

日本鋼管 正員 関口 宏二
京大工学部 正員 亀田 弘行

1. はじめに

本研究は、耐震設計の体系を、弾性設計と終局設計が一体となった総合体系として捉え、安全性評価に関して両者の調和がよくとれた設計体系を目指して基礎的検討を行ったものである。2次モーメント法による安全性評価手法により、二段階耐震設計における安全性評価の枠組は、Table 1のように総括される。塑性限界状態、耐震終局限界状態に対応する地盤震度 K_p , K_u は次のように、塑性じん性率 μ_p , 終局じん性率 μ_u , 降伏震度 K_y の関数として表わされるものとする。

$$K_p = N g_p(\mu_p, K_y) \quad (1)$$

$$K_u = N g_u(\mu_u, K_y) \quad (2)$$

Table 1 Summary of Methodology for Reliability-Based Structural Design for Seismic Loads

seismic design level		elastic design	ultimate design
seismic load		K_{gm}	K_{gu}
design strategy		free from damage or malfunction	prevention of collapse
design A	limit state	elastic limit state	seismic ultimate limit state
	safety index	β_e	β_u
	structural capacity	K_y (or R_y)	μ_u
	balance of safety	$\eta_{ue} = \beta_u - \beta_e$	
design B	limit state	plastic limit state	seismic ultimate limit state
	safety index	β_p	β_u
	structural capacity	K_y (or R_y), μ_p	μ_u
	balance of safety	$\eta_{up} = \beta_u - \beta_p$	

Table 2 Reliability-Based Expression of Design Coefficients v_3, v_4

design A	$v_3 = \frac{\varphi_y(1-d_{Ry}) \cdot \exp(a\beta_e)}{(1+d_{Ae})(1+d_{Kgm})}$	(3)
	$v_4 = \frac{\bar{N}(\mu_u) g_u(\mu_u, K_y)(1+d_{Ae})}{\bar{N}(\mu_u) g_u(\mu_u, \bar{R}_y) \varphi_y(1-d_{Ry}) \alpha} \cdot \exp(c\eta_{ue} + (c-a)\beta_e)$	(4)
design B	$v_3 = \frac{\varphi_y(1-d_{Ry})}{(1+d_{Ae})(1+d_{Kgm})} K_{gm}^{-1} \left(\bar{\mu}_p, \frac{\bar{K}_{gm} \exp(b\beta_p)}{\bar{N}(\bar{\mu}_p)} \right)$	(5)
	$v_4 = \frac{\bar{N}(\mu_u) g_u(\mu_u, K_y)(1+d_{Ae}) \bar{K}_{gm} \exp(c\beta_u)}{\bar{N}(\mu_u) g_u(\mu_u, \bar{R}_y) \varphi_y(1-d_{Ry}) \alpha g_p^{-1}(\bar{\mu}_p, \bar{K}_{gm} \exp(b\beta_p)/\bar{N}(\bar{\mu}_p))}$	(6)

そうすると、道路橋示方書耐震設計編の重要度別補正係数（ここでは重要度係数と呼ぶ） v_3 、構造特性別補正係数（ここでは震度割増し係数と呼ぶ） v_4 は、Table 2 に示されるように、安全性指標 β_e , β_u （あるいは β_p , β_u ）と関係づけられる。ここに、パラメータ α , ϕ_y , ϕ_u , ΔR_y , $\Delta \mu_u$, ΔA_e , ΔK_{gm} については、文献¹⁾を参照されたい。

関数 g_p , g_u について、Veletsos-Newmark の等価ポテンシャルエネルギーの仮定を応用した場合（手法 1 と呼ぶ）は、すでに発表している²⁾ので、ここでは、等価線形化手法を用いた場合（手法 2 と呼ぶ）について述べる。

2. 等価線形化手法による関数 g_u , g_p

耐震終局限界状態（じん性率 μ_u ）に対応する地盤震度 K_u を、次のように表す。なお以下、 $\bar{\cdot}$ （バー）は平均値、 $\bar{\cdot}$ は変動係数を表わすものとする。

$$K_u = N g_u(\mu_u, K_y) = N_{e2}(T_g, h_g) \frac{\bar{A}_{e2}(T_g, h_g) \left(\frac{T_g}{T_u} \right)^2}{\bar{A}_{e2}(T_u, h_u)} \mu_u K_y \quad (7)$$

ここに、 $\bar{A}_{e2}$ は最大加速度が 100 gal 以上の加速度記録を用いて、弾性加速度応答倍率の調和平均 (Fig. 1) を求め、それを次式により関数化したものである。すなわち、減衰定数 h と固有周期 T の関数の積として、

$$\bar{A}_{e2}(T, h) = \{-0.224/\ln(h) + 0.330\} \{P_2 T^{P_2}\} \quad (8)$$

P_2 , g_2 の値は、Table 3 に示した。また、 T_g は初期固有周期、 h_g は初期減衰定数であり、 T_u , h_u は後藤・家村のエネルギーバランスの方法による等価線形系の等価固有周期、等価減衰定数である。 N_{e2} は、等価線形化手法を用いたこと、関数 $\bar{A}_{e2}$ を用いたことによる誤差を補うための補正係数で

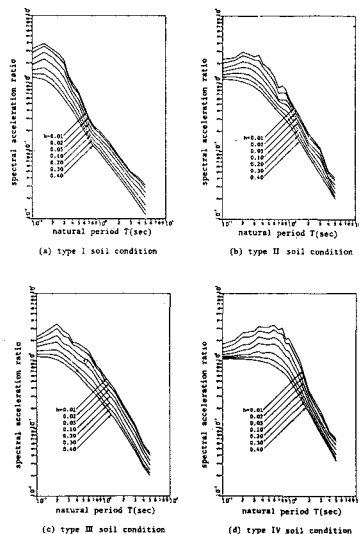


Fig. 1 Mean Spectral Acceleration Ratio (Harmonic Mean)

ある。わが国で得られた主要な強震記録 40 成分 (Fig. 1 を求める際に用いたデータセットと一致する) に対するバイリニヤ系の地震応答解析の結果, 平均値 $\bar{N}_{el}$ は, 固有周期 T とじん性率 μ の関数として,

$$\left. \begin{aligned} \bar{N}_{el}(T, \mu) &= \frac{1}{\mu_{21}-1} \left\{ (-1+\mu) v T^w + (\mu_{21}-\mu) \right\}, \quad 1 \leq \mu \leq \mu_{21} \\ \bar{N}_{el}(T, \mu) &= \frac{1}{5} \left\{ (-2+\mu) + T^u + (7-\mu) v T^w \right\}, \quad \mu_{21} < \mu (\leq 7) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに, $1 < \mu \leq 2.0$ であり, パラメータ値 t, u, v, w は Table 4 に示すものである。補正係数 N_{el} の変動係数 $\Omega_{N_{el}}$ は, じん性率 μ の関数として,

$$\Omega_{N_{el}}(\mu) = 0.35 \left\{ 1 - e^{-0.8(\mu-1)} \right\} \quad (10)$$

以上より, K_u の平均値 $\bar{K}_u$ と変動係数 Ω_{K_u} は,

$$\bar{K}_u = \bar{N} g_u(\bar{\mu}_u, \bar{K}_g) = \bar{N}_{el}(T_g, \bar{\mu}_u) \frac{\bar{A}_{e2}(T_g, h_g) \left(\frac{T_g}{T_u} \right)^2}{\bar{A}_{e2}(T_u, h_u)} \bar{\mu}_u \bar{K}_g \quad (11)$$

$$\Omega_{K_u}^2 = \Omega_{K_g}^2 + \Omega_{\mu_u}^2 + \left\{ \Omega_{N_{el}}(\bar{\mu}_u) \right\}^2 + \Omega_{\mu_u} \Omega_{K_g} \rho_{\mu_u K_g} \quad (12)$$

塑性限界状態に対応する地盤震度 K_p については, 以上の議論で乗字 u を p に置き換えて考えればよい。

3. 数値計算例

Table 5 に示したパラメータ値を用いて数値計算を行った。 $\bar{K}_g$, $\bar{\mu}_u$ については文献 (1) を参照された。Fig. 2 は, 安全性の要求 $\beta_e = 0.5$, $\eta_{ue} = 1.0$ のときの所要耐震性能 $\bar{\mu}_u$ の例を示したものである。 α は, 弾性設計用地盤震度 $\bar{K}_{gm}$ と終局設計用地盤震度 $\bar{K}_u$ の比として定義されるものであり, 地域による地震環境の特徴を表わすパラメータである。なお通常の土木構造物を想定し, 減衰定数は次式より算出した。

$$h = 0.02 / T \quad (T \leq 1.0 \text{ sec}), \quad h = 0.02 \quad (T > 1.0 \text{ sec}) \quad (13)$$

手法 1 による場合は, 地盤種別・固有周期にかかわらず, 一定の終局じん性率が要求される。手法 2 によると, 手法 1 と比べ $\bar{\mu}_u$ が大きい場合, 小さい場合があるが, 平均的には手法 1 よりも $\bar{\mu}_u$ を小さく設計してよいといえよう。これは, 手法 2 では地盤種別・固有周期をも考慮した定式化を行ったために, 式 (2) の K_u の変動係数 Ω_{K_u} を小さくすることができたからである。

Fig. 3 は, Table 5, Table 6 のパラメータ値を用いて, $\beta_e = 0.5$, $\eta_{ue} = 1.0$ のときの震度割増し係数 $\bar{v}_4$ を求めたものである。(式 (4) に対応する。) 手法 1 による $\bar{v}_4$ の値は, 手法 2 による場合の平均的な値を示しているが, この図は, 解析手法の向上により, より精度の高いキャリブレーションが可能であることを示唆するものである。

4. 参考文献

- ① 豊田・関口: 信頼性評価に基づく耐震構造設計の基礎的方法—定式化とキャリブレーション—, 第 27 回構造工学シンポジウム, 昭. 56. 2, pp. 47-57.
- ② 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 昭. 55. 5.
- ③ 後藤・泉村: 弾塑性 1 自由度構造物の地震応答解析等価線形化解法の適用性, 土木学会第 12 回地震工学研究発表会議要旨, 1972, pp. 43-46.

Table 3 Values of p_2 and q_2

soil conditions	natural period(sec)	p_2	q_2
type I	0.1 - 0.2	2.65	0.0614
	0.2 - 0.8	0.134	-1.79
	0.8 - (5.0)	0.155	-1.14
type II & type III	0.1 - 0.2	4.64	0.436
	0.2 - 1.0	0.490	-0.961
	1.0 - (5.0)	0.490	-1.72
type IV	0.1 - 0.6	2.56	0.294
	0.6 - 1.0	1.40	-0.885
	1.0 - (5.0)	1.40	-2.11

Table 4 Values of t, u, v, w

soil conditions	natural period(sec)	t	u	v	w
type I	0.3 - 5.0	1.24	0.228	0.829	0.126
type II	0.3 - 5.0	1.25	-0.0562	0.892	-0.0496
type III	0.3 - 5.0	1.27	-0.117	0.904	0.0448
type IV	0.3 - 2.0	1.17	-0.591	0.926	-0.348
	2.0 - 5.0	0.715	0.126	0.581	-0.100

Table 5 Parameters Used for Calculation

γ	θ	Ω_{Kgm}	Ω_{Kp}	$\Omega_{\mu p}$	$\Omega_{\mu u}$	$\rho_{\mu p K_p}$	$\rho_{\mu u K_u}$
0.5	0.1	0.5	0.4	0.3	0.4	0	0

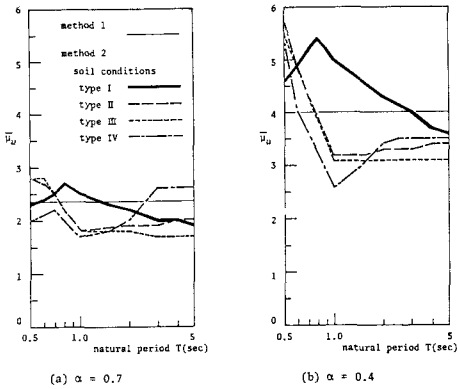


Fig. 2 Variation of Required $\bar{\mu}_u$ with Natural Period (design A; $\beta_e = 0.5$, $\eta_{ue} = 1.0$)

Table 6 Parameters Used for Calculation

ϕ_y	ϕ_u	Δ_{Ry}	$\Delta_{\mu y}$	$\Delta_{\theta o}$	Δ_{Kgm}	$\bar{\mu}_u$
0.7	0.7	0.3	0.3	0	0	6.0

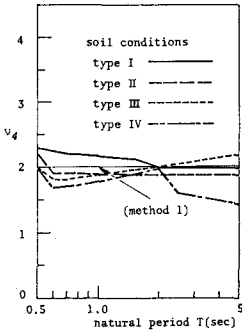


Fig. 3 Variation of $\bar{v}_4$ with Natural Period (design A, $\alpha = 0.7$; $\beta_e = 0.5$, $\eta_{ue} = 1.0$)