

高層建築物の動的弾塑性設計

棚 橋 諒 *

小 堀 鐸 二 *

§ 1. 耐震設計について

建築物を耐震的に設計するために、静的な水平力のみを与え、その力に対して剛強な構造にしさへすればよいという考え方は、もはや過去のものとなりつつあるようである。

それに代るものとして、建築物に働く地震力とその力の加わる時間、すなわち速度(運動のエネルギー)と、建築物の変形能力(ポテンシャル・エネルギー)との二つを、建築物が耐震的であるかどうかの標準の尺度にすべきであるということについて筆者の一人が説いてから久しいが、¹⁾近年にいたり、高層建築の耐震設計が問題になるに及んで、漸く一般の研究者がそうした方向に目を向け始めたと思われる。

もとよりわれわれは、この方向の妥当性を裏付けるべく、建築物の弾塑性地震応答(非線型振動)の理論的な研究を、かねてより行って来ていて、²⁾また具体的な設計方式等についての提案も折に触れて提示して来た。^{3)~5)}

一方、高層建築物の耐震設計の一つのプロセスとして動的解析により設計構造物の耐震性状をチェックしようとする方式が最近になって問題とされている。

これは従来、研究室で行われていた建築物の弾塑性振動の研究を、定量的な実際設計の段階に移し、地震時に生ずる建築物の応答を見出して、それを実施設計の拠り所としようとする意図をもつものであるが、すでに論じたように、^{4), 5)}これが充分の信頼性をもつものとなるためには、弾塑性構造物に関する非線型の地震応答解析の研究が研究室において尙一層、深められ蓄積される必要がある。

これ等の基本応答に関する諸研究をもとにして初期設計の方式が検討され、それにより設計された高層建築物は更に地震以外の重要な外乱、すなわち強風と、それによる座屈安定等の検討を経て、要すればいわゆる動的解析といわれている定量的な地震応答の検定を行うことにするのとなければ、激震に対して十分安全であり、かつ経済性を備えた合理的な設計を構造物に与えることが困難になるであろう。

こうした観点に立つて、われわれがすでに行って来た諸研究²⁾を背景とする初期設計の一方式を提案したのであるが、⁶⁾これを更に合理化するために、そしてまた動的弾塑性解析の方法を定式

* 京都大学教授、工博

化する目的のもとに、基本応答に関する研究を行っているのである。⁷⁾

以下の記述は紙面の関係もあり、最近われわれが行った基本応答の研究の一部を、高層建築物の耐震設計のための一つの資料として提供するにとどめる。

§ 2. 地震応答解析

しばしば論じたように、^{4), 5)} 応答量を如何なる耐震安全性の尺度として捉えたらよいか、高層建築物のモデル化を如何に行うか、そして地震の外乱の規準を何に選定するのがよいか等のいづれも耐震研究上、根本的というべき諸問題については、絶えず十分な検討が払われていなければならない。

将来生起するであろう激震の性質を含む地震の外乱を与え、それに対して耐震安全性の尺度により規定される応答量が、構造物の各部で許容される応答値の範囲内に出来るだけ一様に収束するようにするためには、構造物の動的特性をどのように与えたらよいかという問題を解決することが動的設計の要諦であろう。

いうまでもなく地震の外乱の性質が変われば、構造物の力学的な性質を変えなくても、その地震応答は変化する。あるいはまた地震の外乱の性質を変えずとも、構造物を構成する諸元を変えるならば、同じくその地震応答は異った様相を呈する。われわれの設計する構造物はそうした地震応答の僅かな変化や相違を余り敏感に反映するものであつてはならない。

何故ならば、設計構造物が地震時に受ける地動の外乱は、その地盤の固有性に従うものであつても、震源の発生位置や機構規模により相違してくるものであるし、また構造上の設計要求が完全に忠実に実施設計施工されるとは限らないからである。従つて地震の外乱の振幅特性や周期特性の変化や、構造物の動特性等の若干の変化によつても、地震応答がある許容範囲内に安定するように設計計画してやらねばならないし、そうした構造物のモデルとして如何なる特性を与えてやるのがよいかを見出すことが必要である。

2.1 地震の外乱のパターンの選定

ここに提示する応答に用いた外乱のパターンは El Centro NS 成分 (1940) と Vernon S82 E 成分 (1933) である。われわれは数多くの強震記録についての自己相関関数と確率振幅密度分布を調べて来たが、³⁾ その中で El Centro 地震はランダム成分を多く含み、その継続時間が長い、Vernon 地震は比較的に周期的で継続時間が短い。これ等は地震のパターンの二つの典型と考へてよいのでここに採上げたわけである。

2.2 構造物のモデル化

多くの自由度と分布質量とによって、三次元空間内に複雑に構成される高層建築物が一次元空間の少数自由度をもつモデルにreduceされるためには、可成り大胆な近似が許容されるのでなければならない。少くともその近似のreductionが正当化されるためには、構造物とそのモデルとの双方のもつ動特性が弾性ならびに塑性領域にわたって同等である必要がある。それにはまず構造計画の段階において高層建築の三次元構成が、地震応答としては捩れや上下振動の影響を無視できるように配慮されねばならない。その上で1次元多数質点系を更に少数質点系にreduceすることになるので、この構造物のモデル化は余程慎重に取扱わないと異質なモデルの検討に終始する怖れがある。

こうしたモデルの近似化が当面必要なのは解析手段の電子計算機の問題によるところが大きい。われわれは計算労力と計算精度と、更に計算速度の点で電子計算機を利用するが、現段階ではこうした電子計算機はアナログあるいはデジタル型を問わず、非線型復元力をもつ構造物の弾塑性解析において、多数質点系に伴う誤差の増大を防ぐことが難しいのである。

以上の問題を前提として、ここでは1次元の5質点系が採用された。これに与えた動特性は既経の研究⁸⁾で最適と見られたB₁型について調べることとした。因みにB₁型とは初期剛性分布ベクトル $\{K_i\} = \{1, 8/9, 7/9, 6/9, 5/9\}$ であり、弾性限変位分布ベクトル $\{\delta_i\} = \{1\}$ 質量分布ベクトル $\{m_i\} = \{1\}$ を与えたものである。各層の復元力特性はbilinear型で

i 第2分枝が完全塑性の場合($r=0$)

ii 第2分枝が第1分枝勾配の10%および20%の立上り勾配をもつ場合($r=0.1$ および $r=0.2$)

を採り上げた。これは微量であっても正值の要素をもつ第2分枝の第1分枝(初期)剛性比ベクトル $\{r_i\}$ の導入が応答量を安定化させる傾向をもつことが知られており、⁹⁾水平抵抗部材(軽量壁あるいは筋違等の2次的な耐震部材)の適当な配置が、高度の高層建築においても有効であることを確める目的をもつものである。

地盤連成の効果を無視することが妥当でない場合もあるが、高層建築においては良質な地盤と堅固な基礎が要求されるので、ここではその影響を採り入れていない。従来のわれわれの研究によれば、¹⁰⁾下部構造の連成度には臨界点があつて、この臨界点以上では連成作用を省略しても上部構造の応答に与える影響は殆んど無視出来ることが指摘されている。

2.3 応答出力の考察

応答解析には京大建築教室のアナログ計算機を使用した。

解析結果は基本応答図として第1図から第5図までに整理して示してある。

第1図～第3図は耐震安全性の尺度に第一義的な靱性率の最大値 r_{Di} をとった場合で、例により地震の外乱の周期特性と振幅特性を変化させ、二つの外乱の場合を対比させて示してある。周期特性は T_d を外乱の継続時間、 $1T$ を建物の基本振動周期としたときの $1/\rho (= 1T/T_d)$ の値の変化として与えた。また振幅特性は A を外乱の最大加速度振幅 $\bar{M}$ および $\bar{B}$ を層質量および弾性限層剪断強度のそれぞれの規率量としたとき

$$\alpha = A\bar{M}/\bar{B}$$

によって定義される無次元量 α と ρ との積

$$\alpha\rho = A \cdot T_d \cdot (\bar{M}/\bar{B} \cdot 1T)$$

の値を変化させることによって示した。上式より明かなように $\alpha\rho$ をパラメーターに選んだことは、外乱の振幅特性を外乱の速度を示す無次元量によって変化させたことに対応する。これは従来の研究により $\alpha\rho$ の値が一定の場合、ある $1/\rho$ の値の範囲で応答 r_{Di} が安定化するという結果が得られているからであって、ここではその安定度を更に詳しく考察しようとする立場をとった。これ等のパラメーターの値は

$$\alpha\rho = 2 \sim 8$$

$$\frac{1}{\rho} = \begin{cases} 1/29 \sim 5/29 & (\text{El Centro NS}) \\ 1/11 \sim 5/11 & (\text{Vernon S82E}) \end{cases}$$

の範囲で与えた。

第1図、第2図、第3図の相異は $r = 0, 0.1, 0.2$ の相異だけである。これ等を通覧するとき、 $\alpha\rho$ の値の増加は各層の r_{Di} が増大し、バラついて来る傾向と、上層の r_{Di} に比し下層のそれが大きくなる傾向がみられる。また横軸の周期特性の変化に対しては、 $1/\rho$ の値が増すに従い、 $\alpha\rho$ の値の大きいところで r_{Di} が大きくなる傾向がある。これ等の諸傾向は r の値によって変り、外乱のパターンの影響によっても異なる。 r_{Di} の応答量を略々同じくするような対応を $r = 0$ のときの $\alpha\rho$ の値を n_0 としたとき r の変化による $\alpha\rho$ の相対量は第1表で示される。

第 1 表

$\alpha\rho \backslash r$	$r = 0$ (第1図)	$r = 0.1$ (第2図)	$r = 0.2$ (第3図)
El Centro	n_0	$n_0 + 1$	$n_0 + 2$
Vernon	n_0	$n_0 + 0.5$	$n_0 + 1$

r を固定し、それぞれの図について外乱による影響を比較すれば、El Centroの外乱の $\alpha\rho$

の値を n_E とすればVernon の場合は大体 $n_E + 1$ に対応するとみてよいであろう。

Vernon 地震の T_d はEl Centroのその略々 $1/3$ に近いので、El Centroと同じ $\alpha \rho$ の値を与えることは、約3倍に近い最大加速度振幅を与えることに対応するが、それ以上の振幅に対して応答 r_{Di} は同程度になることを図は示している。

Base Shear 係数 C は g を重力の加速度とするとき

$$C = \frac{A T_d}{5 g \cdot \alpha \rho} \cdot \frac{1}{i T}$$

で示され、 $A T / g \doteq 10 \text{ sec}$ とすれば

$$C = \frac{2}{\alpha \rho} \cdot \frac{1}{i T}$$

となる。これより第1～3図を利用すれば、 r_{Di} と $i T$ をパラメーターとして C を表現することが出来る。

第4図は各層のOff Set 量 r_{Fi} の比較的大きな値を示したもので、これは第2分枝の立上り勾配が有効であることを示している。この解析では特に下層で有効である。

第5図は転倒モーメント r_M を示したもので、当然のことながら $\alpha \rho$ の値が大なれば、その量は大きく、また r の値が増えれば、大きく出て来る。そしてこの r_M のレスポンスがほぼ基本周期に近い変化を示していたことも当然の結果である。

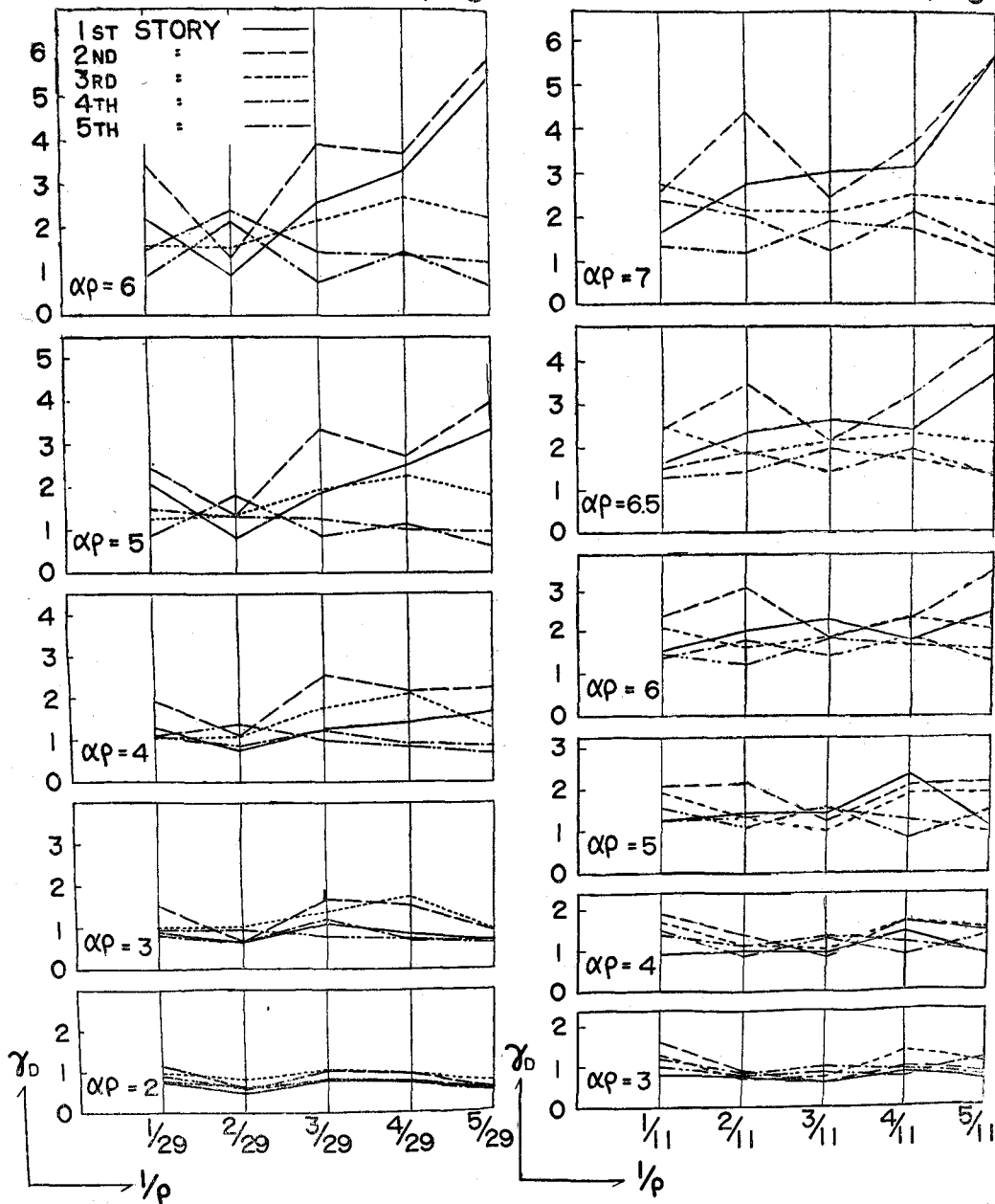
以上、二つの典型的な外乱に関する基本応答図のみを示した。この結果に関する限りランダム性の継続時間の長い外乱を与えることの方が応答解析に望ましいようである。また復元力特性としての第2分枝の立上りは有効で僅か10% ($r = 0.1$) を与えるだけでも、その効果は顕著である。併し余り立上りを大きくすることは、hysteretic な塑性性による履歴減衰が少くなり、線型の場合に近くなるであろう。またこの解析では地震外乱の速度の尺度を示す $\alpha \rho$ をパラメーターに選んだが、 $\alpha \rho$ を定値にみるとき応答 r_{Di} のパラッキは少なくなることが分る。これは r の効果によって更に安定化することが示された。

引用文献

- 1) 棚橋「地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見」 建雄 1935, pp578~587
- 2) 非線型振動に関する一連の研究 1954年以降、建築学会その他に毎年発表
- 3) 坂、棚橋、小堀、金多、六車 「終極変位設計法」
学術会議橋梁構造工学会論文集 1955, pp127~142
- 4) 小堀「動的設計の現段階」 1962
国内地震工学シンポジウム論文集 pp305~310
- 5) 棚橋、小堀、金多、南井、水畑 「雑誌カラム」 №6, 1963
- 6) 小堀 「高層建築物の耐震設計試案」 振動分科会資料 №200, 1963
- 7) 小堀、南井
"Earthquake Response Analysis and Aseismic Design,"
第1回チリー地震工学セッション 1963
- 8) 小堀、南井、田川 「弾塑性構造物の耐震性に関する研究」 1962
国内地震工学シンポジウム論文集 pp165~170
- 9) 棚橋、小堀、金多、南井
"Statistical Properties of Earthquake Accelerograms
and Equivalent Earthquake Excitation Pattern,"
第1回チリー地震工学セッション 1963
- 10) 棚橋、小堀、金多、南井、井上 「構造物の耐震性に及ぼす下部組織連成の効果」
1962 国内地震工学シンポジウム論文集 pp159~164

EL CENTRO NS $r=0$

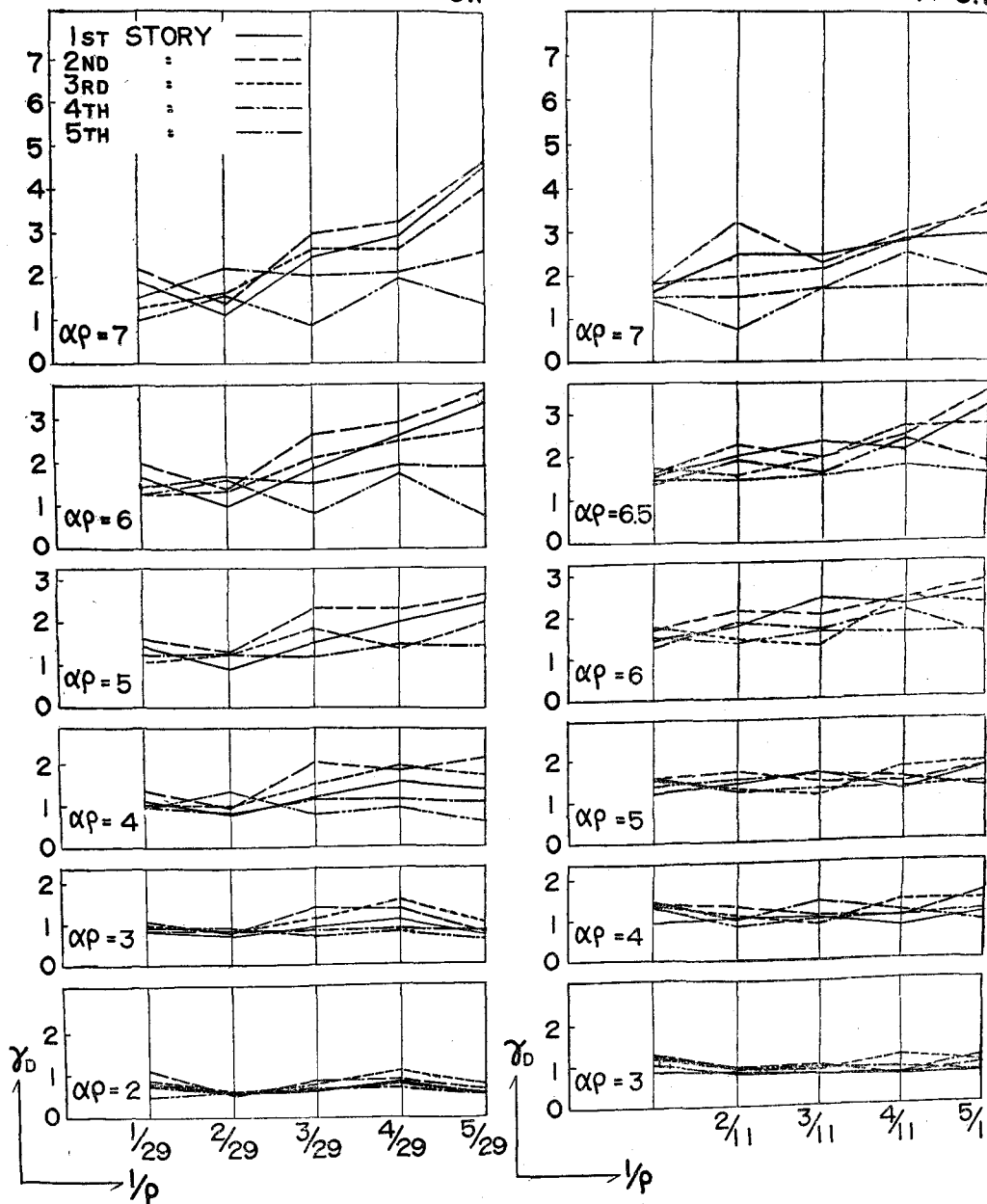
VERNON S82°E $r=0$



第1図 各層の最大靱性率 γ_D ($r=0$ の場合)

EL CENTRO NS $\gamma=0.1$

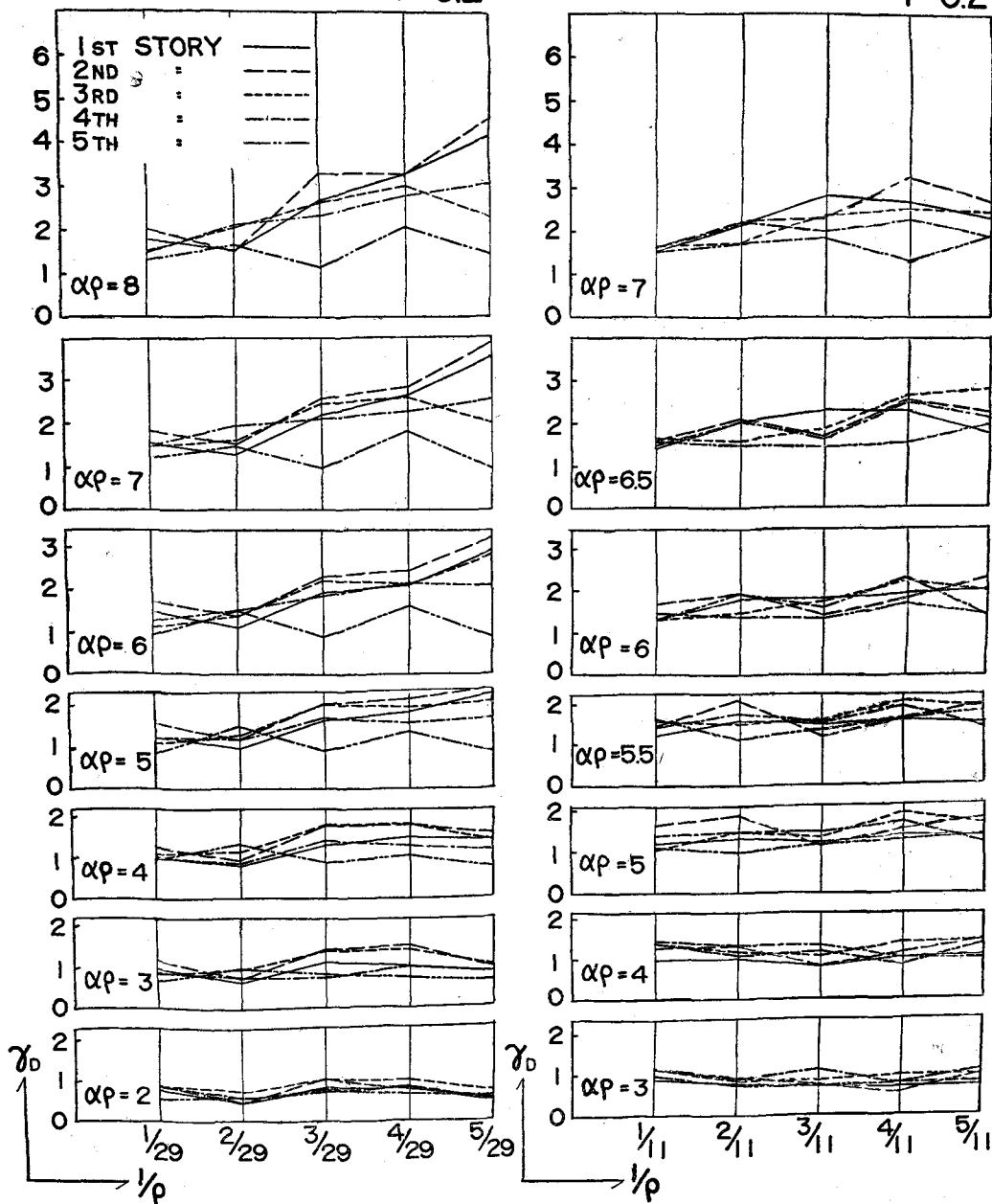
VERNON S82°E $\gamma=0.1$



第2図 各層の最大靱性率 γ_D ($\gamma=0.1$ の場合)

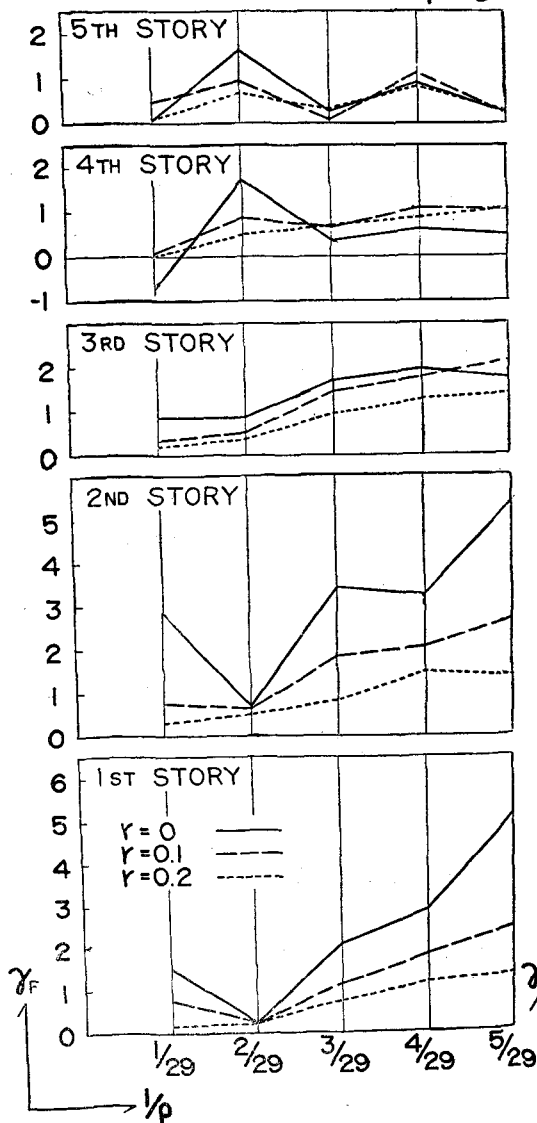
EL CENTRO NS $r=0.2$

VERNON S82'E $r=0.2$

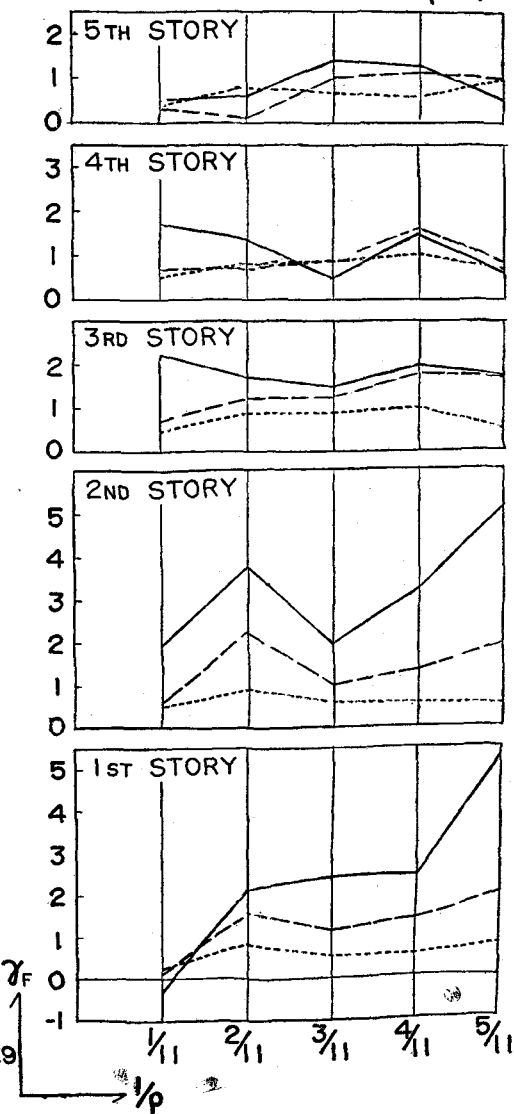


第3図 各層の最大靱性率 γ_D ($r=0.2$ の場合)

EL CENTRO NS $\alpha\rho=6$



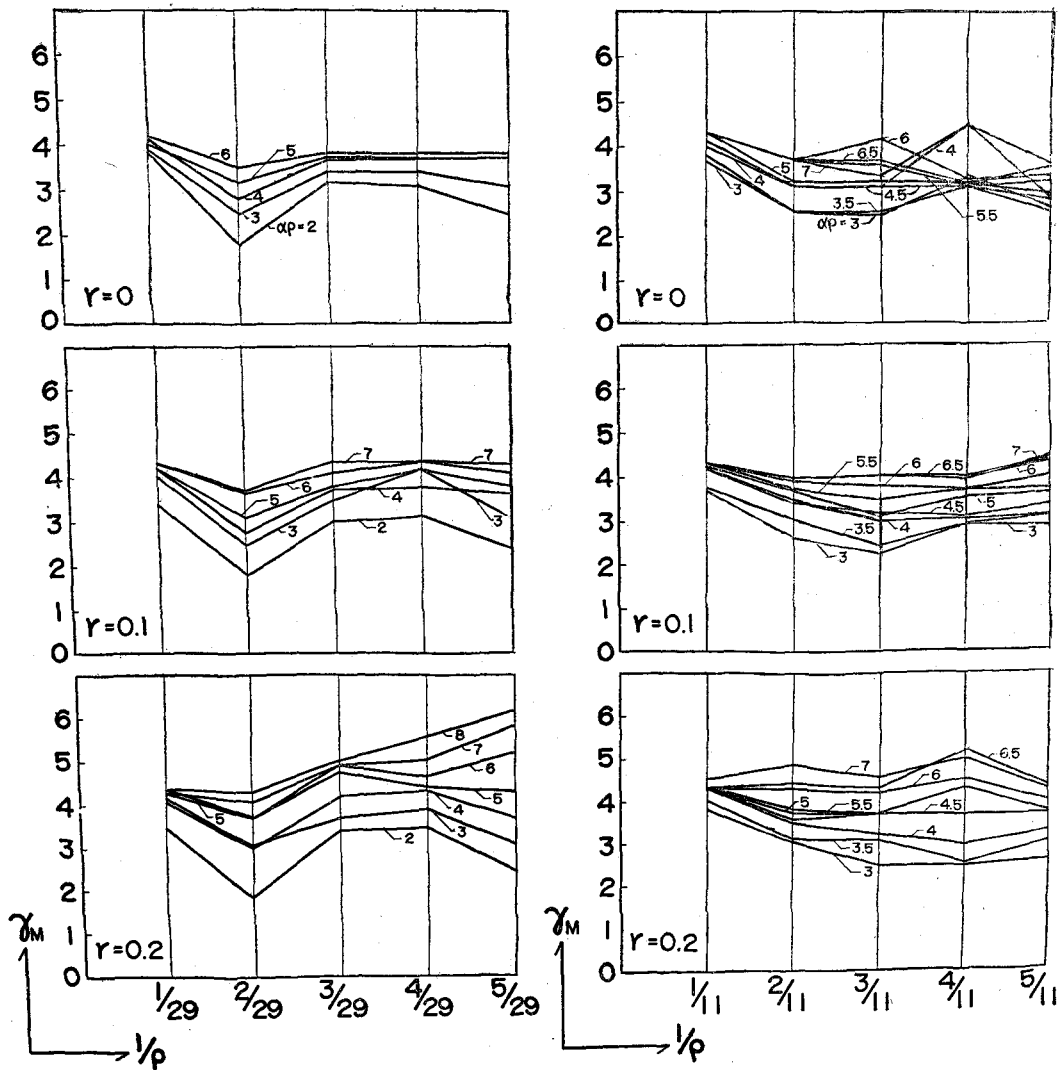
VERNON S82'E $\alpha\rho=7$



第 4 図 各層の OFF SET γ_F

EL CENTRO NS

VERNON S82°E



第 5 図 転倒モーメント γ_M