

土木研究所資料
第528号

構造物の地震応答解析
—非線型スペクトル・1969—

昭和44年8月

建設省土木研究所

正 誤 表

頁	行	誤	正	備 考
1	図 1	(C) 無元力特性	(C) 復元力特性	無 → 復
5	表・1 入力値	数 + 種	数 10 種	+ → 10
5	表・1 出力値	$U = \max(\xi)$ $a = \max(\ddot{\xi})$ $a = \max(\ddot{\xi} + \ddot{Z}/Xy)$	$v = \max(\dot{\xi})$ $a_1 = \max(\ddot{\xi})$ $a_2 = \max(\ddot{\xi} + \ddot{Z}/Xy)$	$U, (\xi) \rightarrow v, (\dot{\xi})$ $a \rightarrow a_1$ $a \rightarrow a_2$
12	1	$Xy = \frac{m \cdot k \cdot g}{k} \cdot S = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 k \cdot g \cdot s$	$Xy = \frac{m \cdot K \cdot g}{k} \cdot S = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 K \cdot g \cdot s$	$k, k, s \rightarrow K, K, S$
20	9	線型系の Z_1, Z_2 に対する	線型系の $\ddot{Z}_1, \ddot{Z}_2$ に対する	Z の頭に $\ddot{\cdot}$ を付ける
20	10	$(Xy)_1 = (Xy)_1 / A$	$(Xy)_1 = (Xe)_1 / A$	分子の $(Xy)_1$ を $(Xe)_1$ にする
27	付表-1 備考	$[9\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 26.2 \text{ gal}]$ $[11\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 125.8 \text{ gal}]$ $[20\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 81.0 \text{ gal}]$ $[8\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 48.6 \text{ gal}]$	$[9\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 26.2 \text{ gal}]$ $[11\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 125.8 \text{ gal}]$ $[20\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 81.0 \text{ gal}]$ $[8\text{成分}, (\ddot{Z}_{max})_{av} = 48.6 \text{ gal}]$	$] を付ける$ $] を付ける$ $=] を付ける$ $=] を付ける$
29	付表-2 (4)の上段の注釈欄			NSD の項に $\uparrow$ を付す
29	付表-2 (5)の上段の注釈欄			NSD の項に $\uparrow$ を付す
29	付表-2 (5)の注釈欄	by penzion	by Penzien	$p \rightarrow P$ $o \rightarrow e$
29	付表-2 (4)と(5)の下段の最上の行	Z_{max}^D	$\ddot{Z}_{max}^D$	Z の頭に $\ddot{\cdot}$ を付す
29	備考欄の上段の②	一定の γ 値をとると長周期で線型となる	一定の γ 値をとると長周期で線型となる。	$\circ$ を付す

要 旨

岩 崎 敏 男

齊 藤 俊 三

本論文ではまず復元力がバイリニア (bi linear) な1自由度系の地震応答に関して、解析結果の普遍性を相似律に基づいて検討した。ついで多数の地震動に対する応答解析を各種パラメータを変えて実施した。このさい、系のパラメータの与え方として3種を考え、各々について平均応答スペクトルを算定すると共に線型系との対比を行なった。さらに、これらについて実際問題への適用法を論じた。

この研究から構造物の非線型性をも考慮した地震応答の算定が、比較的良好な近似度をもって容易に行なえることとなる。

ま え が き

本報告書は、構造物の地震応答解析に関連して実施した1自由度非線型系の地震応答特性を、線型系におけると同様の応答スペクトルという標準的手法によって表示したものである。

当所の非線型系の地震応答解析は昭和39年度から開始され、長期にわたって継続されてきた。本資料は集積された応答解析の結果をとり急ぎまとめたもので、解析結果に対する検討・考察は今後待つ所が大きい。

昭和44年8月

構造橋梁部 振動研究室

岩 崎 敏 男

斉 藤 俊 三

目 次

要 旨

まえがき

§ 1. 緒論	1
§ 2. バイリニア系の地震応答解析の基本概念	2
§ 3. スペクトル曲線の求め方	5
3.1 概説	5
3.2 線型応答パラメータ (δ) による方法	6
3.3 地動加速度パラメータ (降伏定数, r) による方法	7
3.4 ダクティリティ・ファクタ (塑性率, μ) による方法	10
§ 4. 平均スペクトル	15
4.1 平均応答の試み	15
4.2 δ による平均スペクトル	16
4.3 r による平均スペクトル	17
4.4 μ による平均スペクトル	17
あとがき	18
参考文献	18

付表

付表-1 応答解析の対象とした地盤動地震波形記録の一覧表	27
付表-2 線型系及びバイリニア (bi-linear) 系に対する 地震応答スペクトルの拡大応用に関する検討	28

付図 演算結果

1. δ によるスペクトル	
1.1 特定地震のスペクトル	
1) 復元力倍率 β_s	30
2) ダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比 μ/δ	32
1.2 地震波 20 成分の平均スペクトル	
1) 復元力倍率 β_s	34
2) ダクティリティ・ファクタ μ	40
3) ダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比 μ/δ	42
2. r によるスペクトル	
2.1 特定地震のスペクトル	

1) 復元力倍率 β_0	46
2) ダクティリティ・ファクタ μ	50
3) 相対変位 X (cm)	54
2.2 地震波10成分の平均スペクトル	
1) 復元力倍率 β_1	58
2) ダクティリティ・ファクタ μ	62
3. μ によるスペクトル	
3.1 特定地震のスペクトル	
1) 復元力倍率 β_3	66
2) ダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比 μ/Δ	75
3.2 地震波20成分の平均スペクトル	
1) 復元力倍率 β_3	79
4. 線型系の応答解析における復元力倍率の地震波20成分と10成分の比較	88
5. $\Delta-\mu$ 曲線の一例	89

§1. 緒 論

構造物の地震応答解析において、線型力学系を仮定する場合と非線型力学系を仮定する場合とがある。前者に関しては二・三の応答スペクトル曲線⁽¹⁾がすでに与えられ、モーダルアナリシスを行うのみでも容易に最大応答を算定しうる。一方後者に関連して地震観測・実験等により構造物の非線型挙動が指摘されており、構造物ないしは基礎地盤の非弾性を考慮した非線型応答解析の例がみられる。しかしその場合には特定の構造物にある限られた地震動を作用させて応答を求めたものが多く、構造物の性質あるいは地震動の波形とその振幅が想定したものから変化したときの応答量の変化を判断するためには高度の予備知識を必要とする。従って個々の構造物に関して地震波形を入力とした複雑な非線型応答計算をその都度実施しているのが現状である。本資料では復元力がバイリニア (bi-linear) である 1 自由度非線型系に関して、解析結果の普遍性を相似律に基づいて検討し、ついで多数の地震動に対する応答解析を各種パラメータについて実施した。このさい非線型系のパラメータの与え方として 3 種を考え、各々について平均スペクトルを求めるとともに、線型系との対比を行った。さらにこれらについて、実際問題への適用のしかたについて論じた。なお本資料と関係ある報告を参考文献(2)~(5)に示しておく。

§2. バイリニア系の地震応答解析の基本概念

図 1 に示す粘性減衰を有する 1 自由度のバイリニア系の地震応答について考える。この系が地震動を受けたときの運動方程式は周知のごとく次式で表わされる。

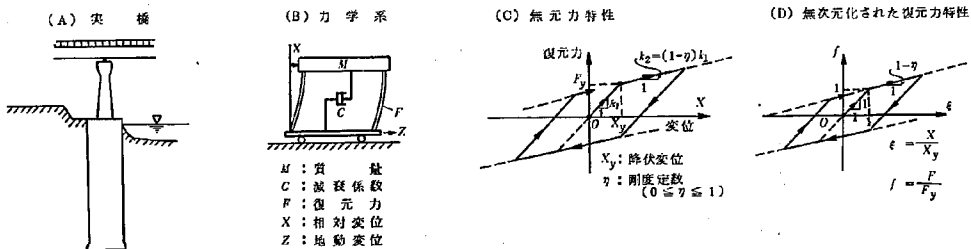


図 1 バイリニア系 (bi-linear 系) のモデル

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F = -M\ddot{Z} \quad (1)$$

ここに

- M : 質点の質量
- C : 粘性減衰係数
- F : バネの復元力
- k_1 : 初期のバネ係数

k_2 : 降伏後のバネ係数

p : 固有円振動数 ($=\sqrt{\frac{k_1}{M}}$)

T : 固有周期 ($=\frac{2\pi}{p}$)

X : 相対変位

$\dot{X}$: 相対速度

$\ddot{X}$: 相対加速度

X_y : 降伏変位

$\ddot{Z}$: 地動加速度

である。式(1)の両辺を $p^2 M X_y$ で除すと次式となる。

$$\frac{\ddot{X}}{p^2 X_y} + \frac{C \dot{X}}{p^2 M X_y} + \frac{F}{p^2 M X_y} = -\frac{\ddot{Z}}{p^2 X_y} \quad (2)$$

式(2)は無次元方程式であることが判る。これは、この解析において相似則が成立することを示唆するものである。

ここで Buckingham の π 定理を用いて相似則が成立することを理論的に立証すると共に必要とする条件を求めてみよう。

いま関係する物理量を $M, C, p, k_2, \ddot{Z}, X, \dot{X}, \ddot{X}$ および X_y の 9 箇とする。初期のバネ係数 k_1 は $k_1 = M p^2$, また復元力は k_1, k_2, X および X_y の従属関数であるからともに省略されう。これら 9 箇の量の中から便宜上 M, p および X_y の一次的に独立している 3 つの量を基本物理量にとると、次に示す 6 箇の無次元積が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{C}{p M} \\ \pi_2 &= \frac{k_2}{p^2 M} \\ \pi_3 &= \frac{\ddot{Z}}{p^2 X_y} \\ \pi_4 &= \frac{X}{X_y} \\ \pi_5 &= \frac{\dot{X}}{p X_y} \\ \pi_6 &= \frac{\ddot{X}}{p^2 X_y} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_6$ は Buckingham の π 定理における無次元積である。このうち π_1, π_2, π_3 および π_6 は時間の関数であり、 π_1, π_2 および π_3 は力学系と地震に関する入力値、さらに π_4, π_5 は応答量である。

もし任意の二つの振動系において、この 6 箇の無次元量がそれぞれ等しければ二つの系は物理的に相似するといえる。さらに二つの系において入力である π_1, π_2, π_3 が等しければ、応答量である π_4, π_5 および π_6 は当然等しくなり、二つの系は相似する。この際 3 箇の基本的物理量 $M \cdot p$ および X_y は任意にとりうる。上記の

相似則においては時間の縮尺比は長さの縮尺比の平方根に等しいこと、そして振動系にとるべき時間軸はこの縮尺比を満足していることが具備すべき重要な条件となる。

この条件は次の如く誘導される。いま任意の二つの力学系1および2を考える。これらが力学的に相似するためには上記の如く、 $\pi_1 \sim \pi_6$ が両者で等しくなければならない。一方二つの系の重力項の比および慣性力項の比は、 $M_1 g / M_2 g$ および $M_1 a_1 / M_2 a_2$ で表わされる。ここで M , g および a はそれぞれの質量、重力の加速度および質点の振動加速度であり、サフィックス1および2は力学系1および2に対応するものである。静的な力-変形関係と動的な力-変形関係の両者が二つの系において相似するためには、重力項の比と慣性力項の比が等しくなければならない。すなわち

$$\frac{M_1 g}{M_2 g} = \frac{M_1 a_1}{M_2 a_2}$$

$$\therefore \frac{a_1}{a_2} = 1$$

が要求される。ここで振動加速度は $a = x / t^2$ (x : 振動変位の振巾, t : 時間座標) と表わされるから、

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\frac{x_1}{t_1^2}}{\frac{x_2}{t_2^2}} = 1$$

$$\therefore \frac{t_1}{t_2} = \sqrt{\frac{x_1}{x_2}}$$

が得られる。これからも同様に、固有周期 (時間を代表するものである) の縮尺比は長さの縮尺比の平方根に等しいことが要求されるわけである。

次に特殊な場合として、二つの振動系が同一の地震動をうけた場合を想定してそのときの両者の応答の相似性を考えてみる。この場合には両者の時間軸および振巾が一致しなければならないから、相似則が成立するためには両者において関係する物理量 (9 箇) が全て等しくなければならないことになる。

さて式(3)における6箇の無次元積の物理的意味は以下の通りである。

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{C}{pM} = \frac{C}{Mk_1} = 2h \quad (h: \text{減衰定数}) \\ \pi_2 &= \frac{k_2}{p^2 Xy} = \frac{k_2}{k_1} = 1 - \eta \quad (\eta: \text{剛度定数}) \\ \pi_3 &= \frac{\ddot{Z}}{p^2 Xy} = \frac{\ddot{Z}}{r \ddot{Z}_{max}} \quad (r: \text{降伏定数}) \\ \pi_4 &= \frac{X}{Xy} = \xi \quad (\text{相対変位に関する無次元量}) \\ \pi_5 &= \frac{\dot{X}}{p Xy} = \frac{\dot{\xi}}{p} \quad (\text{相対速度に関する無次元量}) \\ \pi_6 &= \frac{\ddot{X}}{p^2 Xy} = \frac{\ddot{\xi}}{p^2} \quad (\text{相対加速度に関する無次元量}) \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで $\ddot{Z}_{max}$ は地震動加速度 Z の絶対最大値であり、 $\dot{\xi} = d\xi/dt$, $\ddot{\xi} = d^2\xi/dt^2$ である。これら関係を式(2)に

代入すると、

$$\ddot{\xi} + 2\delta \frac{\dot{\xi}}{p} + f(\xi, \eta) = -\frac{\ddot{Z}}{r \ddot{Z}_{\max}} \quad (5)$$

が得られる。ここで $f(\xi, \eta)$ は復元力 F を降伏復元力 $F_y (= k_1 X_y)$ で除した無次元の復元力項であり、図1 (D) で示されるように変化し、 ξ 、 η および時間の関数である。

ここでバイリニア系の応答解析に必要な力学系の特性値について説明を加える。一般に1自由度線型系は固有周期 T と減衰定数 δ の二つの特性値で表現される⁽¹⁾が、非線型系ではさらに別の特性値が必要となる。いま考えているバイリニア系では上記の T 、 δ の他に二つの特性値が導入される。それは、降伏後のバネの強さの低下を決めるものと、降伏変位を決めるものである。この特性値として、ここでは剛度定数 η と降伏定数 r の2つを定義した。

剛度定数 η は $\eta = 1 - k_2/k_1$ (k_1 : 初期降伏が生ずる前のバネ係数、 k_2 : 降伏後のバネ係数) で表わされる定数で、通常 η の値を0から1の範囲で選ぶことができ、線型系は $\eta = 0$ 、バイリニア系は $0 < \eta < 1$ 、および完全バイリニア系は $\eta = 1$ で表わしうる。この η に類似する定数として R. W. Clough は文献(6)の中で $k_2/k_1 = r_c$ (実際は r で表わされているが、降伏定数 r と同一記号となるので r_c とした。) なる量を定義し、Stiffness Ratio と称している。 η と r_c の間には $\eta = 1 - r_c$ なる関係がある。

次に降伏定数 r は $r = p^2 X_y / \ddot{Z}_{\max}$ で表わされ、降伏変位 X_y を決める係数である。 $X_y = r (\ddot{Z}_{\max} / p^2) = r (M \ddot{Z} / k_1)$ と表わされるから、この振動系に地震動の最大加速度が静的に作用したときにバネに生ずる変位 (但し初期のバネ係数 k_1 が持続するものと仮定) に降伏定数 r を乗じたものが降伏変位 X_y に等しいという定義である。この係数に類するものとして、J. Penzien は完全バイリニア系の地震応答を述べた文献(7)の中で、 $\theta = F_y / M \cdot g$ (ここに F_y : 降伏力、 M : 質量、 g : 重力の加速度) なる量を定義し、strength parameter と称している。 r とこの θ との間には $r = (g / \ddot{Z}_{\max}) \theta$ なる関係が成立する。

さて式(5)に関して、任意の系に任意の地震動を入力として数値積分を行えば、一般的なバイリニア系の地震応答を求めることができる。実施した演算結果および実測結果との対比を次節以下に示すことにする。

次に、バイリニア系の応答計算の入力および出力を表1にまとめて示す。線型系における入力には固有周期 T および減衰定数 δ の2つであったが、バイリニア系においては、さらに降伏後のバネ係数 k_2 および降伏変位 X_y を決めるパラメータの2つが加わる。従って系の種類が非常に大となり、多量の計算が必要となる。

出力は、変位、速度、加速度および復元力などである。最大変位 ($\xi_{\max} = \frac{X_{\max}}{X_y}$) をダクテリティ・ファクタ (延性率、靱性率または塑性率ともよばれる) と称する。ここではダクテリティ・ファクタ μ は、バイリニア系の最大応答変位を降伏変位で除した値と定義したが、 μ は系の終局変位—これに達すると構造物は崩壊する—を降伏変位で除した値として定義される場合もたまにあり、ともに構造物の地震に対する安全性の一つの尺度になるものであるとされている。

表.1 バイリニア系応答計算の入出力値

量				記号	単位	演算実施例	備考	
入力値	固定周期	T	sec	0.1~10sec	} $X_y = X_e/d$			
	減衰定数	h		0, 2, 5, 10, 20, 40%				
	剛度定数	η		0(弾性), 0.4, 0.6, 0.8, 1.0(完全塑性)				
	降伏変位※	X_y	cm					
	相当線型系の最大変位	X_e	cm					
	線型応答パラメータ	d						
	地動加速度(各時刻) 積分時間ピッチ	$\ddot{Z}$ Δt	gal sec	数+種 0.01sec				
備考	※ $X_y = \gamma \left(\frac{T^2}{2\eta} \right) \cdot \ddot{Z}_{\max}$ (γ : 降伏定数)と定義する方法もある。この場合 $\gamma = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot X_e / (d \cdot \ddot{Z}_{\max})$ の関係もある。							
出力値	量	記号と定義		最大値	記号と定義	倍率	記号および定義	
		$\xi - f$ 系	$X - F$ 系					
	相対変位	ξ	$X = X_y \cdot \xi$	最大変位 (ダクティリティ) フック	$\mu = \max(\xi)$			
	残留変位	ξ_p	$X_p = X_y \cdot \xi_p$					
	速度	$\dot{\xi}$	$\dot{X} = X_y \cdot \dot{\xi}$	最大速度	$U = \max(\dot{\xi})$	速度応答倍率	$\alpha = X_y \cdot v / \ddot{Z}_{\max} = \frac{\beta \xi}{d} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot v$	
	相対加速度	$\ddot{\xi}$	$\ddot{X} = X_y \cdot \ddot{\xi}$	最大相対加速度	$a = \max(\ddot{\xi})$	相対加速度応答倍率	$\beta_1 = X_y \cdot a_1 / \ddot{Z}_{\max} = \frac{\beta \xi}{d} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot a_1$	
	絶対加速度	$\ddot{\xi} + \ddot{Z} / X_y$	$\ddot{X} + \ddot{Z}$	最大絶対加速度	$a = \max(\ddot{\xi} + \ddot{Z} / X_y)$	絶対加速度応答倍率	$\beta_2 = X_y \cdot a_2 / \ddot{Z}_{\max} = \frac{\beta \xi}{d} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot a_2$	
復元力	f	$F = F_y \cdot f$ $= k X_y f$	最大復元力	$f_{\max} = \max(f)$	復元力応答倍率	$\beta_3 = F_{\max} / (m \ddot{Z}_{\max}) = k X_y \cdot f_{\max} = \frac{\beta \xi}{d} \cdot f_{\max}$		
備考	$\frac{\mu}{d} = \frac{X_y}{X_e} = \frac{X_{\max}(\text{非線型の最大応答変位})}{X_e(\text{弾性変位})}$				但し $\left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot \frac{\beta \xi}{\ddot{Z}_{\max}}$ (相当線型の加速度 応答倍率) $m = \text{質量}, k: \text{初期バネ係数}$			

§3. スペクトル曲線の求め方

3.1 概 説

一般に1自由度線型系は固有周期 T と減衰定数 h の2つの特性値で表現されるが、非線型系においては前述したようにさらに別の特性値が必要となる。今考えている図.1のバイリニア系(bi-linear系)においては、上記の T 、 h の他に、さらに2つのパラメータが必要である。それは降伏後のバネ係数(の低下)を決めるパラメータと降伏変位を決めるパラメータの2つである。

前者は図.1または表.1に示す剛度定数 η を用いて容易に定義される。すなわち初期(弾性限界内)のバネ係数 k に対して、降伏後のバネ係数は $(1-\eta) \cdot k$ であると定義する訳である。こうすれば、 $\eta=0$ の場合は弾性となり、 $\eta=1$ の場合は完全弾塑性となる。また η を0と1の間にとれば任意の傾斜をもったバイリニア系を選ぶことができる。

一方、後者の降伏変位を決めるパラメータについては、種々の定義の仕方が考えられるが、ここでは①相当線

型系の最大応答変位に関連づけるパラメータ (d)、および②地震動の最大加速度に関連づけるパラメータ (r) について考える。また第3の方法として③直接的には X_y と無関係な量である (間接的には関係がある) ダクティリティ・ファクタ (μ) をパラメータとして導入する方法も考えられる。これら3者について、ある特定の地震動に対するスペクトル曲線の求め方及びその計算例を以下に示すこととする。

3.2 線型応答パラメータ (Δ) による方法

この方法では、①まず今考えているバイリニア系と同一の固有周期 T 、減衰定数 h を有する線型系 (相当線型系) を想定する。すなわち図1(B)において変位と復元力の関係が、直線 $I-I'$ を延長した1本の直線 ($I''-I'''$ 直線) で表わされる線型系を想定する。そしてこの系に地震加速度 $\ddot{z}$ が作用したときの応答計算を行い、最大応答変位 X_e を求める。②上記の相当線型系の最大応答変位 X_e を係数 Δ で除したものが、バイリニア系の降伏変位 X_y であると定義する。

$$(X_y = X_e / \Delta)$$

この定義に従うと、 $\Delta \leq 1$ の場合は $X_y \geq X_e$ となり、系は線型にとどまることとなる。しかし通常は $\Delta > 1$ の値をとり、この場合は必ず降伏変位を越す応答が生じることとなる。

この定義に従えば、今考えている系が線型系であると仮定したときの最大応答変位 X_e の $1/\Delta$ に達すれば降伏するバイリニア系を考える訳である。弾性限界内では復元力 F は変位 X に比例するから、上記の定義は、「系の復元力が相当線型系の最大復元力 $F_e (= kX_e)$

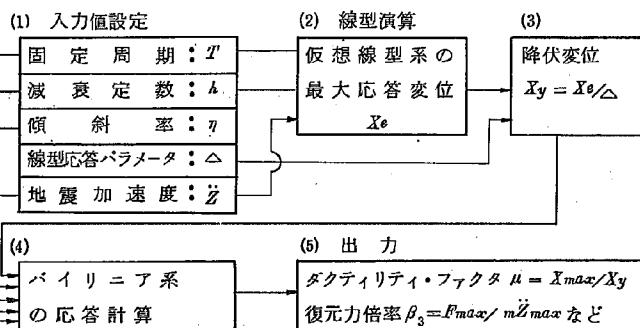
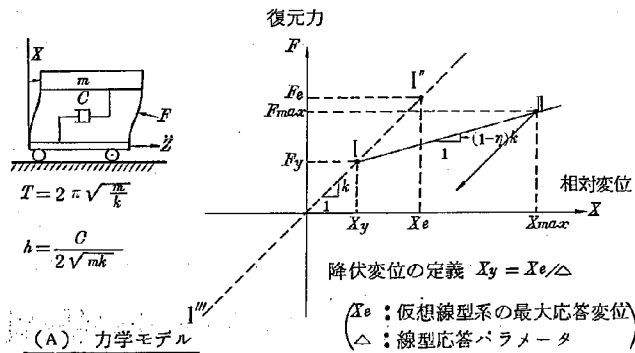
の $1/\Delta$ に達したときに降伏する」と換言することができる。

この Δ は相当線型系の最大応答変位 X_e をバイリニア系の降伏変位 X_y に関係づけるパラメータ

$$(\Delta = X_e / X_y)$$

であり、以下、線型応答パラメータと称することにする。この線型応答パラメータ

(Δ) を用いるバイリニア系の地震応答計算法の概要を図2に示す。このパラメータを用いて実施した演算結果の一部を応答スペクトル図として図3、および図4に示す。これらの図は、ある特定の地震記録 — 越前沖地震 (1963年3月27日) の際に兵庫県明石において得られた加速度記録 (N-S成分, 最大加速度 $\ddot{z}_{max} = 79.88 \text{ gal}$) に関する応答スペクトル



(B) スペクトル計算流れ図

図2 線型応答パラメータ (Δ) を用いたバイリニア系の地震応答計算法の概要図

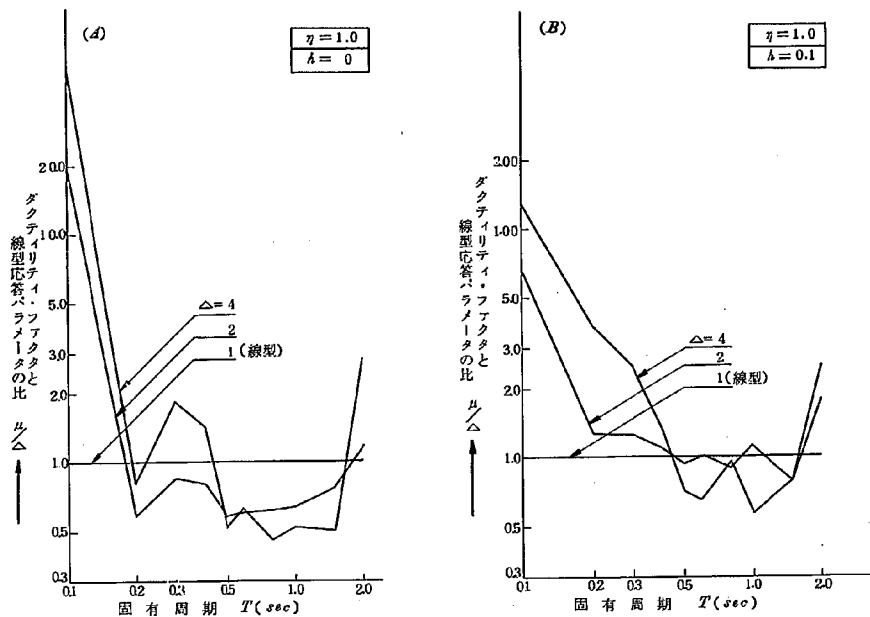


図-3 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号17 明石 Δ - δ 成分

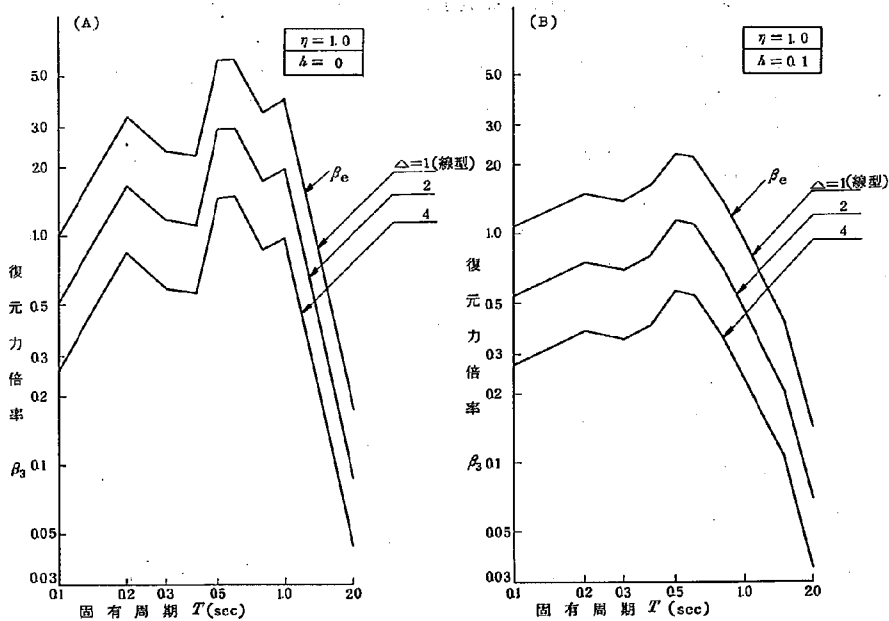


図-4 バイリニア系の復元力倍率
資料番号17 明石 Δ - δ 成分

図であり、横軸は振動系の固有周期 T (sec), 縦軸は図3では、最大応答変位 (ダクテリテイ・ファクタ) μ を d で除したものを、図4では復元力倍率 β (最大復元力 F_{max} を $m \cdot \ddot{Z}_{max} = (\text{質量} \times \text{最大加速度})$ で除したものを)を示し、減衰定数 $h=0$ および 0.1 , 剛度定数 $\eta=1.0$ の場合について、線型応答パラメータ $d=1$ (線型) 2および4の3ケースを比較して示したものである。

これらのスペクトル曲線は次の要領で、バイリニア構造物の地震応答解析に適用される。

- ①バイリニア系の特性値の仮定 (T, h, η, X_y の決定)
- ②地震加速度 $\ddot{Z}$ の設定 (該当するスペクトル曲線の選定)
- ③上記の $T, h, \ddot{Z}$ から相当線型系の最大応答変位 X_e を資料から読み取る。
- ④線型応答パラメータ $d=X_e/X_y$ の算出
- ⑤ T, h, η, d および $\ddot{Z}$ の対応するスペクトル曲線から各種の応答量を読みとる。

一例として $T=0.3$ sec, $h=0.1$, $\eta=1.0$, $X_y=0.1$ cm の系に上記の明石での地震加速度が作用したときの応答を求めてみる。まず相当線型系の応答変位 $X_e=\beta_e \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = 0.25$ cm。次に $d=X_e/X_y=2.5$ 。図3, 4には $d=2.5$, に対応するスペクトル図はないが、 $d=2$ と4との間を補間して、 $\beta_s=0.56$, $\mu=4.2$ が得られる。これより系の最大応答変位は $X_{max}=\mu X_y=0.42$ cm が得られる。また最大復元力は $F_{max}=(m \cdot \ddot{Z}_{max}) \beta_s = \frac{W}{g} \cdot \ddot{Z}_{max} \cdot \beta_s = 0.046 W$ となる。即ちこの系に明石地震 $\ddot{Z}_{max}=79.88$ gal が作用したとき、バネには質点の重量(W)の0.046倍の力が作用し、最大0.42 cmの変位が生ずることが判る。ここでは示されていないが加速度、速度等のスペクトル図が与えられておれば、同様にして加速度、速度等の応答も容易に求めることが出来る。

3.3 地震加速度パラメータ(降伏定数, γ)による方法

今考えている振動系に地震動の最大加速度 $\ddot{Z}_{max}$ が静的に作用したときに、系(但しここでは系のバネ係数は初期(弾性限界内)のバネ係数 k を持続するものと仮定する。)に生ずる変位 X_{st} は

$$X_{st} = \frac{m \cdot \ddot{Z}_{max}}{k} = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \ddot{Z}_{max} \quad (7)$$

で与えられる。バイリニア系の降伏変位 X_y はこの X_{st} にある係数(r)を乗じたものとして定義する。すなわち

$$X_y = r X_{st} = r \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \ddot{Z}_{max} \quad (8)$$

とする。ここで r は地震動最大加速度(および固有周期)を降伏変位 X_y に関係づけるパラメータであり

$$r = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{X_y}{\ddot{Z}_{max}} \quad (9)$$

で表わされ以下、地震加速度パラメータと称する。

一般に、震度法においては設計の対象とする地震の最大加速度 $\ddot{Z}_{max}$ を構造物に静的に働かせて耐震設計を行う。従って設計された構造物の安全度は、 $\ddot{Z}_{max}$ の値と重要な関連があるものと考えられる。ここでは、構造物に加速度 $\ddot{Z}_{max}$ が静的に作用したときに生ずる変位に、ある係数 r を乗じたものを、降伏変位 X_y として定義するものである。

この定義に従えば、 r を小さくすると、降伏変位 X_y は小さくなり、小さい変位で塑性状態に入る。逆に r を大きくすると、 X_y は大きくなり、塑性状態に入りにくくなる。 r をある値以上にとると、最大応答変位が降伏変位以下となり、塑性状態に入らず線型となる。線型となる境界の r 値は、後述の式 (13) で $\Delta \leq 1$ において、

$$r \geq \beta_e = \frac{X_e \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2}{\ddot{Y}_{max}} \quad (10)$$

ここに β_e : 相当線型系の加速度応答倍率

X_e : 相当線型系の最大応答変位

で与えられる。

地震加速度パラメータ (r) を用いるバイリニア系地震応答計算法の概要を図5に示す。

またこのパラメータを用いたスペクトル図の例を図6、(A)

(B) および図7、(A) (B)

に示す。これらのスペクトル

図は、前記の明石地震記録

(N-S成分, 79.88 gal)

について求めたもので、図6

は $\eta = 0.6$ の場合、図7は η

$= 1.0$ (完全弾塑性) の場合

を示し、更に図の (A) では

復元力倍率 β 、およびダクティリティ・ファクタ μ を、図

(B) では最大変位 X (cm)

を示す。そして共に減衰定数

$h = 0$ および 0.1 の場合につ

いて、 $r = 0.5, 1.0, 1.5$

および線型の4種のスペクトル

曲線を描いたものである。

次にこれらのスペクトル図

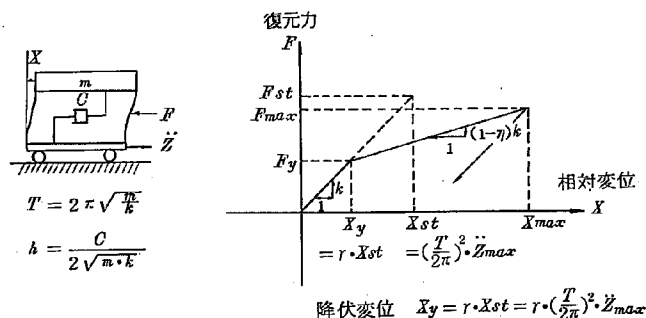
の適用例を示そう。

今仮りに、設計震度 K 、安

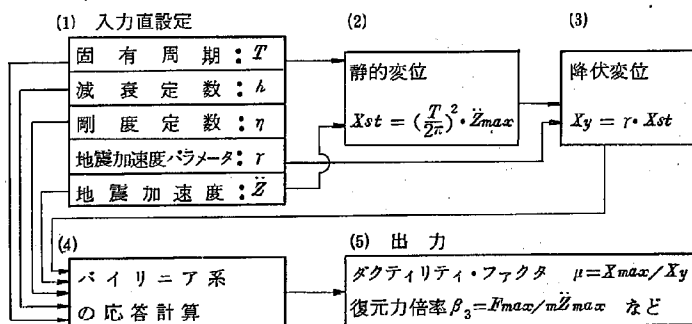
全率 δ (降伏変位に対するも

の) で弾性設計された、すなわち、震度 K が作用したときの変位を δ 倍すると降伏変位に達する、構造物を考え

てみよう。この構造物の降伏変位 X_y は、



(A) 力学モデル



(B) スペクトル計算流れ図

図-5 地震加速度パラメータ (r) を用いたバ

イリニア系の地震応答計算法の概要図

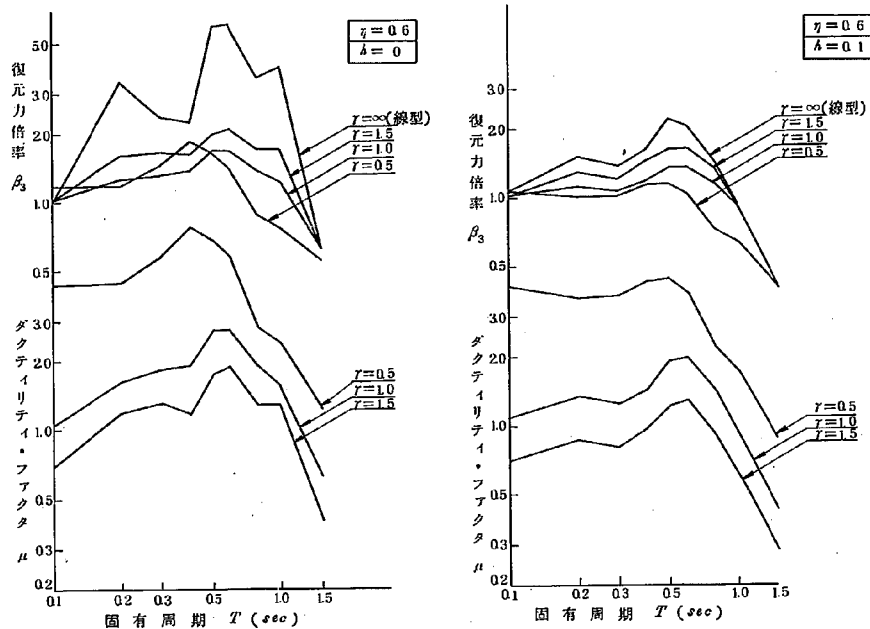


図-6 (A) r によるバイリニア系地震応答
資料番号 17 明石 $N-S$ 成分

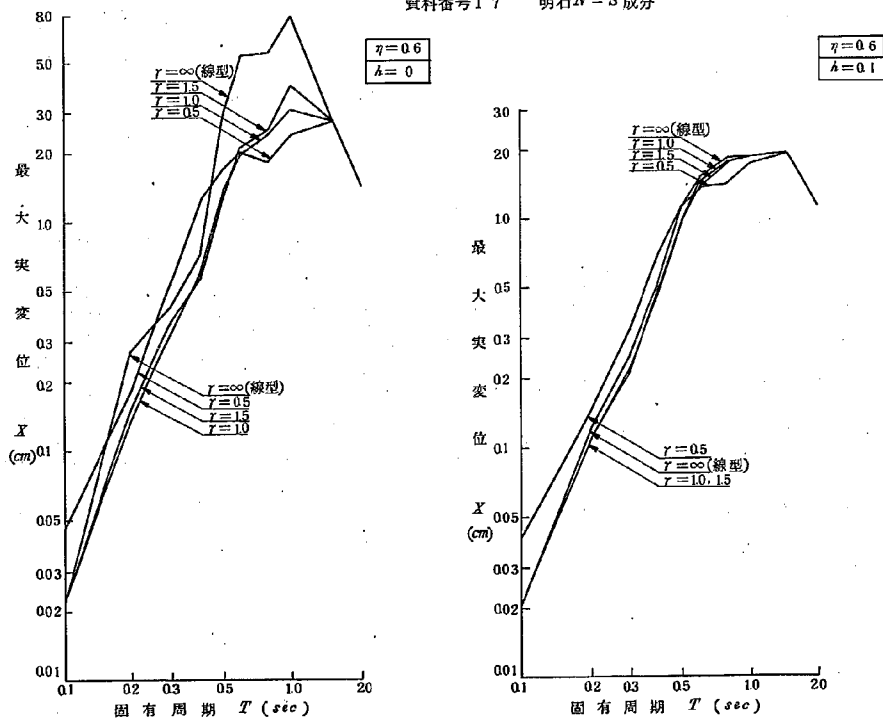


図-6 (B) r によるバイリニア系地震応答
資料番号 17 明石 $N-S$ 成分

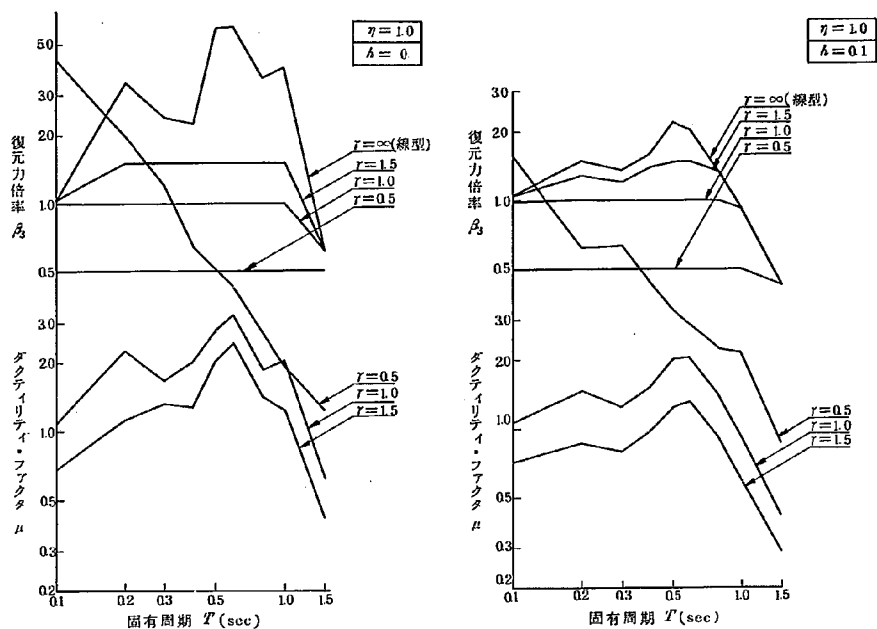


図-7 (A) r によるバイリニア系の地震応答
資料番号 17 明石 $N-S$ 成分

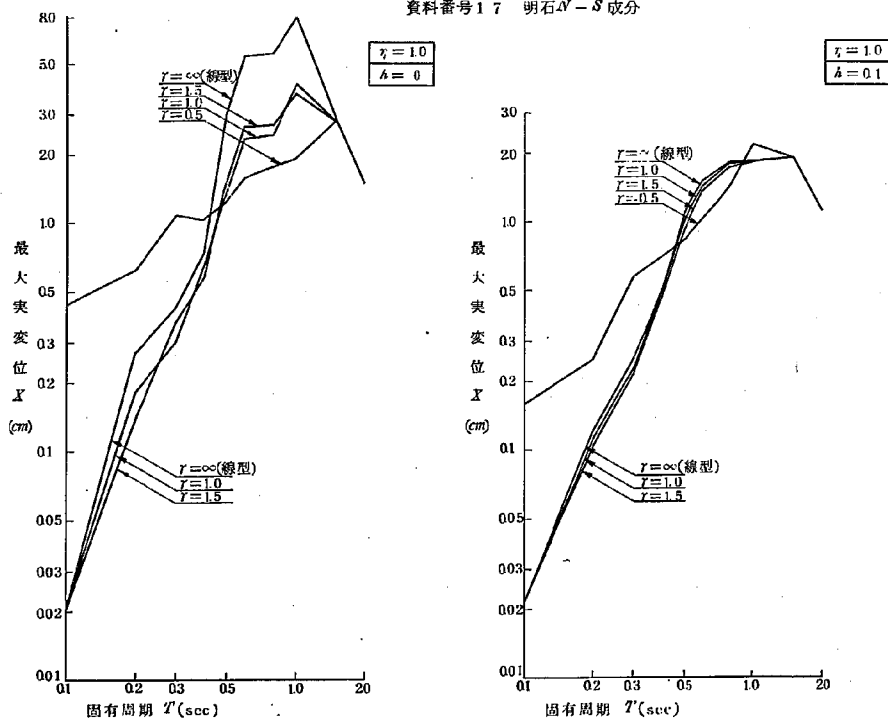


図-7 (B) r によるバイリニア系の地震応答
資料番号 17 明石 $N-S$ 成分

$$X_y = \frac{m \cdot k \cdot g}{k} \cdot S = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 k \cdot g \cdot S \quad (11)$$

で与えられる。この構造物にある地震（最大加速度を $\ddot{Z}_{\max}$ とする）が動的に作用したときの挙動を調べてみよう。式（8）および（11）を等しいとおき

$$r = \frac{K \cdot g}{\ddot{Z}_{\max}} \cdot S \quad (12)$$

（もし $\ddot{Z}_{\max} = K \cdot g$ なら、 $r = S$ となる）から求められる r 値に対応するスペクトル値を読みとって応答を求めることができる。

今この構造物の諸元を次のように仮定しよう。

① 設計震度 $K = 0.1$ ，弾性限界に対する安全率 $S = 1.2$ で設計されている。

② 固有周期 $T = 0.5$ sec，減衰定数 $h = 0.1$ ，剛度定数 $\eta = 0.6$ とする。

これに明石地震録N-S成分（ $\ddot{Z}_{\max} = 79.88 \text{ gal}$ ）が作用したときの応答を求めてみる。

式（12）から

$$r = \frac{K \cdot g}{\ddot{Z}_{\max}} \cdot S = \frac{0.1 \times 980}{79.88} \times 1.2 = 1.47 \div 1.5$$

また式（11）から峰伏変位は、

$$X_y = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot K \cdot g \cdot S = \left(\frac{0.5}{6.28} \right)^2 \times 0.1 \times 980 \times 1.2 = 0.744 \text{ cm}$$

となる。一方応答値は図6（A）から $h = 0.1$ ， $r = 1.5$ ， $T = 0.5$ secに対応するスペクトル値を読みとって、

$$\beta_s = 1.63, \mu = 1.23, (\therefore X_{\max} = \mu \cdot X_y = 0.92 \text{ cm})$$

をうる。また、図6（B）から直接に最大変位 $X_{\max} = 0.92 \text{ cm}$ を読みとることができる。これは当然ながら $\mu \cdot X_y$ が得られた上記の値と一致している。

試みに、この系を線型系（同一の T ， h を有する系）として応答を求めると、図6（A）および（B）のスペクトル曲線から、 $\beta_s^L = 2.22$ ， $X_{\max}^L = 1.12 \text{ cm}$ が求まり、作用する力（1.4倍）も生ずる変位（1.2倍）も変わってくる。

上記の例では r が1.5と比較的大きめの値であったため、線型系の応答値との間に大差が生じなかったが、 r が比較的小さい場合は、線型系の応答に比し、バイリニア系の応答は著しく変化する。この様子は図6および7によく示されている。

また上記の例では T ， h ， η ， r などの値は、図6に示された値の中から選んだが、一般には一致しないはずである。しかし、これらの値の多くの組合せについて、スペクトル図が与えられていれば、補間することにより充分の精度で応答値を算定することができるはずである。これについては後述することにする。

本節で定義した r と前節で定義した d との間には、式（6）および（8）を等しいとおいて、

$$\frac{X_e}{d} = r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot \ddot{Z}_{\max}$$

$$\therefore r \cdot d = \frac{X_e \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2}{Z_{max}} = \beta_e \text{ (相当線型系の加速度応答倍率)} \quad (13)$$

なる式が成立する。この式において、 $d \leq 1$ (線型と非線型の境界の条件) において前述の (11) 式が得られた訳である。

3.4 ダクティリティ・ファクタ(塑性率, μ)による方法

3.2, 3.3 で述べた d および r による方法は共に、降伏変位 X_y を決めるための係数であったが、この外に § 2 で定義したダクティリティ・ファクタ (μ) によってスペクトルを表示する方法が、建築などの分野において比較的よく用いられている。これは、降伏変位を決めるファクタの代りにダクティリティ・ファクタ, μ (=最大応答変位/降伏変位) をパラメータにとってスペクトルをまとめるものである。

しかし表 1 に示されているように、この μ は応答計算の出力であり、演算を実施して始めて知りうる値である。従って、 d あるいは r の場合と異なり、スペクトル曲線を求める操作は幾分かやっかいになる。所望の μ 値に対応するスペクトルを求めるためには、何回かの応答計算を繰返さねばならない。以下に我々が実施したダクティリティ・ファクタ(μ)によるスペクトル曲線の求め方を説明する。この方法は基本的には 3.1 で示した d による方法を用いており、3.2 の方法で繰返し演算するものである。

- ① 入力とする地震波 Z を選定する。
- ② 入力パラメータ (T , h , η および μ) を設定する。
- ③ 相当線型系 (②で設定した T および h を有する線型系) の Z に対する最大応答変位 X_e を計算する。
- ④ 次に d 値 ($d > 1$) を種々仮定し (最初の仮定では、 $d = \mu$ とおく), それに対応する降伏変位 X_y (= X_e/d) を定めて、バイリニア系の応答計算を実施し、 μ 値を求める。

この結果から $d-\mu$ の関係を決める。一般に両者の関係は、 $d=1$, $\mu=1$, を出発点とし、 d が大きくなるにつれて、 μ も大きくなるという傾向がある (図.9 参照)。この関係から、②で設定した μ 値に対応する d 値を決定する。

- ⑤ ④で決定された d 値について、最終的な応答計算を実施し、各種の応答値を計算する。これらの応答値は所定の μ に対するものである。これにより各種の入力値 (T , h , η および μ) の一つの組合せに対して地震 Z の応答スペクトル値が得られる訳である。
- ⑥ 以後は入力値の組合せを種々変えて、同様の操作で一連の計算を行えば、各種の入力パラメータ (T , h , η および μ) に対応する応答値を求めることができ、必要なスペクトル曲線を描くことができる。

このダクティリティ・ファクタ (μ) を用いるバイリニア系の地震応答計算法の概要を図. 8 に示す。これを用いて実施した前記の明石での地震記録 (N-S 成分) に関する演算結果の一部を図. 9, 10 および 11 に示す。図. 9 は $T=0.3$ sec の $d-\mu$ の関係を示したものであり、図.10 は μ/d を固有周期との関係で示したものでありまた図. 11 は、ダクティリティ・ファクタ(μ)=1.0 (限界線型範囲), 1.25, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 減衰定数 $h=0$ (図. A) および 0.1 (図. B), 剛度定数 $\eta=1.0$ (完全弾塑性) について、復元力倍率のスペクトル図を示したものである。

次にダクティリティ・ファクタ (μ) による応答スペクトル曲線の適用例を示す。

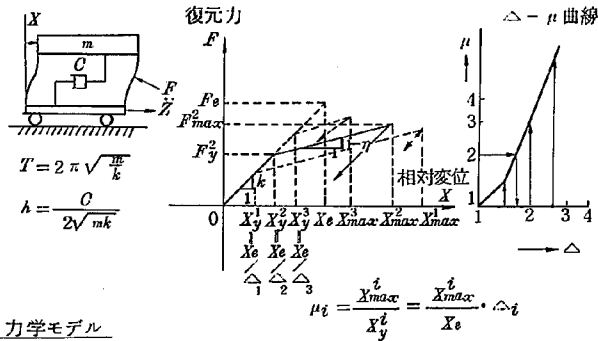
① 構造物のもつ諸

元 (固有周期 T , 減衰定数 h , 剛度定数 η およびダクティリティ・ファクタ μ) を仮定す

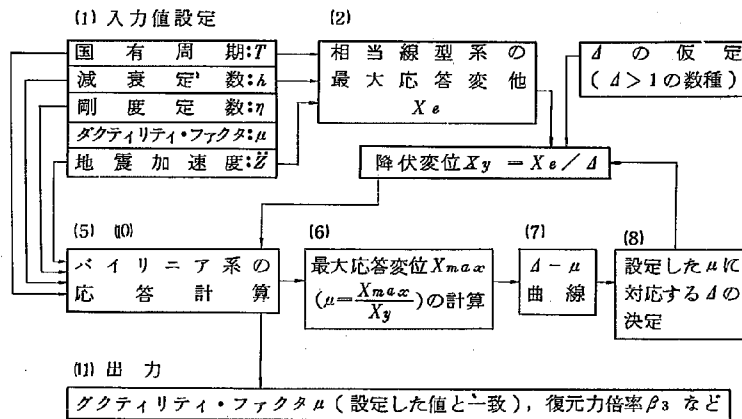
ると共に, 設計の対象とする地震を決定する。

② μ の決定の方針

は次の如く考える。この構造物が設計の対象とする地震をうけた場合, 降伏変位の何倍までの塑性変位を許し得るかによって μ を決める。 μ の決定は, かなりゆんどうであり, 構造物の種類, 規模, 地盤条件, 材料およびその他により, 大きく変わるものと考えられる。建築物については, 設計上この μ をいくらにとればよいかに関する研究がかなり盛んに行われている。しかし土木構造物については, この種の研



(A) 力学モデル



(B) スペクトル計算流れ図

図-8 ダクティリティ・ファクタ (μ) を用いたバイリニア系の地震応答計算法の概要図

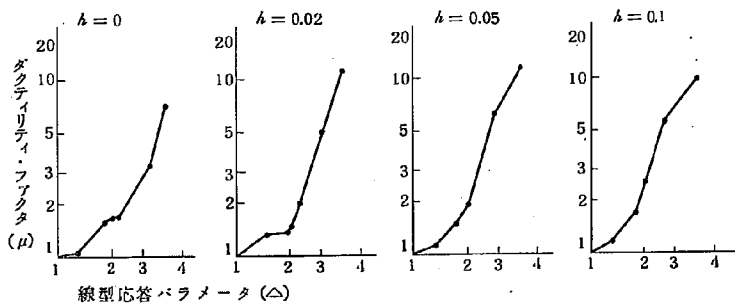


図-9 $\Delta - \mu$ 曲線

(資料番号 17 明石 $N-S$ 成分)
固有周期 $T = 0.3 \text{ sec}$

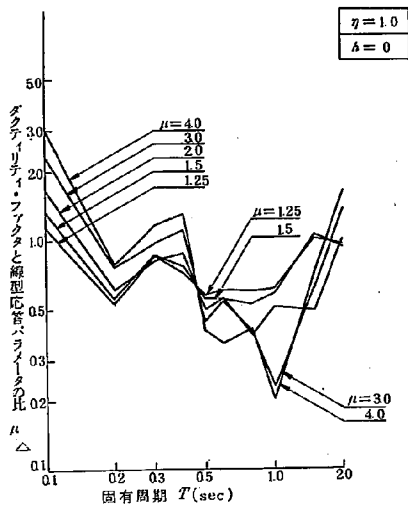


図-10(A) バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号17 明石N-S成分

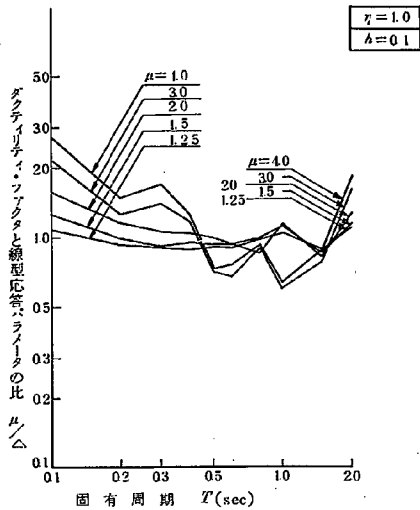


図-10(B) バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号17 明石N-S成分

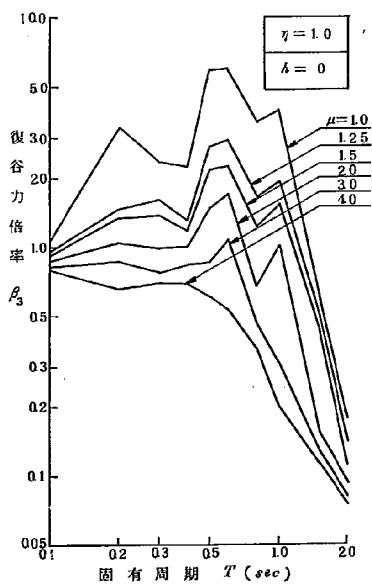


図-11(A) バイリニア系の復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

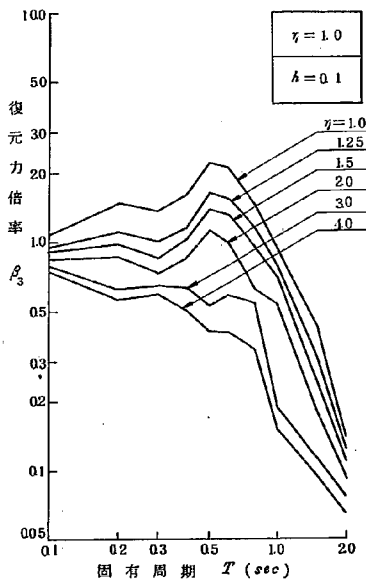


図-11(B) バイリニア系の復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

究は皆無に近く、今後の重要な研究課題となりうる。一般に土木構造物は、力学上必要な構造部材が主体となつてなされているため、建築における μ より大きな μ をとることはむずかしいものと予想される。しかし地中の構造物など地盤の塑性変形に基くものについては、必ずしもこの限りでない。

今例に、明石地震N-S成分($\ddot{Z}_{\max}=79.88 \text{ gal}$)に対して $T=0.3 \text{ sec}$, $h=0.1$, $\eta=1.0$, $\mu=1.25$ の構造物を設計するものとすれば、図.10 (B)から $\mu/d=0.92$, $d=1.36$

また図11 (B) から $\beta_s=1.01$, $\beta_e=1.39$ が得られる。

これから、この構造物の

$$\text{降伏変位} \quad X_y = X_e/d = \frac{\beta_e \cdot \ddot{Z}_{\max} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2}{d} = 0.19 \text{ cm}$$

$$\text{最大応答変位} \quad X_{\max} = \mu \cdot X_y = 0.23 \text{ cm}$$

$$\text{最大復元力} \quad F_{\max} = \frac{W}{g} \cdot \beta_s \cdot \ddot{Z}_{\max} = 0.082 \text{ W}$$

が判明する。ここで降伏変位 $X_y=0.19 \text{ cm}$ はこの構造物がもつ特性値であり、応答値ではない。即ち $X_y=0.19 \text{ cm}$ を満足する系であれば、明石地震(N-S)に対して、上記の応答値は、($\mu=1.25$, $\beta_s=1.01$)を得るという事である。然し、実際の X_y の値が異なれば上記の応答値は、当然ながら変わってくる。

以上、3つの方法によるバイリニア系の地震応答スペクトルの求め方に関する説明を行ったが、最後にこれらの対比を表.2に示しておく。

また表3に、既に当研究室において実施した応答計算の入力値を一覧にして示しておく。これらの演算結果については、順次とりまとめが行われており、次節にすでにまとめられた平均スペクトル曲線一部を示す。

表.2 各種のパラメータによるバイリニア系の地震応答スペクトル

パラメータ	線型応答パラメータ (d)	地動加速度パラメータ (r)	ダクティリティ・ファクタ (μ)	備 考
降伏変位 X_y の定義	$X_y = \frac{X_e}{d}$ (X_e : 相当線型系の応答変位)	$X_y = r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \ddot{Z}_{\max}$ (T : 固有周期 $\ddot{Z}_{\max}$: 地震最大加速度)	$X_y = \frac{X_e}{d}$ (d : 数種の仮定値)	$r \cdot d = \beta_e$ の関係あり。 但し $\beta_e = \frac{X_e \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2}{\ddot{Z}_{\max}}$ (相 当線型の応答倍率)
パラメータ の特徴	① $d \leq 1$: 線型 ② $d > 1$: 降伏する ③ d が大きい程, 小変位で降伏する	① r が小さい程小変位で降伏する ② r が大きくなると ($r \geq \beta_e$) 線型	① $\mu \leq 1$: 線型 ② $\mu > 1$: 降伏する ③ μ が大きい程, 塑性変形が大きい	
スペクトル 曲線の求め 方	① 入力値 ($\ddot{Z}, T, h, \eta, d$) の設定 ② 線型演算 (X_e の算定) ③ 降伏変位 ($X_y = \frac{X_e}{d}$) ④ バイリニア系応答計算 ⑤ 応答値算出	① 入力値 ($\ddot{Z}, T, h, \eta, r$) の設定 ② 降伏変位 ($X_y = r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \ddot{Z}_{\max}$) ③ バイリニア系応答計算 ④ 応答値算出	① 入力値 ($\ddot{Z}, T, h, \eta, \mu$) の設定 ② 線型演算 (X_e の算定) ③ d の仮定 ($d > 1$, 数種) ④ 降伏変位 ($X_y = X_e/d$) ⑤ バイリニア系の応答計算 ⑥ $d-\mu$ 曲線 ⑦ μ に対応する d の決定 ⑧ 最終の応答計算 ⑨ 応答値算出	入力値を種々変えて左 記の操作を行う。
スペクトル 曲線の適用 法	① 系の仮定 (T, h, η, X_y) ② 地震の設定 ($\ddot{Z}$) ③ X_e の算出 ④ $d = X_e/X_y$ に対応するスペクトル値 (μ, β_s など) を読みとる ⑤ $X_{\max} = \mu \cdot X_y = \frac{\mu}{d} X_e$ $F_{\max} = \beta_s \cdot m \cdot \ddot{Z}_{\max}$	① 系の仮定 (T, h, η, X_y) ② 地震の設定 ($\ddot{Z}$) ③ $r = X_y / \left(\left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot \ddot{Z}_{\max} \right)$ に対応する スペクトル値 (μ, β_s など) を読みとる ④ $X_{\max} = \mu \cdot X_y$ $F_{\max} = \beta_s \cdot m \cdot \ddot{Z}_{\max}$	① 系の仮定 (T, h, η, μ) ② 地震の設定 ($\ddot{Z}$) ③ 対応するスペクトル曲線からスペクトル 値 (β_s など) を読みとる。 ④ $X_{\max} = \mu \cdot X_y = \frac{\mu}{d} X_e$ $F_{\max} = \beta_s \cdot m \cdot \ddot{Z}_{\max}$	$X_{\max}$: 系に生ずる 最大変位 $F_{\max}$: 系に作用する 最大復元力
応 答 値	最大応答変位、ダクティリティ・ファクタ $\mu = X_{\max}/X_y$ 相対加速度倍率 $\beta_1 = \ddot{X}_{\max}/\ddot{Z}_{\max}$ 絶対加速度倍率 $\beta_2 = (\ddot{X} + \ddot{Z})_{\max}/\ddot{Z}_{\max}$ 復元力倍率 $\beta_3 = F_{\max}/m\ddot{Z}_{\max}$ $= \frac{\beta_e}{d} f_{\max} = r \cdot f_{\max}, [f_{\max} = \eta + (1-\eta)\mu]$		速度の係数 $\alpha = \dot{X}_{\max}/\dot{Z}_{\max}$ 残留変位など $x_p = X_p/X_y$	

表. 3 バイリニア系の応答計算における入力値 (昭和44年3月計算済み)

(1) 線型応答パラメータ		(2) 地震加速度パラメータ		(3) ダクティリティ・ファクタ	
d による方法		r による方法		μ による方法	
※資料番号 (地震波 Z)	EQ. 6, 8, 12, 14, 15, 17, 19, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 1, 2, 3, 9, 11, 29, 31,	資料番号 (地震波 Z)	EQ. 12, 14, 15, 17, 19, 21, 23, 29, 31, 20	資料番号 (地震波 Z)	EQ. 6, 8, 12, 14, 15, 17, 19, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 1, 2, 3, 9, 11, 29, 31,
T (sec)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0,	T (sec)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5	T (sec)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0
h	0, 0.02, 0.05, 0.1	h	0, 0.05, 0.1, 0.2	h	0, 0.02, 0.05, 0.1
γ	1.0, 0.8, 0.6, 0.4,	γ	1.0, 0.6,	γ	1.0, 0.8, 0.6, 0.4
d	2, 4	r	0.5, 1.0, 1.5	μ	1.25, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0
スペクトル曲線	T: 10 ケース h: 4 " γ: 4 " d: 2 " について 上に示された 1) Z20 成分に関して $[\beta_s, (\beta_e), \mu, h/d]$ の平均スペクトル曲線を完成した。 2) 資料番号 17 明石 N-S 成分に関して $[\beta_s, \mu/d]$ のスペクトル曲線を完成した。	スペクトル曲線	T: 9 ケース h: 4 " γ: 2 " r: 3 " について 上に示された 1) Z10 成分に関して $[\beta_s, (\beta_e), \mu]$ の平均スペクトル曲線を完成した。 2) 資料番号 17 明石 N-S 成分に関して $[\beta_s, \mu, X(\text{cm})]$ のスペクトル曲線を完成した。	スペクトル曲線	T: 10 ケース h: 4 " γ: 4 " μ: 5 " について 上に示された 1) Z20 成分に関して $[\beta_s, (\beta_e)]$ の平均スペクトル曲線を完成した。 2) 資料番号 17 明石 N-S 成分に関して $[\beta_s, (\beta_e), \mu, h/d]$ のスペクトル曲線を完成した。

添付表1を参照

§4. 平均スペクトル

4.1 平均応答の試み

§3, においては, ある特定の地震動に対するバイリニア系の応答スペクトル曲線の算出法および適用例を示したが, ここでは数多くの地震動に対する平均的な応答値の定量的な表示について考えてみる。

ここで線型系において有効であった, 応答の平均化をふり返ってみよう。

ある一つの1自由度線型系(質量 m , バネ係数 k , 粘性減衰 C , 固有周期 T , 減衰定数 h)にそれぞれ別の機会に2つの地震 $\ddot{Z}_1$ (最大値 $\ddot{Z}_1 \max$), $\ddot{Z}_2$ (最大値 $\ddot{Z}_2 \max$) が作用した場合を例にとって考える。

この場合の基本式は (suffix 1, 2 はそれぞれ地震 $\ddot{Z}_1$, $\ddot{Z}_2$ に対応する)

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{X}_1 + C\dot{X}_1 + kX_1 &= -m\ddot{Z}_1 \\ m\ddot{X}_2 + C\dot{X}_2 + kX_2 &= -m\ddot{Z}_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X}_1 + 2p h \dot{X}_1 + p^2 X_1 &= -\ddot{Z}_1 \\ \ddot{X}_2 + 2p h \dot{X}_2 + p^2 X_2 &= -\ddot{Z}_2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left(\begin{aligned} \text{ここで, } p &= \frac{2\pi}{T} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \\ h &= \frac{C}{2\sqrt{mk}} \end{aligned} \right)$$

式(14) または (15) を解いて得られる $\ddot{Z}_1$, $\ddot{Z}_2$ に対する最大応答変位をそれぞれ $X_{1\max}$, $X_{2\max}$ とおくと応答倍率 β_1 , β_2 は周知のごとくそれぞれ,

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{X_{1\max} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2}{\ddot{Z}_{1\max}} \\ \beta_2 &= \frac{X_{2\max} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2}{\ddot{Z}_{2\max}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

で表示される。式(16) で表わされる異なった2つの地震に対する応答倍率は, 単位の最大加速度当りの応答という形で表わされており, $\ddot{Z}_{\max}$ の値の大小に関係の無い値である。従ってこの両者は平均化しうる性質のものである。例えば仮りに $\ddot{Z}_2 = N\ddot{Z}_1$ (N : 定数, 即ち $\ddot{Z}_2$ は $\ddot{Z}_1$ の各時刻における加速度値を N 倍したもの) であると仮定すると, 変位は $X_{2\max} = N \cdot X_{1\max}$ と N 倍になるが, 応答倍率は $\beta_2 = \beta_1$ となり, 加速度の値が N 倍になっても応答倍率は等しい値を保っている。

これで, β 値については平均化が可能ながことが判った。 n 個の地震に対する平均応答倍率 β^M は

$$\beta^M = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n}{n} \quad (17)$$

となる。今考えている地震の最大加速度を $\ddot{Z}_{\max}$ とおくと, この地震に対する最大応答変位, 速度, 加速度の平

均は周知のごとく ρ^M を用いて,

$$\left. \begin{aligned} S_D^M &= \rho^M \cdot \ddot{Z}_{\max} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \\ S_V^M &= \rho^M \cdot \ddot{Z}_{\max} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \\ S_A^M &= \rho^M \cdot \ddot{Z}_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

で表わされる。

以下同様の説明を複雑な性質の (d, r, μ) の場合について行う。

4.2 Δ による平均スペクトル

一つのバイリニア系 (T, h, η, d の一つの組合せ) の, 二つの地震 $\ddot{Z}_1, \ddot{Z}_2$ に対する応答を考える。相当線型系の Z_1, Z_2 に対する最大応答変位を $(X_e)_1$ と $(X_e)_2$ とする。降伏変位 $(X_y)_1, (X_y)_2$ は

$$(X_y)_1 = (X_y)_1 / d$$

$$(X_y)_2 = (X_e)_2 / d$$

と異なる。従って, d が同一でも地震によって X_y が異なるモデルを想定している。

基本方程式は

$$\left. \begin{aligned} m \ddot{X}_1 + c \dot{X}_1 + F_1 &= -m \ddot{Z}_1 \\ m \ddot{X}_2 + c \dot{X}_2 + F_2 &= -m \ddot{Z}_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{p^2} \ddot{\xi}_1 + 2 \frac{h}{p} \dot{\xi}_1 + f_1 &= - \frac{\ddot{Z}_1}{\{ p^2 (X_y)_1 \}}, \quad \xi_1 = \frac{X_1}{(X_y)_1} \\ \frac{1}{p^2} \ddot{\xi}_2 + 2 \frac{h}{p} \dot{\xi}_2 + f_1 &= - \frac{\ddot{Z}_2}{\{ p^2 (X_y)_2 \}}, \quad \xi_2 = \frac{X_2}{(X_y)_2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

この方程式の解を, それぞれ ξ_1, ξ_2 とすると応答値は

$$\left. \begin{aligned} \mu i &= \max (\xi_i) \\ \alpha i &= \frac{(\beta e)_i}{d} \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot \max (\ddot{\xi}_i) \\ (\beta_1)_i &= \frac{(\beta e)_i}{d} \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot \max (\ddot{\xi}_i) \\ (\beta_2)_i &= \frac{(\beta e)_i}{d} \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot \max \left\{ \ddot{\xi}_i + \frac{\ddot{Z}_i}{(X_y)_i} \right\} \\ (\beta_3)_i &= \frac{(\beta e)_i}{d} \cdot f_i \max = \frac{(\beta e)_i}{d} \cdot \{ \eta + (1-\eta) \mu i \} \\ i &= 1, 2 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

で表わされる。

もし、 $\ddot{Z}_2 = N \ddot{Z}_1$ なら式 (20) の2つの方程式は同一の式となり当然応答値は等しくなる。

即ち

$$\mu_2 = \mu_1$$

$$\alpha_2 = \alpha_1$$

$$(\beta_1)_2 = (\beta_1)_1$$

$$(\beta_2)_2 = (\beta_2)_1$$

$$(\beta_3)_2 = (\beta_3)_1$$

が成立する。従ってこれらの種々の応答値 μ , α , β は全て、無次元化され (α は sec の単位をもつ) 異なる地震について、平均化可能な量である。

4.3 γ による平均スペクトル

T , h , η および r の一つの組合せからなるバイリニア系の二つの地震 $\ddot{Z}_1$, $\ddot{Z}_2$ に対する応答を考えてみる。

それぞれの地震の最大値を $\ddot{Z}_{1\max}$, $\ddot{Z}_{2\max}$ とすると、降伏変位 $(Xy)_1$, $(Xy)_2$ は

$$\left. \begin{aligned} (Xy)_1 &= r \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cdot \ddot{Z}_{1\max} \\ (Xy)_2 &= r \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cdot \ddot{Z}_{2\max} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

となる。基本方程式および解は前項の式 (19), (20), (21) と全く同様に示される。また $\ddot{Z}_2 = N \cdot \ddot{Z}_1$ の場合に対しても式 (22) が成立し、前項と同様平均化が可能である。

図. 12 に、平均スペクトルの一例を示す。これは表. 3 に示す 10 地震による β (復元力倍率) の平均スペクトル曲線である。

これらの平均スペクトルの適用法は以下の通りである。

- ① 設計の対象とする地震の最大加速度 $\ddot{Z}_{\max}$ を決める。
- ② 構造物の特性 (T , h , η , r) を決める。この際 r の値は①で決めた $\ddot{Z}_{\max}$ 値を考慮の上決めるのが望ましい。

4.4 μ による平均スペクトル

μ による場合も、詳細は省略するが、 μ あるいは r の場合と同様、平均化することが可能である。

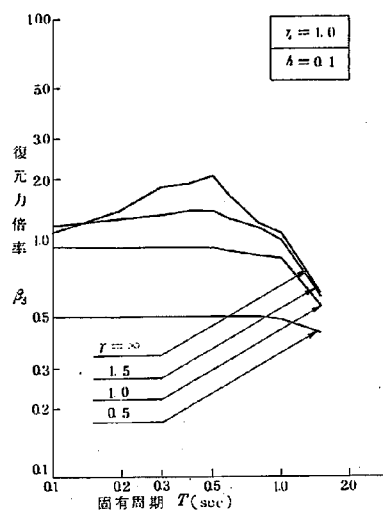


図-12(A) バイリニア系の復元力倍率
10成分の平均

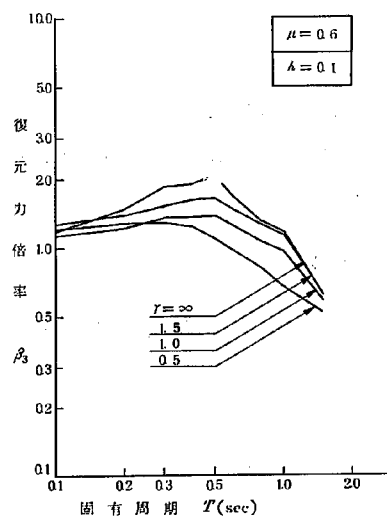


図-12(B) バイリニア系の復元力倍率
10成分の平均

あ と が き

本報告書で、とりまとめた結果についての検討ならびに考察は今後引き継ぎ実施していきたい。

参 考 文 献

- (1) 高田考信・大久保忠良・栗林栄一：「橋梁の耐震設計に関する研究(Ⅰ) — 地震応答スペクトル・1964—」
土木研究所報告・第128号，昭和40年10月。
- (2) 栗林栄一・岩崎敏男：「非線型応答解析の普遍性と適用例」土木学会，第23回年次講演会，昭和43年
10月。
- (3) 栗林栄一・岩崎敏男：「OBSERVED EARTHQUAKE RESPONSES OF BRIDGES」
Presented to 4 WCEE, Chile, January, 1969
- (4) 栗林栄一・岩崎敏男：「道路橋における地震応答の実測と解析」土木学会，第10回地震工学研究発表会，
昭和44年7月。
- (5) 栗林栄一・岩崎敏男：「橋梁の耐震設計に関する研究(Ⅱ) — 動的応答を考慮した修正震度の長大吊橋の耐
震設計への適用 —」土木研究所報告第136号，昭和44年7月
- (6) R.W. Clough: "Effect of Stiffness Degradation on Earthquake
Ductility Requirements" Structures and Materials Research,
Department of Civil Engineering, Univ. of California, Report
No. 66 - 16, Oct. 1966
- (7) J. Penzien: "Elasto-Plastic Response of Idealized Multi-Story
Structures Subjected to a Strong Motion Earthquake." Proc. 2nd
WCEE, 1960

付 表 ・ 付 図

建設省土木研究所

付表-1 応答解析の対象とした地盤動地震波形記録の一覧表

資料 番号	地震発生 年月日	観測地点	最大加速度 gal	成分方向	機種・型式	地震名	グループ※	
1	1	61.8.19	豊橋(吉田大橋)	19.00	Trans	電磁式加速度計	I II	
2	2	"	"	15.76	Long		I II	
3	3	63.3.27	大阪(安治川橋)	21.88	Long (NW28°)	SMAC B-2	I II	
4	6	63.8.4	千葉(土研)	76.75	N-S	SMAC B-2	II III	
5	7	"	"	34.63	U-D		千葉県海岸地震	N
6	8	"	"	74.62	E-W		II III	
7	9	63.3.27	尾崎(高架橋)	27.95	Long	SMAC B-2	I III	
8	10	"	"	13.50	U-D		越前沖地震	N
9	11	"	"	37.58	Trans		I III	
10	12	63.3.27	塩屋(地盤)	26.88	N-S	SMAC B-2	I III	
11	13	"	"	8.33	U-D		越前沖地震	N
12	14	"	"	24.25	E-W		I III	
13	15	63.3.27	岩屋(地盤)	22.38	N-S	SMAC B-2	I III	
14	16	"	"	11.50	U-D	SMAC B-2	N	
15	17	63.3.27	明石(地盤)	79.88	N-S		越前沖地震	II III
16	18	"	"	27.66	U-D		N	
17	19	"	"	39.93	E-W	SMAC B-2	I III	
18	21	62.4.23	釧路(地盤)	243.88	N-S		広島沖地震	II III
19	22	"	"	220.75	U-D		N	
20	23	"	"	372.75	E-W	SMAC B-2	II III	
21	24	56.2.14	東京(東大)	70.25	N-S		千葉県西部地震	II III
22	25	"	"	30.13	U-D		N	
23	26	"	"	56.00	E-W	DC	II III	
24	27	56.2.14	東京(東大)	66.63	N-S		千葉県西部地震	II III
25	28	"	"	50.13	E-W		II III	
26	29	64.6.16	新潟(県道アパート 地下一階)	137.13	N-S	SMAC B-2	II III	
27	30	"	"	42.38	U-D		新潟地震	N
28	31	"	"	156.88	E-W		II III	
29	20	40.3.18	El Centro	313.06	N-S	米国製強震計	El Centro	
備 考	※グループⅠ：最大加速度50gal未満の水平成分〔9成分, ($\bar{Z}_{max}$) _{av} = 26.2gal							
	グループⅡ：最大加速度50gal以上の水平成分〔11成分, ($\bar{Z}_{max}$) _{av} = 125.8gal							
	グループⅢ：全水平成分(El Centroを除く)〔20成分, ($\bar{Z}_{max}$) _{av} = 81.0gal							
	グループⅣ：全上下成分〔8成分, ($\bar{Z}_{max}$) _{av} = 48.6gal							
この表は土木研究所報告第128号の1, 昭和40年10月より抜粋したものである。								

付表-2 線型系及びバイリニア (bi-linear) 系に対する

地表波形	力学系 (降伏パラメータ)	(1) 1 自由度線型系					(2) (その1) 1 自由度 bi-linear 系 (r)							(3) (その2) 1 自由度 bi-linear 系 (d)						
		①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
		固有周期	$\frac{T}{m}$	T	mT	T	T	$\frac{T}{m}$	T	T	mT	T	T	T	$\frac{T}{m}$	T	T	mT	T	T
同一地震波形に対する応答の比較	入 出力値	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h
	減衰定数	-	-	-	-	-	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η
	剛度定数	-	-	-	-	-	r	$\frac{r}{m}$	r	r	$\frac{r}{m}$	r	r	d	Nd	d	d	Nd	d	d
	降伏係数	-	-	-	-	-	r	$\frac{r}{m}$	r	r	$\frac{r}{m}$	r	r	d	Nd	d	d	Nd	d	d
	降伏変位	-	-	-	-	-	X_y	$\frac{X_y}{m}$	X_y	X_y	$\frac{X_y}{m}$	X_y	X_y	X_y	$\frac{X_y}{m}$	X_y	X_y	$\frac{X_y}{m}$	X_y	X_y
	地震加速度	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$	$\ddot{z}^{(t)}$
	加速度倍率	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2
	応答加速度	SA	SA	NSA	SA	SA	SA	SA	NSA	NSA	SA	SA	SA	SA	SA	NSA	NSA	SA	SA	SA
	復元力倍率	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3
	復元力	SF	SF	NSF	SF	SF	SF	SF	NSF	NSF	SF	SF	SF	SF	SF	NSF	NSF	SF	SF	SF
多種地震波形に対する応答の比較・平均	速度係数	α	α	α	$m\alpha$	$m\alpha$	α	α	α	α	α	$m\alpha$	$m\alpha$	α	α	α	α	$m\alpha$	$m\alpha$	$m\alpha$
	応答速度	Sv	Sv	NSv	mSv	mSv	Sv	Sv	Sv	NSv	NSv	mSv	mSv	Sv	Sv	Sv	NSv	NSv	mSv	mSv
	ダクティリティ	-	-	-	-	-	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ
	応答変位	SD	SD	NSD	mSD	mSD	SD	SD	NSD	NSD	mSD	mSD	SD	SD	SD	NSD	NSD	mSD	mSD	mSD
	基礎形 応答形																			
	降伏変位 X_y の定義						$X_y = r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \ddot{z}^{max}$							$X_y = \frac{X_y}{d} (X_e: \text{線型系の最大変位})$						
	個々の応答	最大加速度 $\ddot{z}^{max}$ の地震に対する平均応答					個々の応答 最大加速度 $\ddot{z}^{max}$ の地震に対する平均応答							個々の応答 最大加速度 $\ddot{z}^{max}$ の地震に対する平均応答						
	固有周期	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	減衰定数	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h
	剛度定数	-	-	-	-	-	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η
	降伏係数	-	-	-	-	-	r	r	r	r	r	r	r	d	Nd	d	d	Nd	d	d
	降伏変位	-	-	-	-	-	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}	X_{yi}
	地震加速度	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$	$\ddot{z}_i^{(t)}$
備考	加速度倍率	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}	β_{2i}
	応答加速度	SA_i	SA_i	NSA_i	SA_i	SA_i	SA_i	SA_i	NSA_i	NSA_i	SA_i	SA_i	SA_i	SA_i	SA_i	NSA_i	NSA_i	SA_i	SA_i	SA_i
	復元力倍率	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}	β_{3i}
	復元力	SF_i	SF_i	NSF_i	SF_i	SF_i	SF_i	SF_i	NSF_i	NSF_i	SF_i	SF_i	SF_i	SF_i	SF_i	NSF_i	NSF_i	SF_i	SF_i	SF_i
	速度係数	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i	α_i
	応答速度	Sv_i	Sv_i	NSv_i	mSv_i	mSv_i	Sv_i	Sv_i	Sv_i	NSv_i	NSv_i	mSv_i	mSv_i	Sv_i	Sv_i	Sv_i	NSv_i	NSv_i	mSv_i	mSv_i
	ダクティリティ	-	-	-	-	-	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i	μ_i
	応答変位	SD_i	SD_i	NSD_i	mSD_i	mSD_i	SD_i	SD_i	NSD_i	NSD_i	mSD_i	mSD_i	SD_i	SD_i	SD_i	NSD_i	NSD_i	mSD_i	mSD_i	mSD_i
	備考	$\ddot{z}^{max}$ 値が変化しても β , α の応答値は無変化					$X_{yi} = r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \ddot{z}_{i \max}$ $X_y = r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \ddot{z}^{max}$ $N_i = \frac{\ddot{z}^{max}}{\ddot{z}_{i \max}}$							$X_{yi} = \frac{X_y}{N_i}$ $d_i = \frac{X_{ei}}{X_{yi}}$ $N_i = \frac{\ddot{z}^{max}}{\ddot{z}_{i \max}}$						

地震応答スペクトルの拡大応用に関する検討

(その3)							(その4)							備	考
1 自由度 bi-linear 系 (μ)							1 自由度 bi-linear (θ)								
①	②	③	4	5	6	7	①	②	③	4	5	6	7	ケース版	
T	T	$\frac{T}{m}$	T	T	mT	T	T	T	$\frac{T}{m}$	T	T	mT	T	① ケース番号を○印で囲んだものは基本形で、それ自身で応答を求める。 他は応用形であり基準形から求める。	
h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h		
η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η	η		
μ	$N\mu$	μ	μ	$N\mu$	μ	μ	θ	$\frac{\theta}{N}$	θ	$N\theta$	θ	θ	θ		
Xy	Xy'	Xy''	NXy	NXy'	n ² Xy	n ² Xy''	Xy	$\frac{Xy}{N}$	$\frac{Xy}{m}$	NXy	Xy	nXy	Xy		
$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{NZ}^{(t)}$	$\ddot{NZ}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{NZ}^{(t)}$	$\ddot{NZ}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{(t)}$		
β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	β_2	② r 値は T に応じて、 μ 値を参考にして決める必要あり。 一定の r 値をとると長周期で線型となる	
SA	SA'	SA''	NSA	NSA'	SA	SA'	SA	NSA'	SA'	NSA	NSA'	SA	SA'		
β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3	β_3		
SF	SF'	SF''	NSF	NSF'	SF	SF'	SF	NSF'	SF'	NSF	NSF'	SF	SF'		
α	α'	α''	α	α'	m α	m α''	α	α'	α''	α	α'	m α	m α''		
Sv	Sv'	Sv''	NSv	NSv'	mSv	mSv''	Sv	NSv	NSv'	NSv	NSv'	mSv	mSv''		
μ	$N\mu$	μ	μ	$N\mu$	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ		
SD	SD'	SD''	NSD	NSD'	mSD	mSD''	SD	NSD'	NSD'	NSD	NSD'	mSD	mSD''		
$X_{y\max}$ $Xy = \frac{X_{y\max}}{\mu}$ ($X_{y\max}$: バイリニア系の最大変位)							$Xy = \theta \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 g$ (by penzion)								
個々の応答		最大加速度 $\ddot{Z}^{D\max}$ の地震に対する平均応答					個々の応答		最大加速度 $\ddot{Z}^{D\max}$ の地震に対する平均応答					Bi-linear 系では ① Xy を一定とした平均応答を記したが r , d , μ , θ がそれぞれ一定の応答は容易に得られる。 (但し物理的意味不明確) ② (2) ~ (5) は 1 つあればよい。 (2) が最簡明 ③ $\ddot{Z}^{D\max}$ 値が変化するたびに平均値は異なる。 ④ Xy 値は $\ddot{Z}^{D\max}$ に対応する X^D 値から定める。	
1	2						1	2							
T	T	T					T	T	T						
h	h	h					h	h	h						
η	η	η					η	η	η						
μ_i	μ_i	—					θ_i	θ	—						
Xy _i	Xy	Xy					Xy _i	Xy	Xy						
$\ddot{Z}^{(t)}$	$Ni\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{D\max}$					$\ddot{Z}^{(t)}$	$Ni\ddot{Z}^{(t)}$	$\ddot{Z}^{D\max}$						
β_{2i}	β_{2i}	$\bar{\beta}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{2i}$					β_{2i}	β_{2i}	$\bar{\beta}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{2i}$						
SA _i	NiSA _i	$\bar{SA} = \bar{\beta}_2 \cdot \ddot{Z}^{D\max}$					SA _i	NiSA _i	$\bar{SA} = \bar{\beta}_2 \cdot \ddot{Z}^{D\max}$						
β_{3i}	β_{3i}	$\bar{\beta}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{3i}$					β_{3i}	β_{3i}	$\bar{\beta}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{3i}$						
SF _i	NiSF _i	$\bar{SF} = \bar{\beta}_3 \cdot \ddot{Z}^{D\max}$					SF _i	NSF _i	$\bar{SF} = \bar{\beta}_3 \cdot \ddot{Z}^{D\max}$						
α_i	α_i	$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$					α_i	α_i	$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$						
Sv _i	NSv _i	$\bar{Sv} = \bar{\alpha} \cdot \ddot{Z}^{D\max}$					Sv _i	NSv _i	$\bar{Sv} = \bar{\alpha} \cdot \ddot{Z}^{D\max}$						
μ_i	μ_i	$\bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i$					μ_i	μ_i	$\bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i$						
SD _i	NiSD _i	$\bar{SD} = \bar{\mu} \cdot Xy$					SD _i	NSD _i	$\bar{SD} = \bar{\mu} Xy$						
$Xy_i = \frac{Xy}{Ni}$, $\mu_i = \frac{X_{i\max}}{Xy_i}$							$Xy_i = \frac{Xy}{Ni}$ $\theta_i = \frac{\theta}{Ni}$, $Ni = \frac{\ddot{Z}^{D\max}}{\ddot{Z}_{i\max}}$ $Xy = \theta \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 g$								
$Ni = \frac{\ddot{Z}^{D\max}}{\ddot{Z}_{i\max}}$															

1. Δ によるスペクトル

1.1 特定地震のスペクトル

1) 復元力倍率 β_3

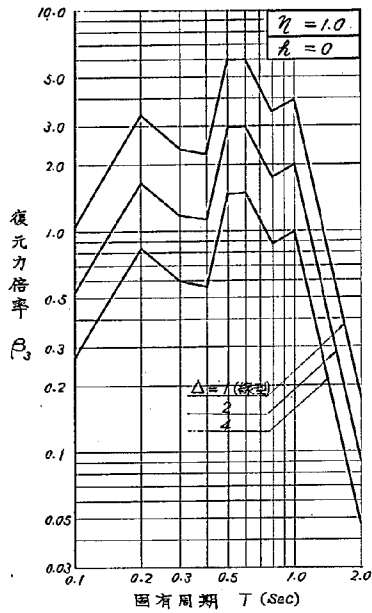


図1-1 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

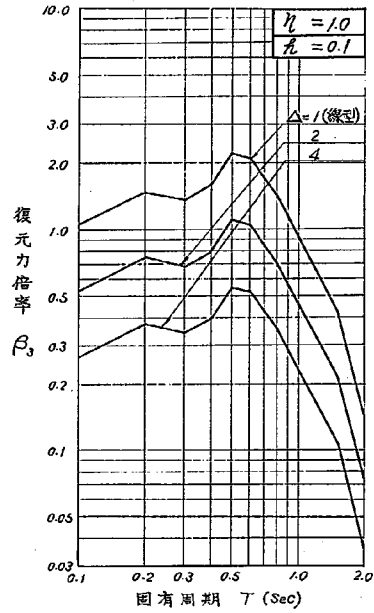


図1-2 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

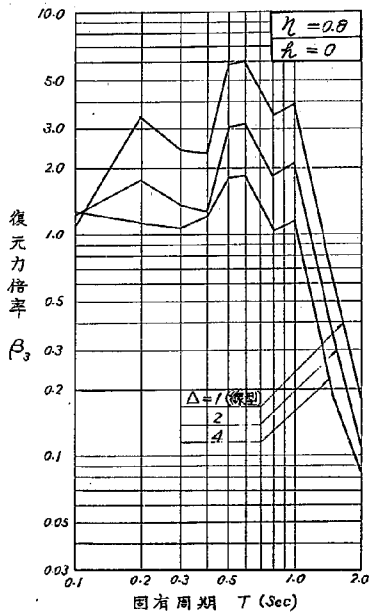


図1-3 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

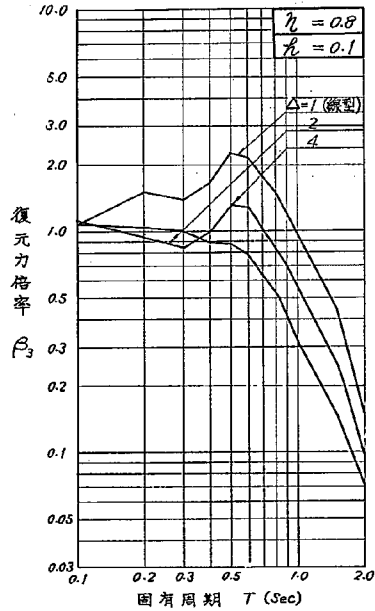


図1-4 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

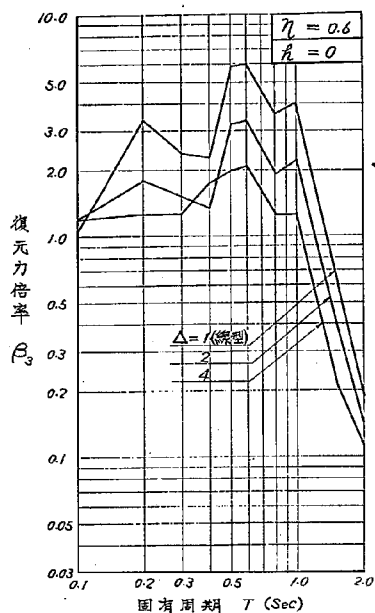


図1-5 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

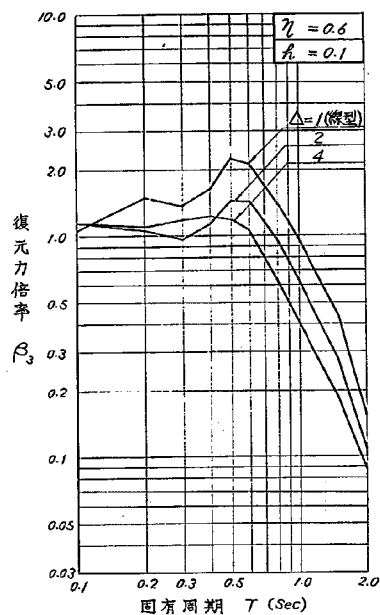


図1-6 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

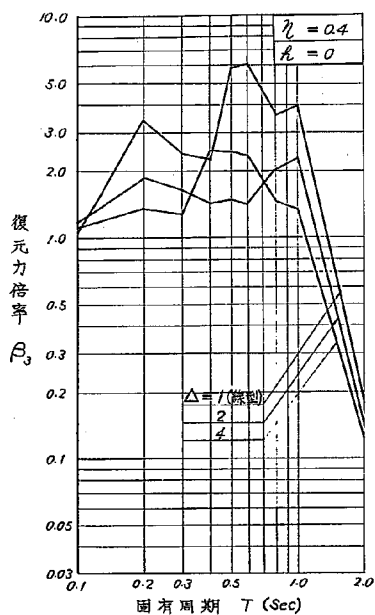


図1-7 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

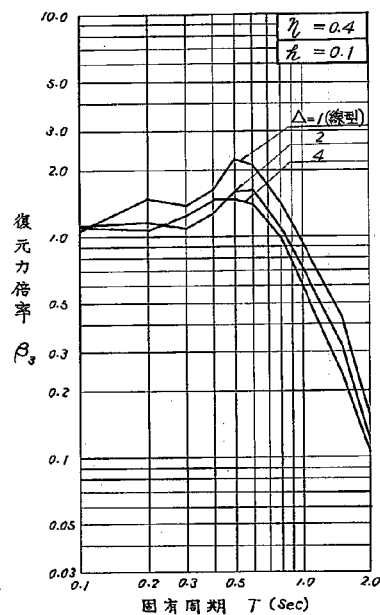


図1-8 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

2) ダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比 μ/d

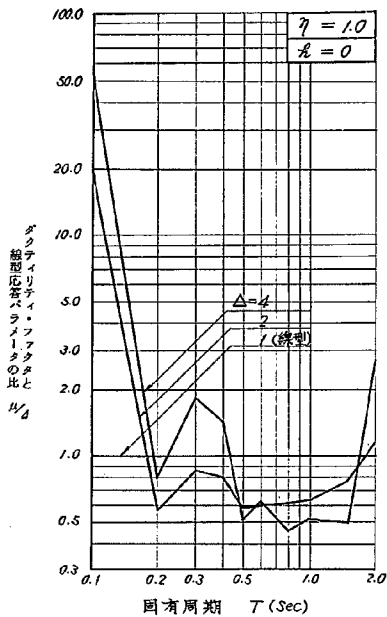


図1-9 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

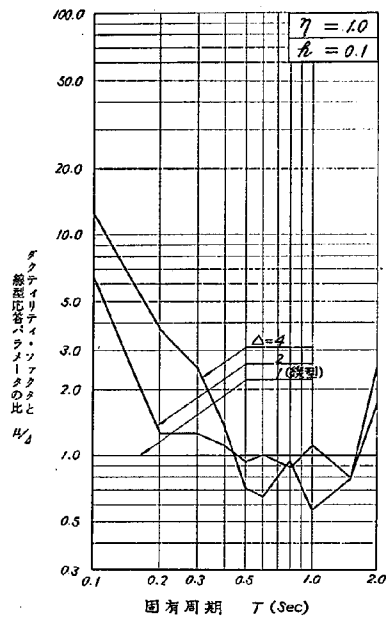


図1-10 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

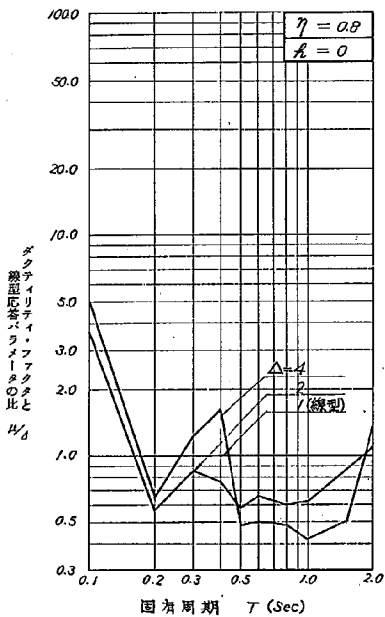


図1-11 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

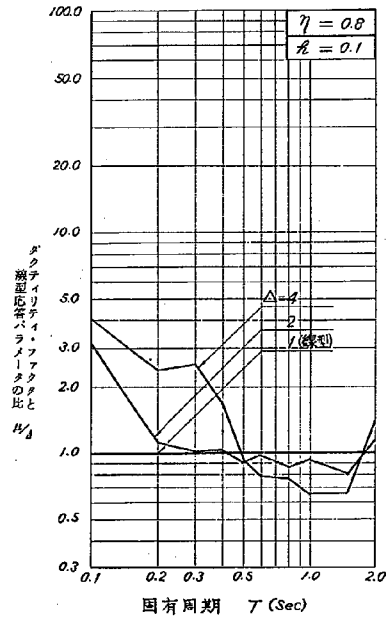


図1-12 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

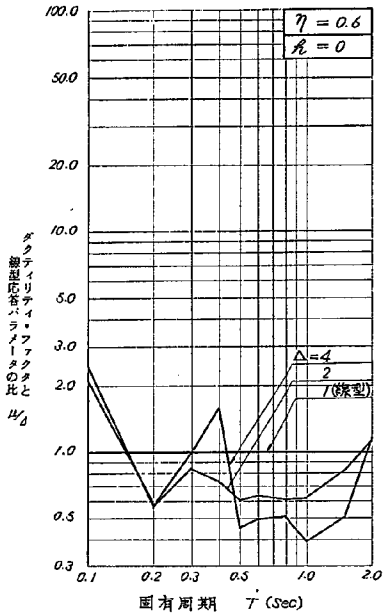


図1-13 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

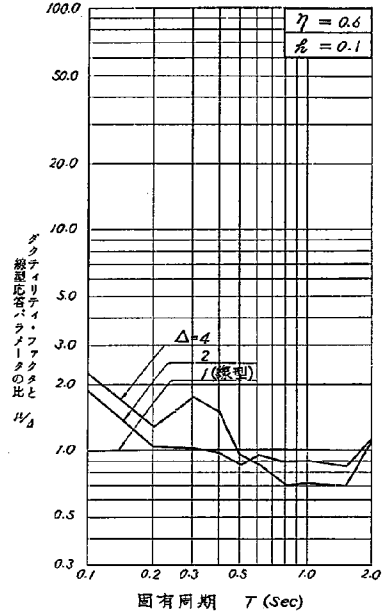


図1-14 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

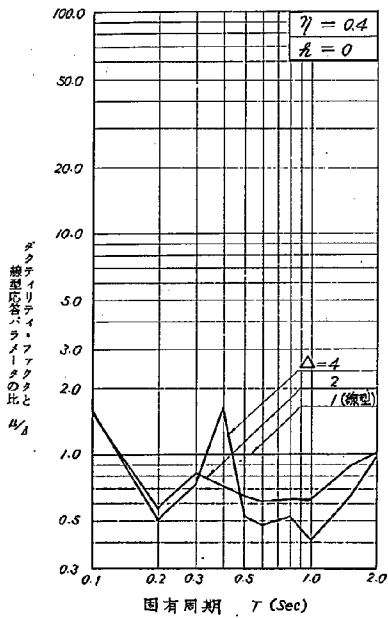


図1-15 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

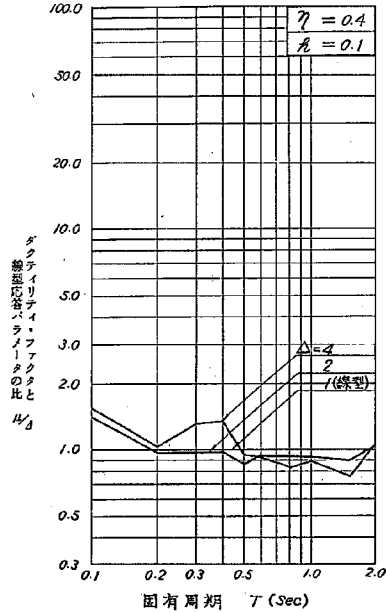


図1-16 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

1.2 地震波 20 成分の平均スペクトル

1) 復元力倍率 β_3

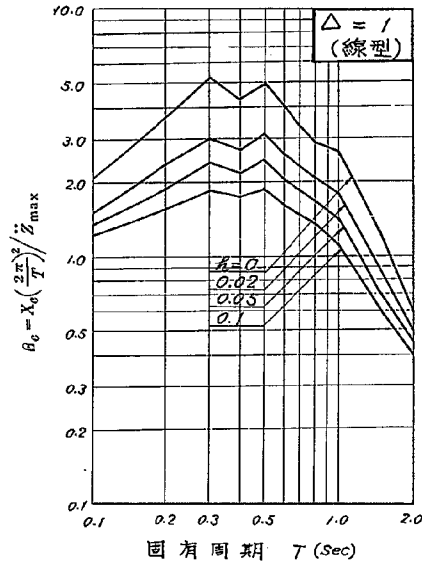


図1-17 線型系の復元力倍率
20 成分の平均

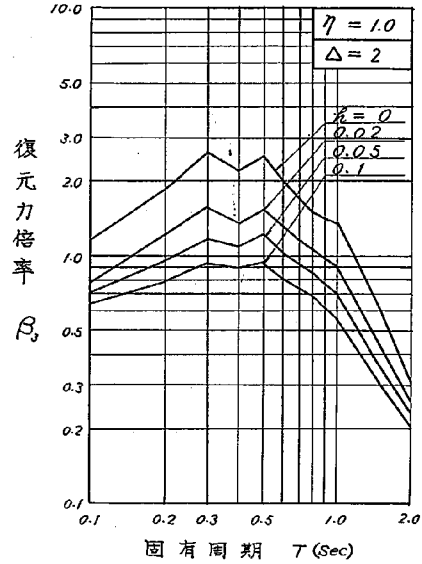


図1-18 バイリニア系復元力倍率
20 成分の平均

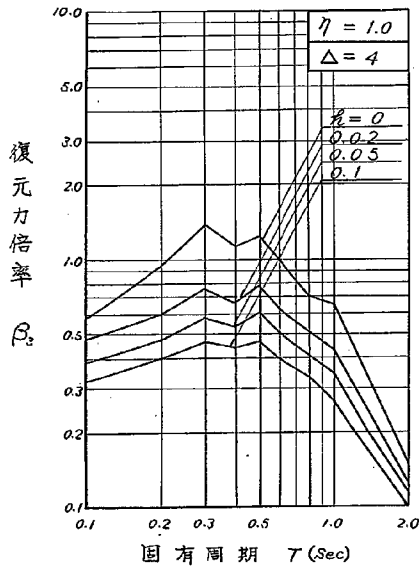


図1-19 バイリニア系復元力倍率
20 成分の平均

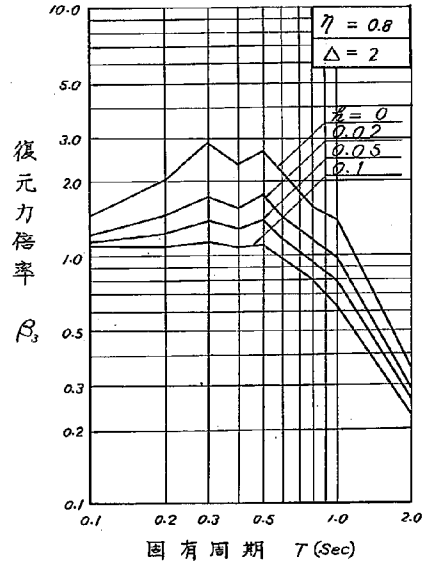


図1-20 バイリニア系復元力倍率
20 成分の平均

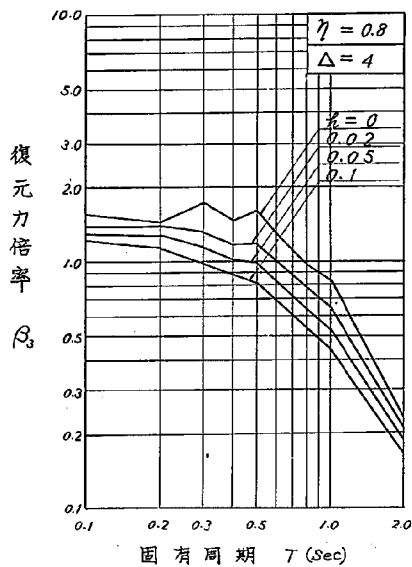


図1-21 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

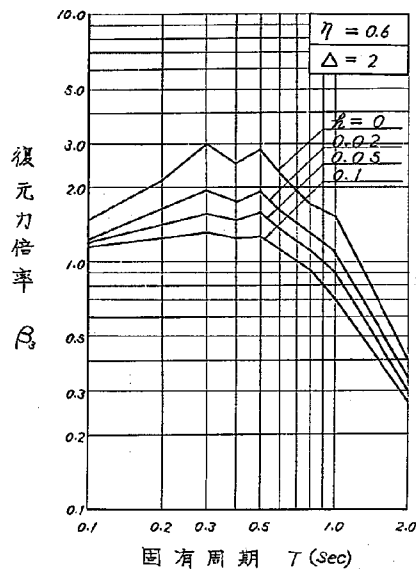


図1-22 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

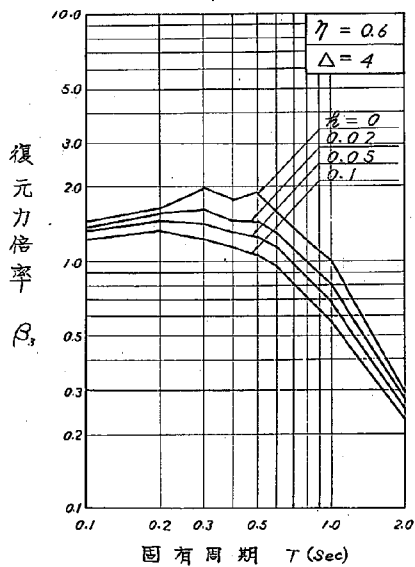


図1-23 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

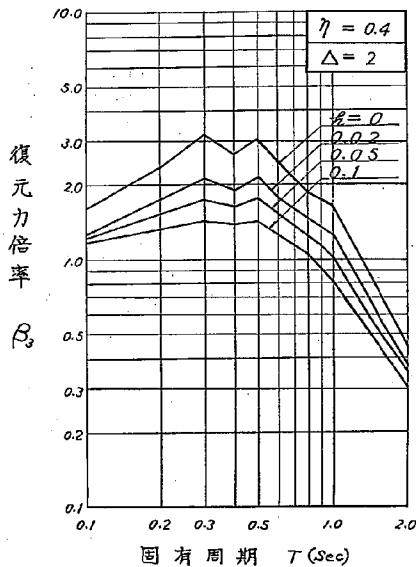


図1-24 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

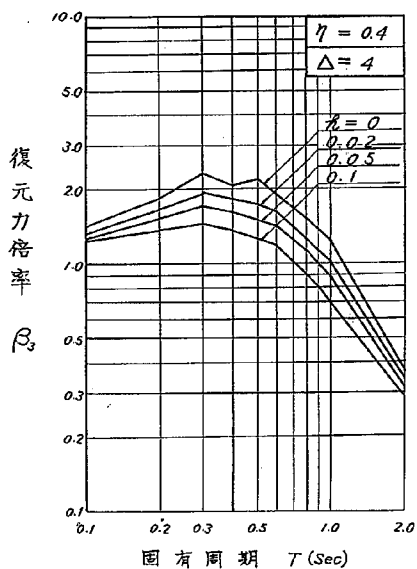


図1-25 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

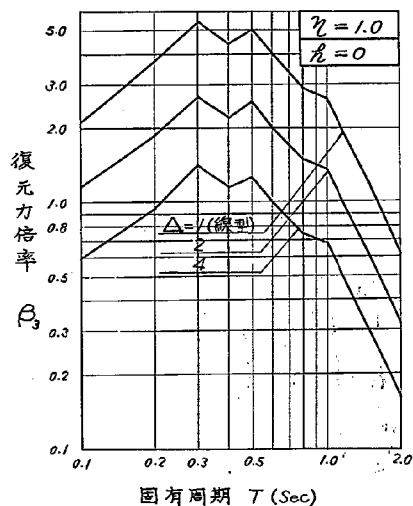


図1-26 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

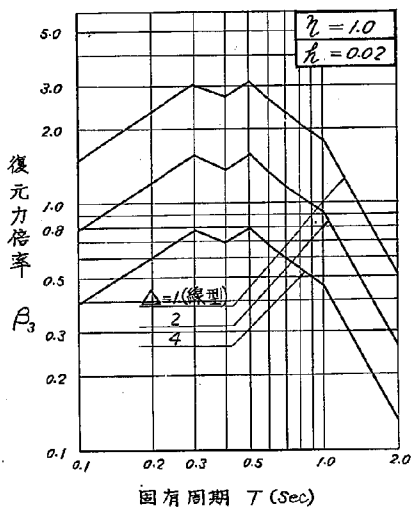


図1-27 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

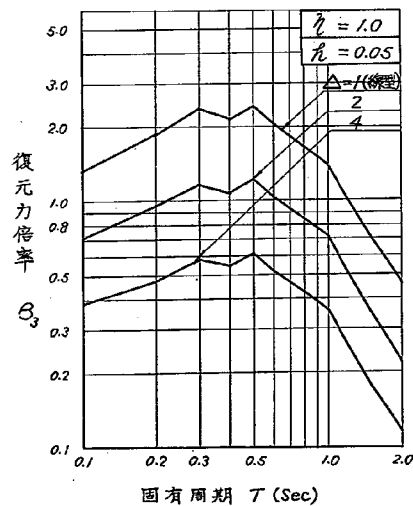


図1-28 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

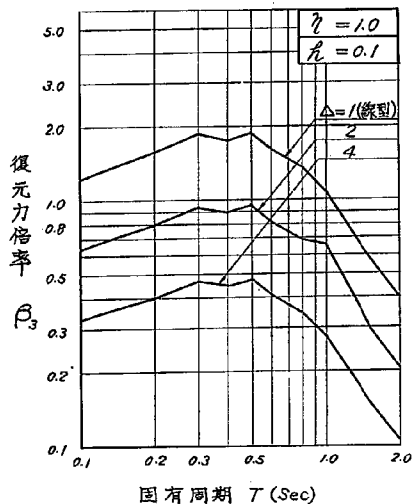


図1-29 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

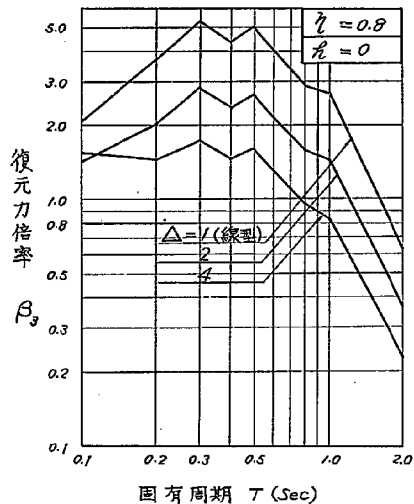


図1-30 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

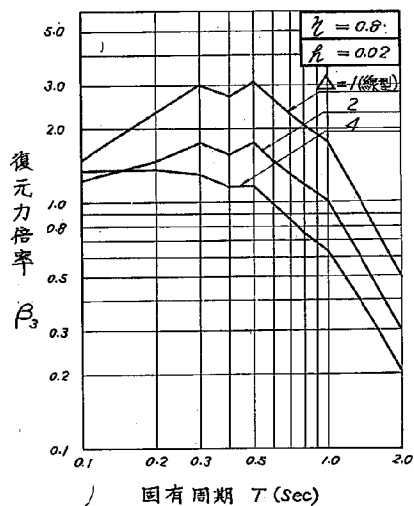


図1-31 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

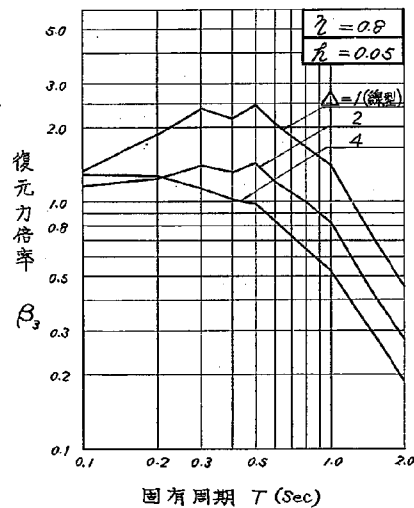


図1-32 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

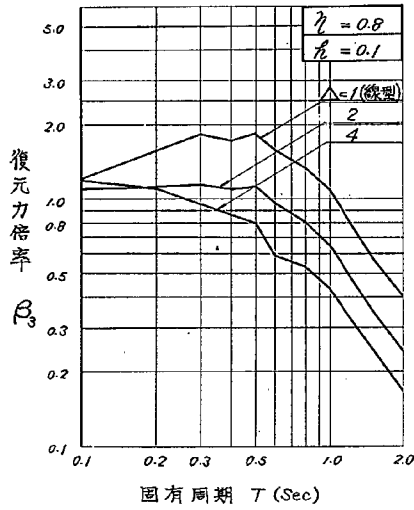


図1-33 バイリニア系還元力倍率
20成分の平均

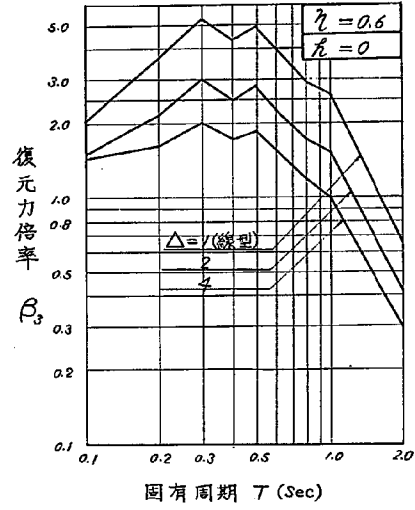


図1-34 バイリニア系還元力倍率
20成分の平均

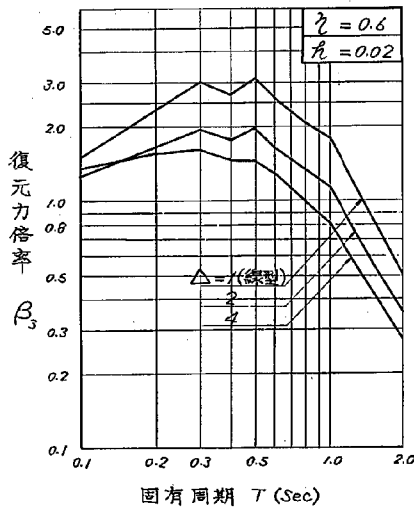


図1-35 バイリニア系還元力倍率
20成分の平均

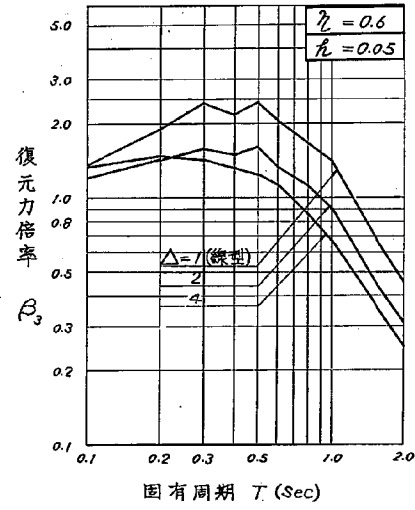


図1-36 バイリニア系還元力倍率
20成分の平均

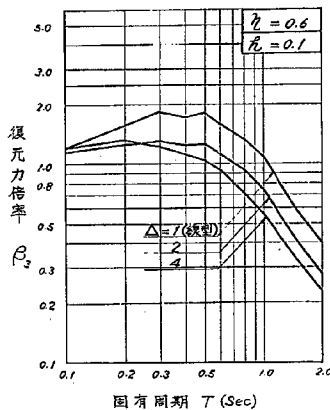


図1-37 パイリニア系復元力倍率
20成分の平均

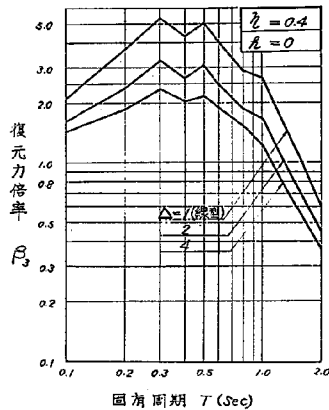


図1-38 パイリニア系復元力倍率
20成分の平均

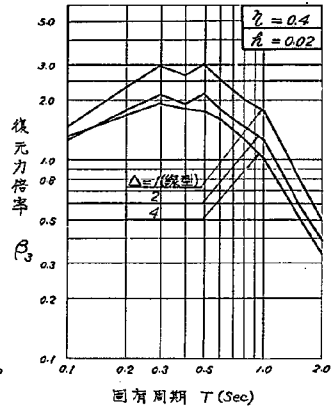


図1-39 パイリニア系復元力倍率
20成分の平均

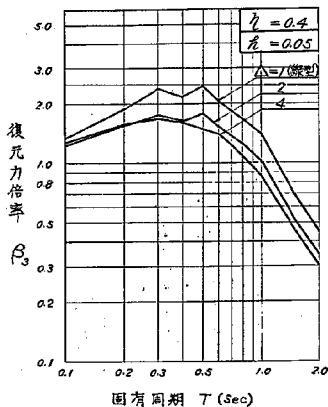


図1-40 パイリニア系復元力倍率
20成分の平均

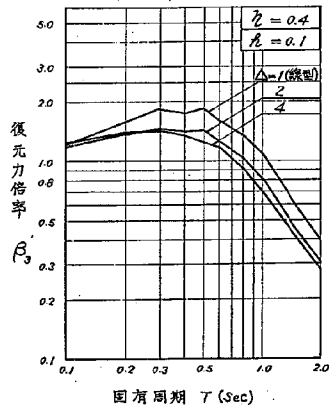


図1-41 パイリニア系復元力倍率
20成分の平均

2) ダクティリティ・ファクタ μ

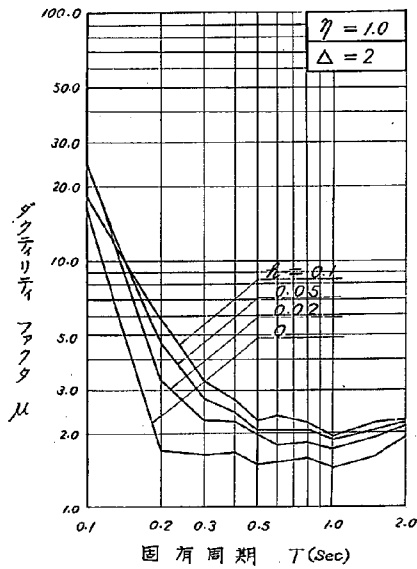


図1-42 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

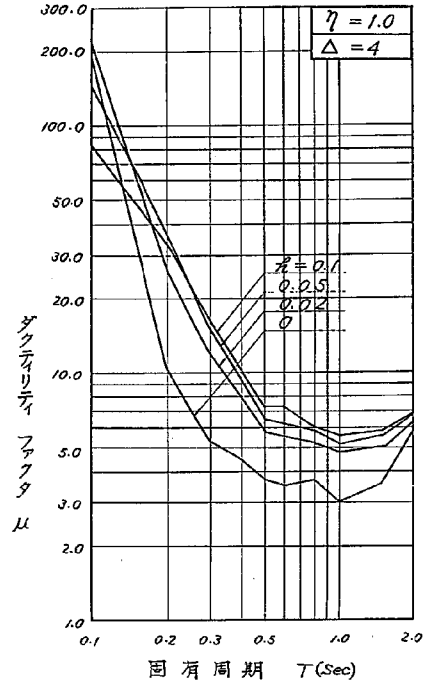


図1-43 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

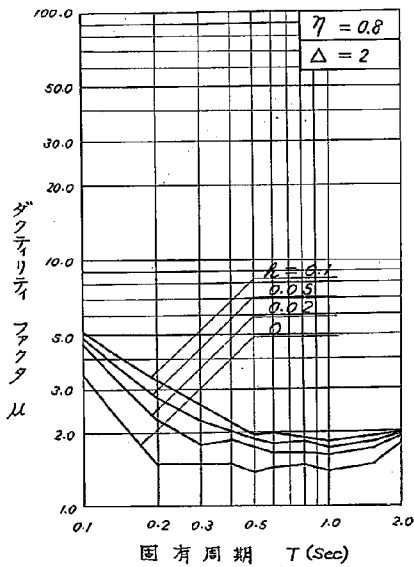


図1-44 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

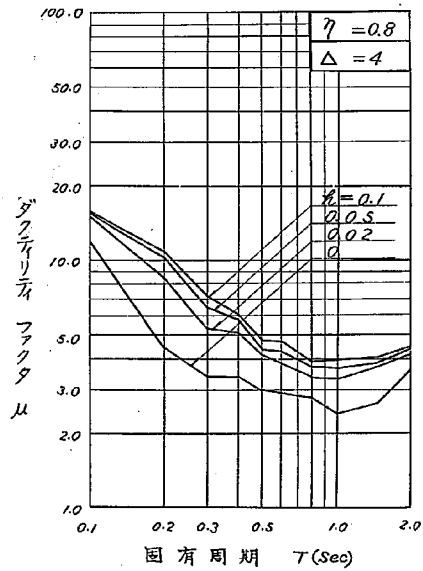


図1-45 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

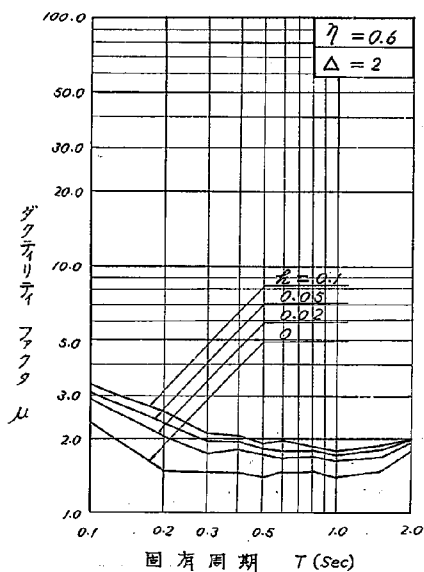


図1-46 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

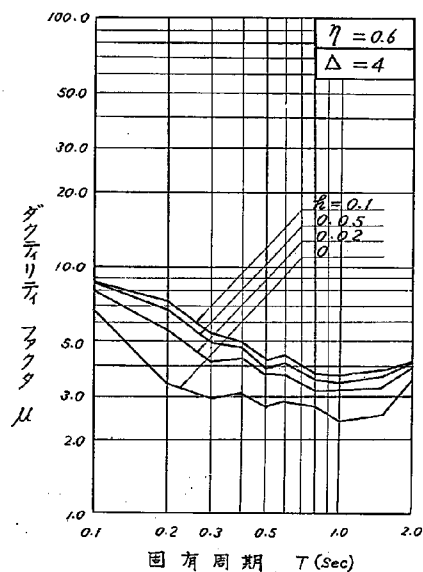


図1-47 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

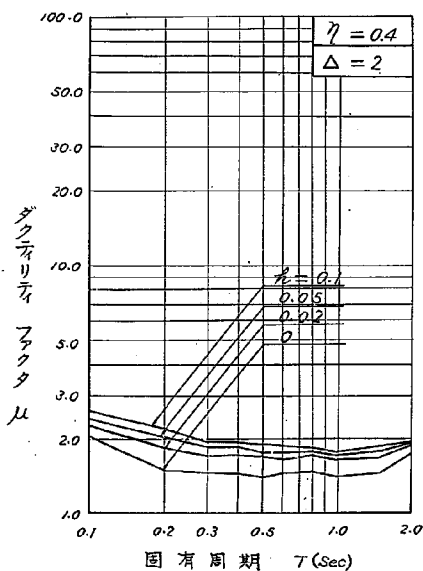


図1-48 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

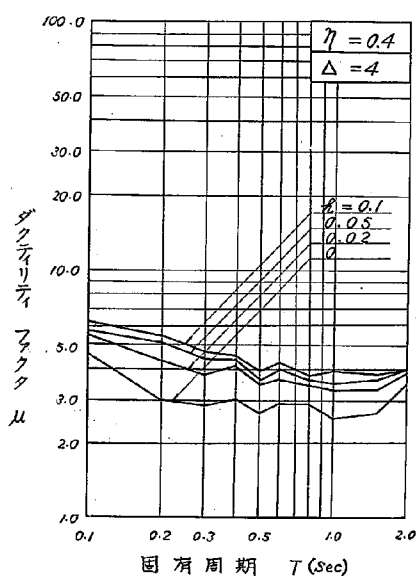


図1-49 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

3) ダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比 μ/d

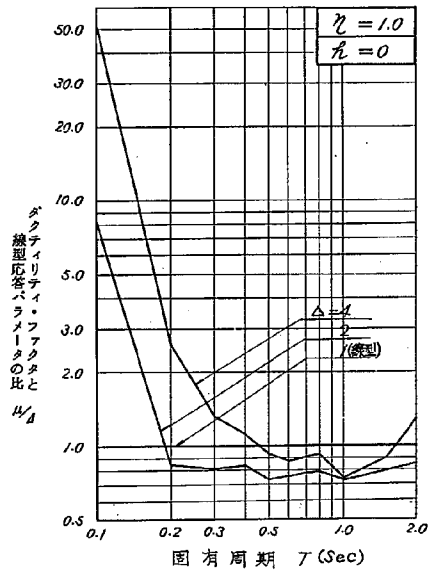


図1-50 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

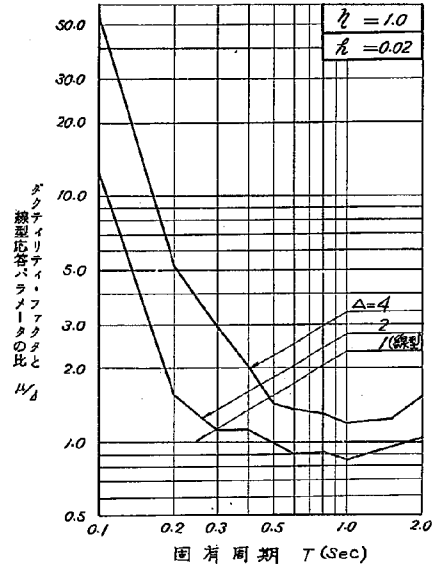


図1-51 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

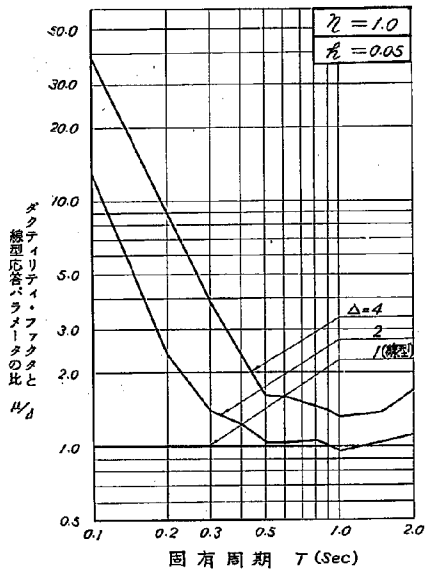


図1-52 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

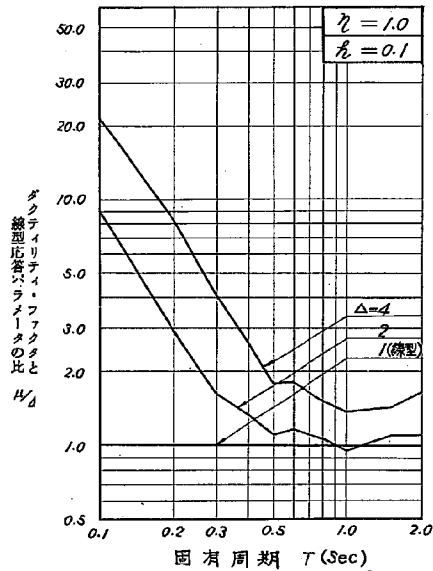


図1-53 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

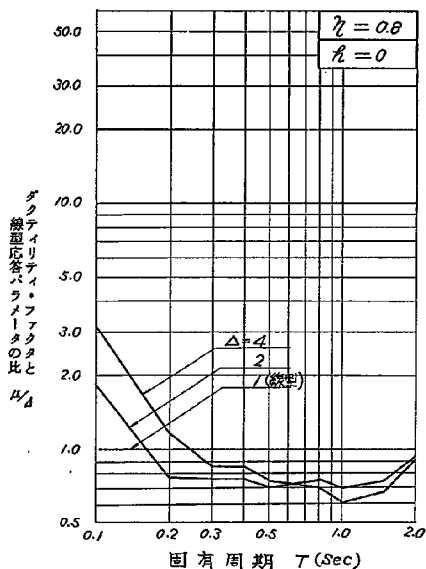


図1-54 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

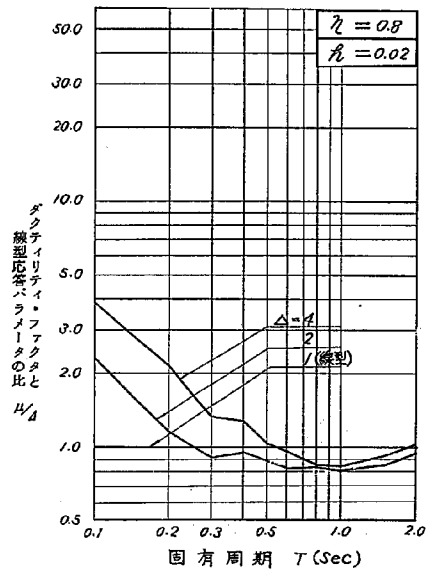


図1-55 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

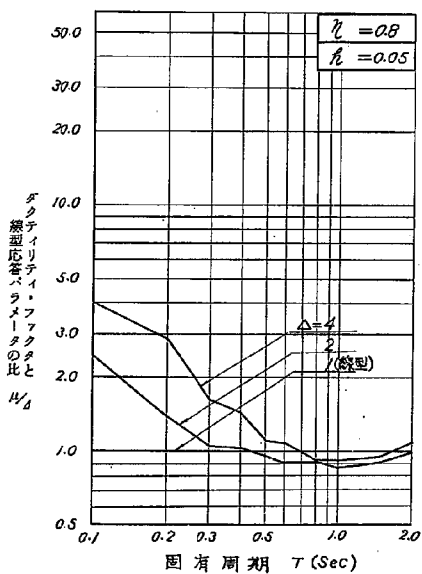


図1-56 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

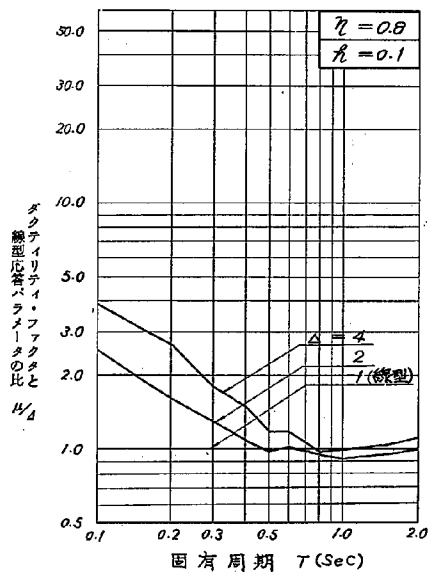


図1-57 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

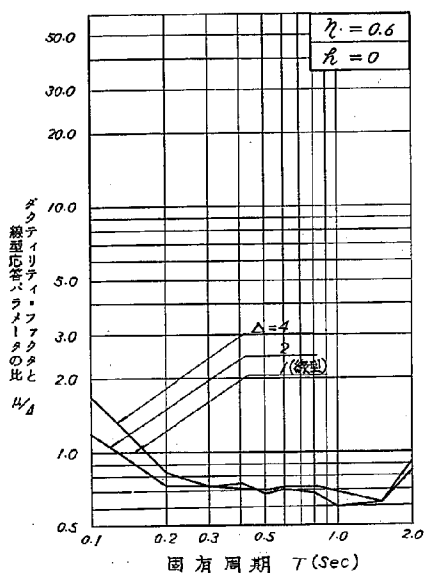


図1-58 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

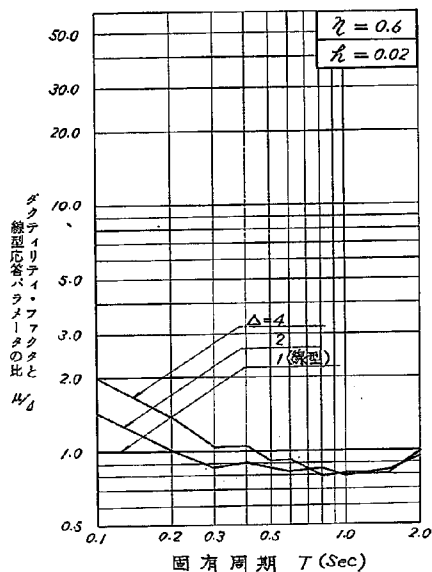


図1-59 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

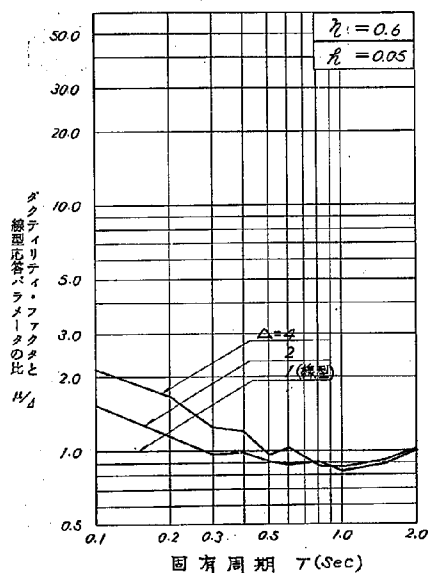


図1-60 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

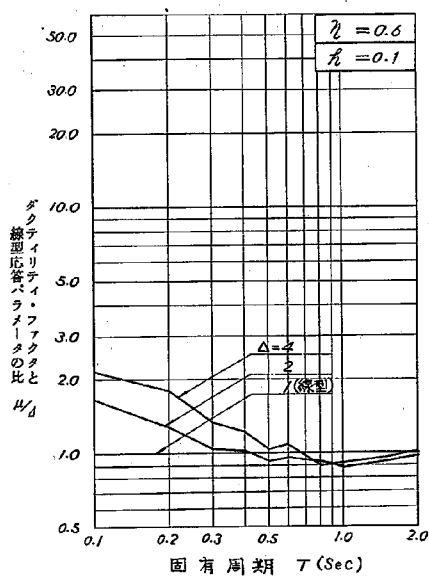


図1-61 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

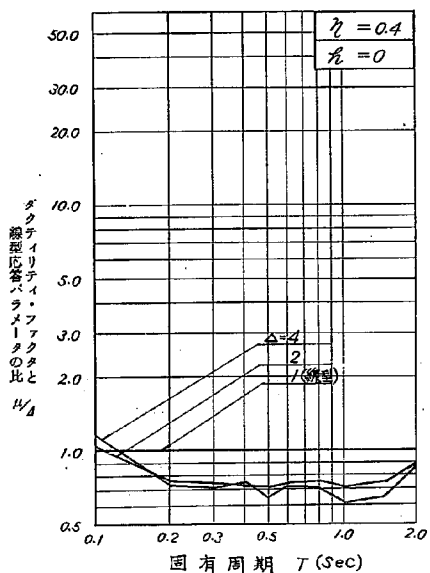


図1-62 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

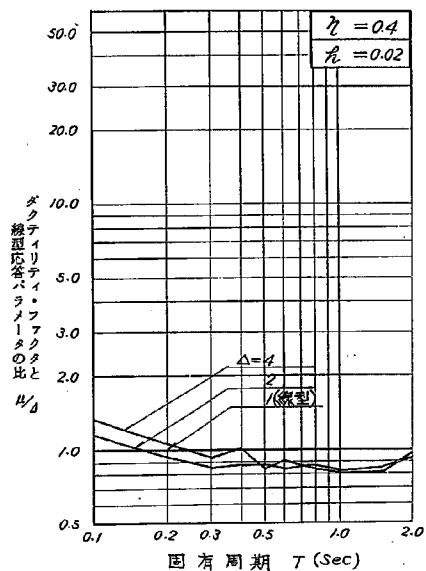


図1-63 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

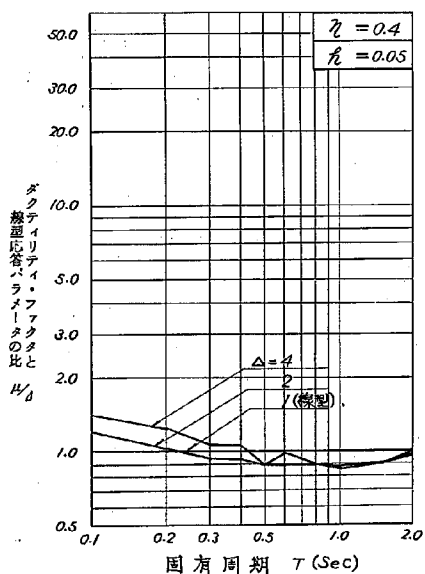


図1-64 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

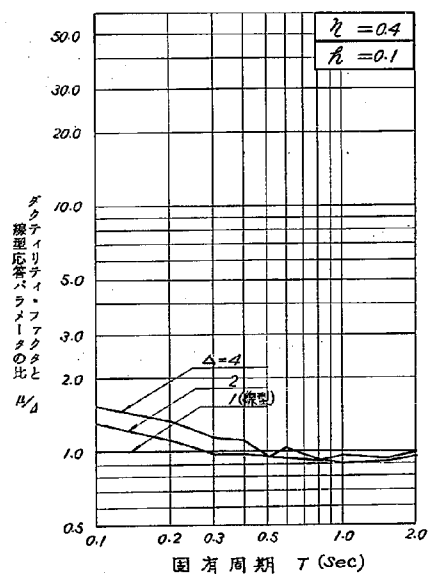


図1-65 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
20成分の平均

2. γ によるスペクトル

2.1 特定地震のスペクトル

1) 復元力倍率 β_3

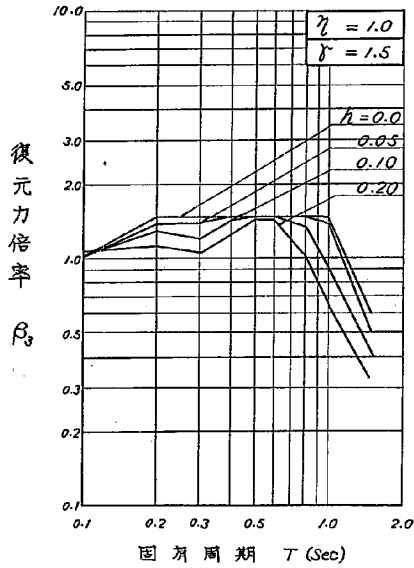


図2-1 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

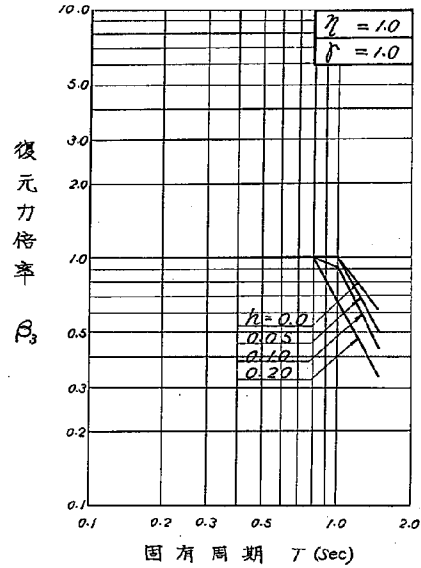


図2-2 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

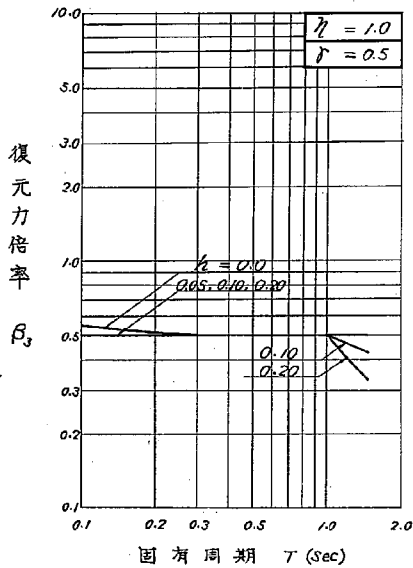


図2-3 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

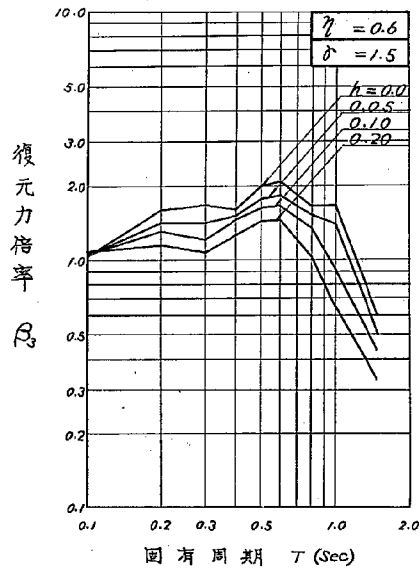


図2-4 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

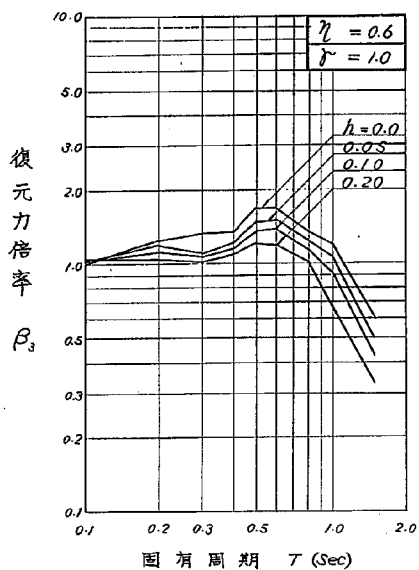


図2-5 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

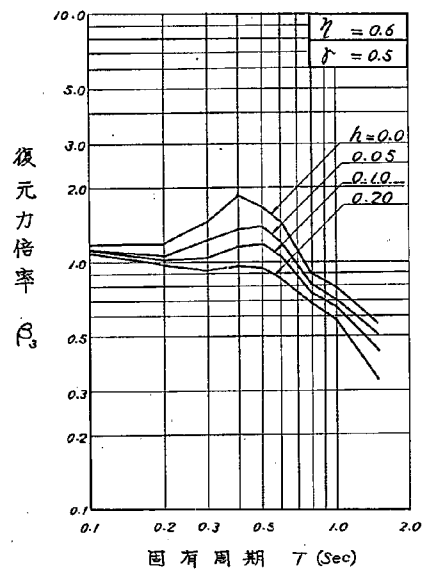


図2-6 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

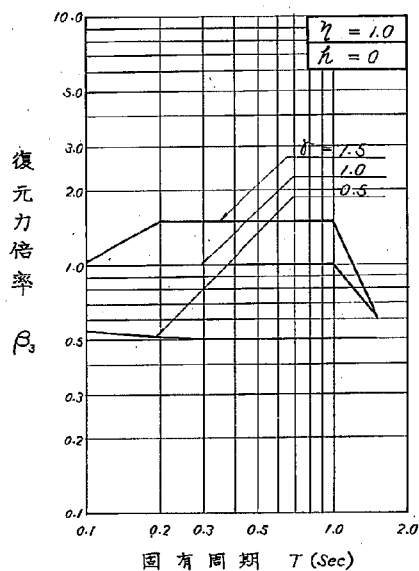


図2-7 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

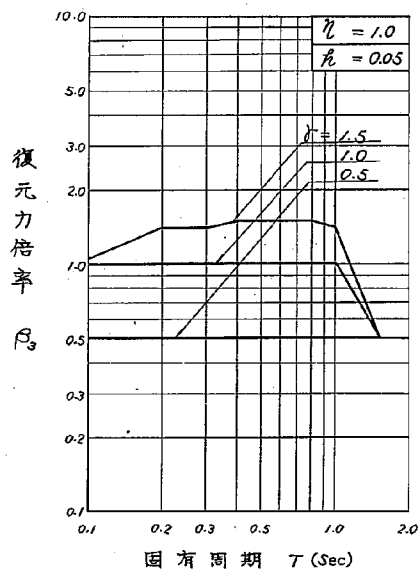


図2-8 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

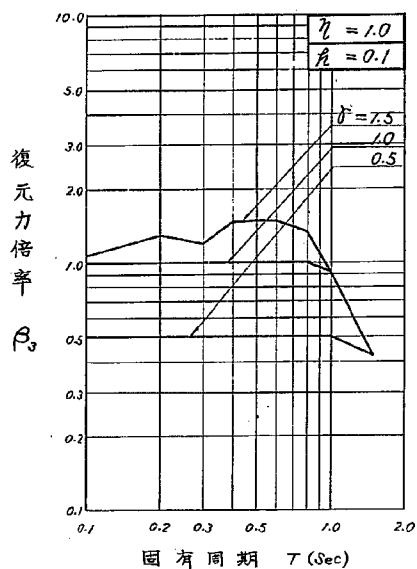


図2-9 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

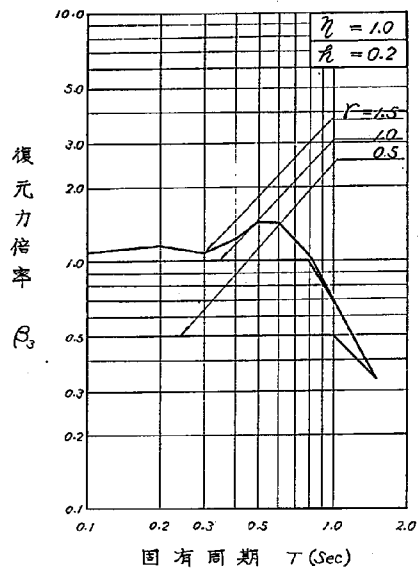


図2-10 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

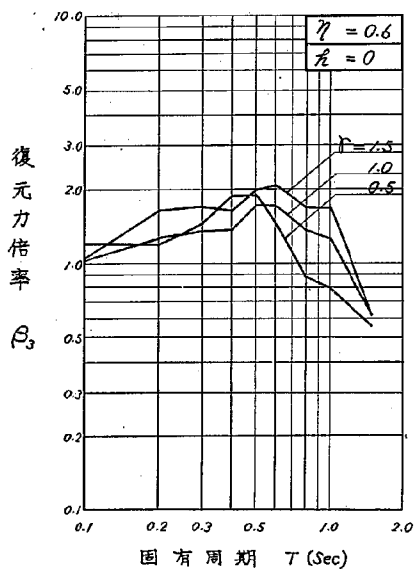


図2-11 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

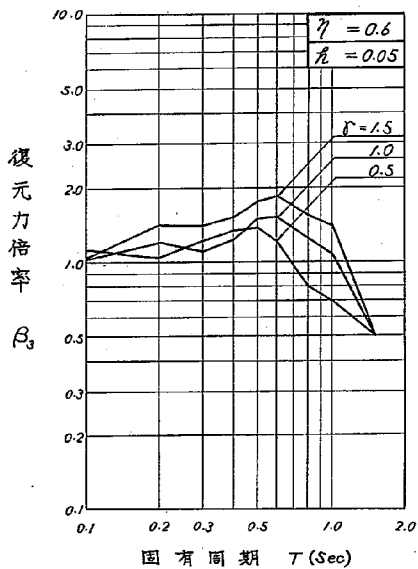


図2-12 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

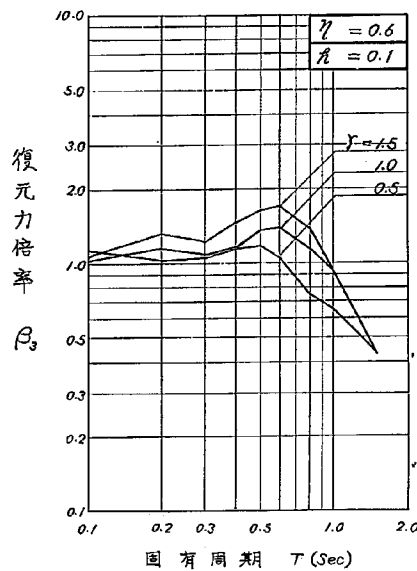


図 2-13 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石 N-S 成分

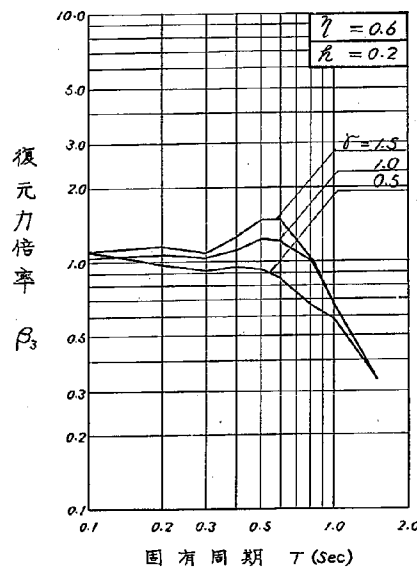


図 2-14 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石 N-S 成分

2) ダクティリティ・ファクタ μ

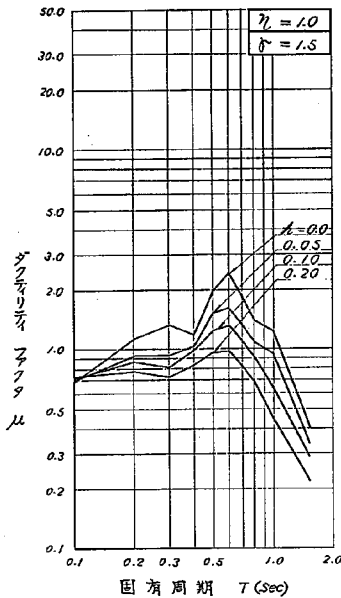


図2-15 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石N-S成分

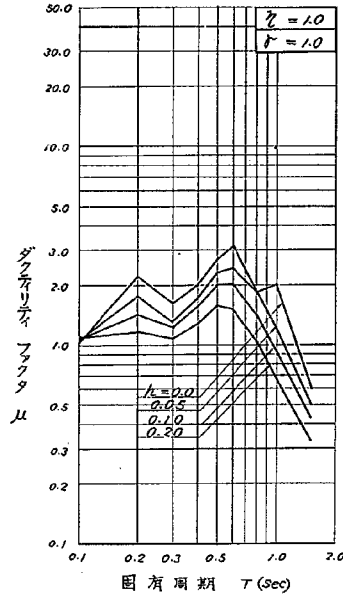


図2-16 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石N-S成分

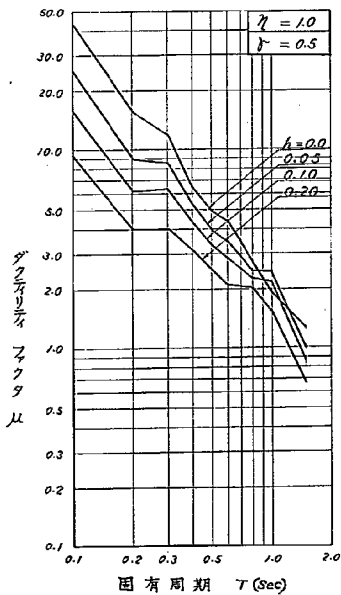


図2-17 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石N-S成分

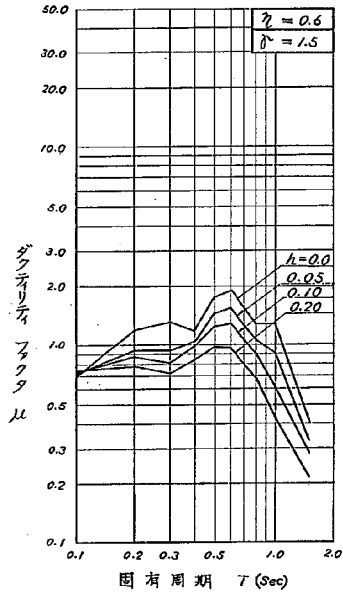


図2-18 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石N-S成分

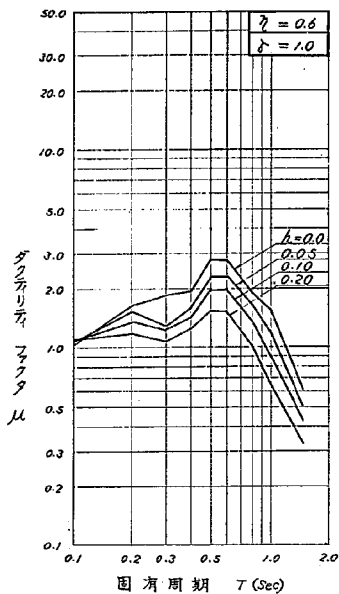


図2-19 パイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

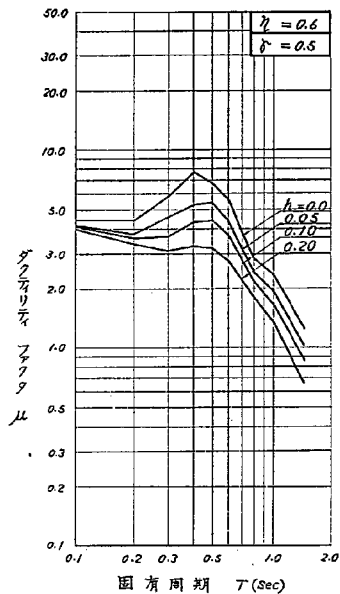


図2-20 パイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

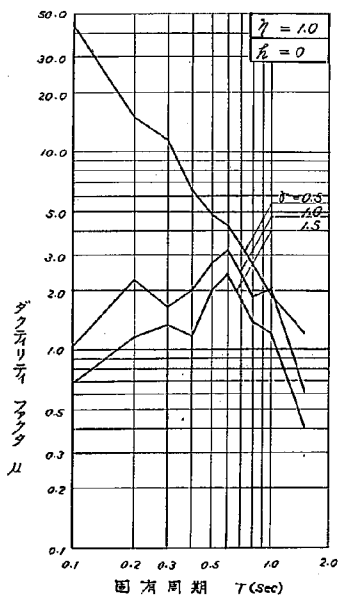


図2-21 パイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

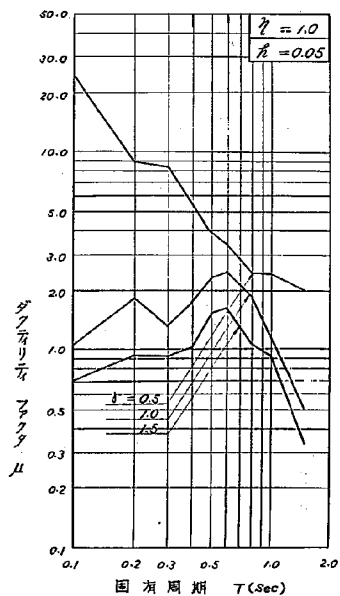


図2-22 パイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

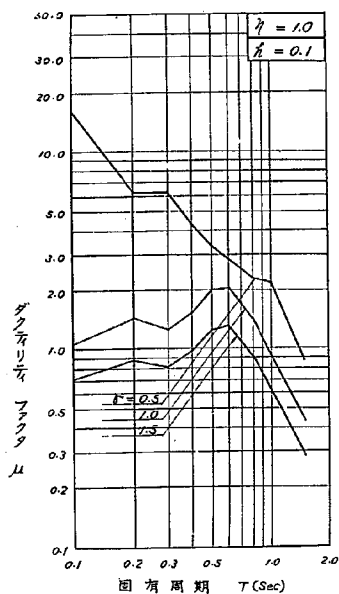


図 2-23 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

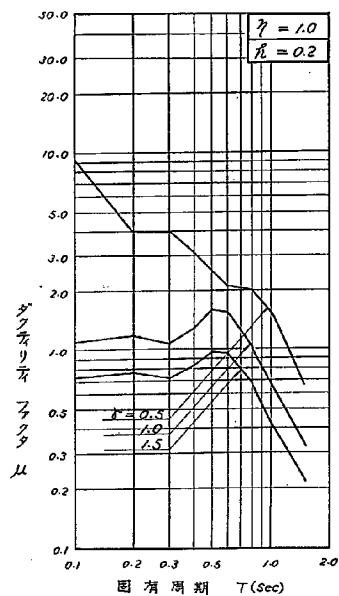


図 2-24 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

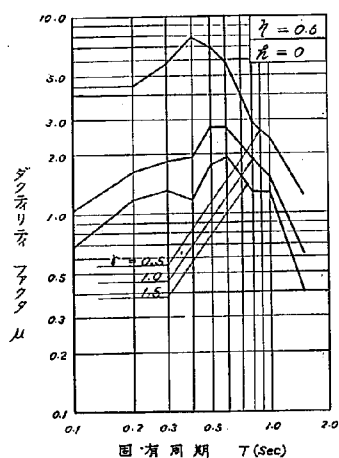


図 2-25 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

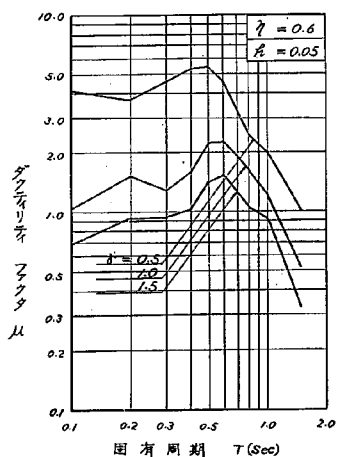


図 2-26 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

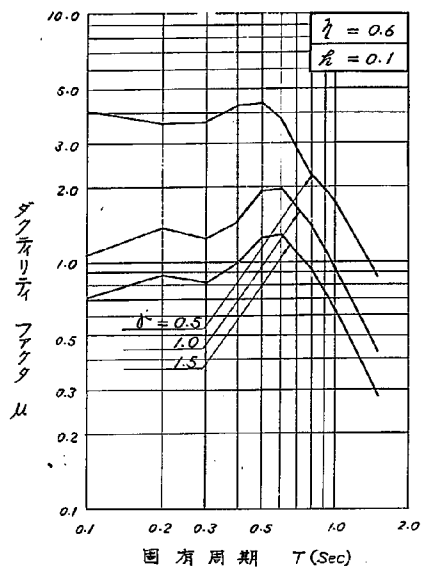


図 2-27 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

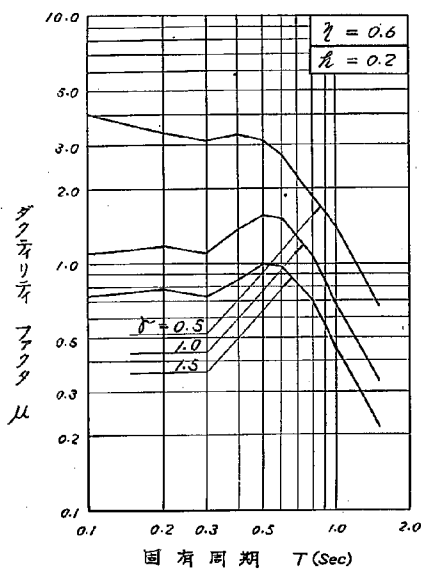


図 2-28 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
資料番号 17 明石 N-S 成分

3) 相対変位 X (cm)

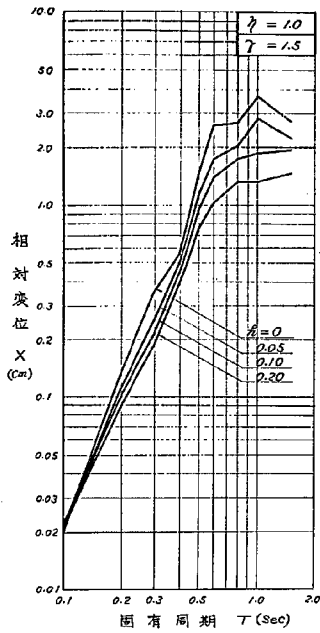


図2-29 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

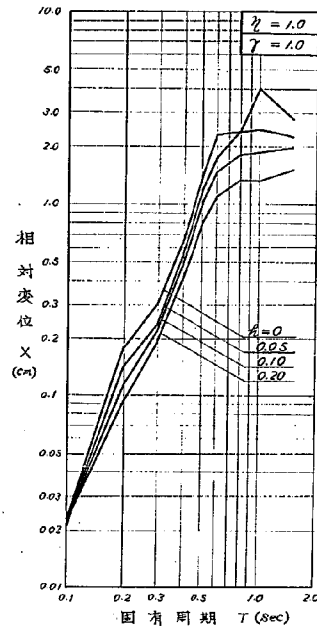


図2-30 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

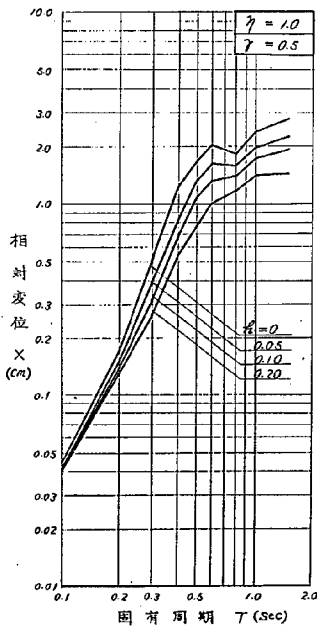


図2-31 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

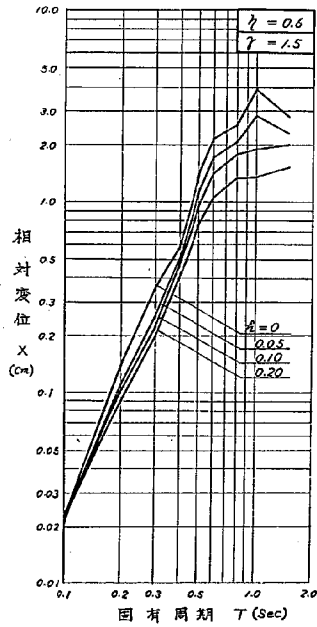


図2-32 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

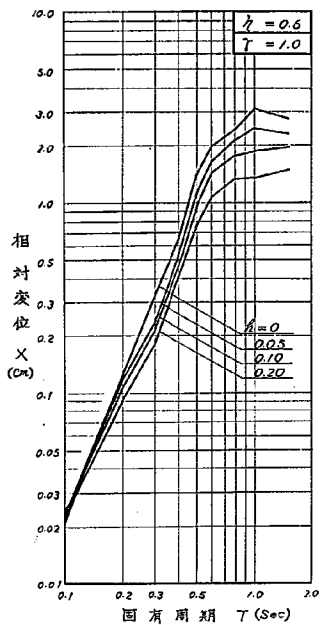


図2-33 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

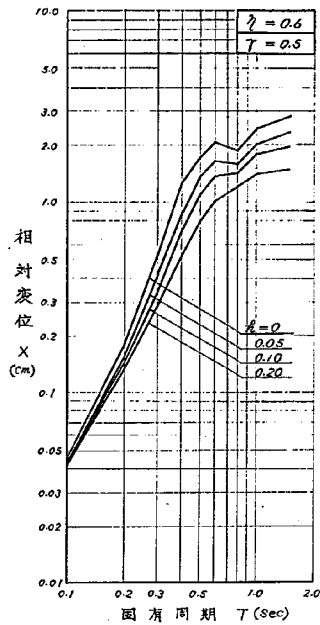


図2-34 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

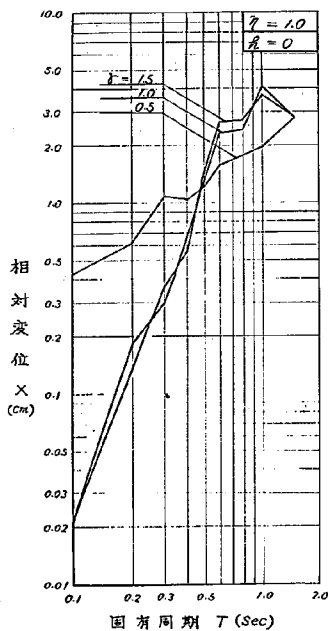


図2-35 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

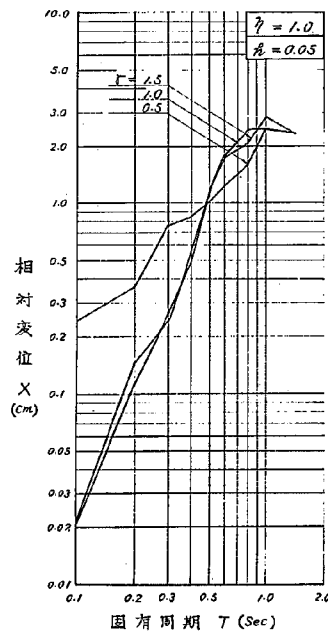


図2-36 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

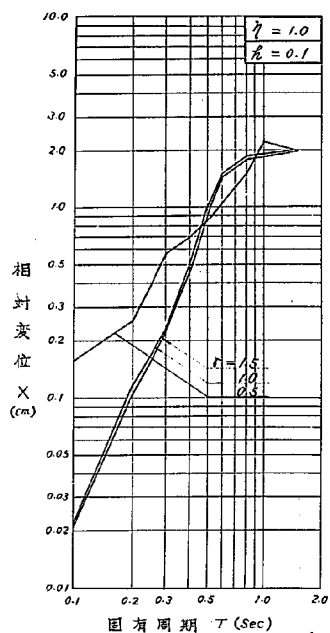


図2-37 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

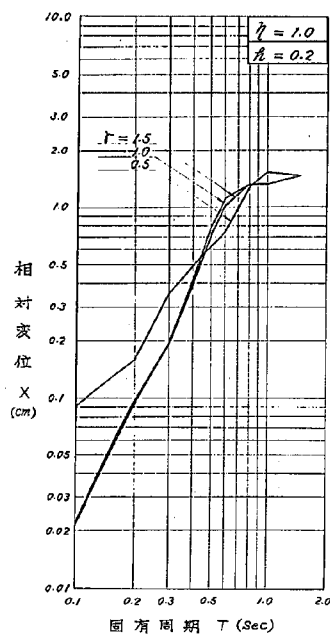


図2-38 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

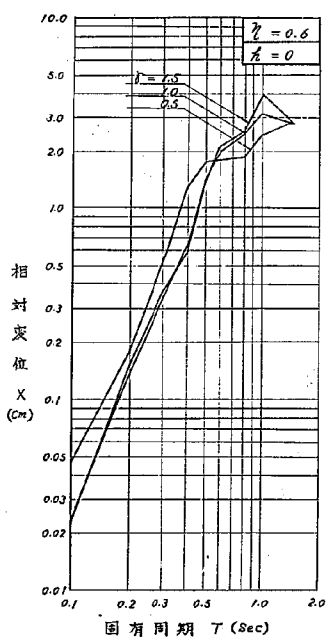


図2-39 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

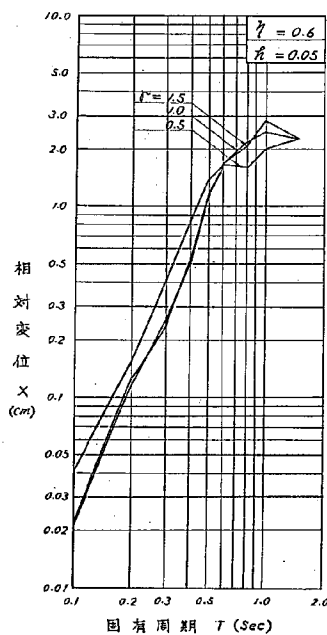


図2-40 バイリニア系の相対変位
資料番号 17 明石N-S成分

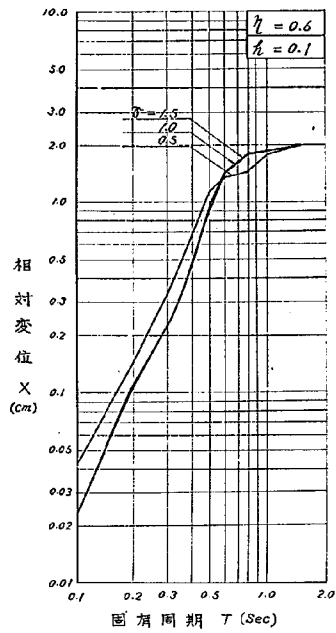


図2-41 バイリニア系の相対変位
資料番号17 明石N-S成分

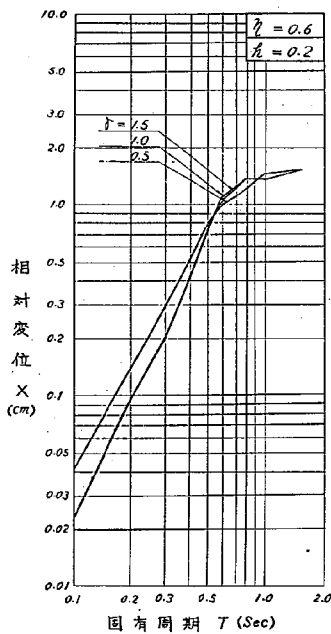


図2-42 バイリニア系の相対変位
資料番号17 明石N-S成分

2.2 地震波 10 成分の平均スペクトル

1) 復元力倍率 β_3

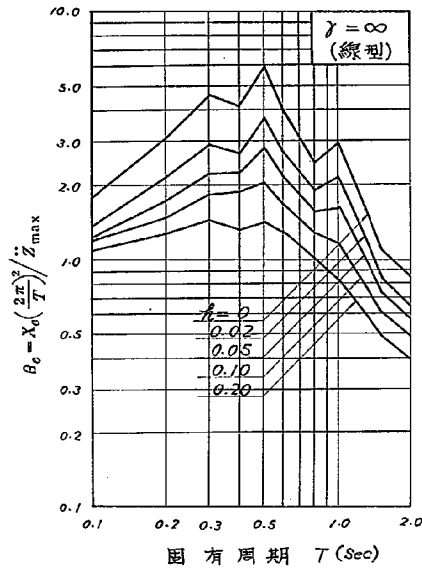


図 2-43 線型系の復元力倍率
10 成分の平均

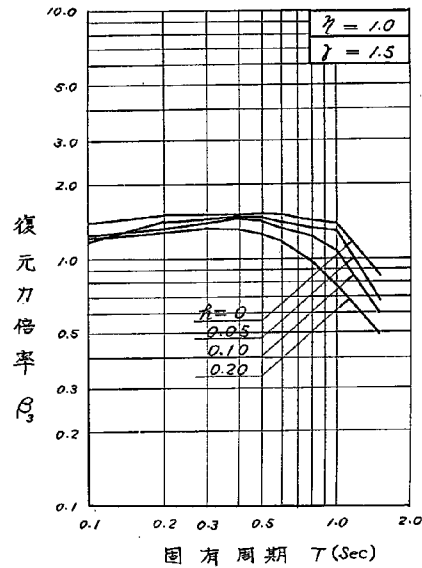


図 2-44 バイリニア系復元力倍率
10 成分の平均

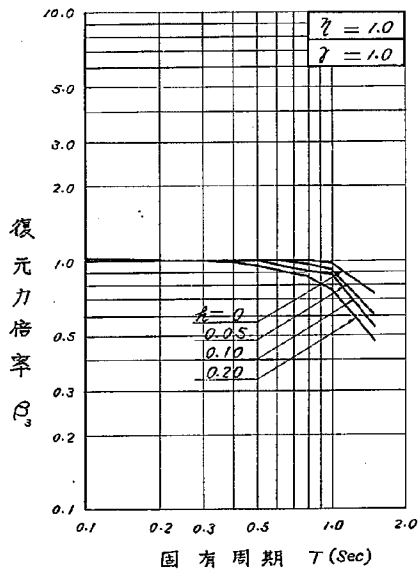


図 2-45 バイリニア系復元力倍率
10 成分の平均

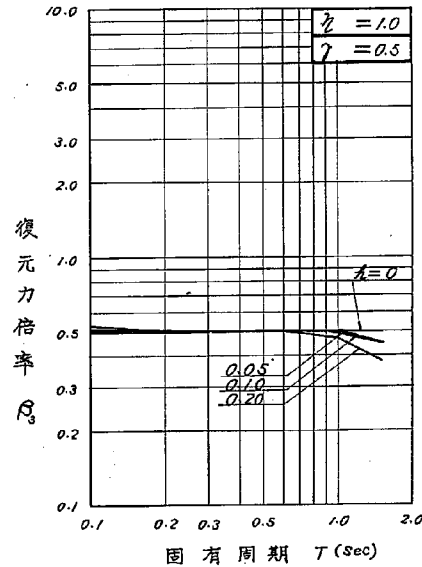


図 2-46 バイリニア系復元力倍率
10 成分の平均

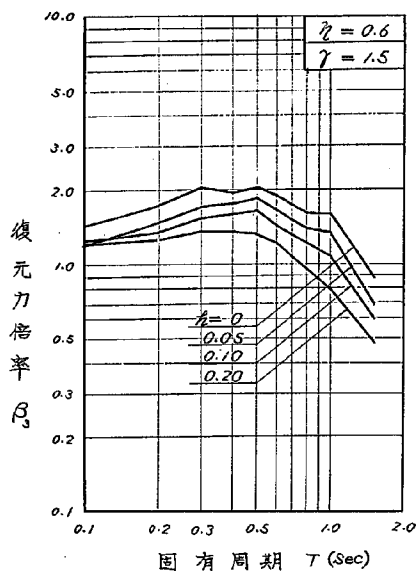


図2-47 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

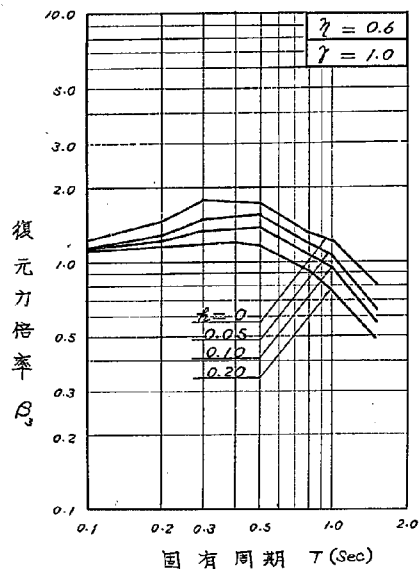


図2-48 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

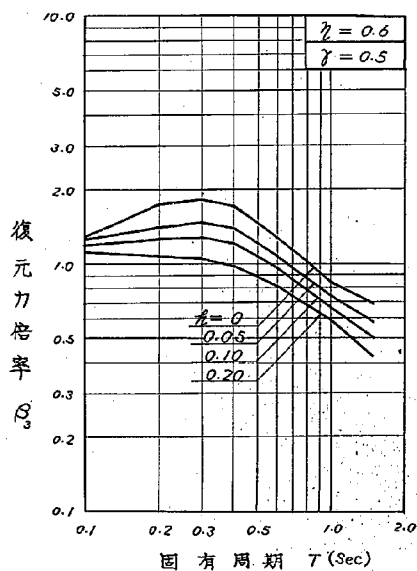


図2-49 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

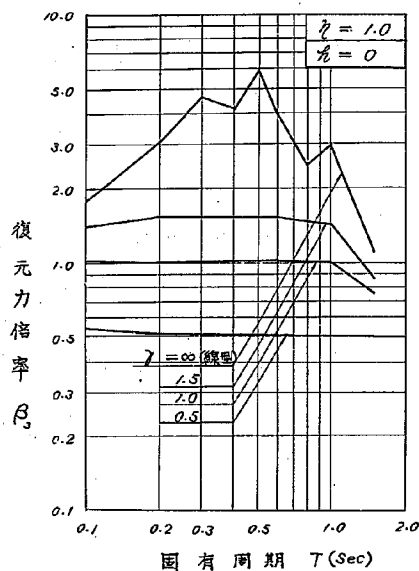


図2-50 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

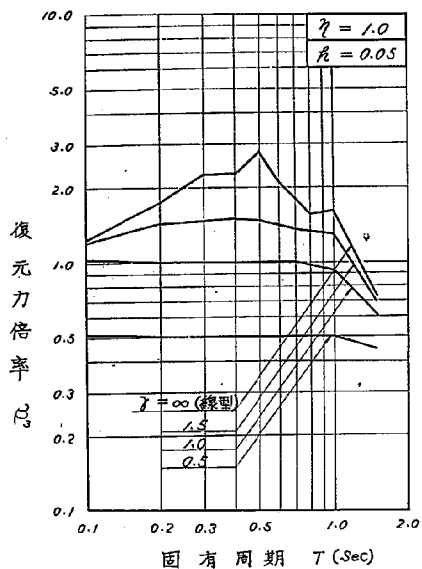


図2-51 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

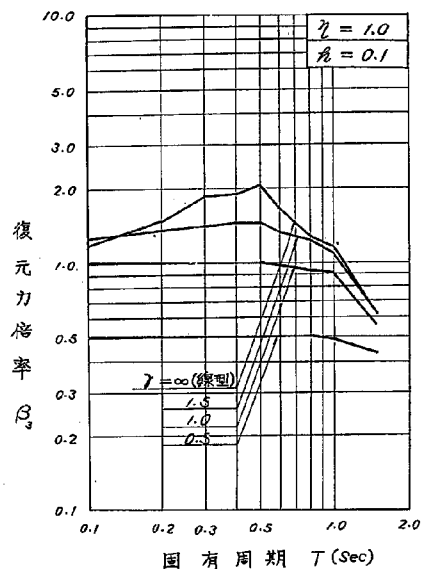


図2-52 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

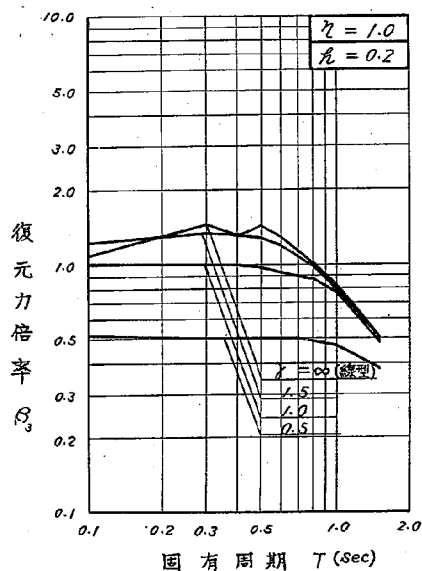


図2-53 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

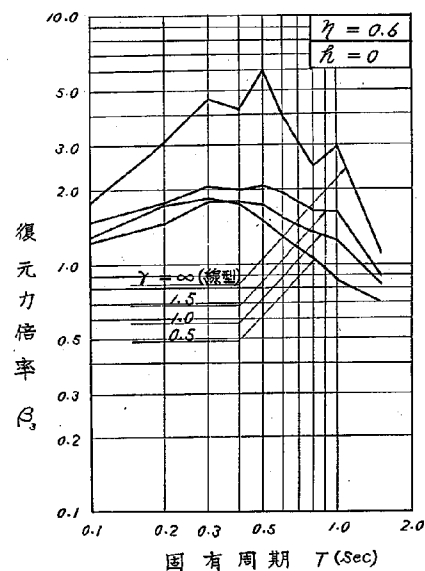


図2-54 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

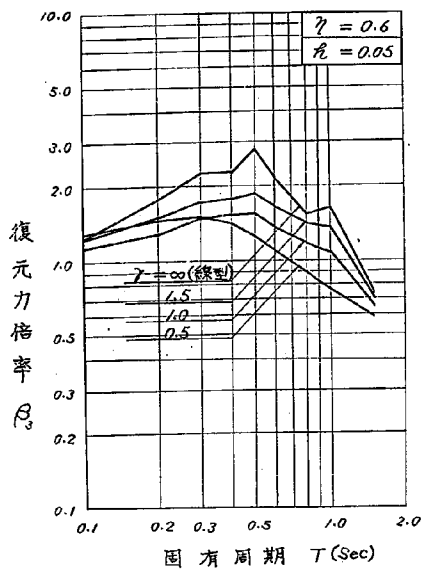


図2-55 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

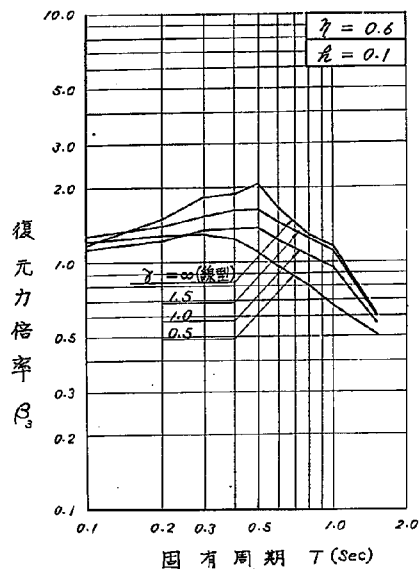


図2-56 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

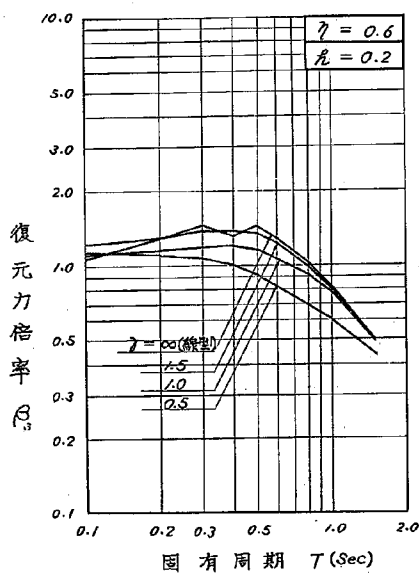


図2-57 バイリニア系復元力倍率
10成分の平均

2) ダクティリティ・ファクタ μ

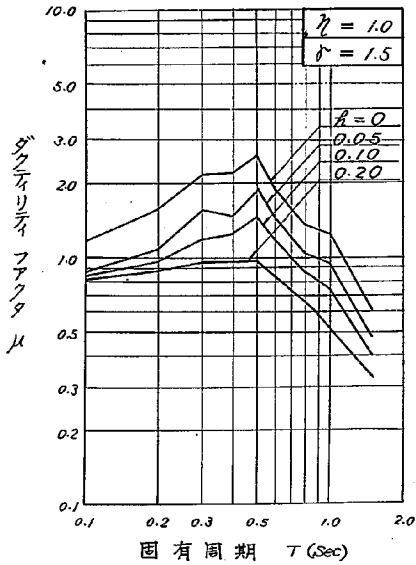


図2-58 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

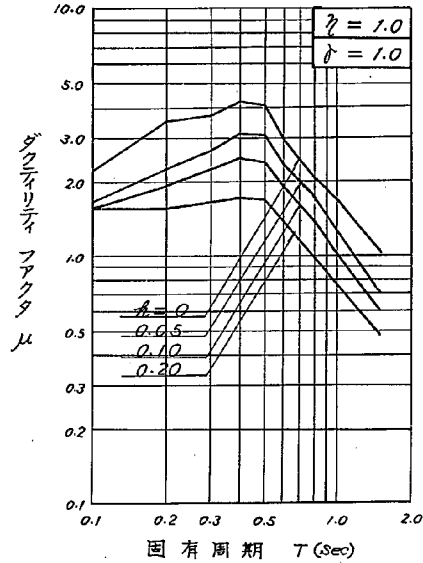


図2-59 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

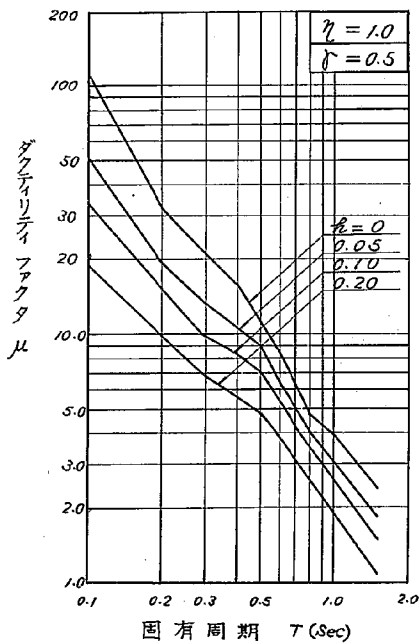


図2-60 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

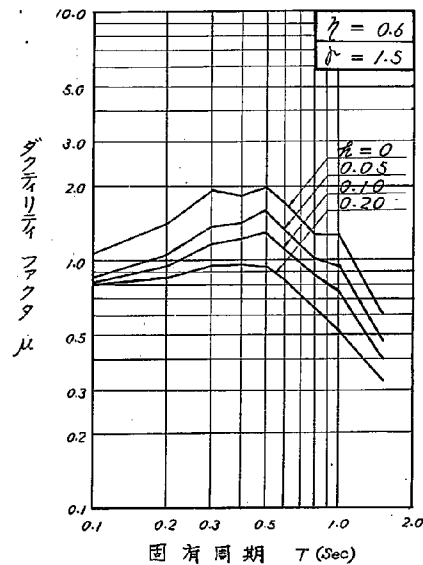


図2-61 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

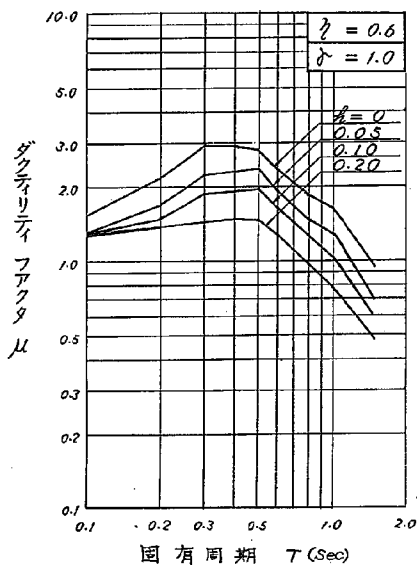


図2-62 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

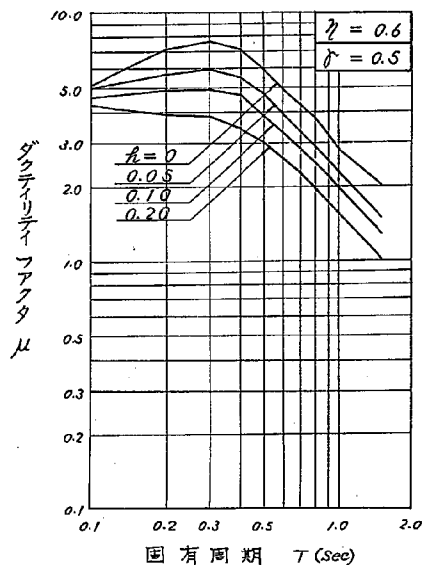


図2-63 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

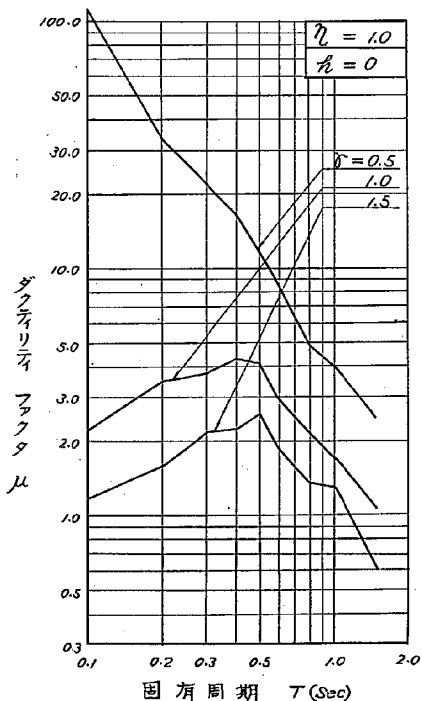


図2-64 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

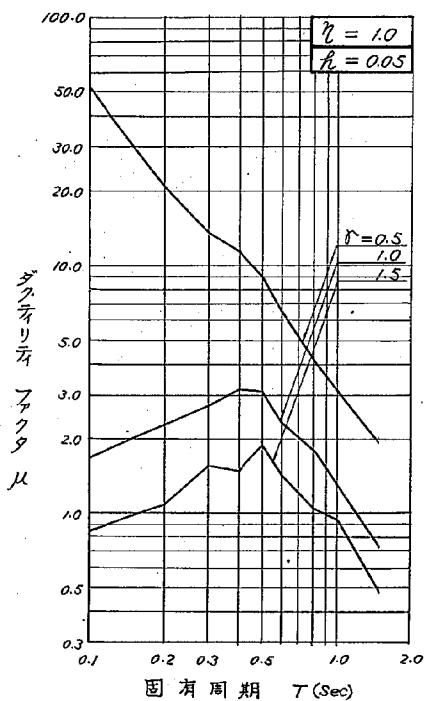


図2-65 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

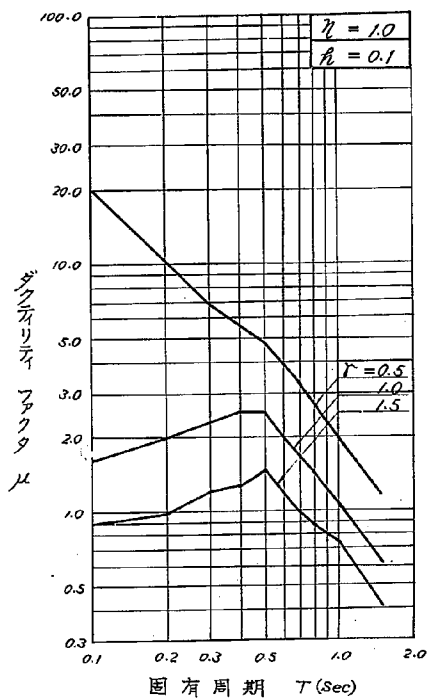


図2-66 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

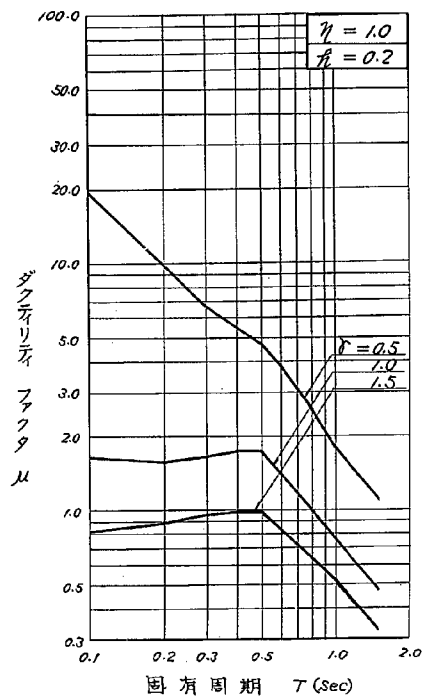


図2-67 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

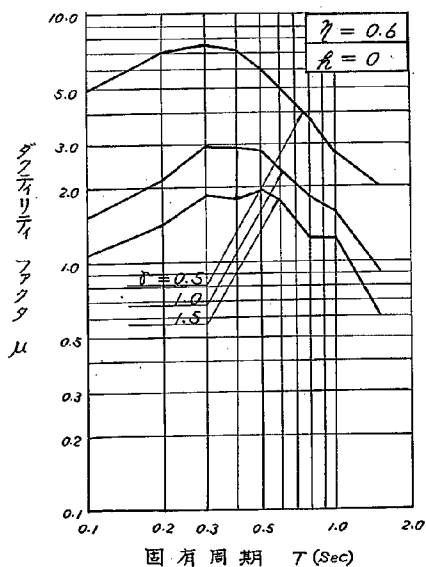


図2-68 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

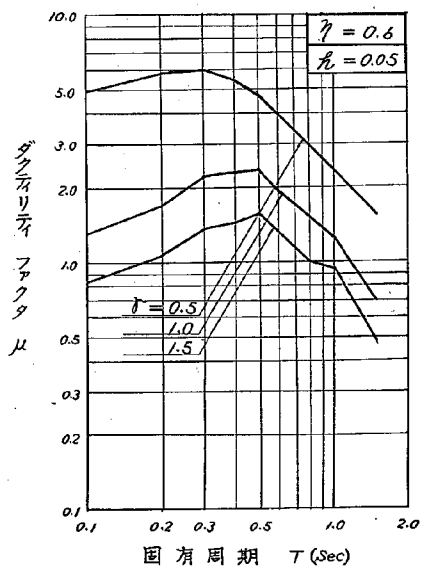


図2-69 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

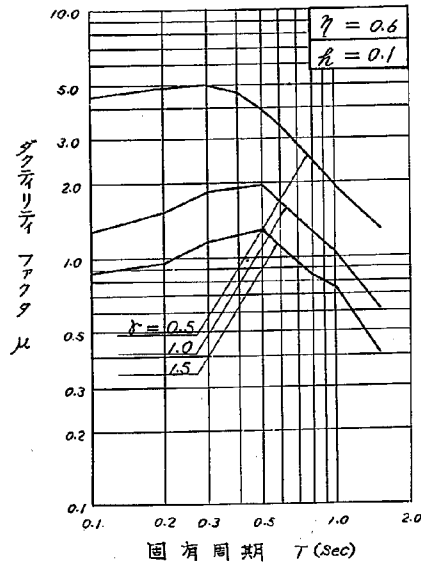


図2-70 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

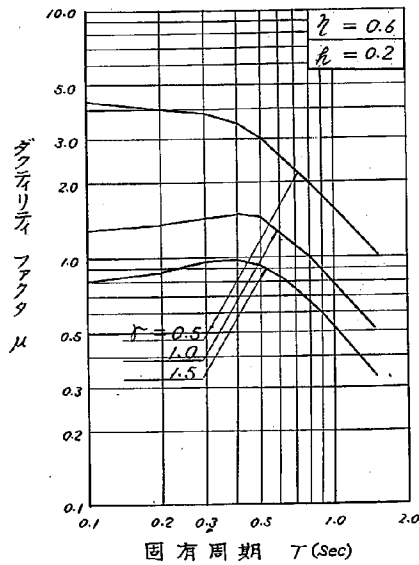


図2-71 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
10成分の平均

3. μ によるスペクトル

3.1 特定地震のスペクトル

1) 復元力倍率 β_s

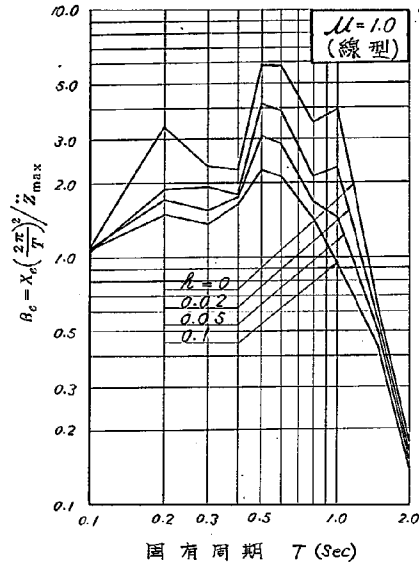


図3-1 線型系の復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

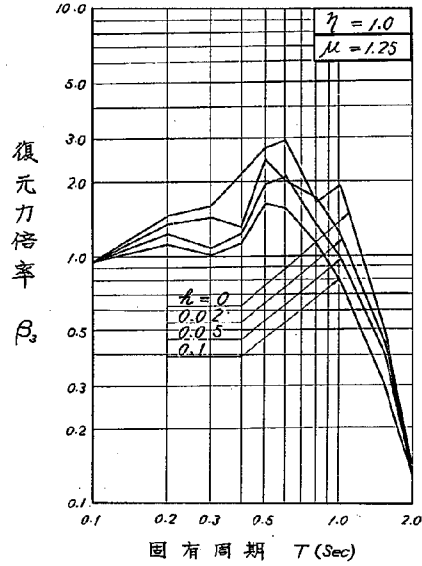


図3-2 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

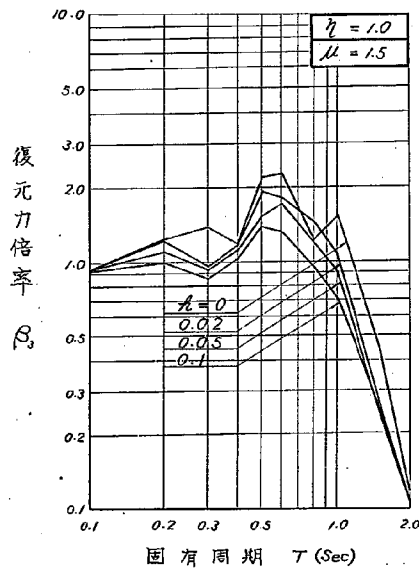


図3-3 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

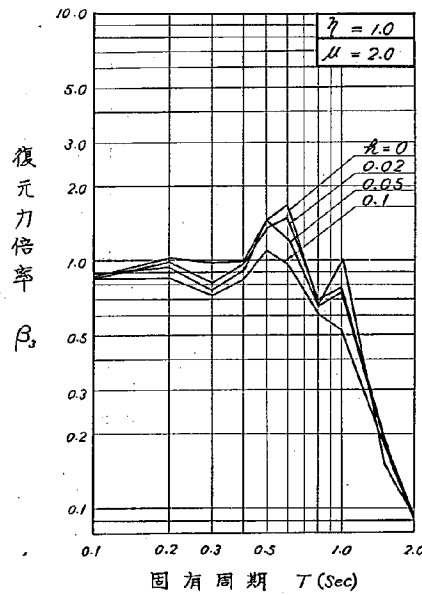


図3-4 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

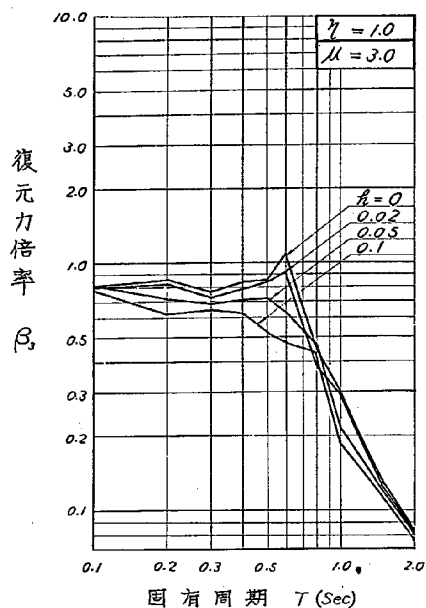


図3-5 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

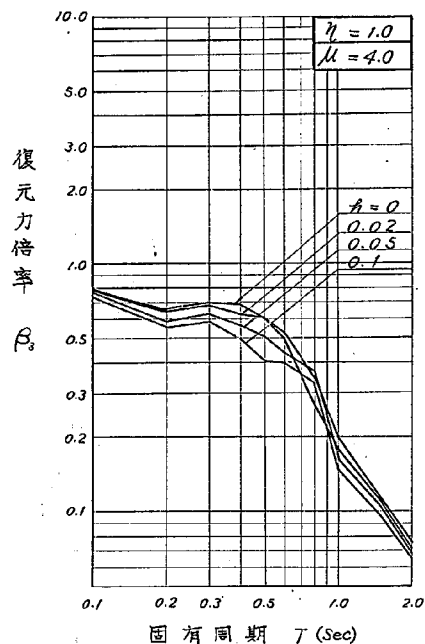


図3-6 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

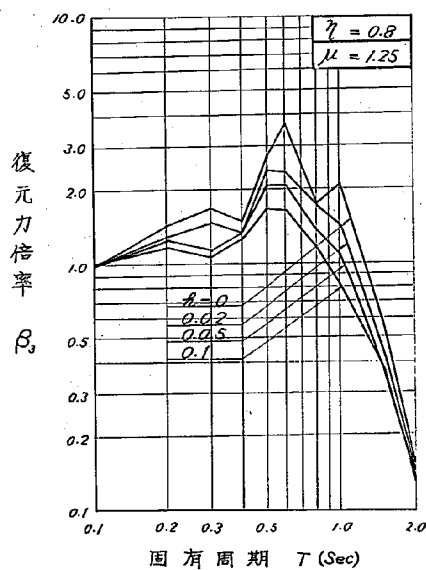


図3-7 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

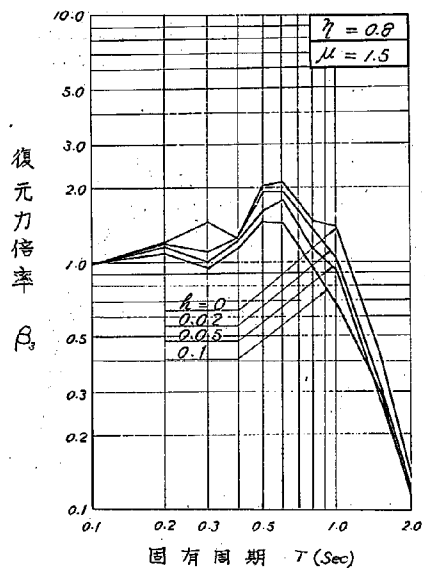


図3-8 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

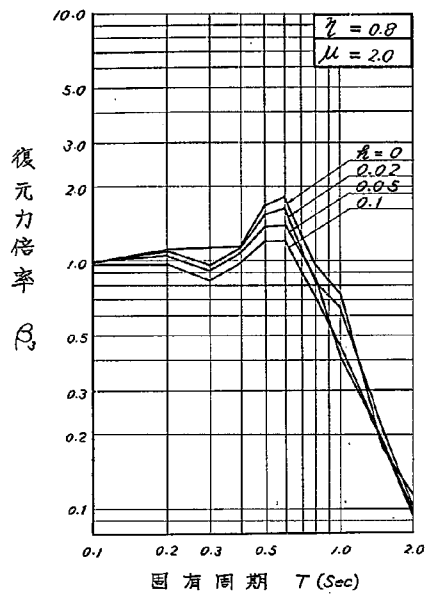


図3-9 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

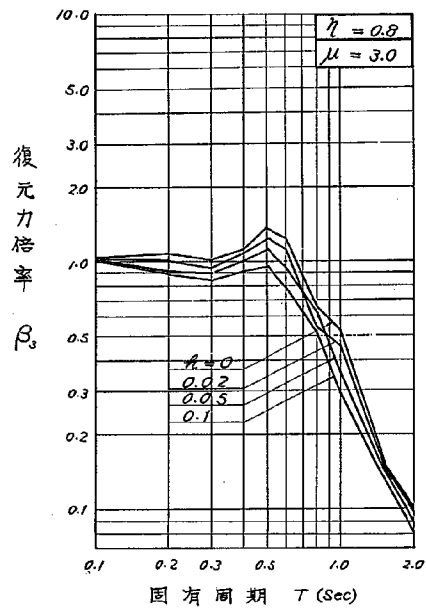


図3-10 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

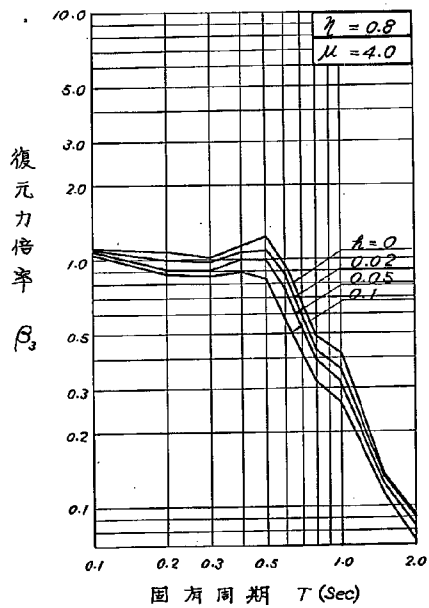


図3-11 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

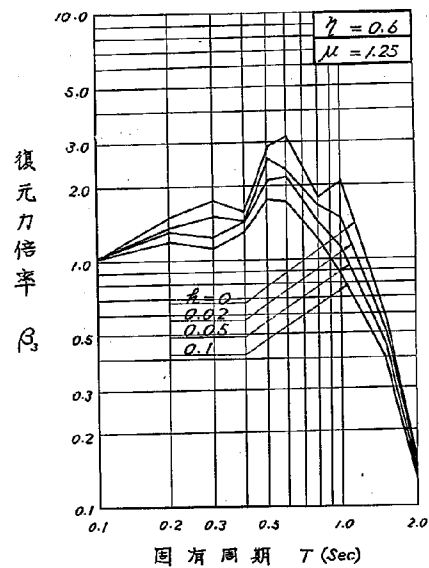


図3-12 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

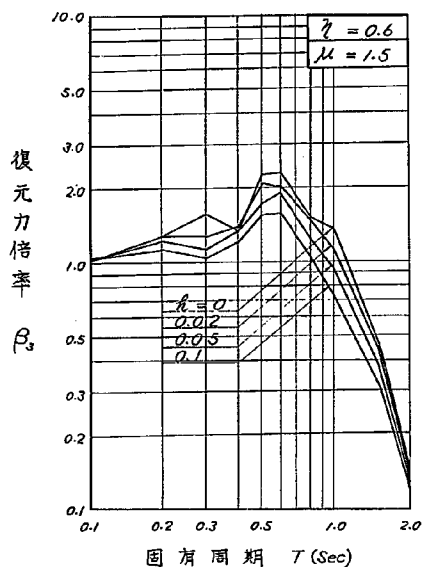


図3-13 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

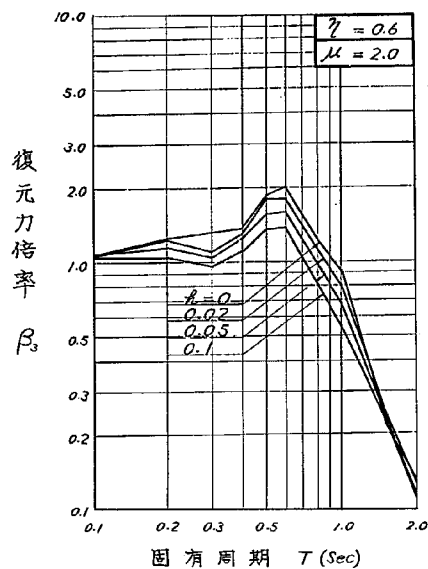


図3-14 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

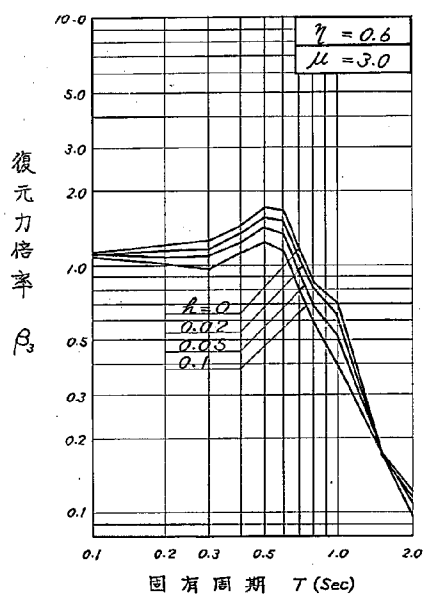


図3-15 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

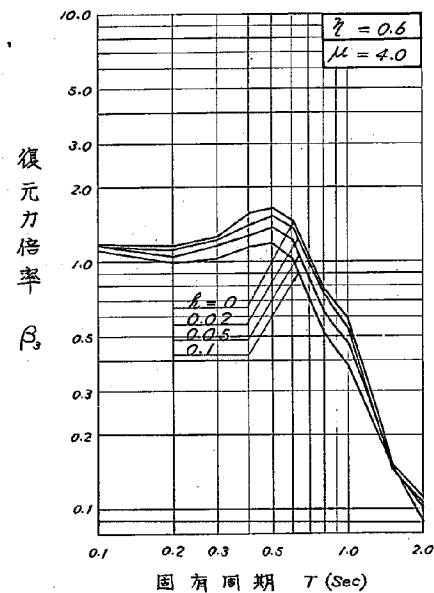


図3-16 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

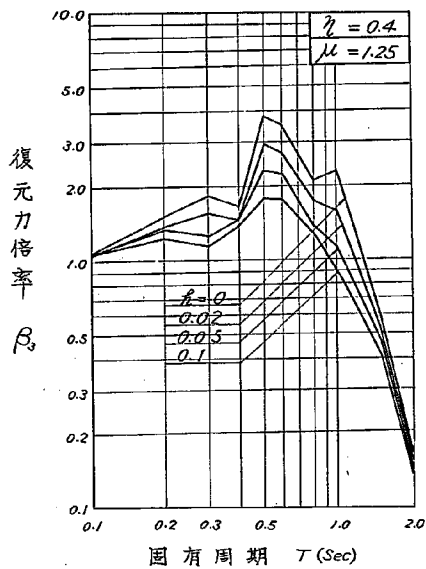


図3-17 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

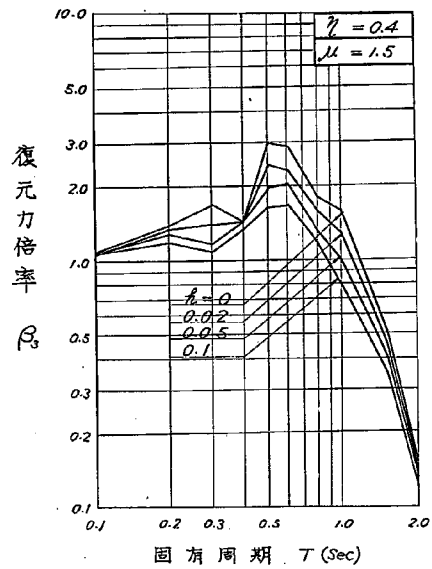


図3-18 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

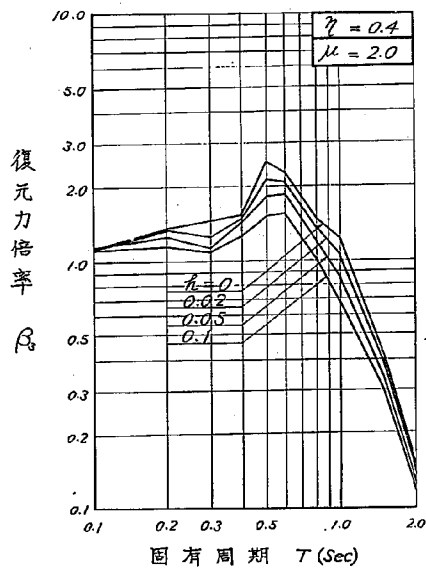


図3-19 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

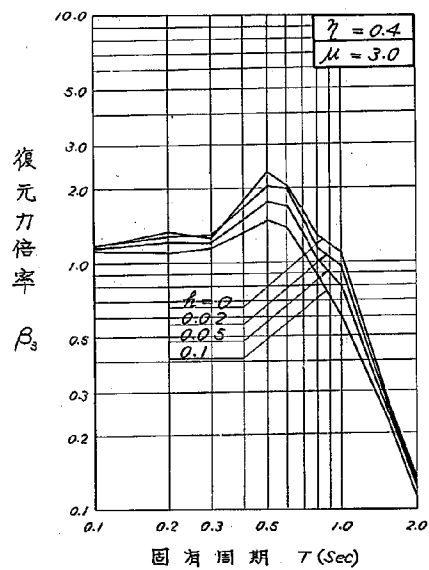


図3-20 バイリニア系復元力倍率
資料番号 17 明石N-S成分

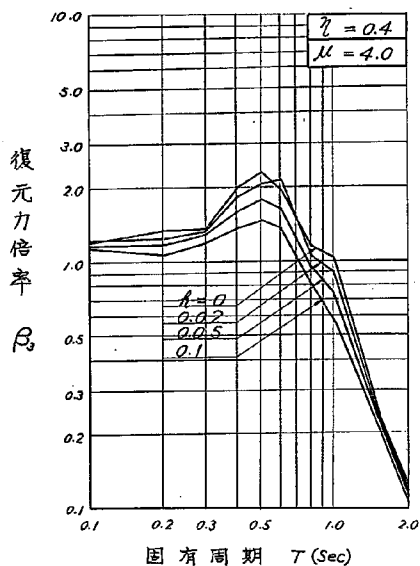


図3-21 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

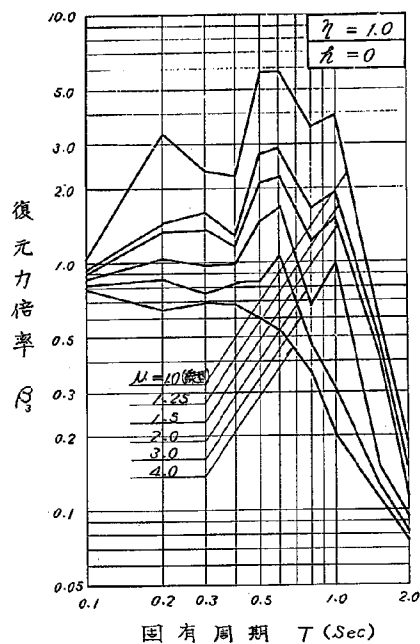


図3-22 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

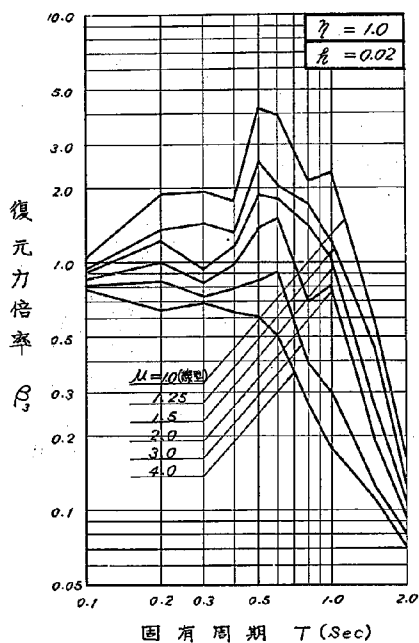


図3-23 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

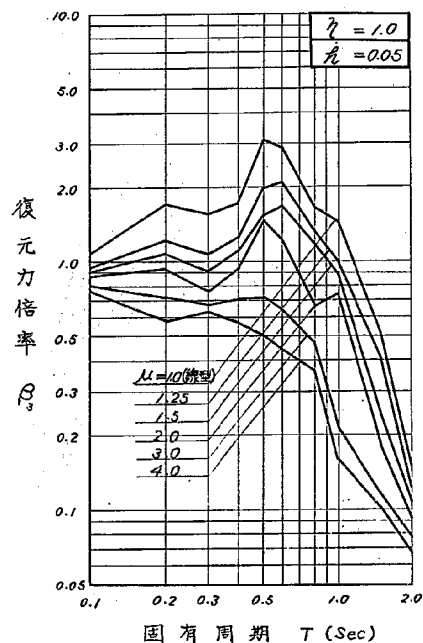


図3-24 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

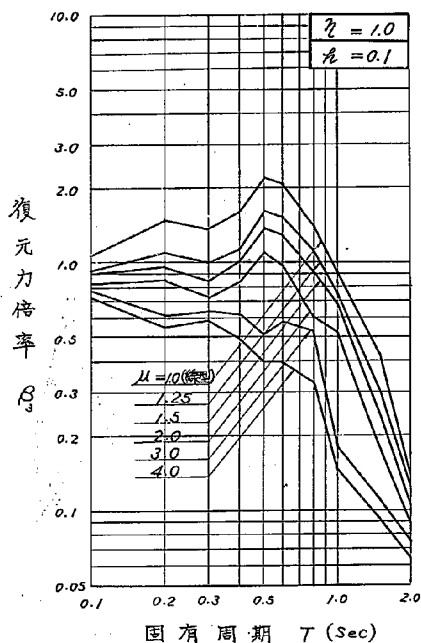


図3-25 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

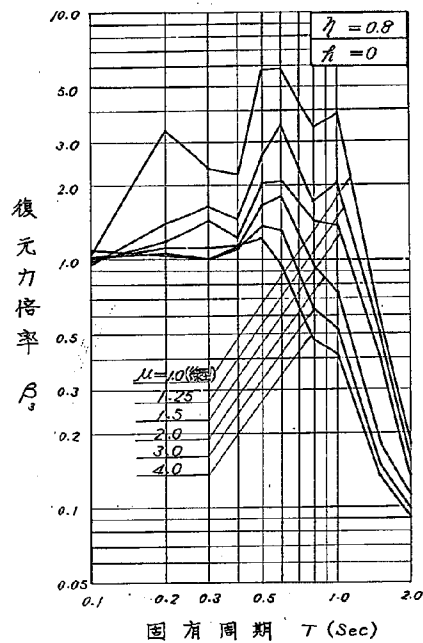


図3-26 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

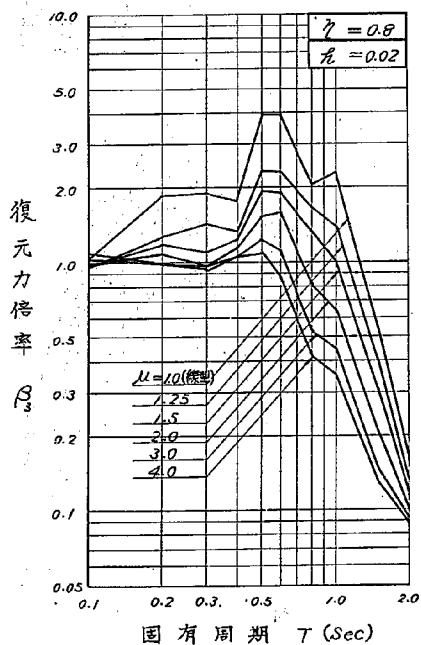


図3-27 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

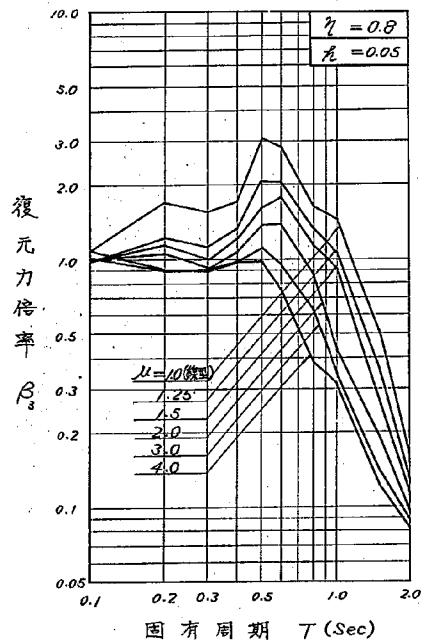


図3-28 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

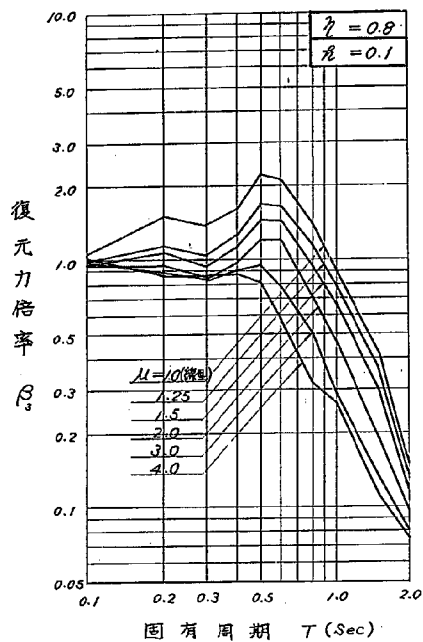


図3-29 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

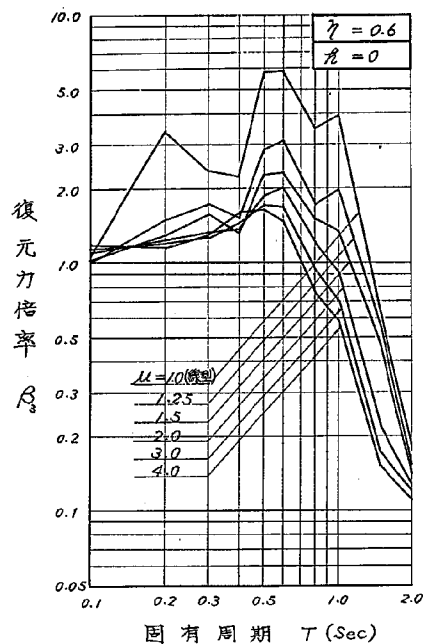


図3-30 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

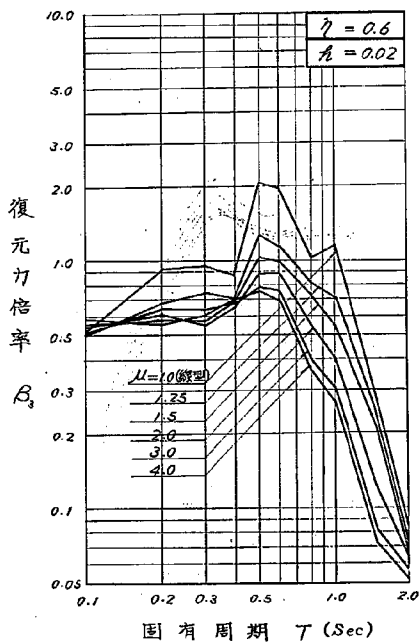


図3-31 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

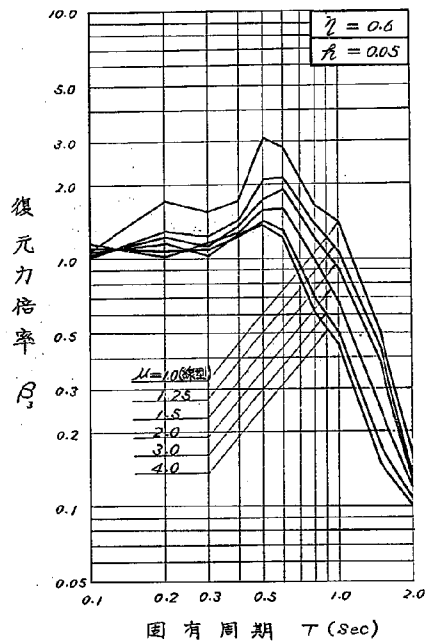


図3-32 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

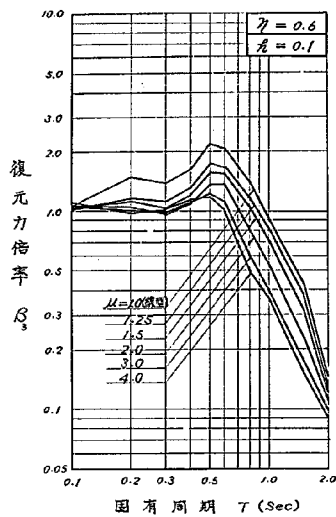


図3-33 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

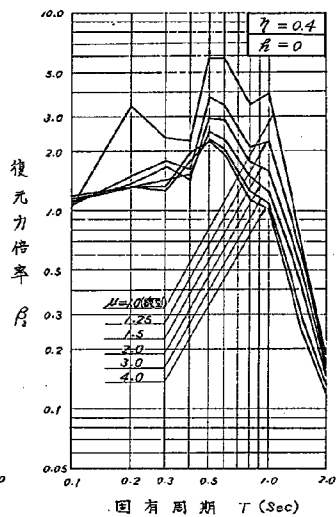


図3-34 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

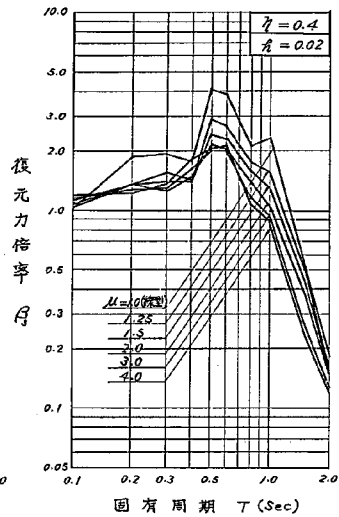


図3-35 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

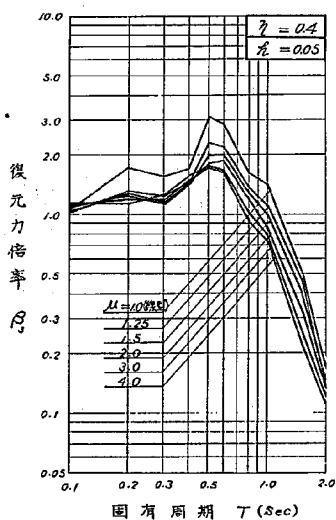


図3-36 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

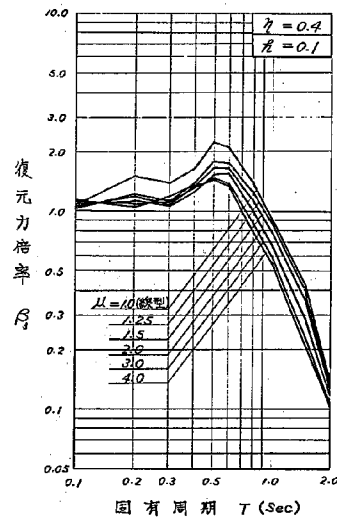


図3-37 バイリニア系復元力倍率
資料番号17 明石N-S成分

2) ダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比 μ/d

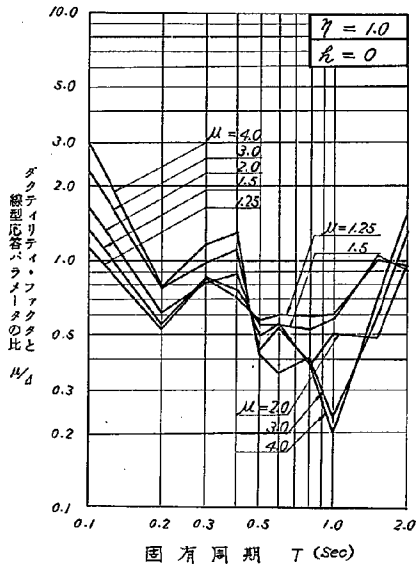


図3-38 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比

資料番号 17 明石 N-S 成分

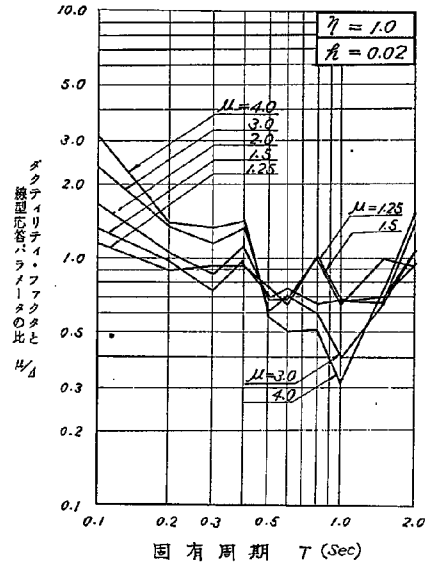


図3-39 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比

資料番号 17 明石 N-S 成分

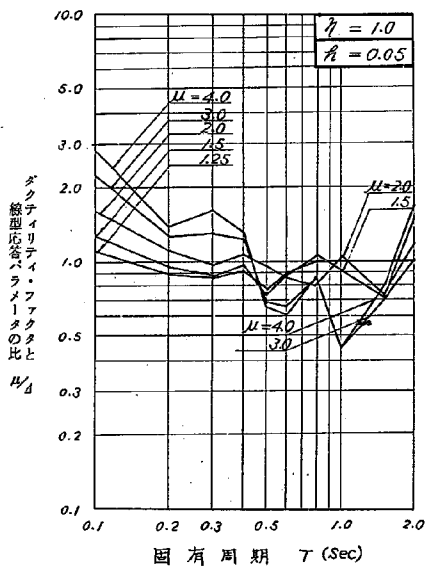


図3-40 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比

資料番号 17 明石 N-S 成分

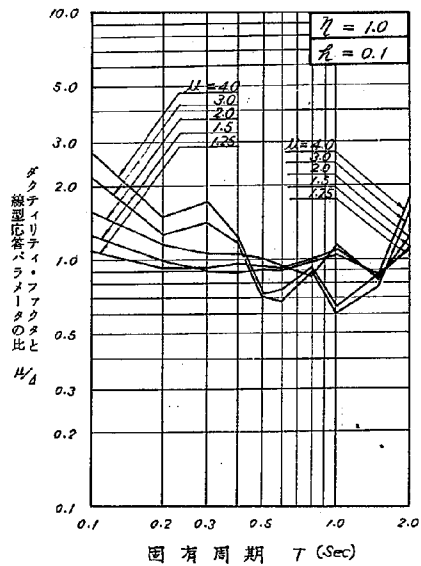


図3-41 バイリニア系のダクティリティ・ファクタと線型応答パラメータの比

資料番号 17 明石 N-S 成分

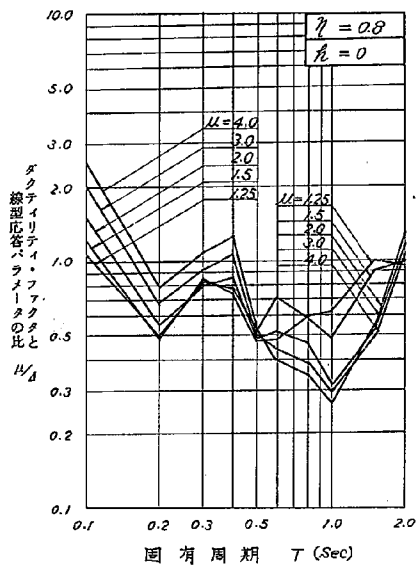


図3-42 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

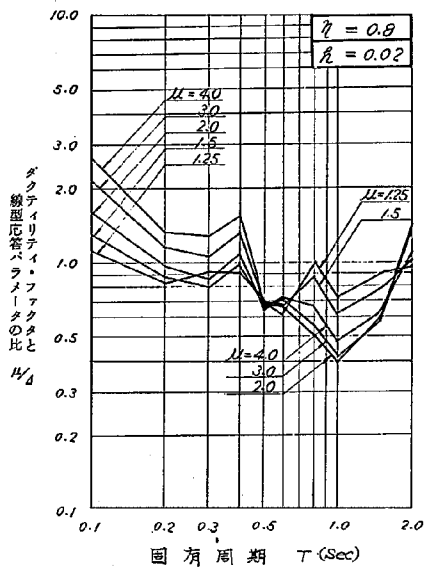


図3-43 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

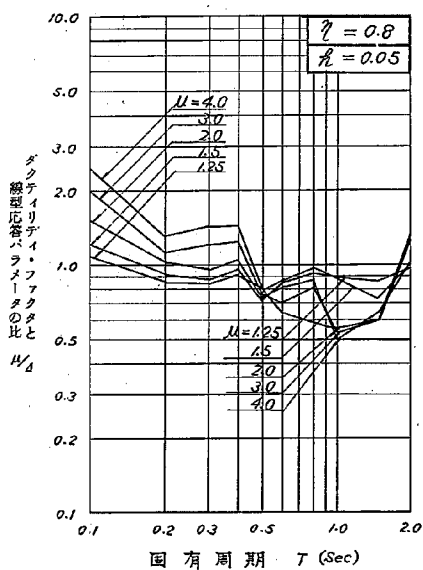


図3-44 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

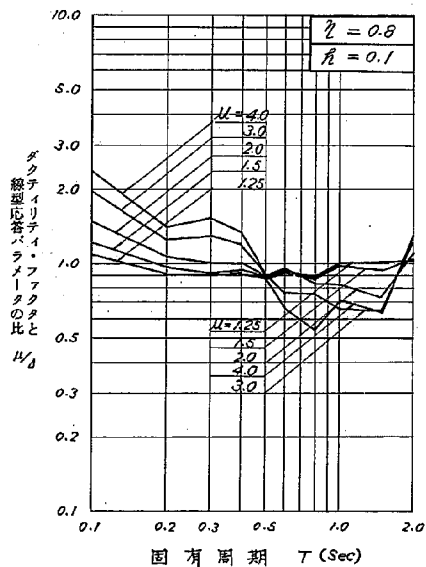


図3-45 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

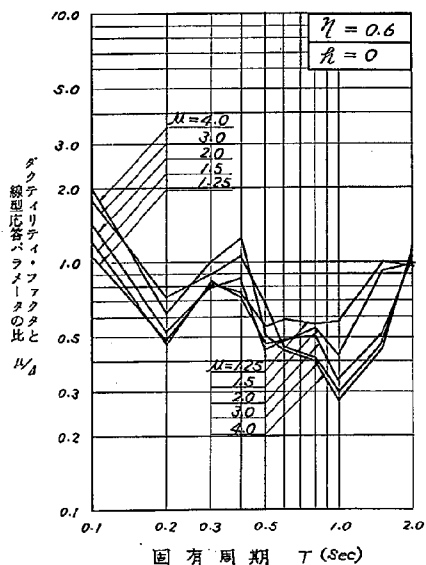


図3-46 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

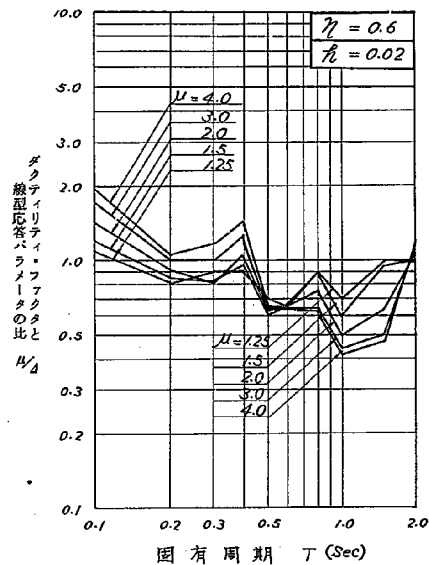


図3-47 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

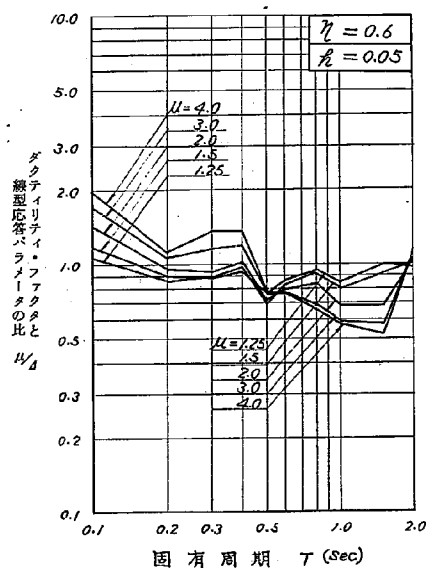


図3-48 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

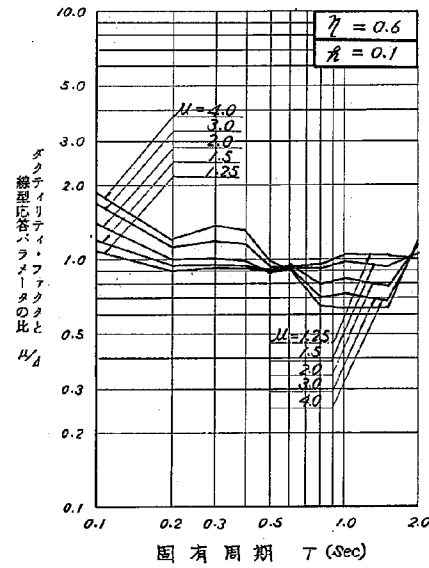


図3-49 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

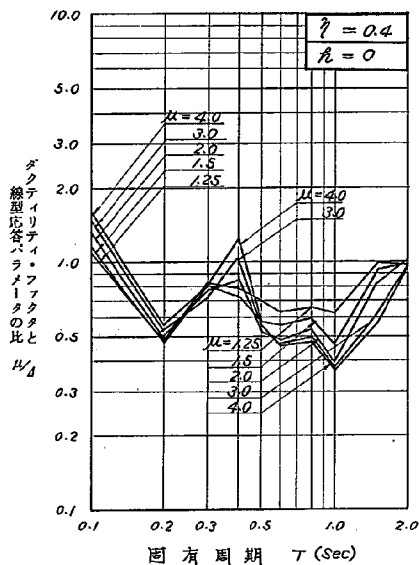


図3-50 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

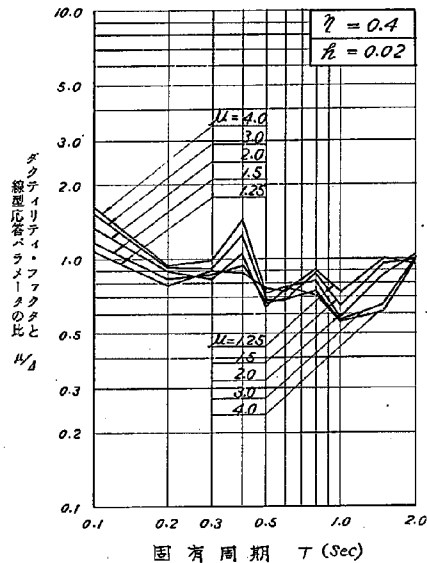


図3-51 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

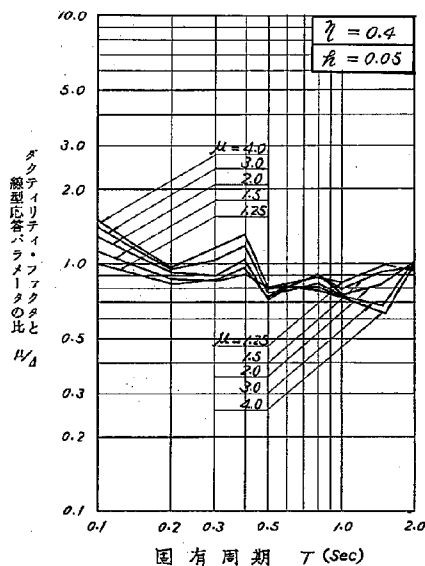


図3-52 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

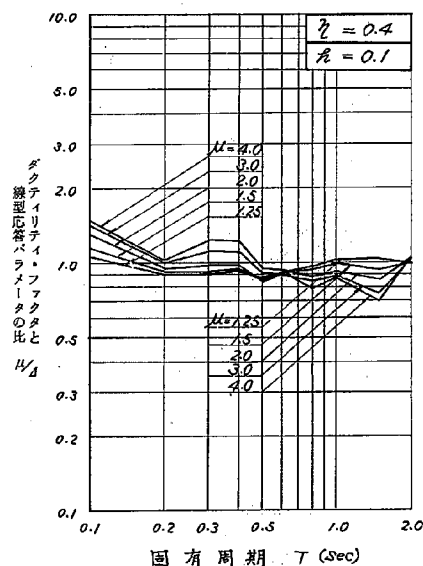


図3-53 バイリニア系のダクティリティ・ファクタ
と線型応答パラメータの比
資料番号 17 明石 N-S 成分

3.2 地震波20成分の平均スペクトル

1) 復元力倍率 β_s

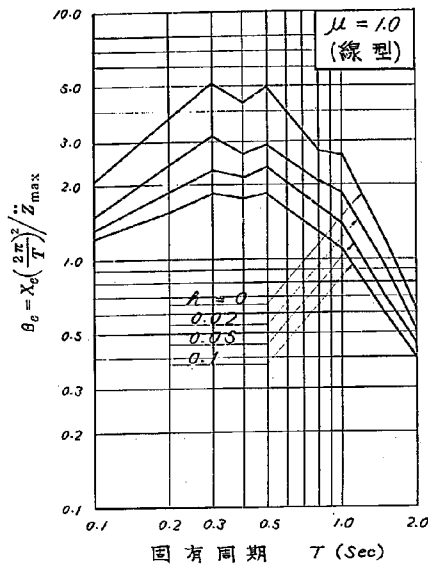


図3-54 線型系の復元力倍率
20成分の平均

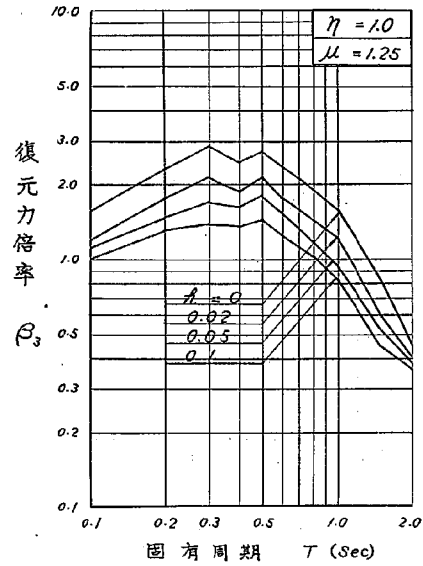


図3-55 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

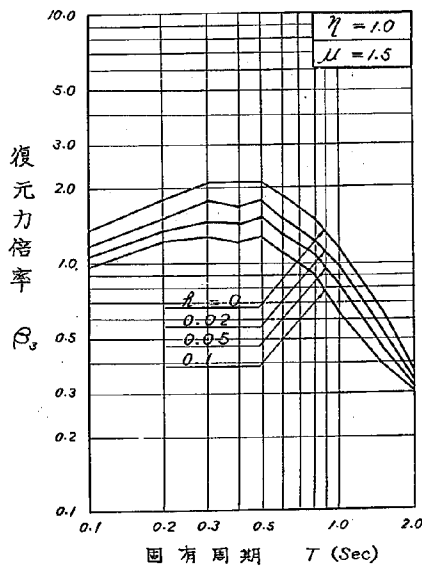


図3-56 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

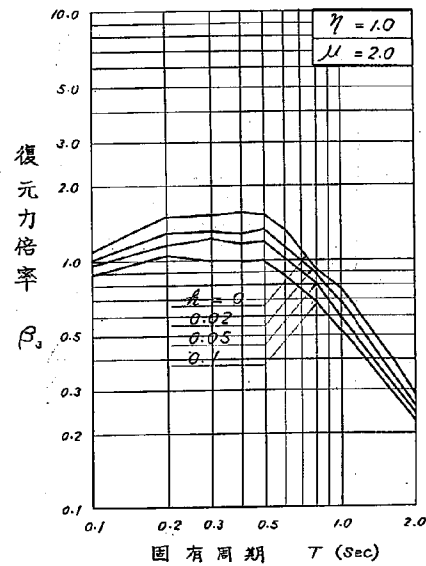


図3-57 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

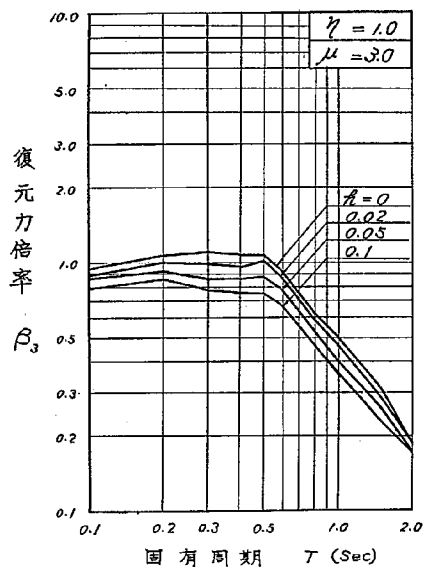


図3-58 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

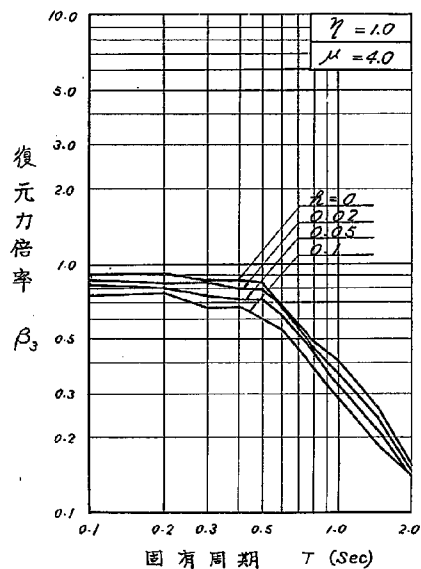


図3-59 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

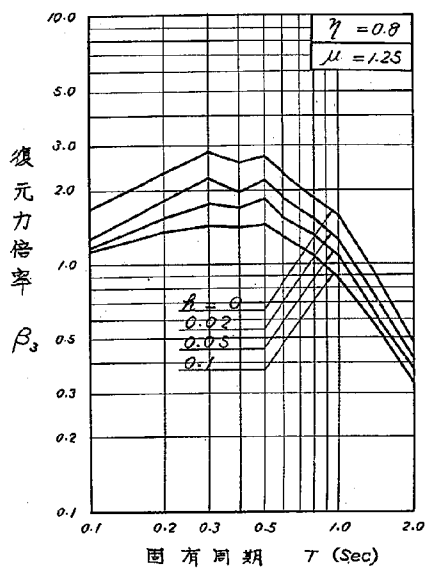


図3-60 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

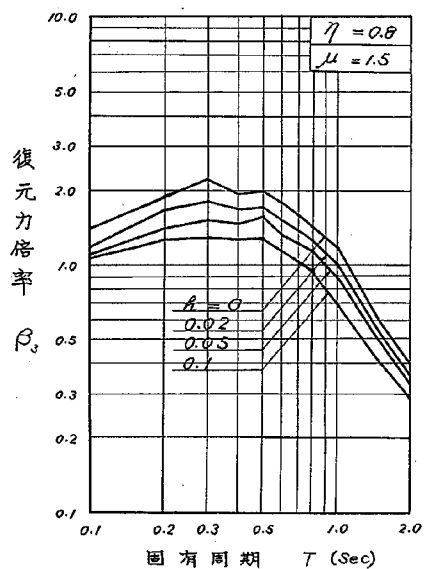


図3-61 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

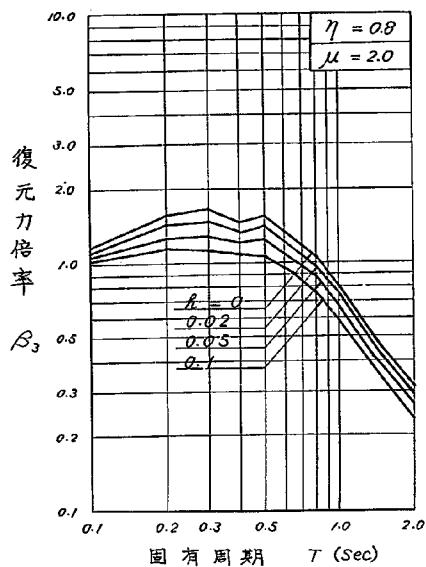


図3-62 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

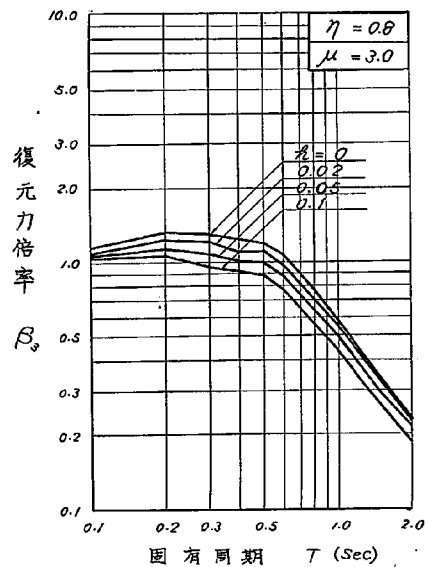


図3-63 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

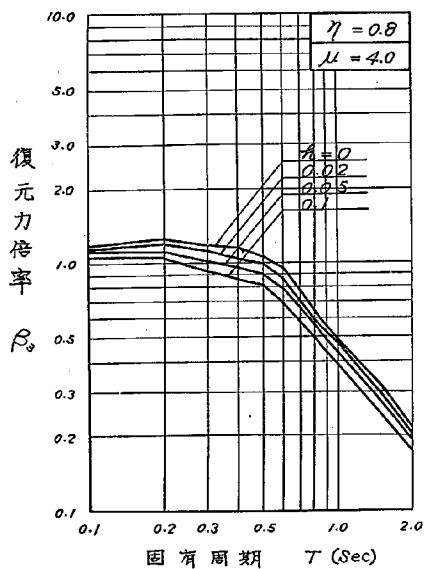


図3-64 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

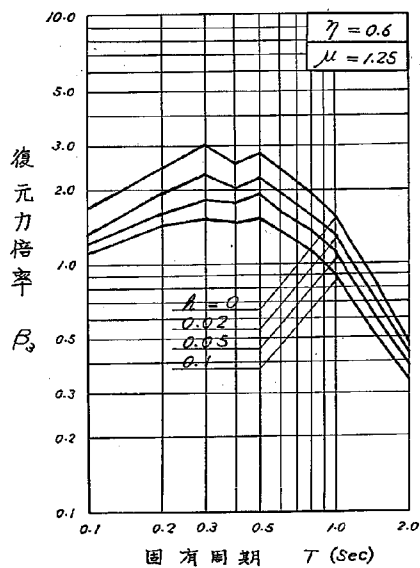


図3-65 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

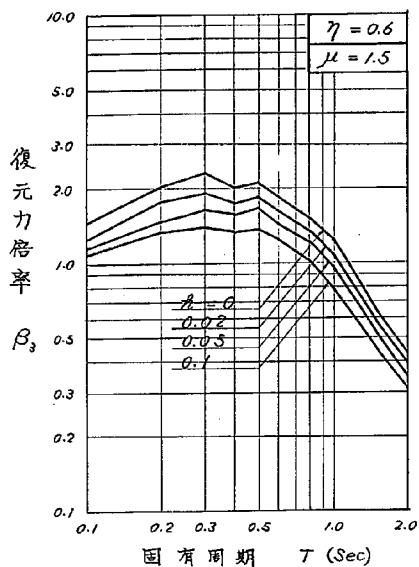


図3-66 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

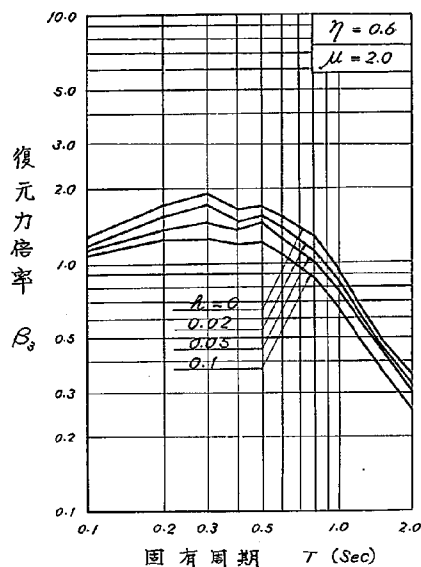


図3-67 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

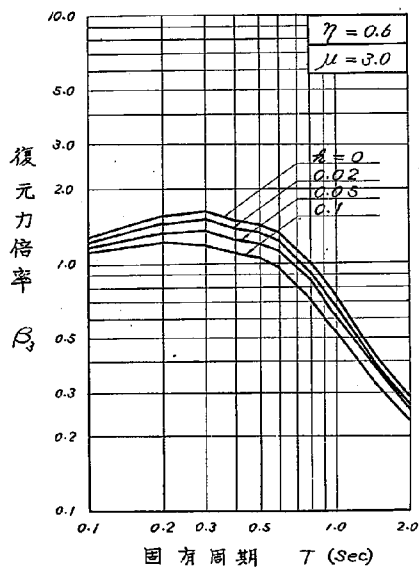


図3-68 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

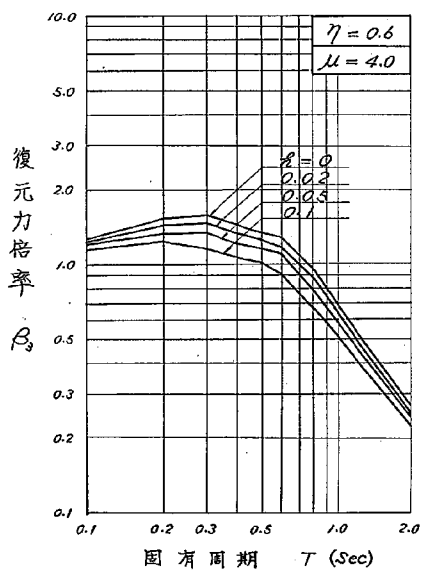


図3-69 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

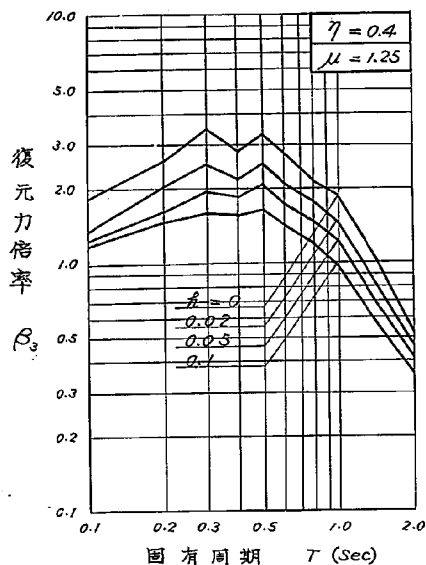


図3-70 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

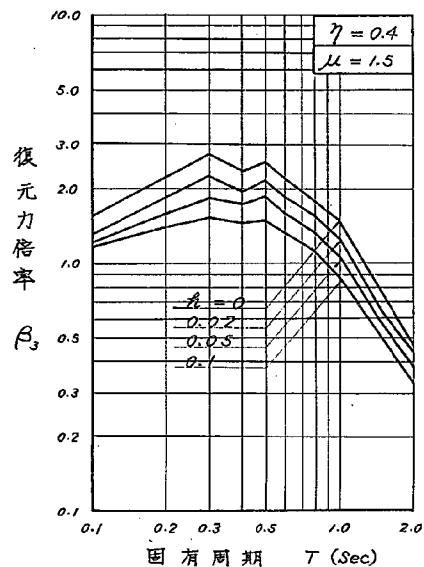


図3-71 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

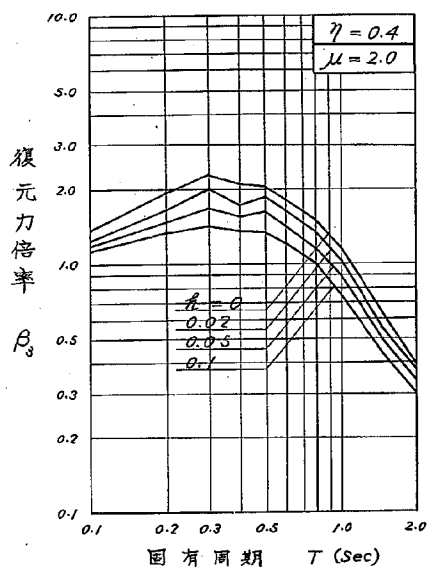


図3-72 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

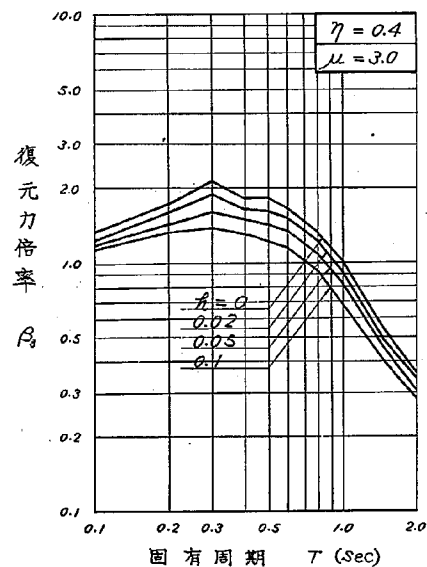


図3-73 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

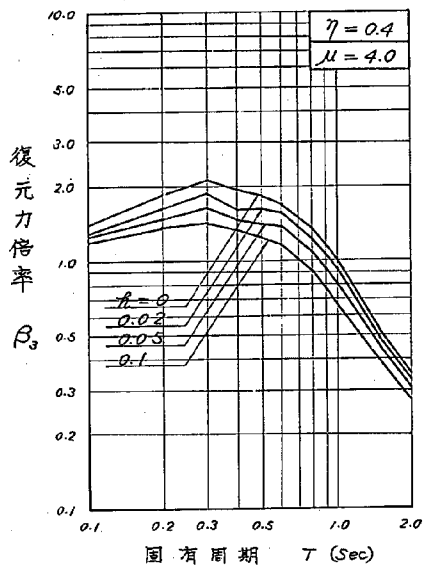


図3-74 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

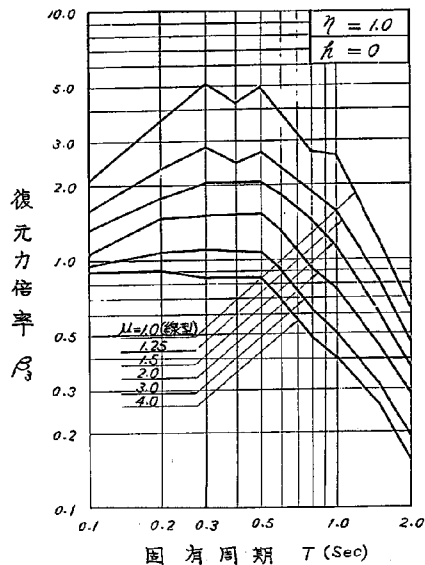


図3-75 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

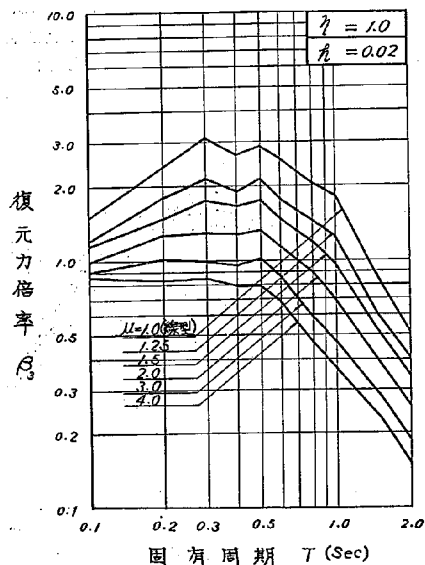


図3-76 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

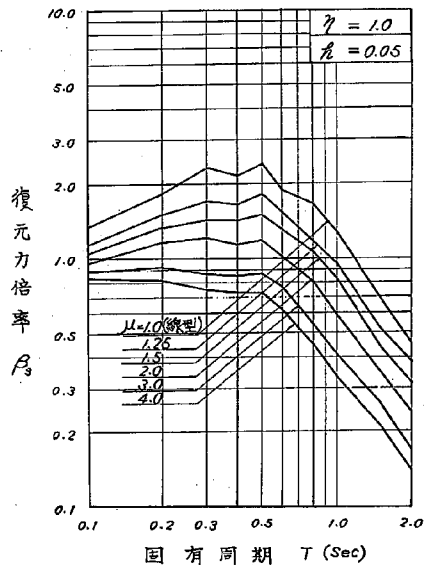


図3-77 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

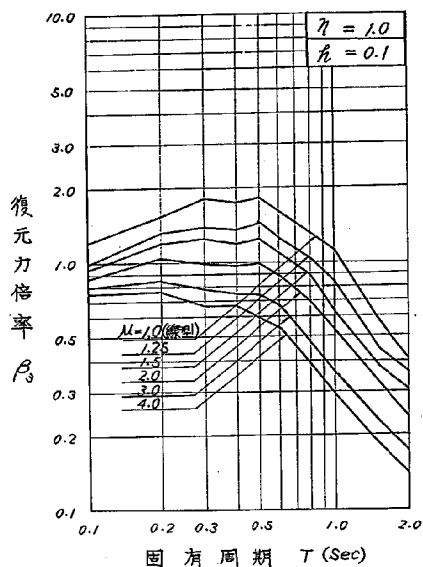


図3-78 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

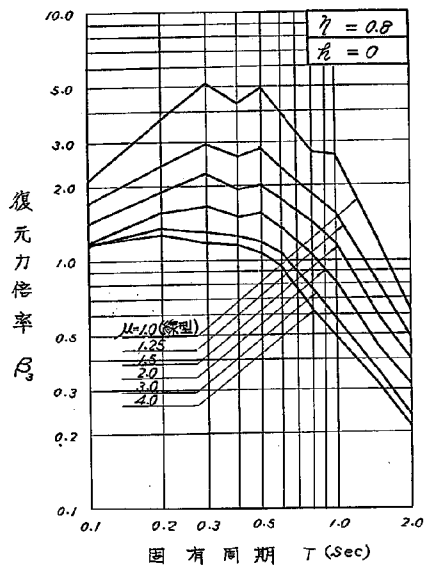


図3-79 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

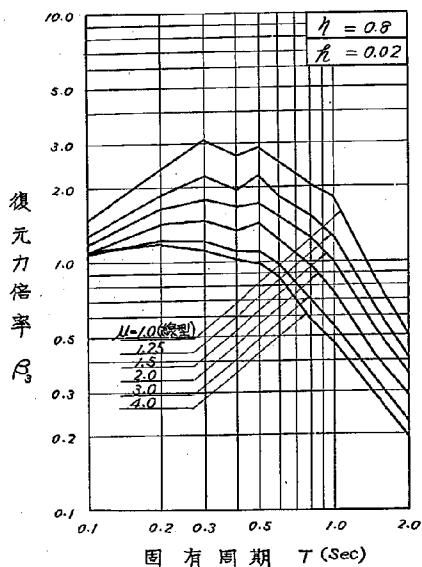


図3-80 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

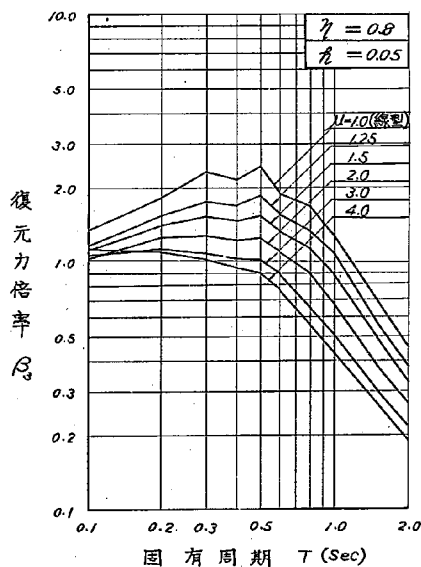


図3-81 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

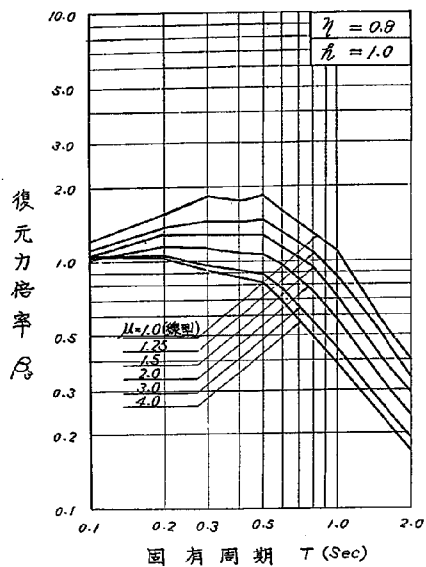


図3-82 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

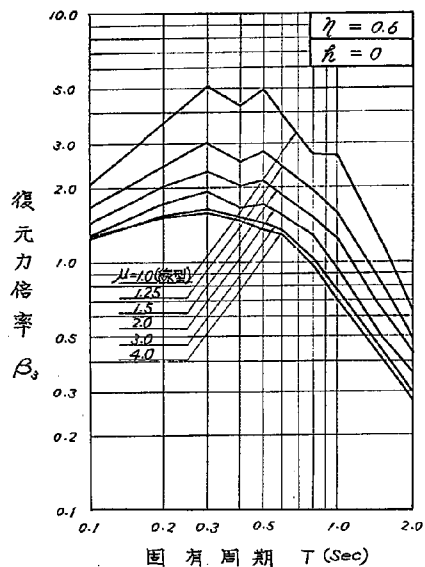


図3-83 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

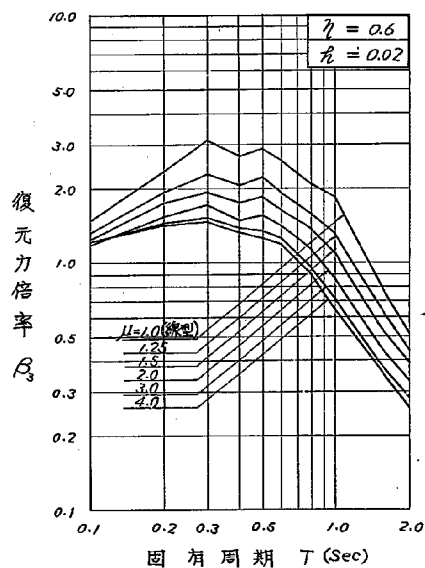


図3-84 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

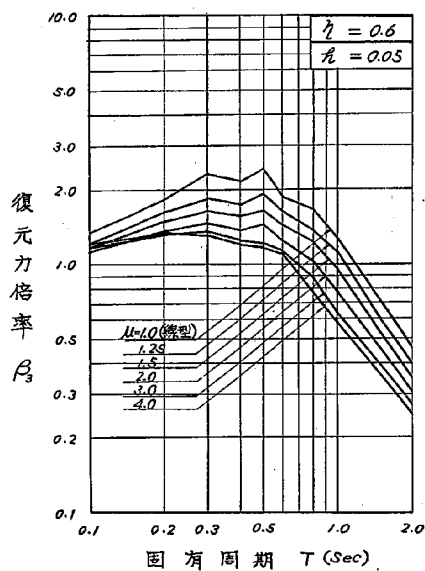


図3-85 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

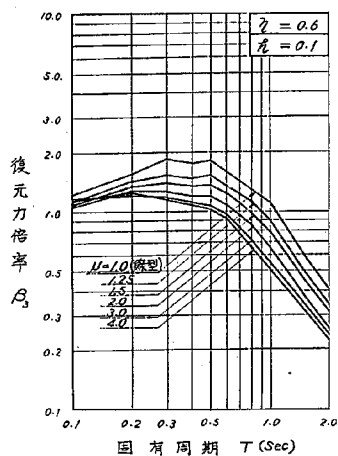


図3-86 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

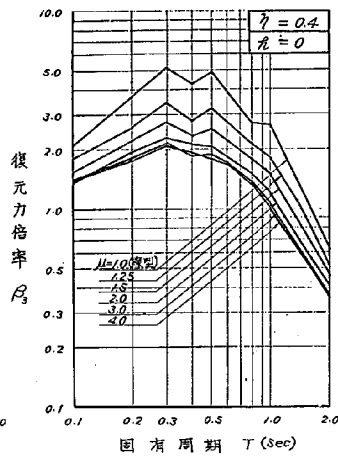


図3-87 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

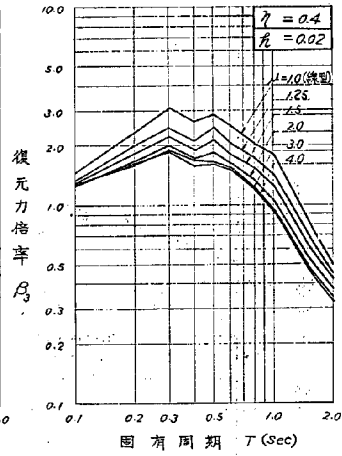


図3-88 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

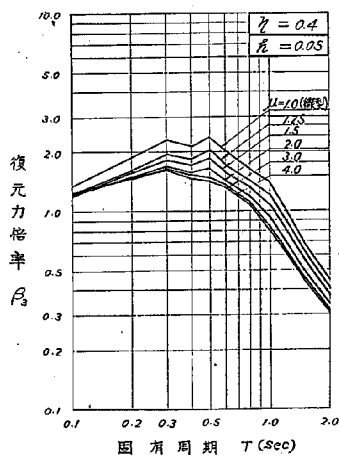


図3-89 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

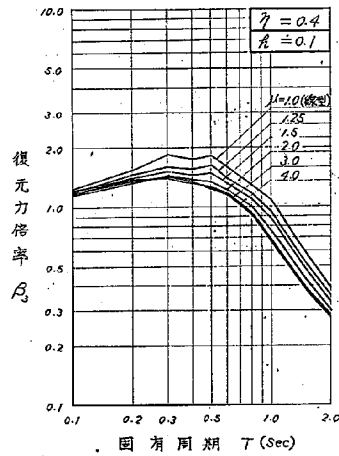


図3-90 バイリニア系復元力倍率
20成分の平均

4. 線型系の応答解析における復元力倍率の地震波20成分と10成分の比較

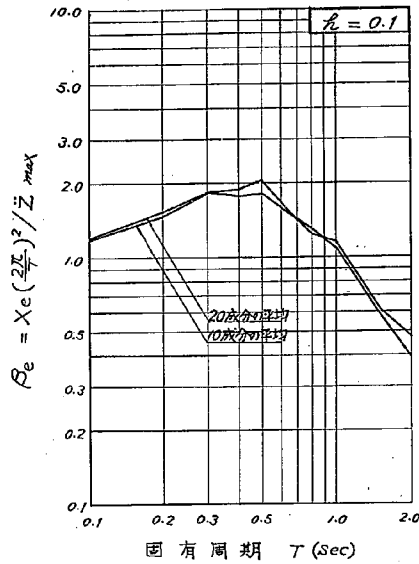


図4-1 線型系の復元力倍率
20成分, 10成分の各平均の比較

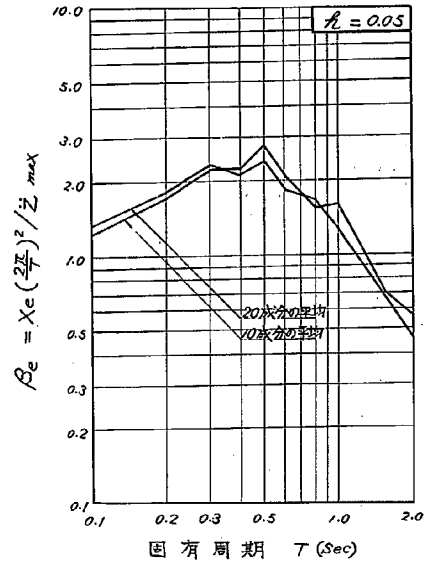


図4-2 線型系の復元力倍率
20成分, 10成分の各平均の比較

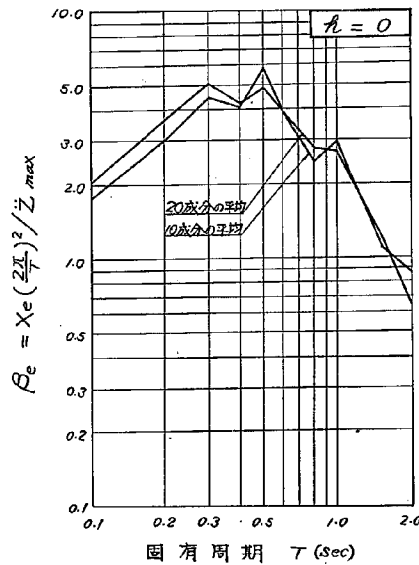


図4-3 線型系の復元力倍率
20成分, 10成分の各平均の比較

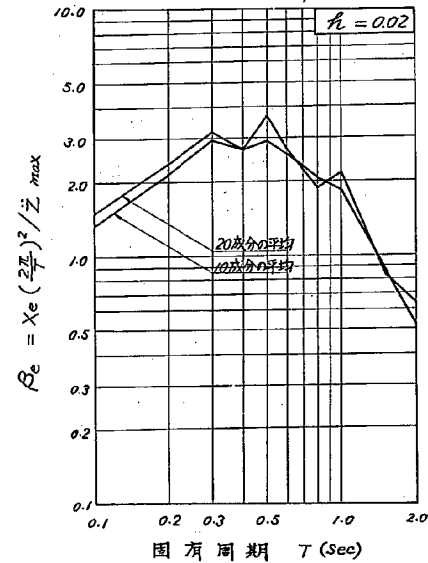


図4-4 線型系の復元力倍率
20成分, 10成分の各平均の比較

5. $\Delta - \mu$ 曲線の一例

$\eta = 1.0$
$\bar{\epsilon} = 0, 0.02, 0.05, 0.1$
$T = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0$

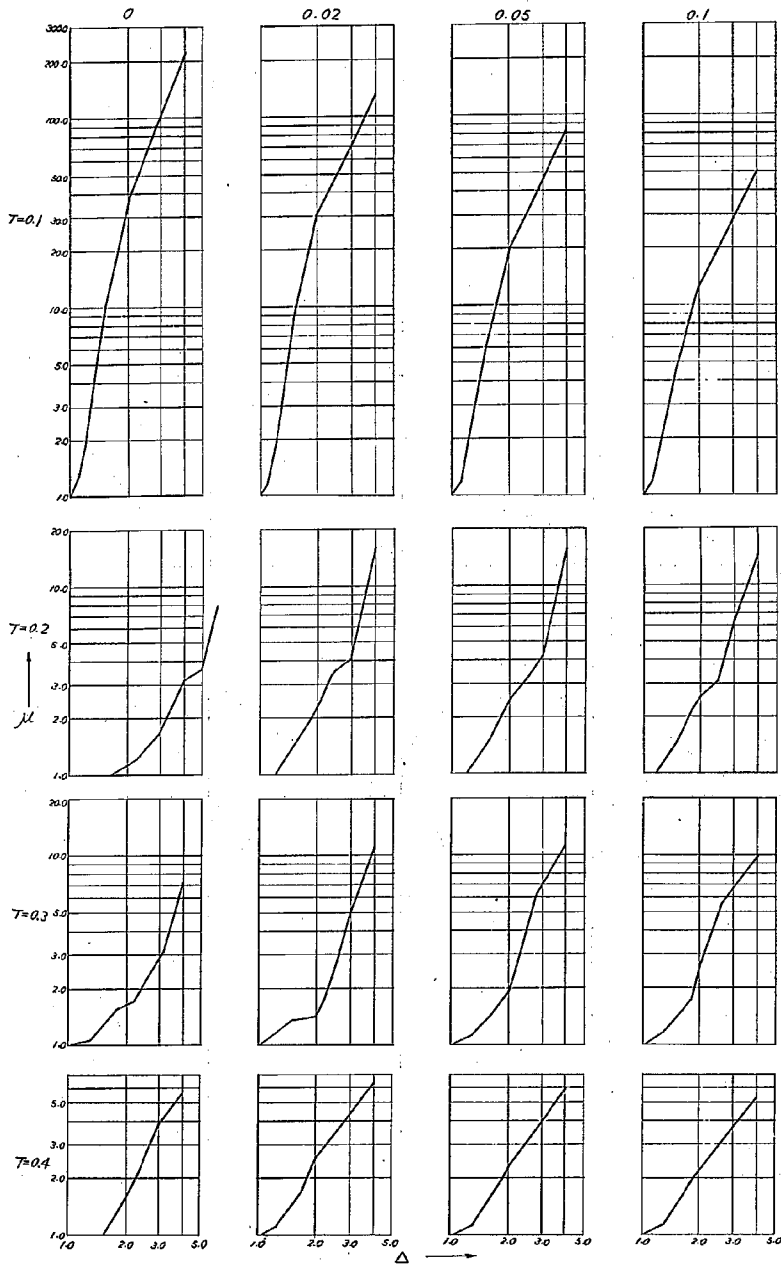


図-5(4) $\Delta - \mu$ 曲線

資料番号 17 明石 N-S 成分

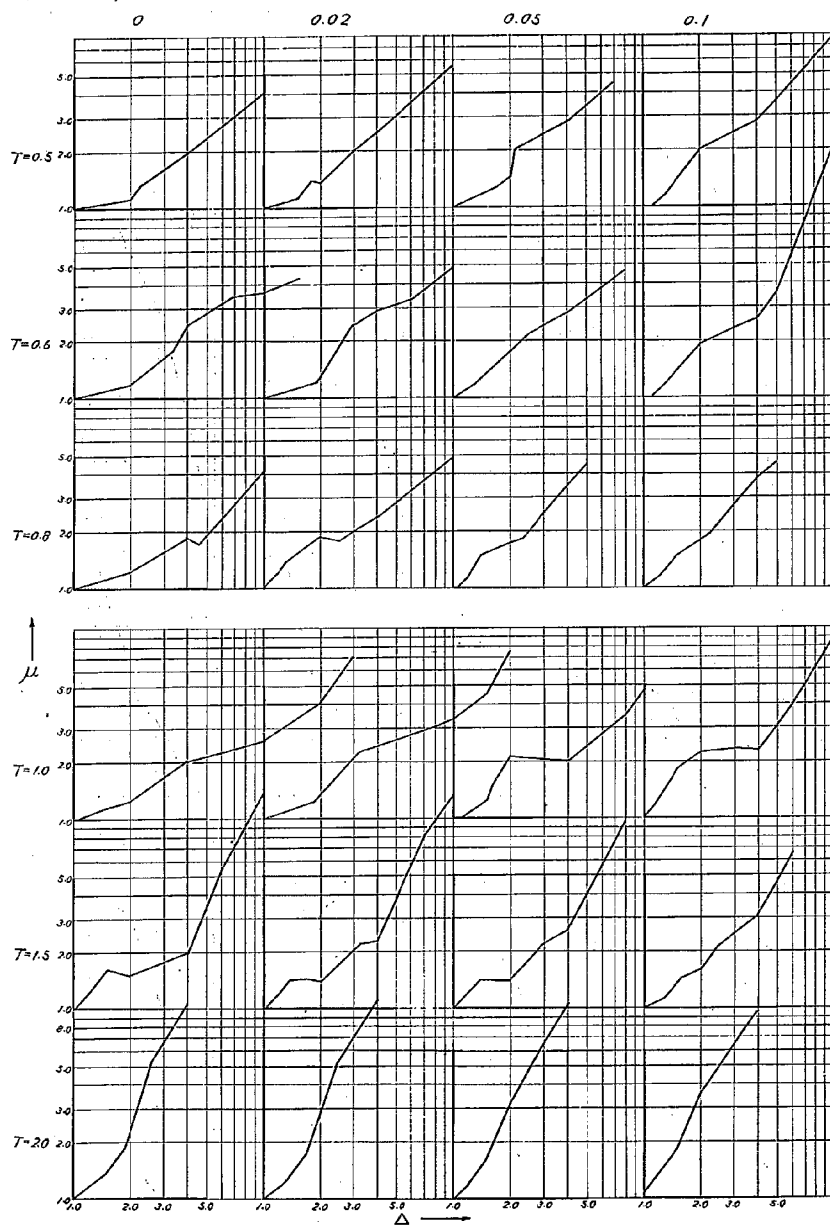


圖-5 (B) $\Delta - \mu$ 曲線

資料番号 17 明石 N-S 成分