

鉄筋コンクリート架構の最終崩壊に至る復元力特性と地震応答性状

早稲田大学 谷 須信 東海大学 永坂 具也 早大大学院生 平松 晃

§1 序

構造物の真の耐震性を評価する時、微小変形領域はもろろんの事、最終崩壊領域に至る構造物の力学的特性を認識する事が大切な要素の一つである。特に外力が地震動のように動的に作用する場合構造物の示す応答性状は、その復元力特性により大きな影響を受ける。近年の十勝沖地震(1968)や、サンフェルナンド地震(1971)においても多数の鉄筋コンクリート構造物が大破した例があり、これらの破壊を説明する為にも、更に又これから構造物を設計する為にも、復元力特性と、より明らかにする事が重要である。このような事情の下に現在多数の研究者により鉄筋コンクリート構造物の復元力特性、或いは、地震応答性状に関する研究が進められつつある。しかし残念ながら最終崩壊領域迄を対象とした研究報告は極めて数少なく、今だに不明確な点が多い。そこで本報告では、まず鉄筋コンクリート模型実験による、崩壊に至る復元力特性を把握し、これを適当なモデルで表現できる事を述べ、次にその復元力特性モデルを持つ系の地震応答性状について述べる。尚、最大耐力以前の復元力特性については、従来から継続されてきた等者等の一連の研究報告⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾で、既に述べてあるので本報告においては特に、最大耐力以後の復元力特性について着目する。

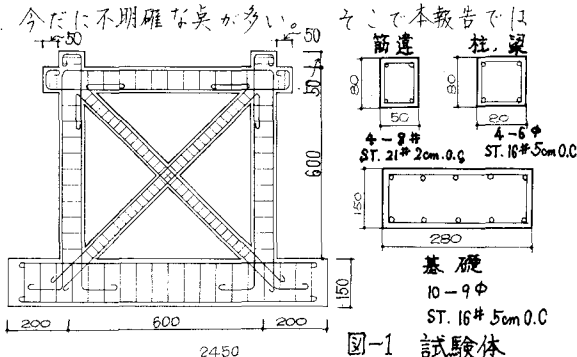


図-1 試験体

§2 鉄筋コンクリート模型実験

本報告における実験で採用した試験体は、図1に示す鉄筋コンクリートブレース入りフレームで、その材料特性については表1に示す。図2は載荷装置の概略を示したものである。水平変位はベースと梁中央の相対変位を $\frac{1}{100}$ タイヤルゲージにより、又、水平荷重 P は、ロードセルを用いて測定した。鉛直荷重 N は両柱頭に 3^t ($\phi=47\frac{kg}{cm^2}$) を加えた。実験は載荷プログラムにより6種類とし、総数は10体である。図3-1～図3-8は各実験の代表的 $P-\delta$ 曲線と、尚参考の為、同種の試験体からブレースを除いた純フレームの $P-\delta$ 曲線を図4に示した。又、図5は実験4-1の最終状態である。亀裂進展状況等については、

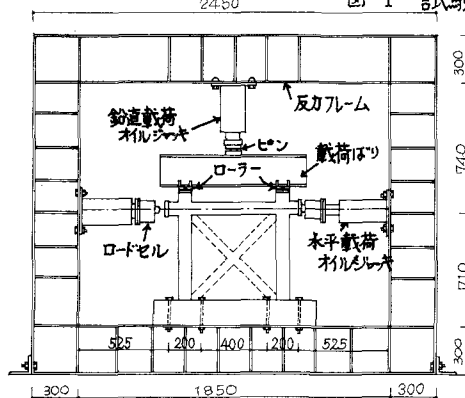


図-2 載荷装置

モルタル			鉄 筋		
ヤング係数 (kg/cm^2)	引張強度 (kg/cm^2)	圧縮強度 (kg/cm^2)	鉄 筋 種 別	ヤング係数 (kg/cm^2)	降伏強度 (kg/cm^2)
1.93×10^5	21.0	350.0	6 中	2.5×10^6	4570.0
			8 中	2.0×10^6	1800.0

表-1 材料特性

本報告では割愛し、

$P-\delta$ 曲線のみ着目する。

§3 実験結果の考察

各試験体は最大耐力に達すると、圧縮フレースが圧壊し耐力は急激に低下する。その後、変位の増加に従い僅かではあるが復元力も増加する。この時の復元力はフレーム部分の耐力(図5参照)と、引張りフレースの鉄筋の耐力の和と、ほぼ等しい。又、終局変位及びそこに至る迄の過程は試験体により異なるが、この間の構造としては一般にフレームと引張りフレースの鉄筋を重ね合わせたシステムと考えて

図3-1 実験-1

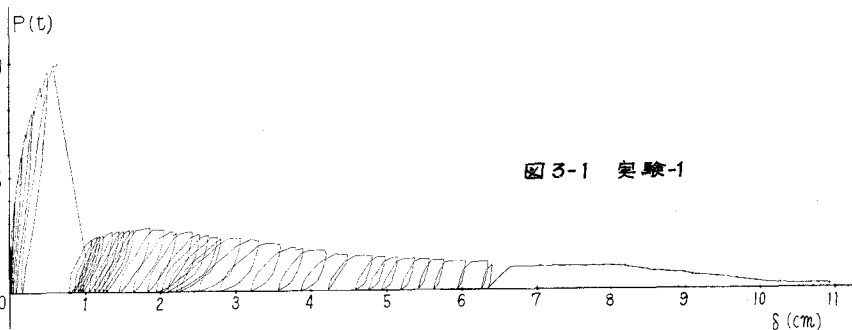


図3-2 実験-2

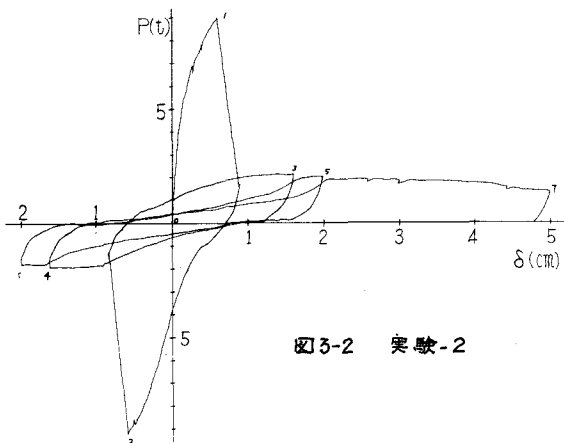


図3-3 実験3

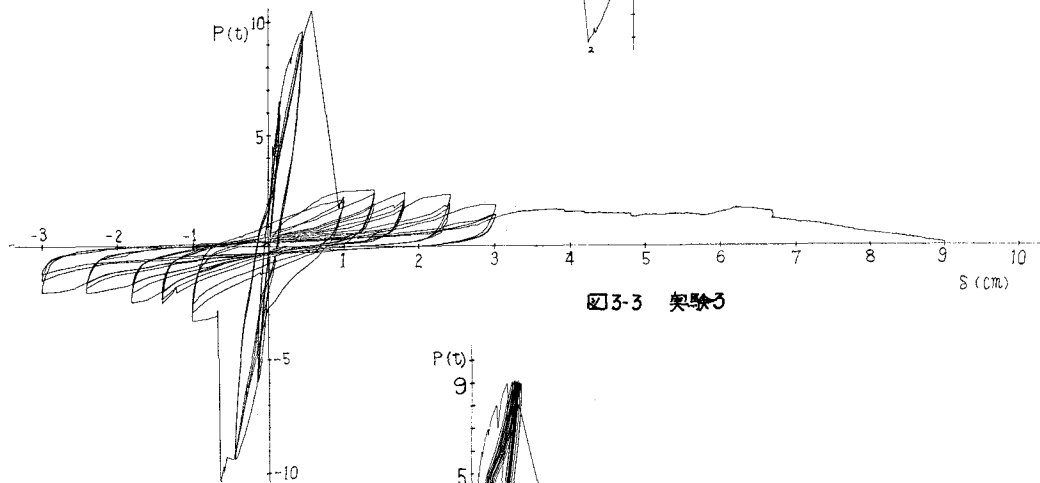
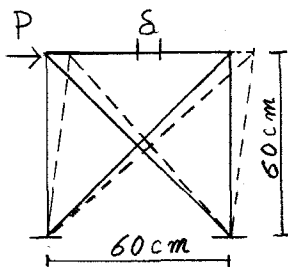
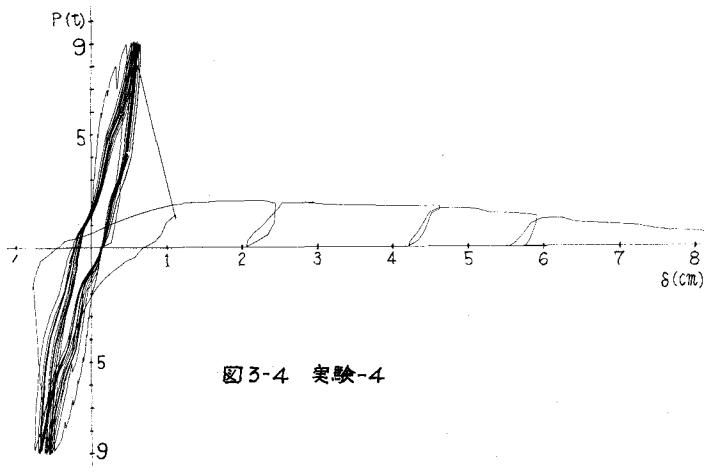


図3-4 実験-4



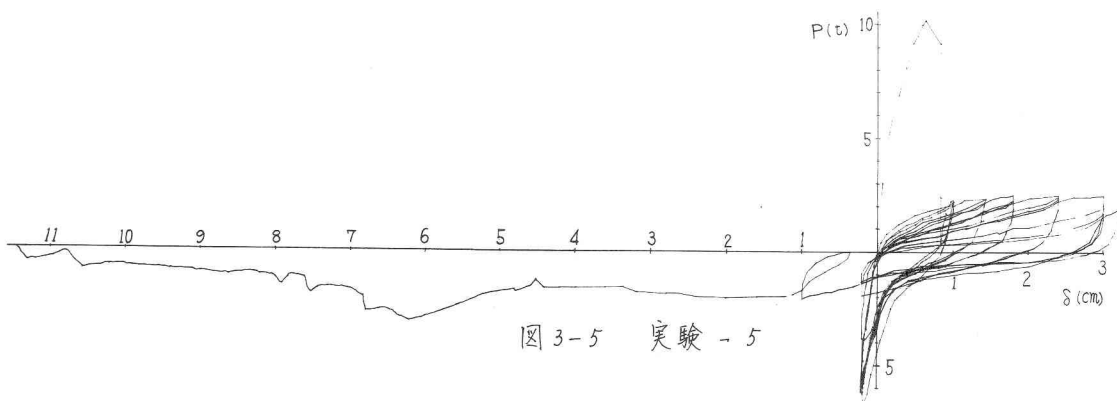


図 3-5 実験 - 5

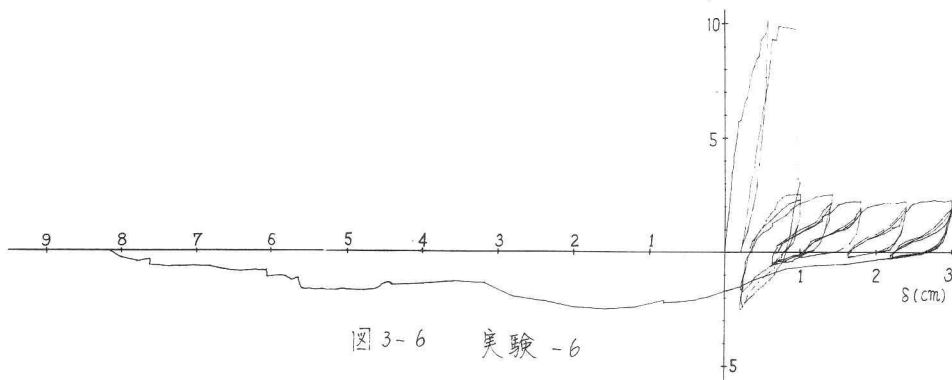


図 3-6 実験 - 6

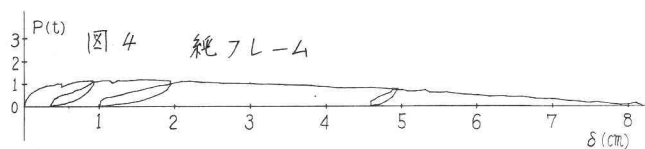


図 4 純フレーム

よい。以上実験で得られた $P-\delta$ 曲線についてまとめれば

- (1) 最大耐力英の変位は $10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で、載荷プログラムによらずほぼ一定している。
- (2) 最大耐力英から急激に (クーメン)+(引張アレースの鉄筋) の示す耐力迄低下し、以後はフレームと引張アレース中の鉄筋で構成される系の挙動を示す。
- (3) 変位の大きな領域 (6.7×10^{-3} 以上) では、繰返しによるデタリオリションが著しい。
- (4) 最大耐力英以後もかなりの変位 (例えば $100 \sim 130 \times 10^{-3}$) に達りまだ充分鉛直力に耐えられる。
- (5) 最大耐力の 9 割程度の荷重振幅で多数回繰返した場合、5~10 サイクルでアレースが圧壊する。
- (6) 終局領域の深い部分での繰返しにより、他方向の耐力は徐々に低下する。

紙面の都合で、詳しくは述べられないが終局領域における復元力特性をモデル化する場合には、以上の英を取り入れる必要がある。

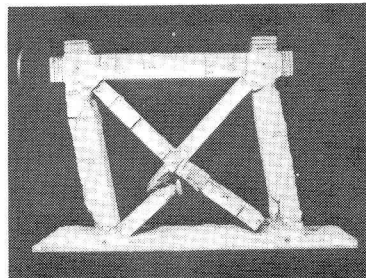


図 5 実験 - 4 の最終状態

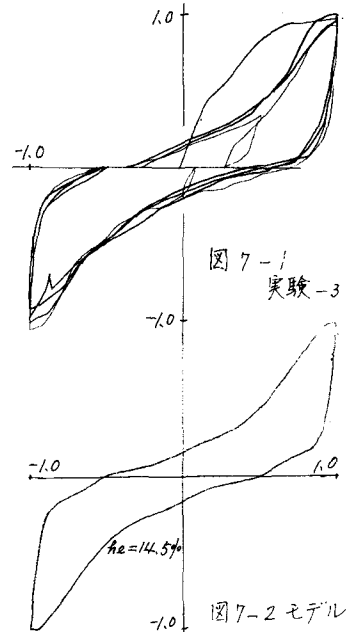
§4 実験結果に基づく復元力特性モデル

現在までの、筆者等の研究報告で述べているように、最大耐力以前の復元力特性については最大耐力の60~70%の範囲ではスケルトンカーブと固有ループとを組合わせるモデル(NCLモデル)で表現できる。そこで、ここでのモデル化は最大耐力以後について述べる。式(1)は、最大耐力以後のスケルトンカーブを表わしたもので図6は実験による曲線と比較を示している。

$$P = a(e^{-b\delta} - e^{-c\delta})$$

但し $0 < b < c \dots\dots\dots (1)$

又図7-1は実験3(図3-3参照)の各ループを頂角で無次元化したループである。又、図7-2はこれらのループを最少二乗法を用いて、10次のべき級数であらわしたもので、以後の応答計算等には、固有ループとして図7-2のループを用いる。図8-2は(1)式のスケルトンカーブと図7-2の固有ループとを組合わせ、更に、デタリオレーションの効果を取り入れた(§5参照)、復元力-変位曲線を表わしたものである。実験3(図8-1)と比較すると、大変位領域の挙動をNCLモデルで表現できると言えよう。尚、図7-2の固有ループと、等価粘性減衰定数 η_e で表わせれば、14.5%である。この外、右側方向だけ(P- δ 図で、第Ⅰ象限)が、最大耐力後に達し、他の側は、まだ達していない状態を表わすモデルも、応答計算の際には重要となる。



§5 地震応答計算

前節までに、鉄筋コンクリート耐震要素が脆性破壊すると耐力が急激に低下し、これはP- δ 曲線が不連続な曲線として表われる事。又、変位の大きな領域では繰返しによる剛性の低下する傾向が著しく変わる事を指摘した。そこで本節では、これらの特性が地震応答性状に与える影響について、計算例、及び若干の考

図-6 スケルトンカーブの比較

図7 固有ループの比較

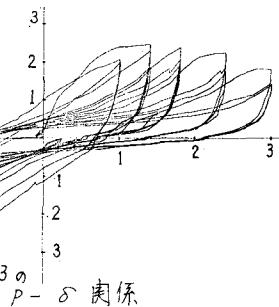


図8-1 実験-3の P- δ 関係

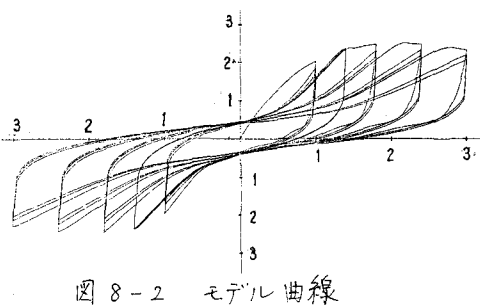


図8-2 モデル曲線

察を述べる。一質点系の振動方程式は(2)式となる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) = -m\ddot{y} \quad (2)$$

(2)式において、 $Q(x)$ は非線形復元力の項である。
そこで(2)式を下の各値で無次元化すれば(3)式となる。

x_f ----- 最大耐力変位

g ----- 重力加速度

h ----- 粘性減衰定数

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ ----- 微小変位時の円振動数

α ----- 最大耐力変位の加速度比

β ----- 最大耐力に対する、終局領域内での最大耐力の比。

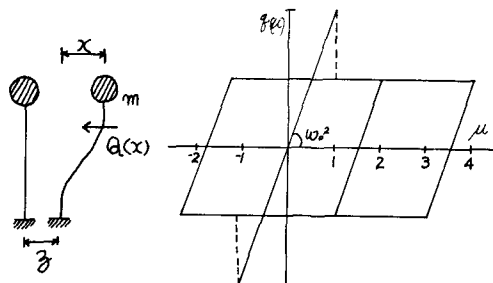


図 9-1 バイリニア型

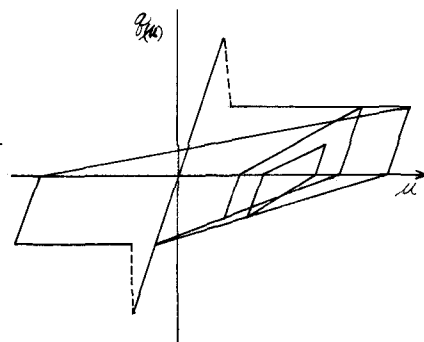


図 9-2 トリリニア型

$$\ddot{\mu} + 2h\omega_0\dot{\mu} + g(\mu) = -\frac{\omega_0^2}{\alpha}\ddot{y} \quad (3)$$

ここに、 $\mu = x/x_f$

$$\ddot{\mu} = \ddot{x}/g$$

$g(\mu)$ 無次元化復元力

以後の応答計算では(3)式を用いることにする。

(3)式中の $g(\mu)$ として、次の三種を用いた。

① バイリニア型 (図 9-1)

② トリリニア型 (図 9-2)

③ NCL型 (図 10)

バイリニア型、トリリニア型は、最大耐力変位は、弾性。その後は、通常の完全弾塑性型 *clough* 等の剛性低下型トリリニアモデルである。又、NCL型は両方向で最大耐力変後も、式(1)のスケルトンカーブと、図 7-2 の固有ループとを組合わせるモデルである。尚、NCLモデルでは $h = 0.0$ とした。

図 10-a は、NCL型モデルで採用したモデルで、オースケルトンカーブは最大耐力以前の、又、オニスケルトンカーブは、 β の値を変化させた場合の終局領域におけるスケルトンカーブである。更に、図 10-b は最大耐力以前に用いる固有ループで、等価粘性減衰定数は $h_e = 6.4\%$ である。

図 11 は、 $\alpha = 0.4$, $h = 0.05$, $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 0.6 \text{ sec}$ とした系の EL-CENTR 1940 NS (330 gal) に対する変位応答波で、 β の

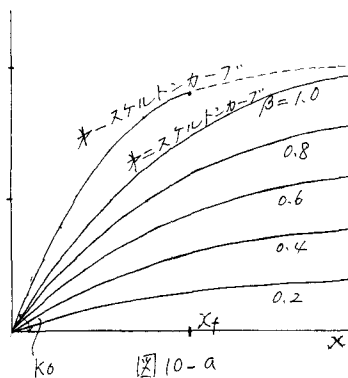


図 10-a

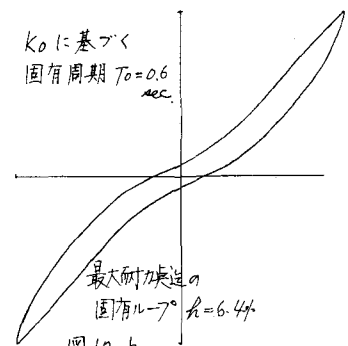


図 10-b

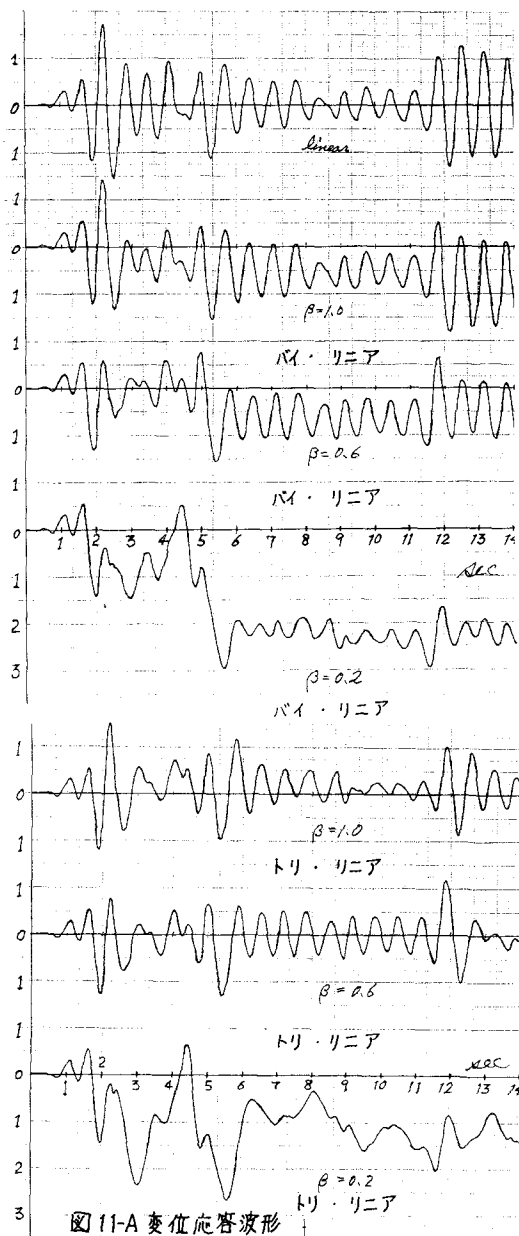


図 11-A 変位応答波形

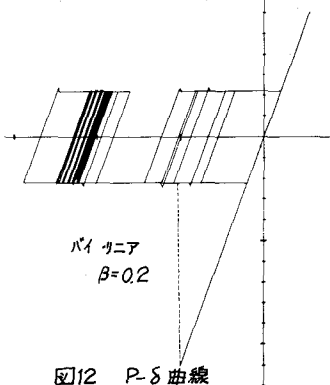


図 12 P-S 曲線

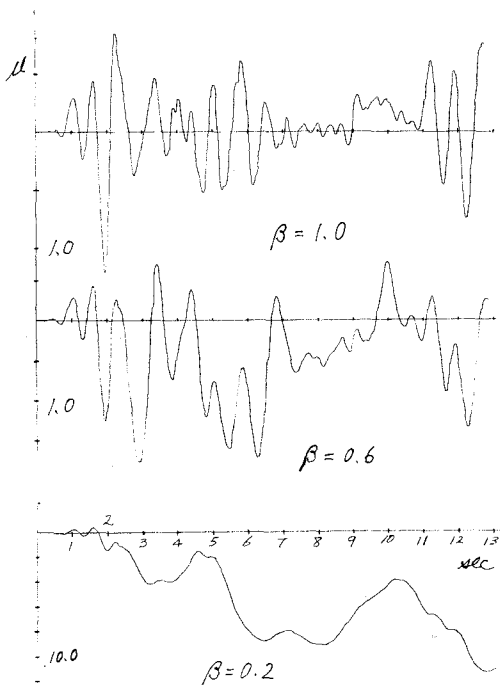
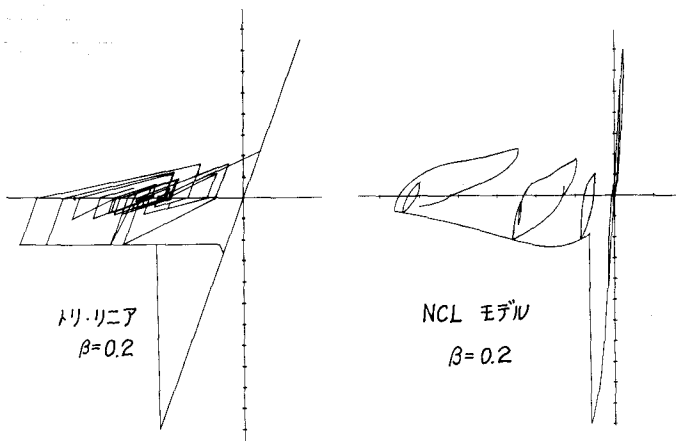


図 11-B NCL モデル

値を変えて比較したものである。尚図 11 の *linear* は、完全弾性系の応答を示す。又、図 12 は各モデルの $\beta = 0.2$ の場合の復元力-変位応答である。これらの図より以下の諸点が観察される。耐力激減後は、変位応答の中心がずれ、特に終局領域での耐力が小さい程著しい。これは完全弾塑性型の場合によく表われる傾向である。又、これに関連して片方向で最大耐力点を経験すると、他方向では最大耐力点に至り難い。つまり一般にある方向で急激に破壊を



すると、他方向では破壊し難く、復元力特性は原典対称性が破れ、非対称振動する可能性が大きい事を示唆する。又、バイリニア型、トリリニア型は $\beta = 0.2$ の場合を除き、最大応答量は線形応答の場合と大差はない。他方NCL型の場合は変位量が大きい。これは終局領域でのスケルトンカーブが負勾配を示す事が一因であろう。

次に、繰返しによる剛性低下の効果による応答性状の変化について述べる。ここでの応答計算では、耐力の急激に落ちる効果は無視する。即ち、スケルトンカーブとして図10のヤースケルトンカーブのみを採用する。

数少ない実験報告によれば、繰返しによる剛性の低下率の α_k と繰返し回数 i の関係は $\log \alpha_k$ 対 $\log i$ が直線となると述べている。つまり $\alpha_k = 1/i^a$ と表わされる。他方実験-4 (図3 -4 参照)によれば、剛性の低下を次のようにモデル化する事も可能である。即ち、繰返し i の効果による、ひかけ上の固有ループを引き伸ばす真の変位 $X'_{m,i}$ を次式で与える。

$$\Delta X_{m,i} = \frac{S}{1.4i} \quad (4)$$

$$X'_{m,i} = X'_{m,i-1} + \Delta X_{m,i} \quad (5)$$

サフィックスは 繰返し回数

ここで述べる計算例では、 S を次のように与える。

$$S = C \cdot X_f \quad (6)$$

表2 は $C = 0.0, \sim 0.2$ に変化させた時の最大応答量を示し、

又図13, 14 は $C = 0.0$ (繰返しの効果無視) と $C = 0.2$ の場合の変位波形及び、復元力-変位曲線である。表2 を見ると C の値の大きな程つまり繰返しによる剛性低下が大きくなる程、最大応答量が減少する傾向を示すがその量は僅かで、本計算例では、繰返しの効果は、応答計算上無視してもよいと考えられる。

§ 6. 応答性状の考察

本節では、耐力激減の変位応答性状に与える影響について述べる。図15の実線は $\alpha = 0.4$ $\beta = 0.6$ の場合のトリリニアモデルの変位応答波形である。A 点 (1.9 sec) で耐力激減するが、ここでしないとするモデルの場合 (点鎖線) と比べると、トリリニアモデルの方が、そこでの

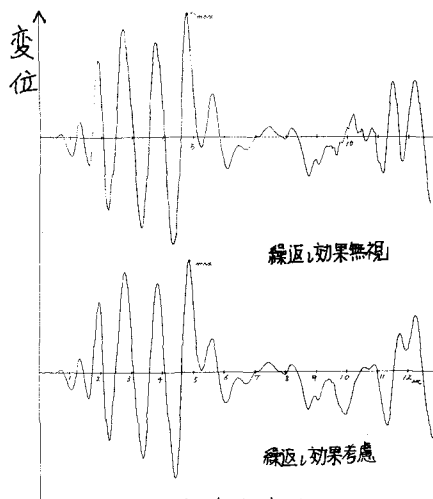


図13 変位波形

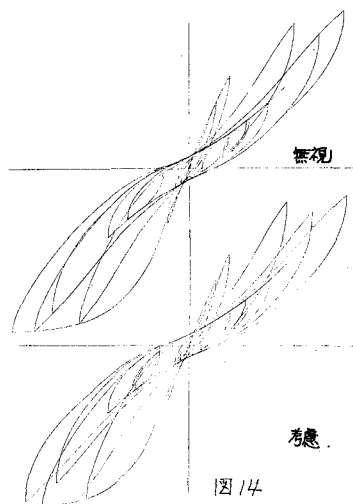


図14 P-δ 関係

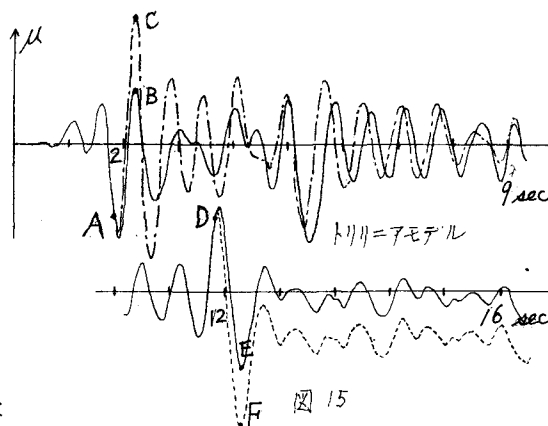


図15

耐力激減の効果

ピーク変位は大きい。次のピーク英 (B) は英 C に比べかなり小さい。これは、トリリニアモデルでは、耐力激減後履歴減衰が大きい為である。更に又、D 英 (11.8 sec) で A と反対の側で耐力激減するが、この時も激減せずとしたモデル (破線) と比べると、そこでのピークは、大きい。次のピーク E 英は、F 英よりかなり小さく、以後この影響により形状は相似であるが変位を中心に上側にずれる。このような傾向は一般に次のように伝える。

(1) 耐力が減衰するとそのサイクルでの履歴減衰が大きく、その直後の変位の伸びをおさえる。(2) それにより、その後の振動中心がずれる可能性が大きい。(3) この傾向は、耐力落差の大きい程著しい。又、図 16 は耐力激減直後のピーク変位 $\bar{\mu} = \frac{\bar{x}_e}{x_e}$ との関係を図示したもので、 β が小さい程 (落差の大きい程) 変位の伸びが反比例的に増加し、以後の履歴減衰効果大きい事を示唆している。但し、たとえ落差が大きくても、変位の値としてはそれほど大きくはない。

§7 まとめ

以上、数少ない計算例について、応答性状の概略を述べたが、まだ多くの問題英を含んでいる。以下応答性状をまとめてみる。

- (1) 耐力激減後、応答性状は大きく異なり、特に落差の大きい程 (β が小程) その差は著しい。
- (2) 片方向で破壊すると、他方向では破壊し難く、非対称の復元力で振動する。
- (3) 最大応答量は (特に地震の初期で起る) 線形系の場合とあまり変わらない。
- (4) 複雑な非線形形状を示すモデル (より実状に近いと考えられる) では振動の中心が著しくずれる。
- (5) 負勾配のスケルトンカーブは、例え、その傾きが小さくても応答性状は極端に不利となる。
- (6) 図 13. 14 は 繰返しによる剛性の低下を考慮した場合と ($c = 0.2$) しない場合の変位波形及び $P-\delta$ 関係を示したものである。これらの図や、又、表 2 などより、ここで用いたモデルによる繰返しの効果は応答性状に大きな影響を与えないと云える。

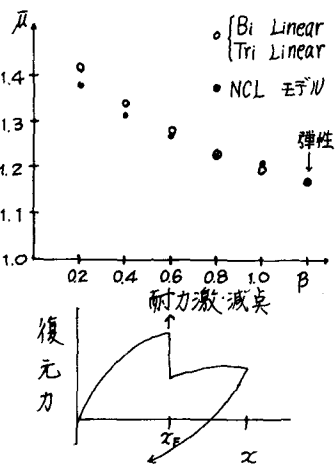


図 16 耐力激減効果

c	$\bar{\mu}$	$\bar{\mu}$
0.0	1.91	13.24
0.05	1.89	13.25
0.10	1.88	13.23
0.15	1.85	13.11
0.20	1.84	12.98

表 2

参考文献

- (1) 鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性 (水平加力実験) 昭 45 学論梗概集 谷 資信他
- (2) 鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性 (動的特性その 1) " " "
- (3) 鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性 (動的特性その 2) " " "
- (4) 鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性 (水平加力実験その 2) 昭 46 " "