

応答スペクトルを用いた鉄筋コンクリート建造物の地震時応答変位の予測

ESTIMATION OF DISPLACEMENT RESPONSES FOR R/C BUILDINGS
USING THE RESPONSE SPECTRUM

島崎 和司 *

Kazushi SHIMAZAKI

This paper proposes a method to estimate the maximum displacement response of reinforced concrete buildings in an earthquake using the response spectrum. Nonlinear earthquake response calculations of 12,600 systems were carried out for 20 ground motions. The results were classified by using the dimensionless parameters based on properties of the system and the frequency characteristics of the ground motion, and plotted in the relation of the dimensionless parameters, strength ratio SR and displacement ratio DR . This relation was fitted by the hyperbolic curve for each plotted figure and the estimation equations (3) and (8) were proposed. This estimation showed satisfactory results in safety side.

Keywords : Reinforced Concrete Building, Earthquake Resistant Design, Displacement Response, Response Spectrum

鉄筋コンクリート 耐震設計 変位応答 応答スペクトル

1. 序

建築設計が性能を明示する設計法へと向かう中、耐震設計においても性能の明示が求められるようになり、その簡易な尺度としての応答変位が着目されている。また、既存建物の耐震性の評価も、耐力だけでなく、変形能力を考慮した評価が求められるようになってきた。著者等は、これまで応答変位に基づいた設計法をめざして検討を重ねてきた^{1)~6)}。そのなかで、バイリニアの復元力を持つ1質点系の弾塑性変位応答を用いて、応答変位一定則の成り立つ条件について検討し、鉄筋コンクリート建造物の地震時水平変位について報告した¹⁾。そこでは、スムーズ化した弾性応答スペクトルとバイリニアモデルに理想化した系の初期周期と耐力を用いた無次元化係数である周期比 TR 、強度比 SR を用い、無次元化して表した応答変位比 DR との関係を下のように与えた。

$SR+TR \geq 1$ ならば、弾塑性応答変位がスムーズ化した弾性応答スペクトル値を超えないという、応答変位一定則が成り立ち、また履歴モデルが応答値に与える影響は小さい

$SR+TR < 1$ ならば、 DR は、 SR に反比例して双曲線的に増大し、また履歴モデルの差による影響（エネルギー吸収能力の大小）が大きい

この応答変位一定則の成り立つ条件は、実験的研究⁷⁾によっても成立することが認められている。これらの研究と等価線形化法を組み合わせ、応答変位より構造特性係数 D_s を算定する手法について

も報告した⁶⁾。

鉄筋コンクリート構造の部材モデルとしては、部材のクラック点と降伏点を折れ点としたトリリニアタイプのモデルがよく使われる。部材をこのようにモデル化すると、建物全体としては

どれかの部材にクラックが入って剛性低下をはじめ、多くの部材にクラックが入って建物全体の剛性が低下する、どこかの部材が降伏して、剛性低下が大きくなる、崩壊メカニズムに達して剛性がほとんど0となる、

というように剛性低下が生じる。建物全体を1質点系にする場合には、剛性低下を始める点と、ほとんど耐力に達する点の2点で折れ曲がるトリリニアのモデルとすることが多い。限界耐力設計法⁸⁾においては、これらのことを考慮し、また、剛性分布、耐力分布の不都合による変形集中も考慮することを目的として、建物のフレームモデルを用い、Pushover解析により、等価1質点系の水平力 - 変形関係を求めている。そのためには、設計が終了し、断面が決まっていなければモデルを求めることは不可能であり、設計の最終段階での検定作業となる。設計の初期段階や、既存建物の応答変位推定においては、構造部材の断面積等から簡単にモデルが設定できることが望ましい。

耐震診断においては、耐震診断指標⁹⁾を用いて復元力モデルを設定し、地震応答解析により耐震安全性を検討している例¹⁰⁾¹¹⁾が見られる。また、フレームモデルを用いたPushover解析において、剛性評価モデルと耐力評価モデルを作成し、その結果をつなぐことで実験結果と

* 神奈川大学 工学部 建築学科 助教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Department of Architecture, Kanagawa University, Dr. Engineering

よく対応することが報告されている¹²⁾。弾性周期は躯体断面積やその他の鉛直部材断面積などの数値を用いれば、比較的簡単に設定できると考えられ、建物高さによる略算式を用いてもおおむね実構造物に対応すると考えられる。建物耐力については、志賀マップや耐震診断指標を用いて設定可能と考えられ、耐震診断指標の考え方を基にすれば、降伏点剛性も推定可能と考えられる。つまり、概算設計時や、既存の建物の診断時において、およその部材の断面積や階高、スパン等がわかれば、初期剛性と降伏耐力、降伏点剛性は大きまかに算定でき、ある程度のトリリニアールモデルを設定できると考えられ、これを用いた応答変位の推定が可能になる。

これまでに、1質点系に関する弾塑性応答解析は数多く行われ、既往の研究¹⁾においてもそのレビューを行っている。これらの中には、バイリニアールモデルだけでなく、トリリニアールモデルを用いて検討したのも数多くあり、変位応答の推定式を提案したのものもある。これらの検討は限定されたパラメータに対するものであったため、既往の研究¹⁾において広範なパラメータを用いた解析を行い応答変位一定則の成り立つ条件について示した。ここでは、バイリニアールモデルを使用しているため、鉄筋コンクリート構造に適用するには工夫が必要であり、曲げ降伏型の建物については、弾性周期と降伏点周期の平均的な周期として、バイリニアールモデルの初期周期を弾性周期の $\sqrt{2}$ 倍に設定することで、振動台実験の結果とよく適合することを示している¹³⁾。これをより一般的に拡張するためには、トリリニアールモデルのパラメータ（第1折れ点耐力、降伏剛性低下率）に対して検討する必要がある。

本論では鉄筋コンクリート構造全般に適用するよう解析モデルのパラメータを設定し、また入力地震動もいろいろの特性を持つものを用い、既往の研究¹⁾に準じた無次元パラメータで整理することにより、バイリニアールモデルを用いて得られた結果を、トリリニアールモデルに拡張し、一般的な傾向を求めようとするものである。トリリニアールモデルとしては武田モデル¹⁴⁾を用い、パラメトリック解析結果を検討した。トリリニアールモデルを用いることで、既往の研究¹⁾に比べパラメータが倍増した。また、エネルギー吸収能力の影響を検討するために、戻り剛性低下率もパラメータとした。主として次の2点について着目し、得られた最大応答変位の解析値を検討し、弾塑性変位応答と各パラメータのかかわりと応答推定法の評価を行うものとする。

主として $SR+TR < 1$ の時の、エネルギー吸収能力の相違による応答値の SR の減少に伴う DR の増大の傾向の検討
 トリリニアールモデルを等価なバイリニアールモデルとして評価するための、等価周期の相違による等価弾性応答値の違いの検討

2. 一質点系応答解析

解析に用いた復元力特性は図1に示したトリリニアール型の武田モデルである。パラメータとして表1に示したように、降伏点荷重とクラック荷重の比、荷重比 FR を 0.2~0.8 まで 0.1 刻みで 7 種、弾性剛性と降伏点剛性の比、剛性比 KR を 0.2~0.6 まで 0.1 刻みで 5 種、弾性応答せん断力に対する降伏点荷重の比、強度比 SR を 0.1~1.0 まで 0.1 刻みで 10 種、地震動の特性を表す応答スペクトルの加速度一定領域と速度一定領域の境界の周期に対する系の初期周期の比、周期比 TR を 6 種、武田モデルの戻り剛性低下率 を 0~1.0

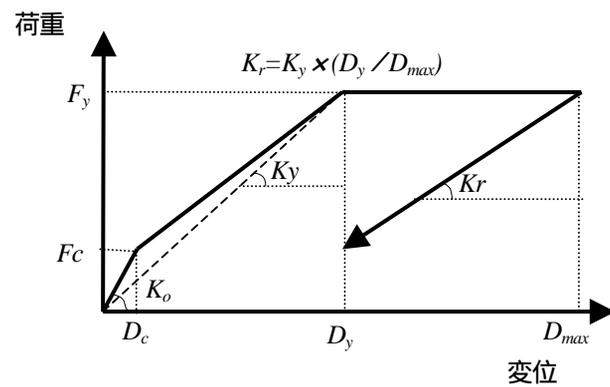


図1 トリリニアールモデル

表1 解析パラメータ一覧

荷重比 FR	$\frac{\text{クラック荷重 } F_c}{\text{降伏荷重 } F_y}$	0.2~0.8 (0.1)	7種
剛性比 KR	$\frac{\text{降伏剛性 } K_y}{\text{弾性剛性 } K_o}$	0.2~0.6 (0.1)	5種
強度比 SR	$\frac{\text{降伏強度}}{\text{5\%減衰弾性応答せん断力}}$	0.1~1 (0.1)	10種
周期比 TR	$\frac{\text{初期周期 } T_o}{\text{加速度・速度応答スペクトル一定領域の境界の周期 } T_1}$	1/3、2/3、1、2、3、及び5sec	6種
	戻り剛性低下率	0~1 (0.2)	6種
	様々な周波数特性をもつ地震動	-	20種
変位応答比 DR	$\frac{\text{最大応答変位}}{\text{初期周期 } T_o \text{ における平滑化した5\%減衰の変位応答スペクトル値}}$	-	-

(DR は解析のパラメータとしては用いないが定義を記載)

表2 用いた地震動記録と最大値

No.	地震動名	地震動の最大値			特性周期 T_1 sec
		加速度 mm/sec ²	速度 mm/sec	変位 mm	
1	EL Centro NS	3417	335	109	0.57
2	EL Centro EW	2101	369	198	0.77
3	Taft NS	1527	157	67	0.53
4	Taft EW	1760	177	92	0.51
5	Tokyo 101 NS	740	76	44	0.70
6	Sendai 501 NS	575	35	19	0.29
7	Sendai 501 EW	475	38	21	0.40
8	Hachinohe NS	2250	341	114	0.74
9	Hachinohe EW	1829	358	133	0.93
10	Tho30-1FL NS	2582	362	145	0.98
11	Tho30-1FL EW	2026	276	91	0.54
12	Castaic EW	3107	163	26	0.36
13	Managua NS	3175	295	67	0.38
14	Santa Barbara EW	1284	188	52	1.15
15	ATS	2526	372	395	0.63
16	YPT	3222	880	1484	1.77
17	Kobe EW	6175	754	179	0.81
18	Kobe NS	8182	904	199	0.83
19	Chichi T129NS	6107	515	1521	0.48
20	Chichi T129EW	9829	724	2704	0.39

まで 0.2 刻みで 6 種変化させた。戻り剛性率が 1.0 のときは、降伏後は原点指向モデルとなる。降伏後の剛性は弾性剛性の 0.001 倍とした。この履歴モデルを用い、様々な周波特性を持つ地震動 20 種に対する一質点系弾塑性応答解析を計 252,000 種行った。用いた地震動を表 2 に示す。No.1~14 は既往の研究¹⁾と同じで、No.15~20 は断層近くの地震動として取り上げた。No.15、16 は、トルコの Kocaeli Earthquake (1999) の記録で Bogazici Univ. の web サイトで公開されていたもの¹⁵⁾、No.17、18 は、阪神淡路大震災 (1997) で神戸海洋気象台で記録されたもの、No.19、20 は、台湾の Chi-Chi Earthquake (1999) TCU129 での記録¹⁶⁾である。地震動の最大値は、No.1~14 は既往の研究¹⁾の値、No.15~20 は大崎の加速度記録の基線補正法¹⁷⁾によって求めた値である。

一質点系の弾塑性応答解析結果から、得られた最大応答変位を表 1 で定義した変位応答比 DR として無次元化し、横軸に変位応答比 DR 、縦軸に強度比 SR をとり、20 種の地震動に対する結果を 1 枚のグラフにプロットした。ここで無次元化の規準とした弾性応答値は、それぞれの地震動の 5% 減衰での弾性応答スペクトル値を既往の研究¹⁾の方法によってスムージング化した値を用いた。

解析結果の例として図 2(a)に一般的な鉄筋コンクリート建物を想定した $FR=0.5$ 、 $KR=0.5$ 、 $\gamma=0.4$ の TR 別グラフを、(b)に耐力に比べ第 1 折点荷重が小さく、剛性低下率が大きく、かつエネルギー吸収能力の少ないケースとして $FR=0.2$ 、 $KR=0.2$ 、 $\gamma=0.8$ の TR 別グラフを示す。 TR 毎の各グラフにおいて、 SR によって DR が増大する傾向が地震動の種類によらずおおむね同様であるといえる。(a)の場合、 TR が 1 以上で、 SR が 0.2 以上の場合には DR はおおむね 1 以下となっており、弾塑性応答変位が弾性応答変位以下となる広義の応答変位一定則を満足している。 TR が 1 以下の場合には、 SR の減少とともに双曲線的に DR が増大している。弾性剛性に比べ降伏点剛性が小さく、かつエネルギー吸収能力の小さい(b)の場合は、一般的に DR が 1 以上で SR の減少とともに双曲線的に DR が増大し、 TR が小さいほどその傾向が大きい。

FR 、 KR 、 γ 、 TR の組み合わせによる 1,260 種の SR - DR 関係のグラフをベースに、これらの因子が DR に与える影響と予測式を検討する。

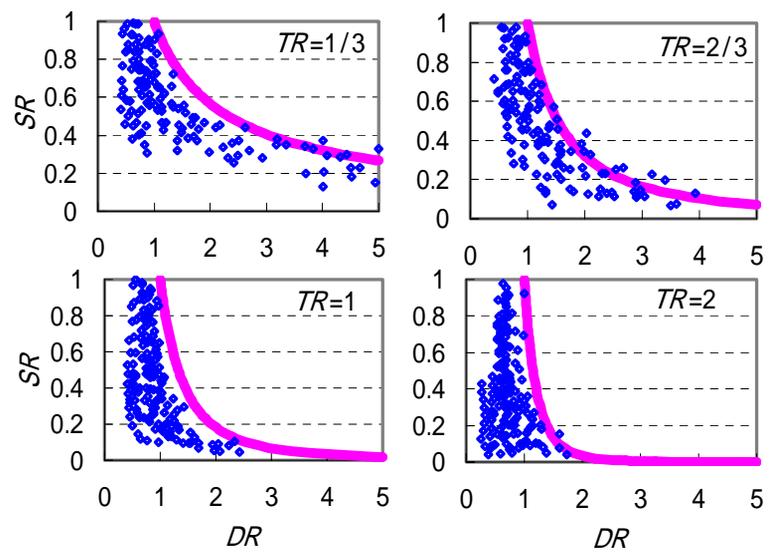
3. 応答推定式

ここでは、推定式が煩雑にならないよう工学的判断を元に以下の手順で解析結果の整理を行った。

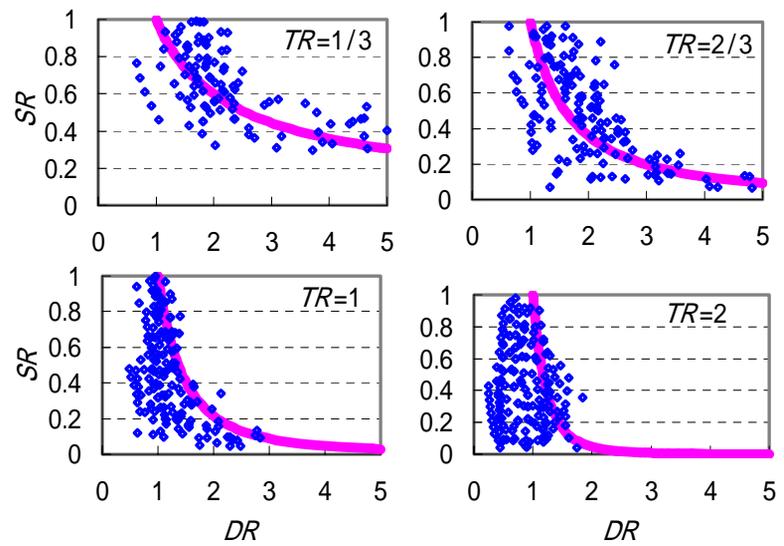
- 1) 各グラフの SR - DR 関係を $DR = 1/SR^{1/x}$ の双曲線で近似
- 2) 双曲線の乗数 $1/x$ と FR 、 KR 、 γ の関係を回帰分析により算定
- 3) 等価な弾性応答値を等価周期の応答値になるように補正

3.1 双曲線近似

1,260 のグラフそれぞれを $DR = 1/SR^{1/x}$ と仮定し、最小 2 乗法により係数 x を算定する。まず、 DR と SR の対数をとって、これを図 3 に例示したようにプロットする。このプロットの直線近似を最小 2 乗法で求めることにより係数 x を求める。この式は、 $(DR, SR) = (1, 1)$ 、すなわち対数グラフでの原点を通るものとする。これは、 $SR=1$ の弾性応答時には、応答変位も弾性応答値と同じ ($DR=1$) であるべきと考えたからである。実際の応答値は、規準となる弾性応答値をスムージング化した値としていること、および第 1 折点を越えた応答な

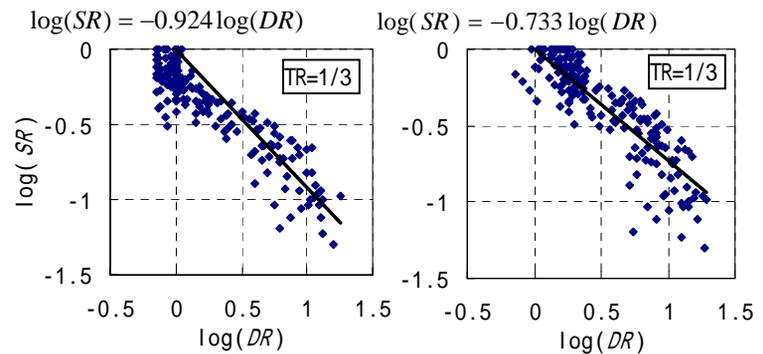


(a) $FR=0.5$ 、 $KR=0.5$ 、 $\gamma=0.4$



(b) $FR=0.2$ 、 $KR=0.2$ 、 $\gamma=0.8$

図 2 無次元量で表した各周期比における耐力 - 応答変位関係と双曲線近似式



(a) $FR=0.5$ 、 $KR=0.5$ 、 $\gamma=0.4$ (b) $FR=0.2$ 、 $KR=0.2$ 、 $\gamma=0.8$

図 3 強度比 SR - 応答変位比 DR 関係の対数グラフと直線近似例

ので弾性ではなく、等価周期が伸びていることにより、 $(DR, SR) = (1, 1)$ の点とはなっていないものが多い。これについては 3.2 で補正する。推定式は安全側の値とするため、最小 2 乗法近似では DR が 0.7 以下となるものを除いて算定した。図 3 中に求めた近似直線とその傾きの例を示した。

算定した TR 別の係数 x と FR 、 KR 、 γ の関係を図 4 に示す。ここで、 $TR > 1$ の場合は、図 2 に示したように DR がおおむね 1 以下となり、解析結果を $DR = 1/SR^{1/x}$ で近似したときに x は 2 以上で、図 5 に示すようにグラフにほとんど差がなくなる。そのためここでは $TR = 1$ の場合のみを検討対象とした。同図中にはそれぞれのパラメ

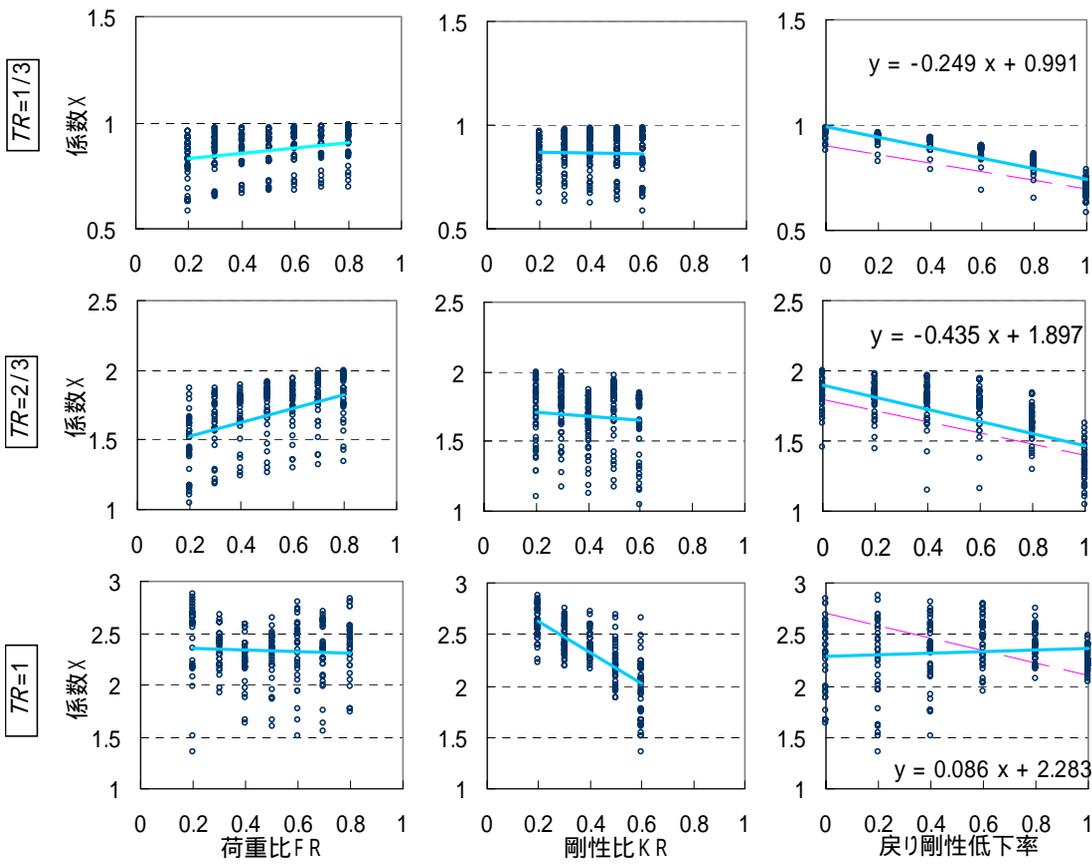


図4 各周期比における係数 x と荷重比 FR , 剛性比 KR , 戻り剛性低下率 との関係

ータに対する最小 2 乗法による近似直線を入れた。 FR に対しては やや右上がり、 KR に対してはおおむね一定で、 $TR=1$ のときのみ右下がり、 DR に対しては、 TR が小さい時には、右下がりの傾向にあり、 TR が大きくなるとその傾きが小さくなっている。これを、重回帰分析により回帰式を求めると表 3 のようになる。これより、係数 x は次式により与えられる事になる。

$$x = -0.053 + 0.180FR + 0.569KR - 0.199\beta + 2.190TR \quad \dots\dots\dots (1)$$

この(1)式で与えられる係数 x の算定式は実用上煩雑であり、工学的にはもっと単純化された式が望ましい。前述のように $TR=1$ のときは x は 2 以上であり、図 5 に示すように推定式の値はほとんど変わらない。そこで、 $TR=1$ のときの値を除いて回帰分析を行うと表 4 のようになる。このなかから、 t 値の大きい TR と DR を変数として採用し、図 4 中に示した DR に関する最小 2 乗法の結果を踏まえて、次式のように単純化する。

$$x = 3(0.9 - 0.2\beta)TR \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式で与えられる係数 x と DR の関係を図 4 中に破線で示した。この略回帰式と、元のデータとの相関関係を重回帰結果である(1)式の値と共に図 6 に示す。決定係数 R^2 は、0.91、0.87 と低下し、直線の傾きも変化している。これは、略算式を設定するのに無視した $TR=1$ のときの値 ($x=2$) のばらつきの影響が大きい。この領域は、推定式に大きな影響を与えないので、 $x=2.5$ のデータを無視して相関関係を求めると、線形回帰式の傾きは 1.0、 R^2 は 0.93 となる。(2)式により、実用上十分な精度で係数 x を算定できるといえる。

これより、 DR の予測式として次式を得る。

表 3 重回帰分析による係数 x と FR, KR, TR との関係 ($TR < 1.0$)

	係数	標準誤差
切片	-0.053	0.037
FR	0.180	0.038
KR	0.569	0.054
TR	-0.199	0.022
	2.190	0.028

回帰統計	
重相関係数 R	0.954
決定係数 R^2	0.910
標準誤差	0.192

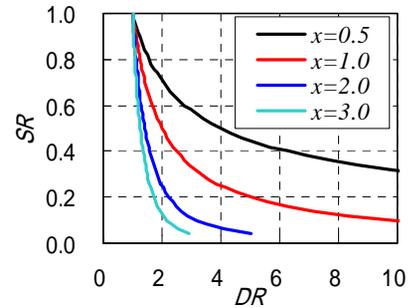


図 5 係数 x と想定した近似曲線との関係

表 4 重回帰分析による係数 x と FR, KR, TR との関係 ($TR < 1.0$)

	係数	標準誤差	t	回帰統計	
切片	0.036	0.026	1.384	重相関係数 R	0.972
FR	0.309	0.025	12.196	決定係数 R^2	0.945
KR	0.084	0.036	2.351	標準誤差	0.104
	-0.342	0.015	-23.053		
TR	2.440	0.030	80.344		

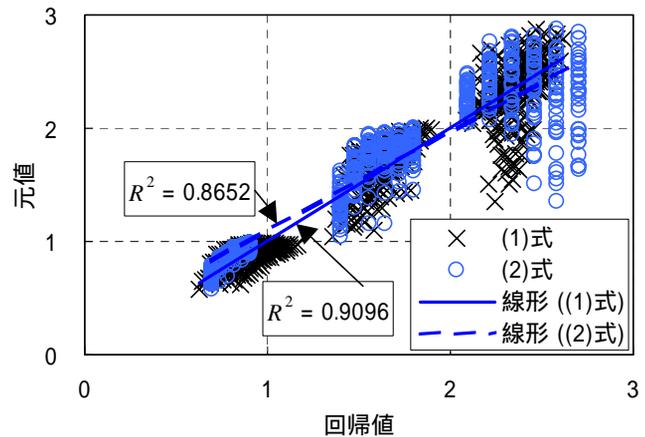


図 6 係数 x の略回帰式の相関関係

$$DR = \frac{1}{SR \cdot (0.9 - 0.2\beta)TR} \quad \dots\dots\dots (3)$$

この(3)式による変位応答推定式を図 2 中に示した。(a)のような一般的な鉄筋コンクリート建物を想定した $FR=0.5$ 、 $KR=0.5$ 、 $TR=0.4$ の場合には、(3)式で十分安全側の評価ができていているといえる。ところが、(b)のように耐力に比べ第 1 折点荷重が小さく、剛性低下率が大きく、かつエネルギー吸収能力の少ないケースで、 $TR < 1$ の

場合には、(3)式による推定値は安全側の評価となっていない。これは、トリリニアモデルの初期周期である弾性周期が、系全体の代表的な周期としては過小のためであり、等価なバイリニアシステムを考えた等価周期的な考えの導入が必要となる。

3.2 近似曲線の補正

(3)式で安全側の評価にならないグラフについては、近似式を次式のように補正する。

$$DR = \frac{\alpha}{SR \sqrt{(0.9 - 0.2) TR}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

の算定にはそれほどの厳密さを要求しないので、(3)式で安全側の評価にならないグラフについて、図7に示したようにおおむね安全側になるように右に移動することにより補正することとした(図中の実線は最終的な補正式の値である)。この移動量を 倍として定めた。求めた DR について、 TR 別に FR 、 KR 、 α の関係を重回帰分析で求めたものが表5(a)である。の係数は小さく、 FR と KR の関数であることがわかる。(b)は、これを $FR+KR$ を変数として回帰解析した結果であるが、係数はそれぞれの係数の平均値、 R^2 はほぼ同程度となっている。(c)はさらに $\sqrt{FR+KR}$ を変数として回帰解析した結果である。 $TR=1/3$ 、 $TR=2/3$ で R^2 は 0.75 程度となって相関がよくなっており、 α は $\sqrt{FR+KR}$ により線形回帰できるといえる。

図8に縦軸に補正係数、横軸に $\sqrt{FR+KR}$ をとり、 TR 別に示す。どの周期比 TR においても、 $\sqrt{FR+KR}$ が 1 以上だと α は 1、 $\sqrt{FR+KR}$ が 1 以下だとおおむね直線的な関係となっている。そこで、 $\sqrt{FR+KR}$ が 1 より大きいものを無視して α と $\sqrt{FR+KR}$ の線形回帰をとり、図中に示した。表5(c)で得られている傾きより大きな値となっている。この傾きを β とし、 α と TR の関係を図9(a)に示す。 TR が 1 以上だと β は一定値、1 以下だと TR と直線的な関係となっている。またこの線形回帰直線の $\sqrt{FR+KR} = 0$ での切片と TR の関係を図9(b)に示す。傾き β と同様に、 TR が 1 以上だと β は一定値、1 以下だと TR と直線的な関係となっている。

この補正係数の傾き β と周期比 TR の関係をを図9(a)中に示すように次式で近似する。

$$\begin{aligned} TR < 1 & \quad \beta = 2.5 - 2TR \\ TR \geq 1 & \quad \beta = 0.5 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、補正係数の切片 α_0 と周期比 TR の関係をを図9(b)中に示すように次式で近似する。

$$\begin{aligned} TR < 1 & \quad \alpha_0 = 3.5 - 2TR \\ TR \geq 1 & \quad \alpha_0 = 1.5 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(5),(6)式より補正係数は $\sqrt{FR+KR} < 1$ の場合、 FR 、 KR 、 TR の関数として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} TR < 1 & \quad \alpha = (3.5 - 2TR - (2.5 - 2TR)\sqrt{FR+KR}) / \sqrt{(0.9 - 0.2) TR} \\ TR \geq 1 & \quad \alpha = (1.5 - 0.5\sqrt{FR+KR}) / \sqrt{(0.9 - 0.2) TR} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図7中の実線はこの(7)式によって求めた DR を(4)式に代入して求めたものである。おおむね安全側の評価となっている。

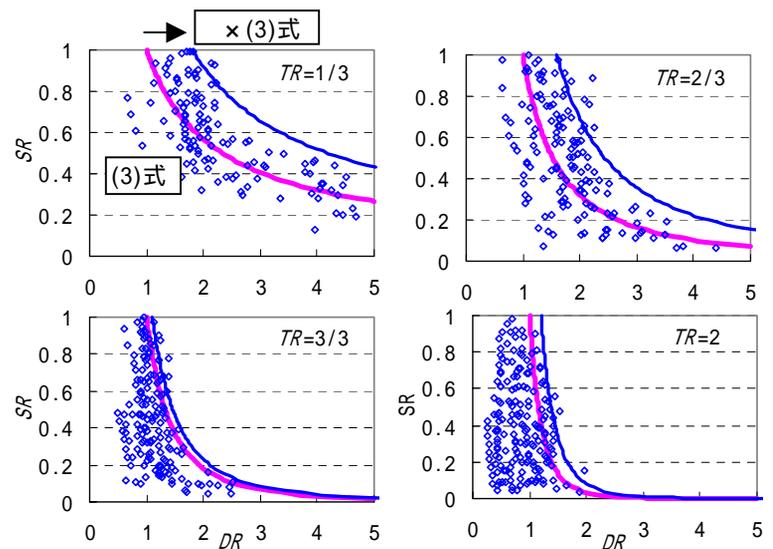


図7 応答解析結果補正例 ($FR=0.2$ 、 $KR=0.2$ 、 $\alpha=0.4$)

表5 TR 別の DR に関する回帰分析結果

(a) FR 、 KR 、 α との関係				(b) $FR+KR$ との関係			
	$TR=1/3$	$TR=2/3$	$TR=1$		$TR=1/3$	$TR=2/3$	$TR=1$
α	0.02	0.07	-0.01	$FR+KR$	-0.71	-0.59	-0.10
FR	-0.65	-0.55	-0.10	R^2	0.66	0.71	0.37
KR	-0.84	-0.69	-0.10				
R^2	0.67	0.73	0.37				

(c) $\sqrt{FR+KR}$ との関係					
	$TR=1/3$	$TR=2/3$	$TR=1$	$TR=2$	$TR=3$
β	-1.36	-1.12	-0.20	-0.30	-0.35
R^2	0.73	0.75	0.44	0.39	0.44

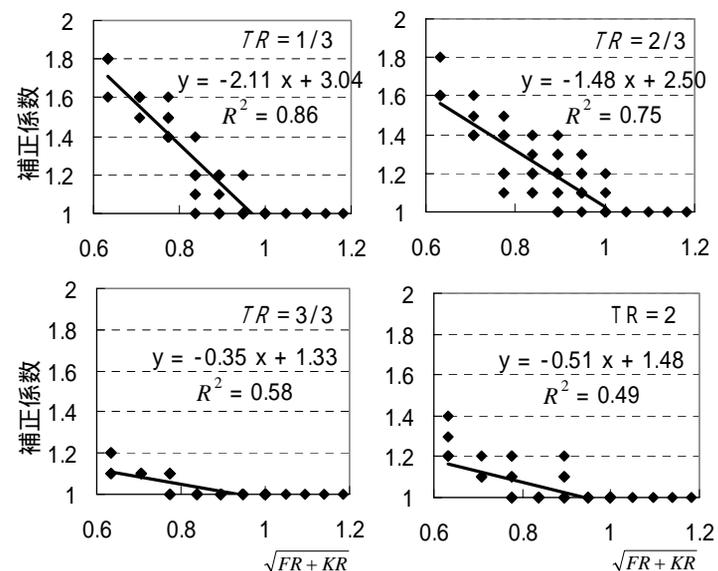
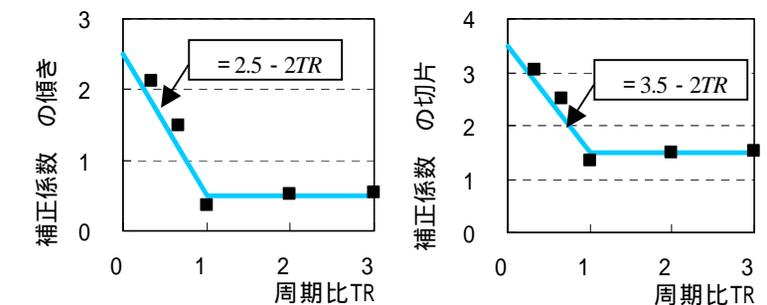


図8 補正係数の $\sqrt{FR+KR}$ に対する分布



(a) 傾き β と周期比 TR の関係 (b) 切片 α_0 と周期比 TR の関係
図9 補正係数の $\sqrt{FR+KR}$ に対する傾き、切片と周期比 TR の関係

3.3 応答変位推定式

以上の検討により、トリリニアアの武田モデルによる応答変位の推定式として、表1に示す各パラメータを用いて次式が得られた。

$$DR = \frac{1}{\sqrt{FR+KR}} \frac{1}{SR^{1/3} \{0.9 - 0.2 \} TR} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sqrt{FR+KR} < 1$$

$$TR \leq 1 \quad DR = \frac{3.5 - 2TR - (2.5 - 2TR)\sqrt{FR+KR}}{SR^{1/3} \{0.9 - 0.2 \} TR} \dots\dots\dots (8)$$

$$TR > 1 \quad DR = \frac{1.5 - 0.5\sqrt{FR+KR}}{SR^{1/3} \{0.9 - 0.2 \} TR}$$

(3),(8)式で与えられる予測式の具体的な値の例を図-10,11に示す。図10によれば、 $TR+SR > 1$ の場合には $DR < 1.5(\sqrt{2})$ である。多層鉄筋コンクリート試験体の振動台実験結果をバイリニアアの復元力を持つ等価1質点系に置換して検討した結果¹³⁾では、エネルギー的に等価なバイリニアア系とするため、初期周期を弾性剛性の1/2として評価すると、最大応答変形の傾向がバイリニアアの復元力を持つモデルを用いて解析した結果と対応することが示されている。この場合、応答変位は、初期周期が速度スペクトル一定領域にあるとすれば、弾性応答変位を $\sqrt{2}$ 倍して評価していることになり、図10の結果とよい対応をすることになる。したがって、システムが $TR+SR = 1$ で、かつ $FR+KR = 1$ ならば、応答変位一定則が成り立ち、弾塑性応答値は弾性応答値(初期周期によるものの $\sqrt{2}$ 倍)以下となるといえる。

3.4 応答変位推定式の評価

(3),(8)式で与えられる予測式と、実際の応答解析結果の比較を周波特性の異なる5種の地震動の結果について図12に示す。ここでは、 $\beta = 1$ (原点指向モデル)は別マークで示した。また、(3),(8)式で与えられる予測式の値が応答スペクトルの変位一定領域の値を超える場合には、応答スペクトルの変位一定領域の値とした。これより、原点指向モデル以外では、(3),(8)式により応答値が安全側に評価できることがわかる。

ここで提示した推定式は安全側の評価となるよう設定しているため図12に示すように、システムによっては推定値が2倍以上になっているものがある。1つの理由としては、系の応答値が応答スペクトルの谷間で納まっていることが考えられる。設計上は応答スペクトルの谷間の値を用いることが適切とは考えられない。もう1つの理由として、 $DR < 1$ の値は、すべて $DR = 1$ として推定していることがある。 $DR < 1$ の値は前記理由の他、塑性化に伴う減衰の増大により応答値が減少したことによるものがあるが、人工的に付加したものでない減衰効果に過度に期待することは、設計上危険側の評価となりかねないので、弾性応答値程度の変形を想定した設計とすべきと考える。

4. 結論

本研究は、主として鉄筋コンクリート構造の変位応答を推定することを目的としてトリリニアアの武田モデルを用いたパラメトリック解析を行い、その結果を検討したものである。用いたパラメータ

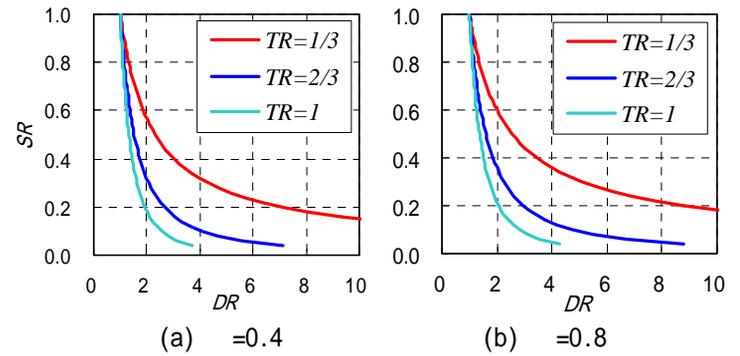


図10 (3)式により求めた応答変位比 DR の例

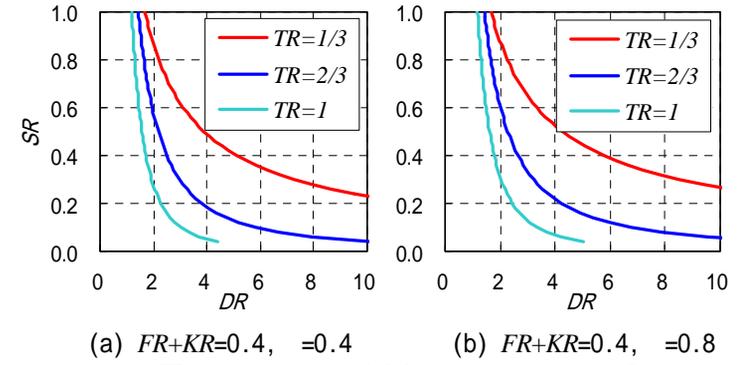


図11 (8)式により求めた応答変位比 DR の例

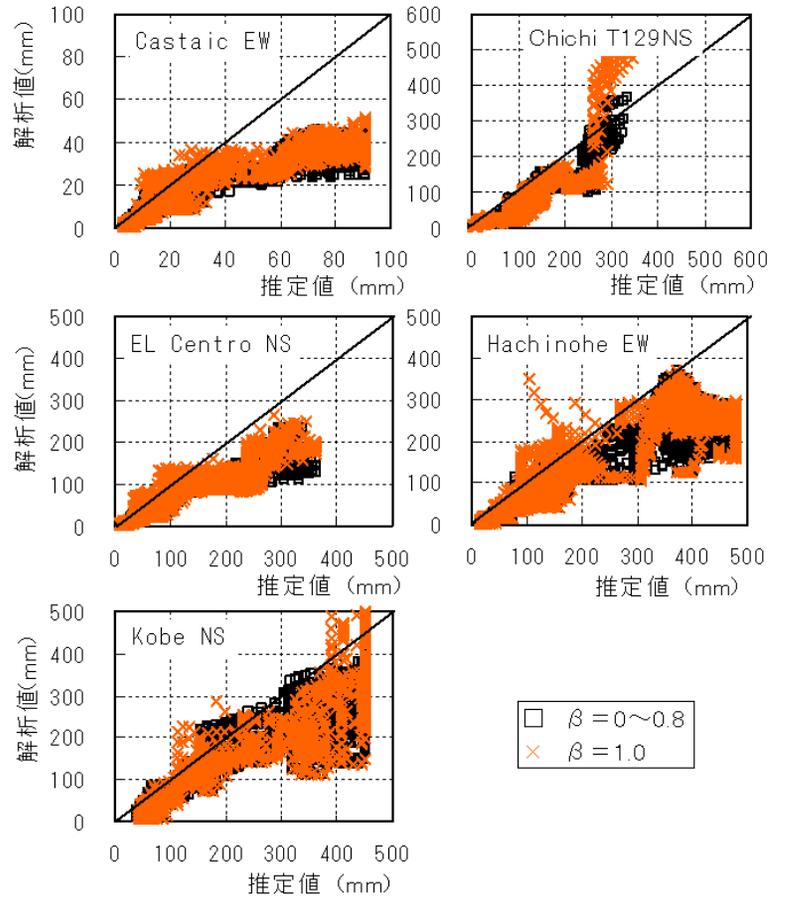


図12 推定値と解析による応答変位との比較

は、降伏点荷重とクラック荷重の比、荷重比 FR 、弾性剛性と降伏点剛性の比、剛性比 KR 、弾性応答せん断力に対する降伏点荷重の比、強度比 SR 、地震動の特性を表す応答スペクトルの加速度一定領域と速度一定領域の境界の周期に対する系の初期周期の比、周期比 TR 、武田モデルの戻り剛性低下率 とし、様々な周波特性を持つ地震動に対する弾塑性地震応答解析を行った。得られた最大応答変位の解析値を検討し、弾塑性変位応答と各パラメータのかかわりと応答推定法の評価を行なった。

本論で得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) トリリニアア型の武田モデルを用いた1質点系の弾塑性変位応答

値を、無次元パラメータ、荷重比 FR 、剛性比 KR 、周期比 TR と武田モデルの戻り剛性低下率 で分類すると、無次元量の強度比 SR と、弾性応答変位に対する弾塑性応答変位の比(変位応答比 DR)は、地震動の種類によらず双曲線関係で表すことができる。

- 2) 強度比 SR と変位応答比 DR を双曲線関係で示した時の乗数 $1/x$ は、周期比 TR と武田モデルの戻り剛性低下率 の関数となり、変位応答比 DR は、周期比 TR が小さいほど、また戻り剛性低下率 が大きいほど、強度比 SR の減少に伴う増大率が大きくなる。
- 3) 武田モデルにおける、荷重比 FR と剛性比 KR の合計が1より小さいときには、変位応答比 DR は強度比 SR の双曲線関係より大きくなり、その量は $\sqrt{FR+KR}$ と TR の1次関数として与えられる。
- 4) 1)~3)の結果を踏まえ、トリリニア型武田モデルを用いた1質点系の弾塑性変位応答推定式として(3),(8)式を提案し、この式で安全側に評価できることを示した。
- 5) トリリニア型武田モデルを用いたシステムが $TR+SR=1$ で、かつ $FR+KR=1$ ならば、応答変位一定則が成り立ち、弾塑性応答値は弾性応答値(初期周期によるものの $\sqrt{2}$ 倍)以下となる。

謝辞

数値計算と結果の整理は神奈川大学卒論生の久米康介、加藤仁君による。解析に使用した1質点系の応答解析プログラムは小谷SDF¹⁸⁾を使用させていただきました。関係者各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 島崎和司, 和田 章: 鉄筋コンクリート構造の地震時水平変位, 日本建築学会構造系論文報告集, No.444, pp.95~104, 1993年2月
- 2) 島崎和司, 和田 章: 高層鉄筋コンクリート造建物の設計用ベースシア係

- 数の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, No.458, pp.99~108, 1994年4月
- 3) 島崎和司, 和田 章: 高層鉄筋コンクリート造建物の設計用せん断力分布の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, No.458, pp.89~98, 1994年4月
- 4) 島崎和司, 和田章: 高層鉄筋コンクリートラーメン建物の応答変位に着目した断面設定法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.466, pp.115~123, 1994年12月
- 5) 島崎和司: 応答変位に基づく設計法の枠組みの提案, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.63~64, 1997
- 6) 島崎和司: 等価線形化法を利用した応答変位推定式による構造特性係数 D_s の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.516, pp.51~57, 1999年2月
- 7) Bonacci, John Francis: Experiments to study seismic drift of reinforced concrete structures, Ph.D Thesis, University of Illinois, 1989
- 8) 日本建築センター: 建築物の構造関係技術基準解説書(2001年版), 2001年3月
- 9) 日本防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説, 2001年10月
- 10) 関松太郎, 杉山公一, 勝俣英雄, 吉岡研三: 神戸市におけるRC, SRC造建物の被害と耐震指標(Is), コンクリート工学, Vol.34 No.11, 1996年11月
- 11) 阿知波敏宏, 久保哲夫, 青野松雄: 耐震診断による耐震性能評価と動的解析による検証 - 国際共同研究プロジェクト: フィリピン为学校建築を事例とした検討 - その1: 建物概要と第2次診断・質点系モデルの地震応答, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, p.897-898, 2002年8月
- 12) 奥園敏文, 上之園隆志, 小堀隆治, 渡辺一弘, 井上隆一: 中高層集合住宅を対象としたフレーム増設型耐震改修に関する研究 (その2 二次壁付き部材のモデル化), 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, p.125-126, 1999年9月
- 13) 島崎和司, 鈴木威祐: RC構造物の地震時水平変位量の簡易な推定法について(その2), 日本建築学会学術講演梗概集, C, pp.23~24, 1985年9月
- 14) Takeda, T., M.A. Sozen & N.N. Nelson: Reinforced Concrete response to simulated earthquakes. Journal of structural division, ASCE, Vol. 96, No. STc2, pp 2557~2573, 1970
- 15) <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html> (現在はここで Kocaeli, Turkey 1999/08/17 地震として検索できる)
- 16) W. H. K. Lee, T. C. Shin, K. W. Kuo, K. C. Chen and C. F. Wu, : CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake: Processed Acceleration Files on CD-ROM, Seismological Observation Center, Taiwan, 2001
- 17) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, p.248~250, 1994
- 18) Otani, Shunsuke: Hysteresis Models of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis, Journal of the Faculty of Engineering, pp.125-159, The University of Tokyo, 1981