エネルギー吸収と耐荷機構の移行を想定した設計法について

高次周期相当の応答を考慮した設計フロー

A STUDY ON ENERGY ABSORPTION AND SHIFT
OF LOAD RESISTANT SYSTEM

A design flow considering higher mode response

嶺脇重雄*

Shigeo MINEWAKI

When devising a design method that takes account of energy absorption by plastic behavior of structural elements, it is necessary to presuppose shift of load resistant system, ie. changes of structural characteristics in mean meaning during 'principal responding time' in which major energy absorption occurs. In this treatise, following matters are investigated to establish the design method. The one is a design flow considering higher mode response, and the other is a manner to decide design parameters, considering characteristics of several earthquake inputs. Influence of higher mode response is estimated by application of adjusted coefficient for equivalent stiffness ratio as function of energy-absorption ratios concerned with several mode responses.

Keywords : plastic energy absorption, design method, elasto-plastic response, equivalent stiffness

塑性エネルギー吸収, 設計法, 弾塑性応答, 等価剛性

1. はじめに

架構の塑性化ないしは架構中に配置した履歴エネルギー吸収部位によるエネルギー吸収を期待した設計を行う場合には, あらかじめ, 設計用入力地震動に対する応答中の架構特性の変化の程度を想定し, それが実現されるように各部の特性ないしはエネルギー吸収能力を決定するという手順を踏むことが必要となる。このような設計法は, 時刻歴の弾塑性地震応答解析によらず, 架構特性の変化とそれに伴うエネルギー吸収を地震動の特性と関連づけて把握し得るという意義がある。

強地震時の構造物の弾塑性応答性状に関する塑性エネルギー吸収による評価や, 応答量を想定した設計法などについてはいくつかの興味深い研究が行われている。棚橋は, 地震動の最大速度の2乗が破壊力の指標となる事を述べた¹⁾。また, Housnerは, 地震動による入力エネルギーを架構のエネルギー吸収能と等置する考え方を示し^{2), 3)}, 秋山は, それを発展させ, 各層の累積塑性変形倍率とDs値の関係や, エネルギー吸収量(損傷)の分布に関する基本則を導いた⁴⁾。また, 石丸は, 複素表示により等価線形化した応答荷重-変形関係から最大塑性率を評価し, 最大塑性率制御を目的とした設計法を提案した⁵⁾。

しかしながら, いずれの研究も, 応答中の架構特性の変化をどう把握するか, あるいは高次周期に相当する応答が1次周期相当の応答にかかわる架構特性の変化にどのような影響を与えるかなどについては直接言及していない。

本論文では, 地震動の継続時間のうち, 構造物の応答が大きい時間帯を主要応答時間と定義し, その間の平均的な架構特性があらかじめ想定した設計目標値と一致することを目指した設計法を提案する。この設計法の確立に必要な事項として高次周期相当の応答を考慮した設計フローの作成について述べ, さらに複数の地震波の特性を考慮した設計用諸定数の設定法に関する検討を行う。架構特性の変化を平均的にとらえることは, 外力に対し抵抗する機構(以下, 耐荷機構)が, 弾性時のそれから降伏部位の塑性化によって移行した, 新たな耐荷機構を想定することに相当する。主要応答時間を定義することは, 耐荷機構が移行している時間帯を定義することに他ならない。この意味で, 本論の表題に「耐荷機構の移行を想定した設計法」という表現を用いた。

本論の検討においては, 架構中の各部材の特性を総合したものとして層の復元力特性が決定されているとした

本論文の一部は, 1992年日本建築学会大会学術講演梗概集¹¹⁾に発表したものである。

* 竹中工務店技術研究所・修士(工学)

Research & Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.

上で、もっぱら層レベルの議論を行う。これら層の復元力特性は一般に弾性部分とエネルギー吸収を担う降伏部分に分離できるものとする。また、本論では1次周期に相当する架構特性の変化についてのみ考えるものとする。設計上最も関心があるのは1次相当の架構特性であり、2次以上の周期に相当する応答については、それらが1次相当の架構特性の変化に及ぼす影響を把握することで十分であると考えた。なお、本論における「平均」という語は主要応答時間中の架構特性の変化を平均的にとらえたという意味で用いる。

2. 主要応答時間

主要応答時間は架構のエネルギー吸収が最も盛んに行われる時間帯であるとして定義できる。秋山⁴⁾によれば弾塑性応答によるエネルギー吸収は粘性減衰係により予測できる。そこで、主要応答時間の時間幅 Δt_p を定めるに当たり、解析用地震波として選んだ EL CENTRO NS 1940, TAFT EW 1952, 東京臨海部設計用基準地震動⁶⁾ (以下、E 波, T 波, R 波と略記する) を種々の固有周期を持つ1質点10%粘性減衰弾性系に入力した時の粘性吸収エネルギーの時刻歴を基に、ある一定時間幅 Δt_p 間のエネルギー吸収量 E_p の総エネルギー吸収量 E に対する比率の最大値 (以下、主要応答時間エネルギー吸収比率 ξ_p) について検討した。吸収エネルギー時刻歴の例を図一

図一 吸収エネルギー時刻歴

1に示す。主要応答時間の条件として、 ξ_p が十分大きいことと、地震動の継続時間に対する Δt_p の比率が大きくなりすぎない事を考慮して、 $\Delta t_p = 15$ 秒と決めた。この結果得られたモデルの等価1次周期 T_{e1} に対する主要応答時間エネルギー吸収比率 ($\xi_p - T_{e1}$ 曲線) を図二に示す (補足1)。

3. 基本設計フロー

架構の諸特性の変化を把握するための手法として、弾塑性応答中の荷重-変形関係を1自由度粘性減衰弾性系 (以下、粘性系と称す) に近似することにより、等価剛性および等価粘性減衰係数 (以下、付加減衰係数と称す) を得ることを基本とする。本論では、このような粘性系近似によって得た値を示す語として「等価」という表現を用いる。主要応答時間中の荷重-変形関係を粘性系近似することにより、その間の平均的な等価剛性の弾性剛性に対する比 (以下、等価剛性比 κ_{eq})、降伏部分の塑性化により付加される等価粘性減衰定数 (以下、付加減衰定数 h_{eq}) が把握できる。またそれらを結び付ける量として、平均的な応答塑性率 (以下、平均塑性率 μ_{me}) を考える。 μ_{me} は降伏変形時を1として表す。これらを架構特性の変化を示す指標として考える。

基本設計フローを図三に示す。設計に当たっては、上記の κ_{eq} , μ_{me} , h_{eq} について適宜設計目標値を設定する。入力地震動の大きさを総入力エネルギー E で評価し、 κ_{eq} に対応する主要応答時間中の等価1次周期 T_{e1} を仮定すれば、 $\xi_p - T_{e1}$ 曲線により T_{e1} に対する主要応答時間のエネルギー吸収量が与えられ、 μ_{me} を平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$ に換算する事で、秋山の方法⁴⁾によりあらかじめ規定した各層の耐力分布、剛性分布を用いて各層の特性を決定できる。この過程でモデルの特性に整合する弾性1次固有周期 T_{01} が求まるので、 $T_{01}/\sqrt{\kappa_{eq}}$ と T_{e1} とがほぼ等しくなるまで、 T_{e1} を $T_{01}/\sqrt{\kappa_{eq}}$ に置き換え上記の過程を繰り返す。

図二 $\xi_p - T_{e1}$ 曲線

図—3 基本設計フロー

4. 基本設計フローによる検討

本節では、基本設計フローを用いて実際にモデルを設計し (このモデルの総称を Model-O とする)、弾塑性時刻歴地震応答解析により、設計目標値と応答結果の整合度について検討する。なお、今後、応答結果の検討および設計用諸定数の設定において、設計目標値よりも塑性化の進行程度が小さい事、および、そのような応答を与える条件について「安全側」という語を用いる。

4.1. Model-O の設計

主要応答時間中の応答が、\$x_{eq}\$, \$\mu_{me}\$, \$h_{eq}\$ によって規定される粘性系の定常応答と等価であると仮定することで、(1) 式の関係が得られる⁷⁾。式中の \$x_0\$ は各層の弾性剛性に降伏部分の弾性剛性が占める比率 (以下、降伏部分剛性比) である。

$$x_{eq} = \frac{x_0}{\pi} (\theta^* - \sin \theta^* \cos \theta^*) + (1 - x_0)$$

$$h_{eq} = \frac{x_0}{2\pi x_{eq}} \sin^2 \theta^*$$

$$\theta^* = \cos^{-1} (1 - 2/\mu_{me})$$

..... (1)

この関係は、すべてのエネルギー吸収が1次周期に相当する応答によりなされると仮定したことを意味する。1次周期相当の架構特性の変化には2次周期以上に相当する応答が影響を与えることが考えられ、また主要応答時間中のエネルギー吸収には高次相当の応答によるものが含まれるわけだが、それらについては後程考慮することとし、ここでは (1) 式をそのまま用いて検討用モデルを設計した。検討用モデルは、全層がほぼ均等に塑性化することを想定した5質点等価せん断モデルとし、各層の特性は降伏部分と弾性部分に分離して表現した。降伏部分の履歴特性は完全弾塑性型とした。各層の耐力分布は秋山⁴⁾による最適降伏せん断力分布を用い、剛性と耐力は比例するものとした。

モデルの設計に当たり、\$x_0 = 0.3\$ と決め、\$x_{eq} = 0.81\$ とすると、(1) 式から \$h_{eq} = 5.6\%\$、\$\mu_{me} = 2.5\$ が求まる。以上を設計目標値とする。この設定は、剛性の低下を抑制しつつ5~6%の付加減衰を与える事でかなりの応答低減効果が見込める事や (1) 式の関係で付加減衰定数が極大となるような組合わせを考慮したもので、架構中にエネルギー吸収部位を配置する場合の実際的な設定として考えられるものである。また、粘性減衰定数 \$h_0\$ は0とし、設計用入力地震動のレベルは総吸収エネルギー \$E\$ の等価速度 \$V_E\$ で100 cm/s に基準化した。基本設計フローに従い、E波、T波、R波それぞれの \$\xi_p-T_{e1}\$ 曲線を用いて3つのモデルを設計した。これらを ELC-O、TAF-O、RIN-O と呼びその特性を表—1に示す。また、安全側の設計となることを期待し \$\xi_p = 1.0\$ としたモデル UNI-O を合わせて示す。表中、\$Q_y\$ は各層の降伏耐力、\$K\$ は弾性時剛性、\$m\$ は各階の質量、\$\delta_y\$ は各層の降伏変位である。

4.2. Model-O による応答解析結果

4種類のモデルと3種の地震波の組み合わせで12ケースの解析を行った。解析ケースは、入力波を表す記号 -E, -T, -R をモデル記号の後に付け表現する。また今後、モデルの設計に用いた地震波を入力したケースについて「モデルと地震波が整合する」、それ以外の地震波を入力したケースについて「モデルと地震波が整合しない」という表現を用いる。表—2に主要な応答結果の一覧を示す。応答値を表記する際には、記号 \$r\$ を変数名の後ろに付け、\$x_{eqr}\$, \$E_r\$, \$\xi_{pr}\$, \$\mu_{mer}\$ のごとく、応答値であることを示し設計目標値と区別する。\$x_{eqr}\$ の評価は、対象とする層のせん断力を \$Q\$、層間変位を \$x\$ と

表—1 Model-O 特性値

モデル		ELC-O	TAF-O	RIN-O	UNI-O
ξ_p		0.85	0.65	0.50	1.00
T_{01}		2.417	2.635	2.872	2.290
κ_o		0.3	0.3	0.3	0.3
Q_{yi} (ton)	1層	47.04	39.20	33.32	56.91
	2層	41.77	34.81	29.59	50.35
	3層	36.13	30.11	25.59	43.51
	4層	29.77	24.81	21.09	36.11
	5層	20.28	16.90	14.37	24.94
K_i (t/cm)	1層	20.15	16.95	14.27	24.39
	2層	17.90	15.05	12.67	21.58
	3層	15.48	13.02	10.96	18.65
	4層	12.76	10.73	9.03	15.48
	5層	8.69	7.31	6.15	10.69
δ_{yi} (cm)	1層	2.334	2.313	2.335	2.333
	2層	2.334	2.313	2.335	2.333
	3層	2.334	2.313	2.335	2.333
	4層	2.333	2.313	2.335	2.333
	5層	2.335	2.313	2.335	2.333
m (t.s ² /cm)		0.2	0.2	0.2	0.2

mは各層一律

m は各層一律

表—2 Model-O 主要応答結果

モデル	ELC-O			TAF-O			RIN-O			UNI-O		
入力波	E	T	R	E	T	R	E	T	R	E	T	R
$\dot{y}_{max}$	330	460	210	350	400	210	420	450	210	390	440	210
V_{Er}	95.9	103	97.4	99.5	97.7	102	97.2	102	102	102	98.3	97.7
ξ_{pr} 全層	0.85	0.69	0.68	0.87	0.54	0.53	0.79	0.63	0.48	0.94	0.67	0.67
κ_{eqr} 平均	0.80	0.79	0.81	0.77	0.81	0.80	0.77	0.77	0.80	0.79	0.81	0.83
μ_{mer} 平均	2.67	2.89	2.46	3.48	2.67	2.71	3.46	3.93	2.81	3.00	2.55	2.21
$h_{eqr}(\%)$ 平均	5.57	5.45	5.60	5.07	5.56	5.54	5.10	4.77	5.48	5.38	5.61	5.65

表—3 Model-O 応答値のモード分割結果

モデル	ELC-O			TAF-O			RIN-O			UNI-O		
入力波	E	T	R	E	T	R	E	T	R	E	T	R
ξ_{se1r} 全層	0.76	0.60	0.76	0.72	0.64	0.56	0.60	0.63	0.89	0.71	0.56	0.73
ξ_{se2r} 全層	0.14	0.13	0.13	0.17	0.19	0.30	0.19	0.16	0.00	0.19	0.20	0.16
κ_{eq1r} 平均	0.79	0.76	0.79	0.76	0.78	0.76	0.76	0.75	0.79	0.78	0.78	0.81
μ_{me1r} 平均	2.01	1.75	1.84	2.54	1.69	1.66	2.62	2.32	2.26	2.14	1.52	1.61
$h_{eq1r}(\%)$ 平均	6.42	6.22	6.21	5.90	6.73	6.71	4.98	5.91	6.52	5.72	6.00	6.34
κ_{eq1a} 平均	0.85	0.88	0.86	0.83	0.88	0.88	0.83	0.85	0.83	0.86	0.90	0.88
μ_{me1a} 平均	2.08	1.74	1.89	2.50	1.77	1.72	2.35	2.24	2.37	2.08	1.56	1.71

書くと (2) 式で表現できる粘性系近似において、主要応答時間中の各解析ステップでの誤差 ε の 2 乗和を最小とする κ_{eqr} を求めることにより行った。式中の C_{eqr} は付加減衰係数である。以上のような近似を粘性系への最小 2 乗近似と称する。また、 μ_{mer} 、 h_{eqr} は κ_{eqr} 、 κ_o から (1) 式の関係を満たすように導いたものである。

$$\kappa_{eqr} \cdot Kx + C_{eqr} \dot{x} = Q + \varepsilon \cdots \cdots (2)$$

表—2 中の値はいずれも各層についての平均値であり、 κ_{eqr} については弾性 1 次モード形に相似な外力分布を与えた時の架構全体剛性についての等価剛性比、 μ_{mer} については各層の荷重-変形関係上で塑性率が 1 増した時の半周期当たりのエネルギー吸収増分 ΔE_u により重みづけ平均した値、 h_{eqr} については各層の等価剛性により重みづけ平均した値を示した。また、入力地震動の最大加速度値 $\dot{y}_{max}$ は 10 % 粘性減衰系における入力エネルギー等価速度と固有周期の関係 ($V_E - T_{e1}$ 関係) を用いて求めることができるが、高次相当の応答によるエネルギー吸収、弾塑性系と弾性系の違いなどの理由で、 E_r は E に対し誤差を持つ値となる。ここでは結果の検討の便宜上、 E_r が $E \pm 10\%$ の範囲となるような $\dot{y}_{max}$ を試行錯誤により見いだした。

表—2 によれば、 ξ_{pr} は入力波に強く依存し、モデル

図—4 TAF-O-E 荷重-変形関係

と入力地震波が整合している ELC-O-E、RIN-O-R などでは ξ_p と ξ_{pr} はほぼ等しいが、 ξ_p の小さなモデルに ξ_{pr} を大きく与える地震波を入力すると塑性化の進行が大きく、 κ_{eqr} は小さく μ_{mer} は大きくなる。全般に、 κ_{eqr} が κ_{eq} よりも小さいケースが多く、 ξ_p と ξ_{pr} がほぼ等しい ELC-O-E、RIN-O-R でも κ_{eqr} は κ_{eq} を若干下回る。それに伴い、 μ_{mer} は μ_{me} を多くのケースで上回り、TAF-O-E、RIN-O-E、RIN-O-T 等では 3.0 を大きく超える。UNI-O についても、UNI-O-R を除き、塑性化の進行程度は設計目標値を超える。

κ_{eqr} 、 μ_{mer} の値が応答と具体的に整合しているかどうかを TAF-O-E を例に採って検討する。図—4 に主要応答時間の第 1 層および第 4 層の降伏部分の荷重-変形関係を、図—5 にその時の 1 次周期付近のフーリエスペ

図—5 TAF-O-E フーリエスペクトル (1 次振動数付近)

クトルを示す。図—4によれば、 μ_{mer} は応答の進み具合を平均的に評価した値としては過大な値である。また、降伏部分の平均的な等価剛性として $K(\kappa_{eqr} + \kappa_0 - 1)$ により求めた値も1次周期相当の応答と考えられるいくつかのループに対するものとしてはやや小さい。一方、図—5によれば、 $\sqrt{\kappa_{eqr}}/T_{oi}$ として求めた振動数は、弾性解と弾塑性応答解のスペクトル形状の違いをほぼ説明しており、主要応答時間のフーリエスペクトルにはモデルの特性が色濃く反映される事を考え合わせると、 κ_{eqr} は1次等価剛性の変化をおおむね評価していると考えられる。

すなわち、高次相当の応答を含む荷重-変形関係を粘性系に近似する事で得られる κ_{eqr} により1次相当の等価剛性がおおむね評価できるが、 κ_{eqr} と μ_{mer} の関係は(1)式では直接表すことは出来ないということになる。

以上より、本設計法の精度を上げるためには1次相当の架構特性の変化を表す諸量の関係を高次相当の応答の影響を考慮した上で表現する必要がある。以下、Model-Oの応答結果を用いて検討を行う。

5. 高次相当の応答による影響の考慮

5.1. 各次周期相当の応答の分離

応答波のフーリエスペクトルの例としてTAF-O-Eの第1層層間変位と層せん断力について図—6に示す。スペクトルの形状から、バンドパスフィルターを用いることで、各次周期に相当する応答を分離できると判断した。ここではモード分割振動数として弾性時の各次固有振動数の中間値を用いた。各層の層せん断力、層間変位それぞれについて分離を行い、分離後の各次に相当する主要応答時間の荷重-変形関係を粘性系に最小2乗近似することによって、各層について、各次相当の等価剛性比、等価粘性減衰係数が求まる。分離後の荷重-変形関

図—6 TAF-O-E フーリエスペクトル

係はほぼ単一の周期に相当する成分により構成されているので、これらの値を精解値として扱うことができる。また、荷重-変形関係から主要応答時間の各次相当吸収エネルギーが計算できる。さらに、近似によって得られた粘性系のエネルギーに等価な定常変位振幅に相当する各次相当の平均塑性率、および各次相当のエネルギー吸収比率、付加減衰定数を(3)式により得る。これらの値を、次数を表す数字を変数名に付け、 κ_{eqir} , C_{eqir} , E_{seir} , μ_{meir} , ξ_{seir} , h_{eqir} のごとく表記する。また、1次相当吸収エネルギー E_{seir} から κ_{eq} と ΔE_u を用いて(4-1), (4-2)式により略算的に、1次相当の平均塑性率と等価剛性比を求めることができる。これらを略算値を表す記号 a を変数名の後ろに付け、 μ_{meia} , κ_{eqia} と表記する。略算値はモデルの復元力特性上のエネルギーに等価な定常変位振幅に基づくものであり、これらと応答値との相関を評価することで、復元力特性上で想定できる等価剛性比、平均塑性率、付加減衰定数の関係を高次相当の応答を考慮した関係に変換することが可能となる。計算結果を表—3に示す。表中、1次および2次相当エネルギー吸収比率 ξ_{seir} , ξ_{se2r} は全層についての比率、その他は各層についての平均値であり、平均方法は表—2の値と同様である。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{meir} &= \frac{1}{\delta_y} \sqrt{\frac{T_{oi}^2 E_{seir}}{2 \Delta t_p C_{eqir} \pi \kappa_{eqir}}} \\ \xi_{seir} &= E_{seir} / \sum_k E_{sekr} \\ h_{eqir} &= \frac{\pi}{T_{oi} K} \frac{C_{eqir}}{\sqrt{\kappa_{eqir}}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

式中、 i, k は次数を表す添字である。

$$\mu_{meia} = E_{seir} / (2 \Delta E_u \Delta t_p / T_{ei}) + 1 \dots\dots\dots (4-1)$$

$$\kappa_{eqia} = 1 - \kappa_0 (1 - 1 / \mu_{meia}) \dots\dots\dots (4-2)$$

5.2. 等価剛性比、平均塑性率、付加減衰定数の評価

μ_{mer} と μ_{meir} , κ_{eqr} と κ_{eqir} の比較を図—7および図—8に示す。 μ_{mer} は μ_{meir} よりも大きくその差は最大で1.8, 平均で0.7程度である。また、 κ_{eqir} は κ_{eqr} よりもやや小さいが0.01程度の違いにとどまっているケースが多い。これは4節で述べた κ_{eqr} と μ_{mer} に関する考察結果

図—7 平均塑性率比較
(モード分割の有無)

図—8 等価剛性比比較
(モード分割の有無)

を裏付けるものである。

μ_{me1r} と μ_{me1a} の比較を図-9 に示す。また、 κ_{eq1r} と κ_{eq1a} の関係を検討するため、(5) 式で定義する等価剛性比調整係数の応答値 κ_{adr} と ξ_{se1r} , ξ_{se2r} との関係を図-10 に示す。表現上の煩雑さを避けるため、 ξ_{se2r} の係数を ξ_{se1r} に対するデータのバラツキが最小となる 2.5 に固定し、縦軸に $\kappa_{adr} + 2.5 \cdot \xi_{se2r}$ を、横軸に ξ_{se1r} を採って表現した。図-9, 10 とも各ケース各層のデータをプロットした。図-9 によれば、 μ_{me1a} は μ_{me1r} とほぼ同等の値を与えると考えられる。すなわち、設計目標値 μ_{me1} を (4-2) 式の μ_{me1a} に代入することで κ_{eq1a} を設計目標値として評価できる。図-10 によれば、等価剛性比調整係数 κ_{ad} の近似式を (6-1) 式の形で与えることができ、 ξ_{se1} , ξ_{se2} を何らかの形で評価すれば、(4-2) 式および (5) 式から得られる (7) 式により、高次モード相当のエネルギー吸収による影響を考慮した設計目標値 κ_{eq1} を得ることができる。また、 κ_{eq1} , μ_{me1} が評価できれば、 h_{eq1} は (1) 式を書き直した (8) 式で与えられる。

$$\kappa_{eq1r} = \{\kappa_{eq1a} - (1 - \kappa_0)\} / \kappa_{adr} + (1 - \kappa_0) \quad (5)$$

$$\kappa_{ad} = 1 + \tau_{w1}(1 - \xi_{se1}) - \tau_{w2} \cdot \xi_{se2} \quad (6-1)$$

$$\kappa_{eq1} = 1 - \kappa_0 \{1 - 1/(\mu_{me1} \cdot \kappa_{ad})\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} h_{eq1} &= \frac{\kappa_0}{2\pi\kappa_{eq1}} \sin^2 \theta^* \\ \theta^* &= \cos^{-1}(1 - 2/\mu_{me1}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

5.3. 各次各層のエネルギー吸収比率の推定

前述の検討から、 ξ_{se1} , ξ_{se2} を推定できれば、 κ_{eq1} ,

図-9 1次相当平均塑性率

図-10 等価剛性比調整係数

μ_{me1} , h_{eq1} を得ることができる。また、図-10 のデータの分布状況から ξ_{se1} , ξ_{se2} は層ごとに異なると考えられるので、これらの諸量は層ごとに評価することが望ましい。

まず、モデル全体に対する各次相当の吸収エネルギー量は (9-1) 式で表せると考える。ここで、各次相当の等価周期は (9-2) 式となると仮定する。各次のエネルギー吸収比率は (9-3) 式となる。Model-O の応答結果による主要応答時間中の各次エネルギー吸収比率と (9-3) 式による推定値との比較を図-11 に示す。いくつかのケースでは誤差が生じているが、過半の解析ケースで推定値と応答値はよく対応しており、(9-1)~(9-3) 式のような簡単な仮定で、各次のエネルギー吸収比率を推定することが可能であると言える。E 波、T 波、R 波についての $\xi_{se1}-T_{e1}$, $\xi_{se2}-T_{e1}$ 曲線を図-12 に示す。

$$E_{sei} = \frac{1}{2} \bar{M}_i V_{ei}^2 \quad (9-1)$$

$$T_{ei} = T_{oi} / \sqrt{\kappa_{eq1}} \quad (9-2)$$

$$\xi_{sei} = E_{sei} / \sum_k E_{sek} \quad (9-3)$$

ここで、 $\bar{M}_i$: i 次有効質量

図-11 各次エネルギー吸収比率

図-12 ξ_{se1} , $\xi_{se2}-T_{e1}$ 曲線

V_{Ei} : V_E - T_{Ei} 関係上の i 次相当の等価周期に対する入力エネルギー等価速度

式中, i, k は次数を表す添字である。

次に, 弾塑性応答時の各次に相当するモード形状を弾性時のモード形状と同一であると仮定し, モード形状に比例した層間変形量を想定すれば, 各層におけるエネルギー吸収量はおおむね各層の層間変形量と降伏耐力の積に比例すると考えられるので, 各次相当の応答ごとに各層のエネルギー分担比率は (10) 式で表せる。(9-3) 式と (10) 式から各層ごとの各次相当エネルギー吸収率が (11) 式により求まる。Model-O による数ケースの応答結果と上述の仮定により推定した各層ごとの各次エネルギー比率との比較を図-13 に示す。最上層 (5 層) で ξ_{se1} は ξ_{se1r} を過大評価しているほか, ケース間での傾向の変化に対し推定値の変化は鈍感であるという傾向があるが, おおむね, 各層各次のエネルギー吸収比率を評価できており, (9)~(11) 式による評価を設計に用いることに支障はないと考えられる。

$$R_{ij} = |Q_{yj} U_{stij}| / \sum_k |Q_{yk} U_{stik}| \quad (10)$$

ここで, R : エネルギー分担比率推定値

U_{st} : 弾性モードの層間量

式中, i は次数を, j, k は層を示す添字である。

$$\xi_{seij} = R_{ij} \xi_{sei} / \sum_k R_{kj} \xi_{sek} \quad (11)$$

式中, i, k は次数を, j は層を示す添字である。

5.4. 高次相当の応答を考慮した設計フロー

上述の検討により, 層ごとに, ξ_{se1} , ξ_{se2} が評価でき κ_{eq1} , μ_{me1} , h_{eq1} が求まることになる。ここでは各層の平

図-13 各層ごとの各次エネルギー吸収比率

均值 (以下, 層平均値と言う) と区別するために j を層を表す添字として用いることにする。設計の手順としては, まず, κ_{eq1j} の層平均値として設計目標値 κ_{eq1} を与える。 μ_{me1j} の分布は弾性 1 次モードの層間量 U_{st1j} の分布と相似であるとし, 層平均値 μ_{me1} を適宜仮定することで μ_{me1j} を求める。次いで, (6-1) 式, (7) 式を各層について適用し κ_{eq1j} を得る。ここで, κ_{eq1j} の層平均値が先に仮定した κ_{eq1} とほぼ一致するまで μ_{me1} の仮定を変更し繰り返し計算を行う。 h_{eq1j} は (8) 式を各層について適用する事で得られる。以上で, 1 次相当の架構特性の変化を表す各種変数が定まったことになる。以下, ξ_p を $\xi_p \cdot \xi_{se1}$ と読み変え μ_{me1} を η に換算することで基本設計フローと同様に各層の特性を決定する。 T_{e1} に関する繰り返し計算についても基本設計フローと同様

図-14 高次周期相当の応答を考慮した設計フロー

である。上記の手順を含めた設計フローを図-14に示す。

6. 高次を考慮した設計フローによる検討

6.1. 解析モデル

高次を考慮した設計フローを用いた検討用解析モデルとして、(6-2)式に示す等価剛性比調整係数近似式を用いたモデルを考えた。(6-2)式はModel-Oの応答結果によるデータを最小2乗近似する事によって得られる平均的な近似式である。このモデルをModel-M0と総称し、E波、T波、R波に対して設計したモデルを、それぞれ、ELC-M0、TAF-M0、RIN-M0のように称する。また、モデルと整合する地震波を入力した時、 κ_{eq1r} が(4-2)式による κ_{eq1a} とほぼ一致するような等価剛性比調整係数を与えたモデルを考え、Model-M1と総称する。Model-M1の等価剛性比調整係数式は試行錯誤により見いだしたもので、RIN-M1の場合(6-3)式、TAF-M1の場合(6-4)式となる。ELC-M1はELC-M0と一致する。なお、モデルの設計に当たっては、Model-Oとの整合を計るため、 κ_0 を0.3、 κ_{eq1} を

0.81とした。各モデルの特性値を表-4中に示す。

$$\kappa_{ad}=1+5(1-\xi_{se1})-2.5\xi_{se2} \quad (6-2)$$

$$\kappa_{ad}=1+4(1-\xi_{se1})-2.5\xi_{se2} \quad (6-3)$$

$$\kappa_{ad}=1+4.2(1-\xi_{se1})-2.5\xi_{se2} \quad (6-4)$$

6.2. 応答結果と考察

1) モデルと入力地震波が整合する場合

Model-M0およびModel-M1の各モデルに、設計に用いた地震波を入力した場合の応答結果について検討する。主要な応答結果の一覧を表-5中に、 μ_{me1r} と μ_{me1} および μ_{me1a} の比較を図-15に、 κ_{eq1r} と κ_{eq1} および κ_{eq1a} の比較を図-16に示す。表-5中に示した κ_{eq1r}

表-4 Model-M0, Model-M1, UNI-M0特性値

モデル	ELC-M0	TAF-M0	RIN-M0	TAF-M1	RIN-M1	UNI-M0
ξ_p	0.858	0.652	0.674	0.644	0.639	0.9
T_{o1}	1.922	2.028	2.123	2.198	2.336	1.853
κ_0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Q_{yi} (ton)	1層	75.99	68.26	62.32	56.91	75.99
	2層	61.14	55.11	51.53	50.35	61.14
	3層	52.07	46.93	43.94	43.51	52.07
	4層	48.59	44.27	39.58	36.11	48.59
	5層	36.59	33.06	28.44	24.94	36.59
K_i (V/cm)	1層	32.57	29.26	26.71	24.39	32.57
	2層	26.21	23.62	22.08	21.58	26.21
	3層	22.32	20.11	18.83	18.65	22.32
	4層	20.82	18.97	16.96	15.48	20.82
	5層	15.68	14.17	12.19	10.69	15.68
δ_y (cm)	2.333	2.333	2.333	2.333	2.333	2.333
m (ts ² /cm)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

δ_y , m は各層一律

図-15 平均塑性率比較 (モデルと入力波が整合する場合)

図-16 等価剛性比比較 (モデルと入力波が整合する場合)

表-5 Model-M0, Model-M1, UNI-M0主要応答結果

モデル- 入力波	ELC-M0-E	TAF-M0-T	RIN-M0-R	TAF-M1-T	RIN-M1-R	ELC-M0-T	TAF-M0-R	RIN-M0-T	UNI-M0-R
y_{max}	390	380	205	400	210	400	150	375	165
V_{Er}	102	98.8	102	102	98.9	103	104	96.2	102
ξ_p 全層	0.86	0.65	0.67	0.64	0.64	0.86	0.86	0.65	0.65
ξ_{pr} 全層	0.75	0.66	0.68	0.66	0.67	0.67	0.52	0.84	0.63
ξ_{se1} 全層	0.72	0.70	0.76	0.68	0.78	0.72	0.72	0.70	0.76
ξ_{se1r} 全層	0.70	0.57	0.70	0.48	0.73	0.60	0.82	0.59	0.74
ξ_{se2} 全層	0.20	0.20	0.17	0.21	0.13	0.20	0.20	0.20	0.17
ξ_{se2r} 全層	0.22	0.30	0.21	0.29	0.14	0.27	0.12	0.29	0.20
κ_{eq1} 平均			0.81				0.81		
κ_{eq1r} 平均	0.82	0.84	0.83	0.79	0.80	0.83	0.88	0.78	0.85
μ_{me1} 平均	1.55	1.48	1.62	1.59	1.81	1.55	1.55	1.48	1.48
μ_{me1r} 平均	1.36	1.26	1.44	1.31	1.69	1.27	1.22	1.42	1.37
$h_{eq1}(\%)$ 平均	5.37	5.14	5.54	5.48	5.80	5.37	5.37	5.14	5.14
$h_{eq1r}(\%)$ 平均	6.17	5.42	6.55	6.36	6.49	5.47	5.93	6.01	5.98
κ_{eq1a} 平均	0.81	0.80	0.80	0.79	0.80	0.81	0.84	0.80	0.82
μ_{me1a} 平均	1.50	1.40	1.61	1.46	1.79	1.40	1.42	1.50	1.52

図—17 平均塑性率比較
(モデルと入力波が
整合しない場合)

図—18 等価剛性比比較
(モデルと入力波が
整合しない場合)

図—20 平均塑性率比較
(統合モデル)

図—21 等価剛性比比較
(統合モデル)

図—19 等価剛性比調整係数比較

の層平均値は Model-M0 では κ_{eq1} よりやや大きく (塑性化の進行程度が小さく), Model-M1 では若干小さい (塑性化の進行程度が大きい)。Model-O の結果 (表—3) と比較すると, Model-M0, Model-M1 と同様に, κ_{eq1r} は大きな値となり, より κ_{eq1} に近い。図—15 a) によれば, μ_{me1r} はいずれの場合も μ_{me1} を下回る。また, 図—15 b) によれば, μ_{me1a} よりも μ_{me1r} はやや小さいが Model-O で得られた分布の範囲内である。Model-M1 では, 図—16 b) に見られるように κ_{eq1r} と κ_{eq1a} もほぼ等しく, κ_{eq1r} と μ_{me1r} の関係が設計時の想定通りになっている事がわかる。一方, Model-M0 では Model-M1 に比べ, κ_{eq1r} は全般に大きく, κ_{eq1a} による κ_{eq1r} の評価は安全側となる。これは, 等価剛性比調整係数の近似式における $(1 - \xi_{se1})$ の重み r_{w1} をやや大きめにする事で安全側の設計が得られることを示す。また, 表—5 によれば, h_{eq1r} はいずれの場合も h_{eq1} を上回る。また, ξ_{pr} , ξ_{se1r} は, 解析ケースにより, ξ_p , ξ_{se1} に対してばらつく場合があり, Model-M1 で κ_{eq1r} が κ_{eq1} をやや下回った原因をここに求めることができる。

2) モデルと入力地震波が整合しない場合

Model-M0 について, モデルと入力地震波が整合しない場合の検討を行う。主要な応答結果の一覧を表—5 中に, μ_{me1r} と μ_{me1} , κ_{eq1r} と κ_{eq1} の比較を図—17, 18 に示す。また, 図—10 と同様に整理した κ_{adr} と ξ_{se1r} , ξ_{se2r} の関係を図—19 に示す。 ξ_{pr} が ξ_p を上回り, ξ_{se1r}

が ξ_{se1} を下回る TAF-M0-E, RIN-M0-E では, κ_{eq1r} が κ_{eq1} を下回るといった傾向がみられる。 κ_{adr} の値は (6-2) 式よりやや下側に分布するが, 上記の 2 ケースは逸脱している。この 2 ケースは, ξ_p , ξ_{se1} で表現される入力地震波のエネルギー的な特性に対して, κ_{ad} の設定を誤った例として位置づけられる。入力地震波の特性により要求される値よりも κ_{ad} が安全側に設定されている場合には, ELC-M0-T, RIN-M0-T のように ξ_{se1r} が ξ_{se1} を下回っても, μ_{me1r} , κ_{eq1r} と同様に μ_{me1} , κ_{eq1} に対し安全側の値を示す。

7. 複数の地震波を考慮したモデルの設計

7.1. 設計用諸定数の設定

前節の検討結果を踏まえ, 実用的なモデルとして設計対象の複数の地震波に対し安全側の応答を与えるモデル (以下, 統合モデル UNI-M0 と称す) の, 設計用諸定数の設定法について検討する。

まず, 入力地震波のエネルギー的な特性を表す ξ_p , ξ_{se1} , ξ_{se2} を安全側に設定する。

統合モデル設計用の ξ_p - T_{e1} 曲線は, 図—2 中に示すように, 設計対象地震波 3 波の各固有周期ごとの ξ_p の最大値を包絡する折線とする。また, ξ_{se1} については下限値, ξ_{se2} については上限値を採るのが安全側と考えられるので, 統合モデル設計用の ξ_{se1} - T_{e1} , ξ_{se2} - T_{e1} 曲線として, 図—12 中に示すように, 設計対象地震波 3 波の ξ_{se1} の最小値と ξ_{se2} の最大値をそれぞれ近似する折線を設定する。

このように ξ_p , ξ_{se1} , ξ_{se2} を設定した事により, 等価剛性比調整係数近似式として平均的な (6-2) 式を採用すれば, 各層に関する κ_{ad} の値は安全側に設定される事が期待できる。

これら諸定数を用いて設計した UNI-M0 の各層特性値を表—4 中に示す。

7.2. 応答結果と考察

主要な応答結果の一覧を表—5 中に, μ_{me1r} と μ_{me1} および μ_{me1a} , κ_{eq1r} と κ_{eq1} および κ_{eq1a} の比較を図—20, 21 に示す。 μ_{me1r} , κ_{eq1r} と同様に μ_{me1} , κ_{eq1} に対しおおむね安全

側の値を示す。また、 μ_{me1a} , κ_{eq1a} とも応答値を安全側に評価する。 ξ_{pr} は、3地震波すべてについて、 ξ_p を下回っている。 ξ_{selr} は、UNI-M 0-Tの時に ξ_{sel} をやや下回るのが μ_{me1r} , κ_{eq1r} などに重大な影響を与えない。また、 h_{eq1r} はいずれの場合も設計目標値を上回る。

以上から、統合モデルは安全側の応答結果を与え、設計用諸定数の設定は妥当なものであったと言える。

8. まとめ

構造物各部の塑性化によるエネルギー吸収を期待した設計を行うためには、主要応答時間中の平均的な架構特性の変化（耐荷機構の移行）を想定した設計法が必要となる。本論では、この設計法の確立に必要な事項として高次周期相当の応答を考慮した設計フローと複数の地震波の特性を考慮した設計用諸定数の設定法に関する検討を行った。

主要応答時間中のエネルギー吸収がすべて1次周期に相当する応答により行われるとしたモデルによる検討では、等価剛性比の応答値は設計目標値をやや下回る傾向があり、等価剛性比と平均塑性率の関係を当初仮定した式で表す事はできない。

そこで、高次周期相当の応答が架構特性の変化に与える影響を考慮した設計フローを、各次周期に相当する応答を分離する事により得られた、以下の検討結果に基づき作成した。

- ① 1次相当エネルギー吸収量から求めた平均塑性率の略算値は、対応する応答値とほぼ同等ないしはやや安全側の値を与える。
 - ② 1次および2次相当エネルギー吸収比率を考慮する事で、高次周期相当の応答が1次周期相当の等価剛性比に与える影響を表す等価剛性比調整係数が得られる。
 - ③ 各層における各次相当のエネルギー吸収比率は、弾性時のモード形に基づき推定できる。
- さらに、この設計フローを用いて設計したモデルによるケーススタディを行い、その結果として以下の知見を得た。
- ④ 等価剛性比調整係数近似式((6-1)式)における(1- ξ_{sel})の重み r_{w1} を適切に選ぶと1次相当の等価剛性比と平均塑性率の関係は設計時の想定どおりになる。さらに r_{w1} を大きめに設定すると安全側の設計が得られる。
 - ⑤ 主要応答時間エネルギー吸収比率、各次相当エネルギー吸収比率は入力地震動のエネルギー的な特性を表し、これらの値が設計時の想定と異なると、応答値から求めた等価剛性比調整係数は設計時の設定に対し大きく変動する。

以上の検討に基づき、複数の地震波に対し安全側の応答を与えるモデルの設計用諸定数について推奨値を設定

した。ただし、本論での検討は特定のパラメータに対するもので、等価剛性比調整係数における各次相当エネルギー吸収比率の重み r_{w1} , r_{w2} の適切な値は等価剛性比の設計目標値に応じ異なる事が予想されるなど、検討の余地が残されている。これら設計用諸定数の推奨値を設計用資料として整備することを以って、本設計法が一般性を持つものとなると考えている（補足2）。

補足1：限定した時間幅での入力エネルギーないしは吸収エネルギーについての検討は、秋山・宮崎⁸⁾、長橋⁹⁾、金多・西澤¹⁰⁾らにより行われている。これらの研究では、いずれも、時間幅をモデルの固有周期の関数としてとらえ、比較的短い時間幅における最大エネルギーと最大応答値の相関について検討している。本論文における主要応答時間の定義については、①平均的な架構特性の変化をとらえる時間幅として、比較的長い時間幅とすることが望ましい②吸収エネルギー時刻歴上の吸収エネルギー増分の大きい時間帯は、図—1の臨海波入力例に見られるように、ある特定の固有周期を境に大きく変化するが、その前後ではモデルの固有周期に敏感に影響されるような変化は見だし難い。したがって、 Δt_p として一定時間幅を考える方が合理的である③地震動の継続時間に対する Δt_p の比率が大きすぎると、主要応答時間を考える意味がないなどの理由から、 Δt_p を一定時間15秒とした。

また、10%粘性減衰弾性系による検討によって、 ξ_p - T_{e1} 曲線を求めたのは、これより小さい減衰では、系の固有周期 T_{e1} の変動に対する ξ_p の変動が敏感に過ぎ、設計用資料として扱いにくいものとなると考えたためである。

補足2：本設計法により設計された各モデルについて、その設計条件が要求する平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$ を求める事で、秋山の手法⁴⁾により設計されたモデルと同等の評価が可能となる。本論文での検討用モデルの平均累積塑性変形倍率を表A—1に示す。表中 $\bar{\eta}$ は降伏部分の平均累積塑性変形倍率、 $\bar{\eta}_p$ は完全弾塑性系に換算した平均累積塑性変形倍率であり、図—3中の式に示したようにモデルの降伏せん断力係数は $\bar{\eta}_p$ に基づき定まる。 $\bar{\eta}_p$ は本論文での記号を用いると(A—1)式で求められる。

$$\bar{\eta}_p = \kappa_0 \cdot \bar{\eta} \cdots \cdots \cdots (A-1)$$

各モデルの $\bar{\eta}$ は11.6～28.0であり、かなり大きい塑性変形能力を要求している。これはモデルの設定に当たって架構中に塑性変形能に富んだエネルギー吸収部位を配置する事を想定したためである。一方、 $\bar{\eta}_p$ は3.5～

表 A—1 平均累積塑性変形倍率

モデル	ELC-O	TAF-O	RIN-O	UNI-O	ELC-MQ	TAF-MQ	RIN-MQ	TAF-MT	RIN-MT	UNI-M
$\bar{\eta}$	21.1	23.5	28.0	17.6	12.5	14.0	15.4	16.5	18.8	11.6
$\bar{\eta}_p$	6.3	7.1	8.4	5.3	3.8	4.2	4.6	5.0	5.6	3.5

8.4 と、鋼構造の $\bar{\eta}_p$ として代表的な値と考えられる 5.0⁴⁾ と同程度となっており、同じ入力レベルに対し、架構主要部分の塑性化を想定したモデルを設計したとき、層の降伏変位が本論文の検討用モデルと同程度であれば、同程度の弾性固有周期と降伏せん断力係数が得られることが考えられる。

モデルの設計において架構ないしは部材の累積塑性変形能を制約条件とする場合には、設計条件が要求する平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$, $\bar{\eta}_p$ について検討を行い、設計条件の設定が妥当なものであるかどうかを検証する必要があると考えられる。

謝 辞

この論文をまとめるに当たっては、千葉大学村上雅也教授の御指導を仰ぎました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 棚橋 諒：地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見，建築雑誌，pp.578～587，1935.5
- 2) Housner. G.W：Limit design of structures to resist earthquakes, Proc. of 1st WCEE, pp.5-1～5-13, 1956
- 3) Housner. G.W：Behavior of structures during earth-

quakes, ASCE EM 4, pp.109～129, 1959.10

- 4) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計 第2版，東京大学出版会，1980
- 5) 多治見宏，石丸辰治：「塑性率制御法」について，日本建築学会論文報告集，pp.17～28，1973.12
- 6) 丹羽正徳，渡部 丹，横田治彦，田村 保：東京臨界部における動的設計用入力地震動の検討（その1）基準地震動スペクトルと模擬地震動，日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅰ，pp.361～362，1991
- 7) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，1981
- 8) 日本建築学会編：免震構造設計指針，1989
- 9) 長橋純男：入力エネルギーによる地震動強さの評価，日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅰ，pp.417～418，1991
- 10) 西澤英和，金多 潔：1自由度振動系のエネルギー応答について（第1報）鉄骨造及び鉄筋コンクリート造架構モデルのオンライン実験，日本建築学会構造系論文報告集，pp.117～124，1991.6
- 11) 嶺脇重雄：エネルギー吸収と耐荷機構の移行を想定した架構の設計法について（その1）設計フローと質点系モデルによるスタディ，日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅰ，pp.647～648，1992

（1992年10月9日原稿受理，1993年2月17日採用決定）