparison of hysteresis (left) and time histories of δ (right)Fig. 9 Comparison of hysteresis (left) and time histories of δ (right)

応答に多少の違いが見られるが、最大応答変位や大振幅の振動の回数などに大きな相違は見られない。

以上のように比較的大きな塑性変形が生じない限り、両モデルの応答は類似の傾向を示す。その理由は、この場合には、スケルトンカーブでひびわれ荷重に対応する点が $Q_y/2$ に固定されており、降伏後の勾配を

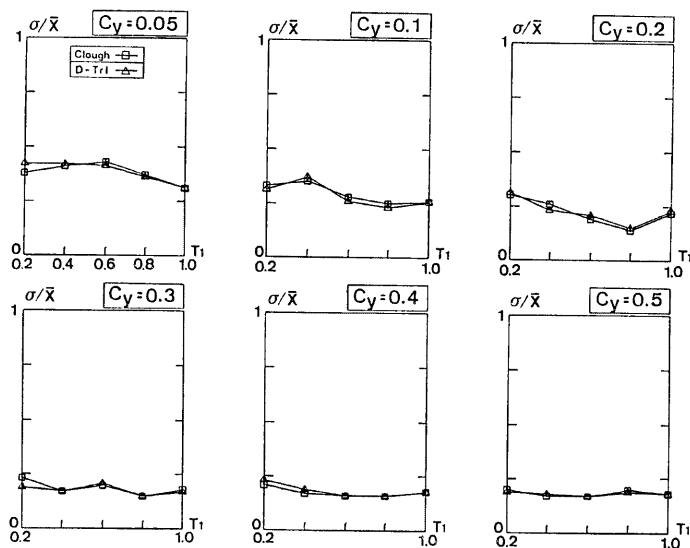


Fig. 10 Standard deviation spectra

零としているためである。文献⁹⁾にあるようにひびわれ点の決め方によっては D-Tri モデルの履歴ループはその面積及び形状が変わり、応答性状はかなり変化する可能性がある。そのため、実際の構造物や構造部材に適用するにあたってモデルのひびわれ点の評価が難しい。このためもあって本論文では履歴則が比較的簡単でありながらある程度大きな塑性変形が生じて Degradating 型の構造物や構造部材を適確に表現できるといわれる Clough モデルを重ね合わせの基礎モデル A として採用した。

Fig. 10 は入力地震の相違による変位応答のばらつきを示したもので、横軸は系の固有周期、縦軸は変動係数（標準偏差/平均値）として降伏震度 $C_y=0.05$ から 0.5 について図示したものである。降伏震度が 0.3 以上の場合応答塑性率の平均値があまり大きくないこともあって、その変動係数は 0.2 前後と比較的ばらつきは小さいが、降伏震度が 0.1 では大塑性変形を経験するとともに変動係数は 0.3 前後、降伏震度が 0.05 では変動係数は 0.4 前後となる。これは大変ばらつきが大きいと言わねばならない。また全体的には短周期系の方が長周期系のものよりばらつきが若干大きい。

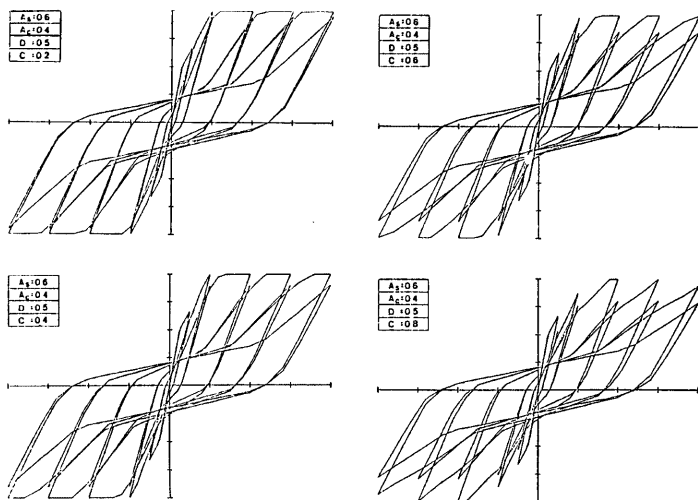
5. ループの劣化性状が動的応答に及ぼす影響—スケルトンカーブが比較的安定している場合—

5.1 解析パラメータ

ここでは Fig. 4 に図示するようなスケルトンカーブを想定して劣化パラメータ C のみを変化させて、繰返し作用による履歴ループの劣化が動的応答に及ぼす影響について解析した。さらに固有ループの面積の相違と劣化のパラメータの関係についても考察している。パラメータ群は Table 3, Table 4 のとおりであり履歴ループの形状を規定するパラメータの内 a_s , a_c , D については代表的なスリップ性状を示すものを選び、 $a_s=0.6$, $a_c=0.4$, $D=0.5$ に固定し、これを基本モデルとしている。

5.2 解析 1

Fig. 11 に Table 3 のパラメータのうち $C=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の場合についてその漸増変位交番繰返

Fig. 11 Shapes of hysteresis loop constructed when only parameter C changed

し載荷の履歴ループを示す。例えば $C=0.8$ の場合、多数回の繰返し作用によってスリップモデルの剛性がもとの剛性に対して $(1-C)=0.2$ の割合にまで低下し、モデル全体としては $(1-D \times C)=0.6$ の割合にまで剛性が低下するモデルである。

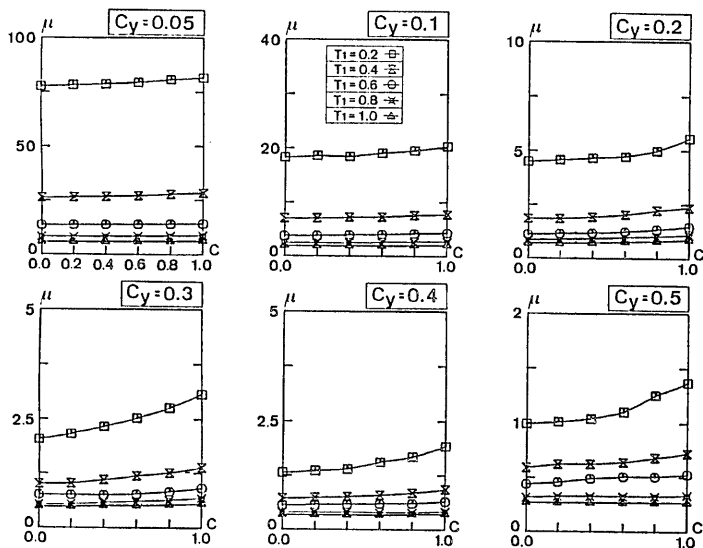


Fig. 12 Ductility ratio versus base shear coefficient

Fig. 12 は劣化のパラメータ C に対する最大応答塑性率 μ の変化を降伏震度 $C_y=0.05$ から 0.5 に対して系の固有周期 T_1 をパラメータとして図示したものである。この図より一般に以下の傾向が見られる。

・劣化を考慮した履歴系は劣化を考慮しない系に比べて応答が大きくなる傾向がある。しかし、入力地動レ

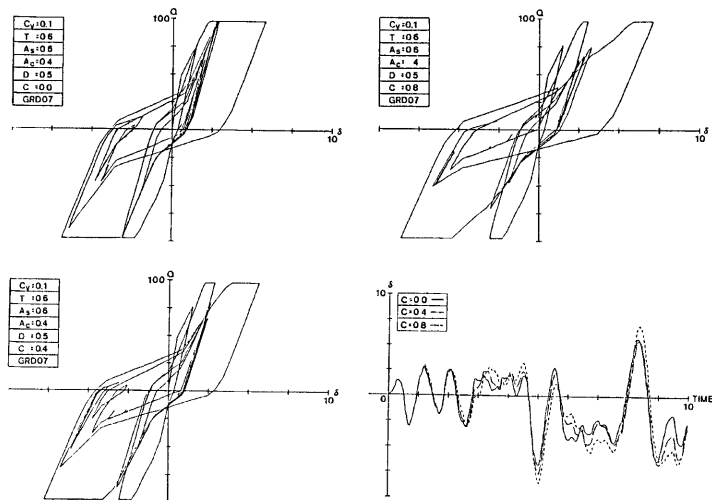


Fig. 13 Comparison of hysteresis and time histories of δ when only the values of parameter C changed

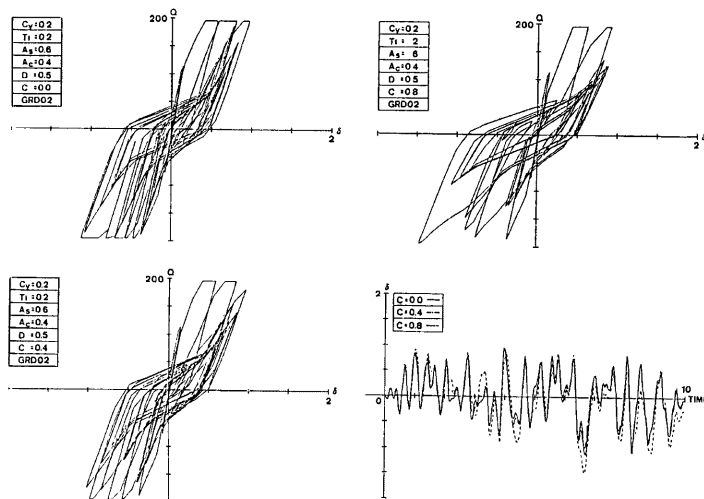


Fig. 14 Comparison of hysteresis and time histories of δ when only the values of parameter C changed

ベルに比べて降伏震度が大きい場合や、固有周期が長い場合の応答は降伏にまで達しないので、当然の帰着として劣化の影響は見られない。また入力地動レベルに比べて降伏震度が小さい場合にはその応答がほとんどスケルトンカーブで決定されてしまうため、同じく劣化（剛性の低下）の影響は見られない。

- ・降伏震度が極端に小さい場合や降伏震度が大きく長周期系の場合を除いて、劣化のパラメータ C が増大し劣化が顕著になるにつれて、特に短周期系で応答が大きくなる傾向が見られる。

降伏震度0.1、固有周期0.6秒の系で劣化パラメータのみを変化させたモデルについての特定の波形（GRD 07, 最大加速度 297 gal）に対する履歴及び応答波形を Fig. 13 に示す。地動が始まってから3秒以降応答変位に繰返し作用による劣化の影響がでてき始め、地動が始まってから5秒のピークでは最大応答変位にかなり違いが表れる。また劣化が生じた後には若干振動の周期がのびる傾向も見られる。

降伏震度0.2、固有周期0.2秒の系で劣化のパラメータのみを変化させたモデルについての、特定の波形（GRD 02, 最大加速度 306 gal）に対する履歴及び応答波形を Fig. 14 に示す。地動が始まってからはやくも

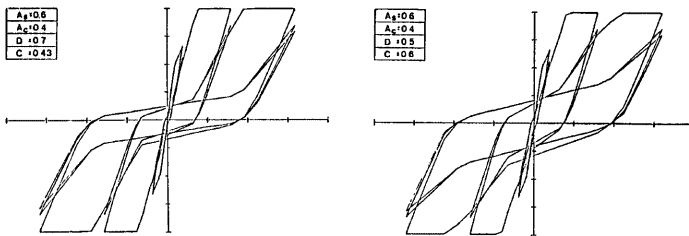


Fig. 15 Shapes of hysteresis loop which have different area of hysteretic loop

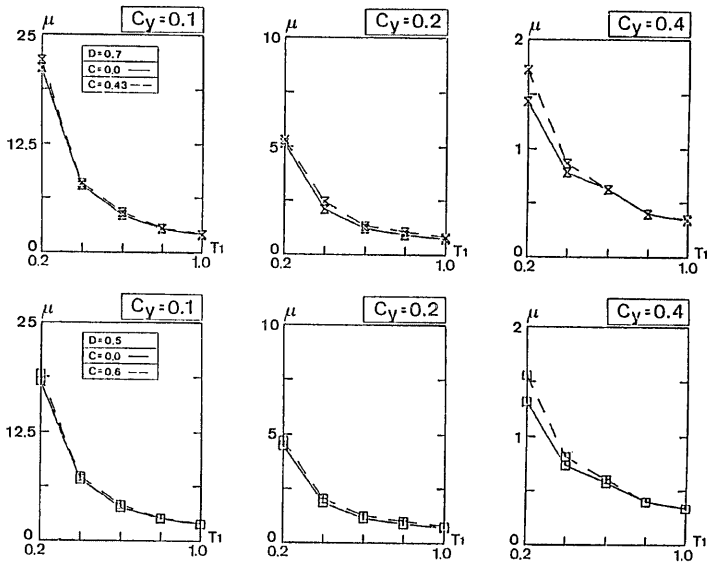


Fig. 16 Ductility ratio spectra

1秒以降に劣化の影響が変位応答波形に現われている。特に劣化のパラメータ C が 0.8 の場合その影響はかなり大きく応答変位の増加となってあらわれている。しかし劣化のパラメータ C が 0 と 0.4 ではその履歴性状や応答波形はほとんど変わらない。このように入力地動や降伏震度によっては劣化の度合の変化に対して応答が敏感に変化しない場合も見られた。

5.3 解析 2

固有ループの面積が違うこととループの劣化の有無が、応答にどのような影響を与えるかを検討するために基本モデルに対して固有ループの面積の小さいモデルを用いて、各々に対して繰返し作用による剛性の低下、耐力の劣化が全くない場合及びモデル全体として剛性の劣化が同じ程度 ($1-D \times C=0.7$) の場合について解析した。**Table 4** に示す解析パラメータを用いて固有ループの面積が異なり、繰返し作用による劣化がある場合を対象に漸増変位交番繰返し载荷を与えたときの履歴ループを **Fig. 16** の上段は **Fig. 15** の固有ループの面積が小さい系に対する応答結果であり、下段は基本モデルに対する応答である。また図中の実線は劣化が全くない場合、破線は劣化を考慮した場合を表わしている。**Fig. 16** の上段と下段を比較すると、固有ループの面積の小さい系は面積の大きい系に比較して応答が大きくなる傾向にあるのは当然であるが、固有ループの面積が異っていても劣化のパラメータが応答に与える影響に大きな差はないようである。

6. ループの劣化が動的応答に及ぼす影響—スケルトンカーブの降伏点以降の勾配が変化する場合—

6.1 解析パラメータ

ここでは劣化がない場合 ($C=0$) と C が 0.8 (多数回繰返しによって剛性もとの剛性に対して6割にまで低下するもの) の場合に限定して **Fig. 5** のようにスケルトンカーブの降伏点以降の勾配を変化させたときの、繰返し作用による履歴ループの劣化が動的応答に及ぼす影響について検討した。解析に用いたパラ

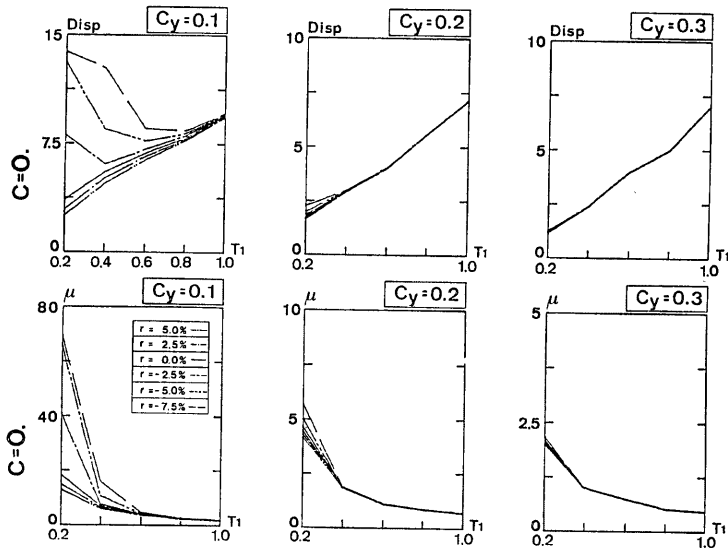


Fig. 17 Displacement spectra in case of $C=0$

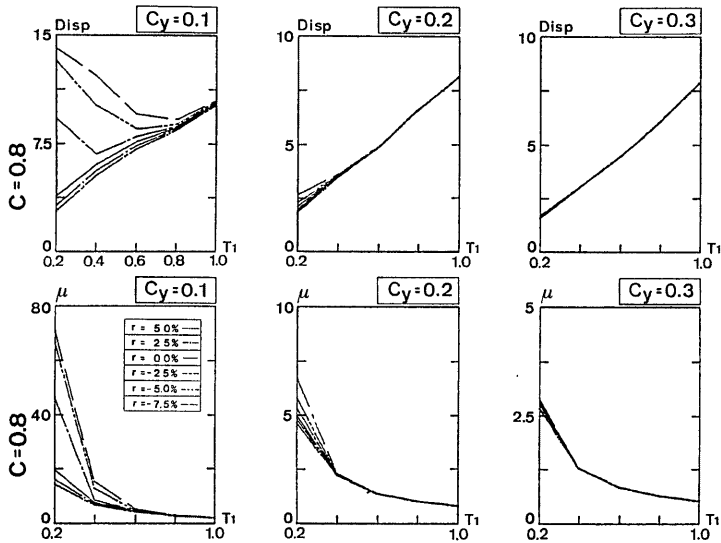


Fig. 18 Displacement spectra in case of $C=0.8$

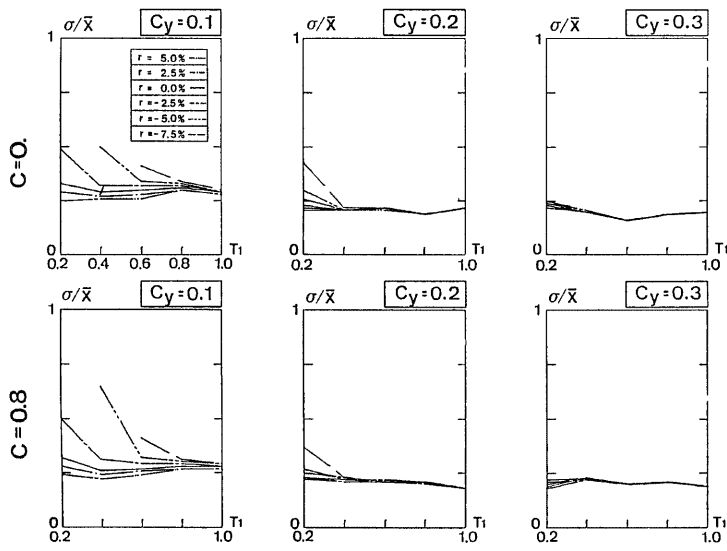


Fig. 19 Standard deviation spectra when $C=0$ (upper) and when $C=0.8$ (lower)

メータを Table 5 に示す。

6.2 解 析

Fig. 17 は固有周期 T_1 と最大応答変位 Disp の関係を上段に、 T_1 と最大応答塑性率 μ の関係を下段に、いずれも劣化のない降伏震度 C_y が 0.1, 0.2, 0.3 の場合について示しており、スケルトンカーブの降伏点以降の勾配の初期剛性に対する比をパラメータとしている。Fig. 18 に劣化がある場合の同様の結果を示す。これらの図から以下の傾向が見られる。

- ・降伏点以降の剛性比を表わすパラメータ r の増加にともなって、繰返し作用による劣化の有無にかかわらず応答は小さくなる。但し降伏震度が大きく長周期の系で最大応答塑性率が 2 以下の場合には、準弾性応答となるため降伏後の影響は見られない。しかし降伏震度 C_y が 0.1 の短周期系では降伏点以降のスケルトンカーブの勾配が負になるに従って大幅に増大し、完全に崩壊している。
- ・降伏震度が小さく応答がスケルトンカーブによって決定されてしまう場合や降伏震度が大きく応答が比較的小さい場合を除き、劣化の影響が表われる。

以上ループの劣化がある場合とない場合についてスケルトンカーブの降伏点以降の勾配が変わったときの大略の傾向が得られたが、Fig. 19 に示すように入力地動の相違による応答のばらつきが大きくなっているため、以下に特定の波形に対する解析例を示す。

Fig. 20 には劣化のパラメータ C と最大応答塑性率 μ の関係を特に降伏震度 0.2, 固有周期 0.2 秒の場合についてスケルトンカーブの降伏の剛性比 r をパラメータとして図示した。解析に用いた入力地動は GRD 02 である。劣化が小さい場合、スケルトンカーブの降伏点以降の剛性比は系の最大応答塑性率にはさほど影響を及ぼしていない。しかし劣化のパラメータ C が大きくなるにつれて、剛性比にかかわらず応答は増大する。特にスケルトンカーブが降伏点以降負勾配の場合に、その傾向は顕著である。参考のために $r = -10\%$ についても解析したが、この場合劣化のパラメータ C の増加にともなって応答は急激に大きくなり、完全に崩壊に至っている。降伏点以降のスケルトンカーブの剛性がゼロの場合で劣化のパラメータ C が 0, 0.6, 0.8 の場合の応答を Fig. 21 に示す。Fig. 22 は $r = -7.5\%$ の場合の同様の関係を示している。これらの図において劣化のパラメータ C が増大し、劣化の度合いが大きくなるとその履歴及び応答波形はかなり異なったものになってくる。また劣化のパラメータ C がスケルトンカーブの降伏点以降の剛性比の異なる両モデルに対して同じように変化しているのにもかかわらず、スケルトンカーブが降伏点以降負勾配をもつ場合にはパラメータ C の変化に敏感で、Fig. 22 のように劣化のパラメータのわずかな変化に対して急激に応答が大きくなる場合がある。

以上の解析によって、降伏震度にも影響されるが繰返し作用による履歴ループの劣化は、スケルトンカーブが降伏点以降負勾配をもつ場合に一層その影響がでてくることがわかった。特に Fig. 20 の解析例では降伏震度が 0.2 程度でも系の繰返し作用による劣化の度合いが大きくなることによって、応答が負勾配をもつスケルトンカーブ上での大きな塑性変形域を含む応答を生じ、大きな塑性率応答を示すことがわかった。別の見方をすれば、ループの劣化によって系の相対的な降伏震度が低下したと見なすこともできるほどその影響は大きいと考えられる。

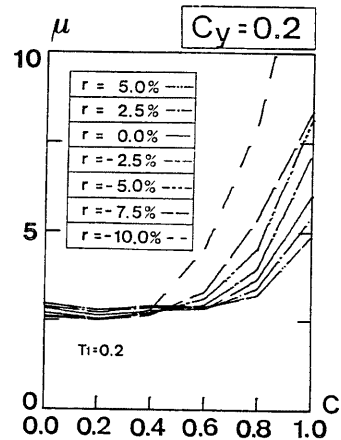


Fig. 20 Ductility ratio versus base shear coefficient

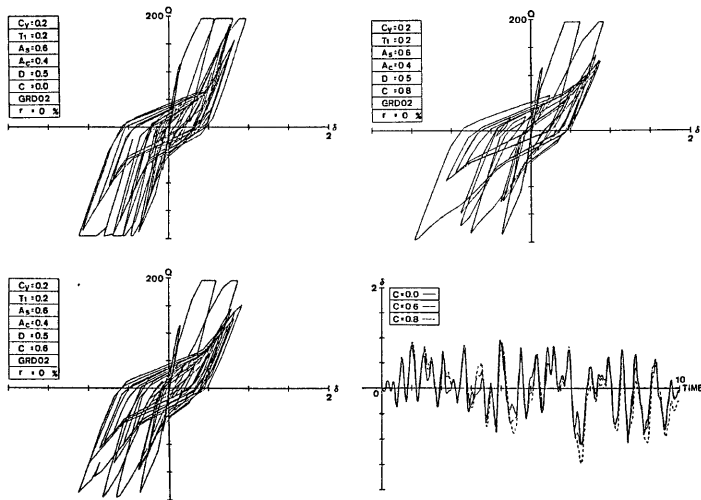


Fig. 21 Comparison of hysteresis and time histories of δ when only the parameter C changed in case of $r=0\%$

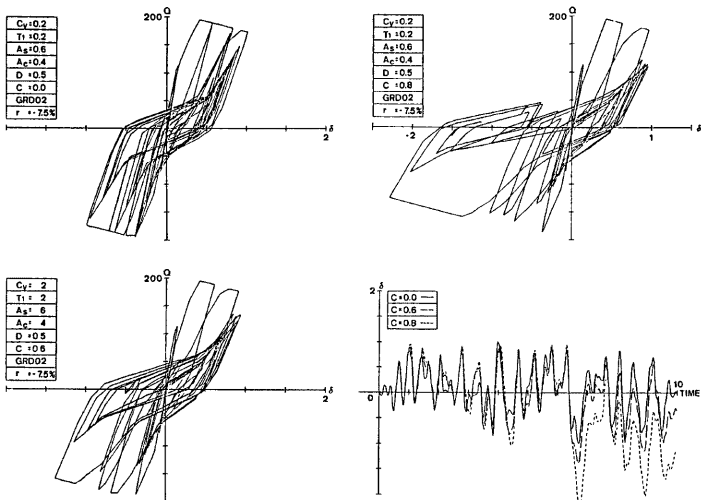


Fig. 22 Comparison of hysteresis and time histories of δ when only the parameter C changed in case of $r=-7.5\%$

7. 結 語

本論文では繰返し作用による履歴ループの劣化が動的応答に及ぼす影響について解析を行なった。これらの解析結果を要約すると次のようになる。

- ・スケルトンカーブが比較的安定した履歴系においては、入力地動レベルに比べて降伏震度が小さく応答がスケルトンカーブによって決定されてしまう場合や降伏震度が大きく応答が降伏に達しない場合を除いて、劣化が動的応答に及ぼす影響は固有ループの面積の大小にかかわらず大きいといえる。またこの傾向は地動の継続時間が一定の場合、短周期の履歴系に顕著に見られる。
- ・スケルトンカーブの降伏点以降の剛性比を変化させた系においても上述の傾向が見られるが、特に系のスケルトンカーブが降伏点以降負勾配をもつ場合、降伏震度にも影響されるがわずかな劣化の度合の変化によって大きく系の応答が変わる。

参 考 文 献

- 1) 若林 實・渡辺泰志：構造部材の復元力特性のモデル化，京大防災研年報，第26号 B-1，1983. pp. 199-213.
- 2) 若林 實・渡辺泰志：構造物の復元力特性の形状が動的応答に及ぼす影響について，京大防災研年報，第27号 B-1，1984. pp. 141-172.
- 3) 谷 資信・平松 晃・渡辺俊彦・石川 泰・森 伸之：鉄筋コンクリート構造の崩壊過程を考慮した地震応答解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭51. pp. 1283-1284.
- 4) 小谷俊介：復元力特性の地震応答に及ぼす影響，第26回構造工学シンポジウム，1980.
- 5) Otani, S: Hysteresis Models of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis, Journal of the Faculty of Engrg., The Univ of Tokyo, Vol. XXXVI, No. 2, 1981.
- 6) 松島 豊：構造物の復元力特性に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭44. pp. 587-588
- 7) 渡部 丹・藤堂正善：設計用模擬地動に関する研究（その1），日本建築学会論文報告集，第303号，昭56. pp. 41-51.
- 8) 滝沢春男：振動方程式を数値積分する際の発散現象に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭46. pp. 539-540.
- 9) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，1981.
- 10) 若林 實：構造物の減衰とエネルギー吸収能力について，京大防災研年報，第17号 A，1974. pp. 27-47.