

第4章 免震建築物の設計用地震層せん断力係数設定法（案）

4-1 提案の背景

4-1-1 既往の設定法

免震構造物の地震力分布に関しては、既往の基準類および研究として以下のような提案がある。

a. 一定地震力分布（SEAONC1986¹³⁾， UBC91¹⁴⁾ など）

（免震層に対して上部構造が剛体に近い場合・高次モードを無視）

$$F_i = V_b \cdot (m_i / \sum m_j) \quad (4.1-1)$$

ここで、

F_i : 第 i 層に作用する地震力

V_b : 第 1 層（免震層）の地震層せん断力

m_i : 第 i 層の質量

$\sum m_j$: 上部構造（含：免震層直上床）の全質量

第 1 層の地震層せん断力係数を α_b とすると、第 i 層の地震層せん断力係数 α_i は、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= (F_i + F_{i+1} + \dots + F_n) / (m_i + m_{i+1} + \dots + m_n) \\ &= V_b \cdot ((m_i + m_{i+1} + \dots + m_n) / \sum m_j) / (m_i + m_{i+1} + \dots + m_n) \\ &= V_b / \sum m_j \\ &= \alpha_b \end{aligned} \right\} \quad (4.1-2)$$

b. 逆三角形分布（UBC94¹⁴⁾， UBC97¹⁴⁾， FEMA273¹⁵⁾ など）

（上部構造による増幅を考慮，最下階床（免震層の上）の重量を無視）

$$F_i = V_b \cdot (m_i h_i) / \sum (m_j h_j) \quad (4.1-3)$$

ここで、

h_i : 基礎から第 i 層までの高さ

第 i 層の地震層せん断力係数 α_i は

$$\alpha_i = (F_i + F_{i+1} + \dots + F_n) / (m_i + m_{i+1} + \dots + m_n) \quad (4.1-4)$$

SEAONC (the Structural Engineers Association of Northern California) の PSC (Protective Systems Committee) は、基礎レベル（免震層の直上）への集中荷重を加えた次式を提案している¹⁶⁾。

$$F_i = ((V_b - F_b) / R_T) \cdot (m_i h_i) / \sum (m_j h_j) \quad (4.1-5)$$

ここに、 $F_b = (V_b / \sum m_j) \cdot m_i$ F_b : 免震層直上床レベルに作用する地震力

R_T : 上部構造の塑性域におけるじん性を考慮した設計用地震力低減係数

c. 線形免震層に対して高次モードを考慮した分布

i) Lee ら (2001)¹⁷⁾ の方法

Kelly (1999)¹⁸⁾ による 2 自由度系構造物の線形近似解を利用して、多自由度系の地震力として、以

下の式による方法を提案している。

$$F_i = V_b \cdot (m_j (1 + \varepsilon h_i / \alpha h_n)) / \sum (m_j (1 + \varepsilon h_j / \alpha h_n)) \quad (4.1-6)$$

ここに、 $\varepsilon = (\omega_b / \omega_s)^2$ 。また、 ω_b と ω_s は、それぞれ上部構造を剛体とした時の固有角振動数と基礎固定とした時の上部構造の 1 次固有角振動数を表す。 α は有効高さ比でせん断型一様構造物の場合 0.7、 h_n は建物高さを表す。

ii) Tsai ら (2003)¹⁹⁾ の方法

上の Lee らの方法と同様だが上式の α を 1.0 とした形の下式を提案している。

$$F_i = V_b \cdot (m_j (1 + \varepsilon h_i / h_n)) / \sum (m_j (1 + \varepsilon h_j / h_n)) \quad (4.1-7)$$

d. 非線形免震層に対して高次モードを考慮した分布

i) Andriano & Carr (1991)²⁰⁾ の方法

$$F_i = V_b \cdot (m_i h_i^P) / \sum (m_j h_j^P) \quad (4.1-8)$$

ここに、P は係数で、bi-linear 形の復元力特性を持つ免震層の想定した設計変位に対応する 1 ループの履歴面積のそれを囲む四角形の面積で除した面積比 R を用いて(4.1-9)式より求める。

$$P = A + B R \quad (4.1-9)$$

ただし、A、B は、諸パラメータの免震構造モデルに対する非線形地震応答解析結果から求めた回帰係数。せん断型の上部構造モデルで上部構造のみの（基礎固定時）の固有周期が 0.2sec, 0.4sec, 0.8sec の場合の係数は以下のようにになっている。

上部構造の周期	A	B
0.2sec	-0.4352	2.8246
0.4sec	-0.8483	6.7600
0.8sec	-0.4347	8.5817

ii) York & Ryan¹⁶⁾ の方法

地震層せん断力比（上部構造の第 1 層のせん断力と免震層のせん断力の比）を質量比と有効減衰の関数として次式のように表している。

$$V_s / V_b = (M_s / M)^{(1-a\zeta)} \quad (4.1-10)$$

ここに、a は非線形回帰により求めた定数で、a=2.2 である。

$$F_x = C_{vx} V \quad (4.1-11)$$

$$C_{vx} = w_x h_x^k / \sum w_i h_i^k \quad (4.1-12)$$

ここに、V：構造物のベースシア

w_i and w_x ：全有効重量の、レベル i あるいはレベル x における部分

h_i and h_x ：基礎からのレベル i あるいはレベル x までの高さ

ここに k は、時刻歴非線形地震応答解析の結果として回帰された、有効減衰と上部構造の固有周期

T_s との関係より(4.1-13)式で求める。

$$k=13 \zeta T_s \quad (4.1-13)$$

iii) Cardone, Dolce & Gesualdi²¹⁾ の方法

設計用地震層せん断力は(4.1-14)式により求める。

$$F_i = V_b (m_i \Delta_i^*) / \sum (m_j \Delta_j^*) \quad (4.1-14)$$

ここに、 Δ_i^* は 3 次モードまで考慮した変形プロファイルであり式(4.1-15)により求める。

$$\Delta_i^* = \phi_{1i} + a_2 \phi_{2i} + a_3 \phi_{3i} \quad (4.1-15)$$

ϕ_{ji} は免震層の設計変位 D_d に対応する有効剛性 k_{is} に対応する有効周期 T_{is} と上部構造の周期 T_{fb} を用いて(4.1-16)式より求める。

$$\left. \begin{aligned} \phi_{1i} &= \cos((T_{is}/T_{fb}) - 1(1-i/N)(\pi/2)) \\ \phi_{ji} &= \cos((2j-2)(\pi/2)(i/N)) \quad j \geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (4.1-16)$$

また、 a_2 , a_3 は、装置のタイプ別に地震応答解析結果を回帰して求めた係数である。

a_2 は、(4.1-17)式により求める。

$$a_2 = m N L^p (T_{is}/T_{fb})^{(r-q)} \quad (4.1-17)$$

ここに、 m , p , q , r は装置のタイプ別に回帰された係数。

また、 a_3 は、装置のタイプ別に(4.1-18)式および(4.1-19)式で求める。

(LRB/HDRB の場合)

$$a_3 = 0.7 a_2 \quad (4.1-18)$$

(FPB/SB+LDRB の場合)

$$a_3 = a_2 (1-0.5a_2) \quad (4.1-19)$$

iv) 菊地、大澤ら (2004, 2005)^{22),23)} の方法

菊地、大澤らによる検討では、告示 2009 号による設計用地震層せん断力係数は上部建物が長周期になると、地震応答解析よりも危険側に評価されることを指摘し、新たな地震力分布の提案を行っている。

告示 2009 号における設計用地震層せん断力係数は、減衰材による負担せん断力に対する建物高さ方向への増幅を A_i 分布として定めている。著者らは A_i 分布に変わる分布形として、(4.1-20)式に示す A_i' を提案している。

$$A_i' = 1 + k_1(1-\alpha) + k_2 \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} - \alpha \right) + k_3(1-\alpha)^2 \quad (4.1-20)$$

α : 基準化重量

k_1, k_2 : 上部構造の固有周期によるパラメータ

k_3 : 地盤条件によるパラメータ

(4.1-20)式の第 1 項、第 2 項、第 3 項はそれぞれ震度一様分布、震度逆三角形分布、 $\sqrt{\alpha}$ 分布を表し、

第4項は表層地盤の増幅特性の影響を表す項である。

上記の検討におけるパラメータ $k_1 \sim k_3$ は、上部構造の基礎固定時1次固有周期を0.25～2.0秒の範囲で0.25秒刻みに変化させた10階の質点系の時刻歴応答解析結果に基づいて設定されており、入力地震動および地盤についても複数の条件にて検討されたものである。ただし、免震層の特性は、復元力特性を曲線モデルで表した鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰積層ゴムそれぞれ1ケースに対しての場合で検討されたものであるため、免震層がこれらとは異なる履歴形状を有する場合の適用性は不明である。

v) 日本建築学会⁷⁾の方法

日本建築学会の免震構造設計指針では、免震構造の高次振動モードや免震層の非線形復元力特性(バイリニア型モデル)の影響も考慮した、上部構造の地震層せん断力分布を提案している。

上部構造の地震層せん断力係数は、上部構造第1層の水平剛性と免震層のダンパー剛性の比 b_s に応じて、ダンパー分のせん断力の A_i 分布による増幅率 α_i を一定倍(割増率: a)するものとし、時刻歴応答解析の結果より(4.1-21)式の割増率を提案している。

$$\left. \begin{array}{ll} a = 3.1238 - 0.1238b_s & 1 \leq b_s < 10 \\ a = 2.0127 - 0.0127b_s & 10 \leq b_s < 80 \\ a = 1.0 & 80 \leq b_s \end{array} \right\} \quad (4.1-21)$$

また、免震層に粘弾性ダンパーを設置した場合のせん断力分布は、やはり地震応答解析の結果を基に、 A_i 分布を用いればよいとしている。

ここでの検討では、地震層せん断力係数分布形のパラメータにダンパーの影響は考慮されているものの、ダンパーの降伏耐力、免震層と上部構造の等価剛性比(等価周期比)、上部構造の固有周期などの影響は含まれていない。また、ここで割増率 a を求めるのに用いているパラメータ b_s は、上部構造の第1層の剛性とダンパー剛性の比率であり、上部構造の剛性分布が特殊な場合に直接これを用いるのには適切なパラメータではない。また、検討に用いた入力地震動は、観測波や模擬地震動であるが、告示1461号で規定されているもの(告示波)とはやや異なる地震動である。

vi) 小林ら¹¹⁾の方法

小林らによる検討では、日本建築学会免震構造設計指針に記載するダンパー分のせん断力の A_i 分布による増幅率 a_i に代わる新たな増幅率 β_i を提案している。なお、式中の heq はパーセント表示の値である。

$$\beta_i = \left(\frac{\bar{\beta} - 1}{N - 1} \right) i + \frac{N - \bar{\beta}}{N - 1} \quad (4.1-22)$$

$$\bar{\beta} = \frac{s}{I_2} + t \quad (\bar{\beta} > u \text{ の範囲では } \bar{\beta} = u \text{ とする}) \quad (4.1-23)$$

$$s = 0.26heq + 0.29 \quad (s > 5.0 \text{ の範囲では } s = 5.0 \text{ とする}) \quad (4.1-24)$$

$$t = 0.60 \quad (4.1-25)$$

$$u = 0.09heq + 1.28 \quad (u > 3.0 \text{ の範囲では } u = 3.0 \text{ とする}) \quad (4.1-26)$$

上述の s 、 t 、 u は、告示 1461 号で規定されている地震動を用いた時刻歴応答解析による地震層せん断力係数分布の平均的な値を与えるように定められている。免震層の復元力特性がバイリニア型とは異なる場合には、等価則を用いて等価バイリニアに置換することで適用可能である。また、入力地震動に対する地震層せん断力係数分布のばらつきは、免震係数 I の小さい範囲で顕著となる。このばらつきの程度は、 $\bar{\beta}$ の変動係数 CV を免震係数 I に応じて定め、次式の補正式 v を $\bar{\beta}$ に乗じることで評価することができる。

$$CV = \begin{cases} 0.25 & (0 \leq I < 3) \\ -0.06I + 0.43 & (3 \leq I < 6) \\ 0.07 & (6 \leq I) \end{cases} \quad (4.1-27)$$

$$v = \begin{cases} 1 + CV & (\text{平均値} + \sigma) \\ 1 + 2CV & (\text{平均値} + 2\sigma) \end{cases} \quad (4.1-28)$$

また、流体型ダンパーによる地震層せん断力係数の高さ方向への増幅についても、評価できることが確認されている。そのため、履歴型ダンパーと流体型ダンパーを併用した場合には、それぞれの増幅率 ${}_s\beta_i$ および ${}_h\beta_i$ を算定し、告示 2009 号第 6 と同様に各ダンパーの負担せん断力に乗ずることで、上部構造の応答増幅を考慮した設計用地震層せん断力係数分布を求めることができるとしている。

$$\alpha_i = \frac{Q_{iso} \cdot \frac{A_i({}_s\beta_i \cdot {}_sQ_y + {}_h\beta_i \cdot {}_hQ_m) + fQ_m}{{}_sQ_y + {}_hQ_m + fQ_m}}{Mg} \quad (4.1-29)$$

ここで、 ${}_s\beta_i$: 履歴型ダンパーに対する増幅率、 ${}_h\beta_i$: 流体型ダンパーに対する増幅率

e. 告示 2009 号による方法

日本における告示 2009 号第 6 は、免震建築物の構造計算を規定しており、免震構造物に作用する地震力については、免震層と上部構造に作用する地震力に分けて定めている。

免震層に作用する地震力は、地震動のスペクトル特性を考慮し、免震層の復元力特性より上部構造を剛体として算定した等価周期と等価減衰定数より、免震層の変形を求め、これを基に地震層せん断力係数を定めている。

また、上部構造の地震層せん断力係数分布は、上部構造部分での応答増幅の影響を考慮して定めている。即ち、免震層のうち減衰材（ダンパー）およびこれと同等の減衰特性を有する支承材の部分の負担せん断力分に関しては、非免震建物と同じ増幅率（ A_i 分布）を考慮しており、免震層のうち支承材の負担せん断力分に関しては増幅しないものとしている。

この規定の課題としては、以下の 2 点が考えられる。

i) 支承材の負担せん断力分に対しては、上部構造による増幅分を見込んでいないが、これは、上部構造部分が免震層部分と比較して相対的に水平剛性が非常に高い場合に近似的に成立するものであり、

厳密には 1 次振動モードのみを考慮した場合においても増幅される。さらに、高次振動モードを考慮すると増幅程度は大きくなる。

ii) 減衰材の負担せん断力分については、非免震構造物と同等の増幅率 (A_i 分布) が考慮されているが、これは免震構造物の高次振動モードも含めた増幅率とは異なる性質の増幅率である。免震層が線形で減衰が小さく上部構造の固有周期が短い場合には、この規定でも安全側の設計になるが、免震層がバイリニア形のような非線形な特性を有し、この非線形性が強い場合 (等価減衰定数が大の場合) には、高次振動モードによる増幅が大きくなり、この規定では危険側の設定となる可能性がある。

4-1-2 地震層せん断力係数設定上の課題

以上の地震力設定法のうち、a の一定地震力と b の逆三角形分布は、簡便な形だが、a はやや危険側、b は線形の免震層に対してはやや安全すぎる設定になっている。c は高次モードまで考慮した式ではあるが、実免震システムの特性は非線形である場合が一般的であることを考えると、適用範囲が限られる。また、d の i) ~ v) については、非線形特性を有する免震構造物について、免震層と上部構造を合わせた全体系における、高次の振動モードの影響を考慮した場合の上部構造の地震力分布に関する設定法を検討している。いずれも、基本的には非線形地震応答解析結果を基に、回帰分析などを交えて設定する方法である。従って、考慮する建物や免震部材の変形特性、入力地震動の特性などにより異なる結果となる。

また、いずれも上部構造の固有周期が免震周期と比較して相対的に短い場合を想定したせん断力分布形を考えているため、上部構造が高層化・長周期化した場合や、免震層の非線形性が強くなった場合には、危険側の設定になる可能性もある。

次項では、上部構造の高次の振動モードも考慮した地震層せん断力係数分布の設定法として、既往の検討結果なども参考にして、高次モードによる上部構造での地震層せん断力係数の増幅率に着目した上で、3-3 節に示した地震応答解析結果を用いて設定する。

3 章の結果や既往の検討結果によると、バイリニア形復元力特性の免震層に対する上部構造の地震層せん断力係数については、上部構造の周期が免震周期よりも相対的に長い場合、免震層のバイリニア形復元力の初期剛性が高い場合、降伏耐力が高い場合、免震層の応答変形に対応する等価減衰定数あるいは非線形係数が大きい場合、などには、高次モード成分が多くなり、告示 2009 号による値よりも地震層せん断力が大きくなる可能性がある。

具体的には、免震層のパラメータのうち、免震層の応答最大変形に基づく等価周期 T_{eq} 、初期剛性に対応する周期 (上部構造が剛体時) T_1 、非線形係数 NL 、上部構造の基礎固定時 1 次固有周期 T_0 の 4 つを考慮する。これらのパラメータと告示 2009 号の方法による免震層の変形算定とを組み合わせることで上部構造の地震層せん断力係数分布を求める。また、同時に、告示 2009 号による地震層せん断力係数の割り増し係数 α を規定する方法についても提案する。

4-2 地震層せん断力係数設定法の提案

4-2-1 設定法の基本的な考え方

3-3 節の地震応答解析の結果より、上部構造の地震層せん断力係数の増幅率および地震層せん断力係数比（時刻歴応答解析結果の地震層せん断力係数を告示 2009 号第 6 により算出した結果で除した値）は、解析パラメータによってばらつく値となることがわかった。また、この要因は、3-4 節の解析結果の分析や前節の既往知見より、解析パラメータの違いによる免震建築物の高次モードの励起特性の違いによるものである。本節では、上記の知見を加味しうる地震層せん断力係数の設定法を提案する。本研究における上部構造の地震層せん断力係数の基本的な考え方は、下記の 2 つである。

1) 上部構造の地震層せん断力係数は、告示 2009 号で求めた地震層せん断力係数に対して、免震建築物の解析パラメータに応じて割増率として設定する。

2) 上部構造の地震層せん断力係数は、解析パラメータの値に応じて設定する。

手法 1) は、告示 2009 号による地震層せん断力分布算出法に則り、上部構造の地震層せん断力係数の増幅は免震層の減衰材が負担する地震層せん断力分に対してのみ考えるものとするが、本手法では、上記の知見を考慮し割増率 α を乗じる。

一方、手法 2) では、上部構造の地震層せん断力係数の算出に際し、告示 2009 号による手法を用いない。免震層の地震層せん断力係数に対しての上部構造に対する増幅率 β が、解析パラメータの値に応じて算出される。各層の増幅率 β を求め、これと免震層の地震層せん断力係数 C_0 を乗じることで各層の地震層せん断力係数が求まる。

これらの手法では、割増率 α 、増幅率 β が地震層せん断力係数の設定において非常に重要な値となる。これらの値に依存する解析パラメータは、次節に示す。

4-2-2 地震層せん断力係数設定法 1, 2, 3

3-3 の地震応答解析結果と 4-1 の情報を基に、免震構造物の上部構造の地震層せん断力係数の設定法として以下の 3 つを提案する。本節で示す設定法 1 は前節の手法 1) に基づく。一方、設定法 2 および 3 は前節の手法 2) に基づいたものである。

a. 地震層せん断力係数設定法 1

i) 免震層の復元力特性と上部構造モデルを仮定する。

ii) $T_0 = \xi h$ (h : 建物高さ、RC 造の場合 $\xi = 0.02$ 、S 造の場合 $\xi = 0.03$) により T_0 を求める。

iii) 告示 2009 号により免震層の変形と各層のせん断力係数を求める。

iv) i) ~ iii) より $T_{eq}/T_0, T_1/T_0$ を求める。

v) $T_{eq}/T_0, T_1/T_0$ より、告示 2009 号による地震層せん断力係数の割増率 α を求める。(図は中間階で折れる 2 直線で表しているが、今回の検討では免震層（最下層）と最上階を直線で結ぶ形としている。)

ここに最上階における α ($= \alpha_v$) は 3-4 節での回帰結果を基に以下の式(4.2-1~4)で求めるものとする。

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 1.61 + 0.31 (T_{eq}/T_0) \quad (4.2-1)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 1.60 + 0.19 (T_{eq}/T_0) \quad (4.2-2)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 1.33 + 0.084 (T_{eq}/T_0) \quad (4.2-3)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 0.94 + 0.018 (T_{eq}/T_0) \quad (4.2-4)$$

vi) 設計構造断面を用いた骨組モデルに対する固有値解析、あるいは略算法により T_0 を求める。この T_0 が ii) の T_0 と大きく異なる場合には、ii) の T_0 を変えて、地震層せん断力係数を設定し直す。

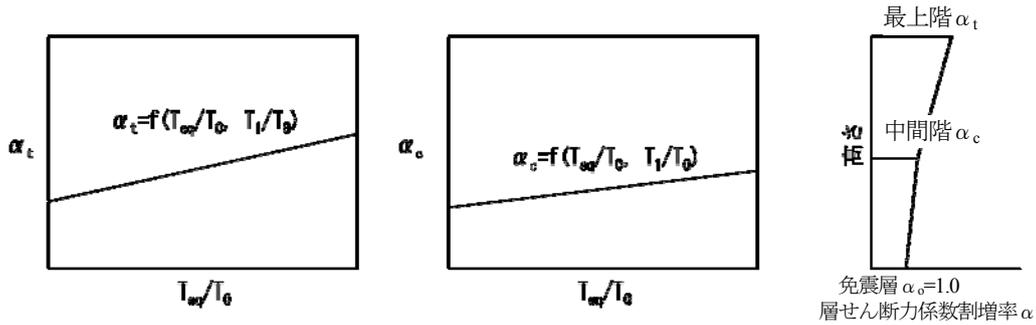


図 4.2-1 設定法 1 の最上階割増率 α_t と中間階割増率 α_c

b. 地震層せん断力係数設定法 2

i) ~ ii) は設定法 1 と同じ。

iii) 告示 2009 号により免震層（最下層）の変形とせん断力係数を求める。

iv) i) ~ iii) より T_1/T_0 と非線形係数 NL（図 2.2.4-1 による。）を求める。

v) T_1/T_0 と NL より、上部構造における地震層せん断力係数増幅率 β を求める。（図は中間階で折れる 2 直線で表しているが、今回の検討では免震層と最上階を直線で結ぶ形としている。）

ここに最上階における β ($= \beta_t$) は、3-4 節での回帰結果を基に (4.2-5~8) 式で求めるものとする。

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、} \quad \beta_t = 2.19 + 3.95 NL \quad (4.2-5)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \beta_t = 2.31 + 3.34 NL \quad (4.2-6)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、} \quad \beta_t = 1.66 + 2.58 NL \quad (4.2-7)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、} \quad \beta_t = 1.04 + 1.59 NL \quad (4.2-8)$$

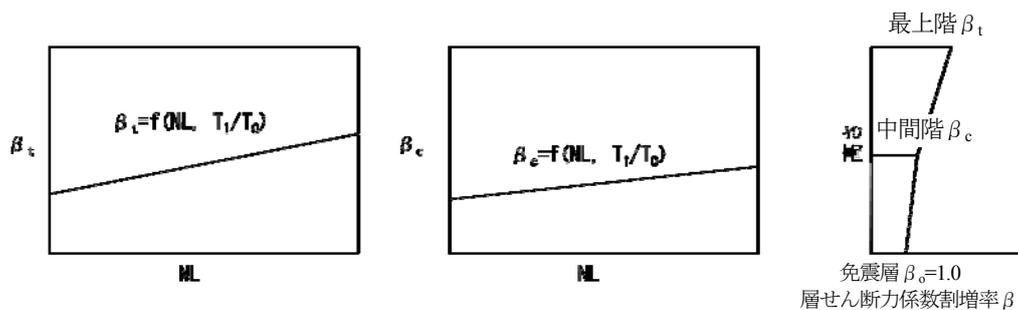


図 4.2-2 設定法 2 の最上階増幅率 β_t と中間階増幅率 β_c

vi) 設定法1のvi)と同じ。

c. 地震層せん断力係数設定法3

i) ~iii) は設定法2と同じ。

iv) i) ~iii) より非線形係数 NL を求める。

v) T_0 と NL より、上部構造における地震層せん断力係数増幅率 β を求める。(図は中間階で折れる2直線で表しているが、今回の検討では免震層と最上階を直線で結ぶ形としている。)

ここに最上階における β ($=\beta_t$) は3-4節での回帰結果を基に式(4-2-9~11)で求めるものとする。

$$0 < T_0 \leq 0.75 \text{ の時、} \quad \beta_t = 1.32 + 3.87 \text{ NL} \quad (4-2-9)$$

$$0.75 < T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \beta_t = 1.93 + 4.41 \text{ NL} \quad (4-2-10)$$

$$1.5 < T_0 \leq 2.0 \text{ の時、} \quad \beta_t = 2.21 + 4.51 \text{ NL} \quad (4-2-11)$$

vi) 設定法1のiv)と同じ。

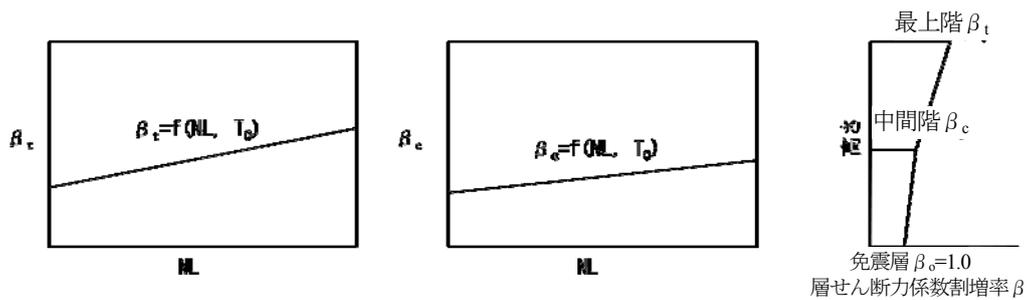


図 4.2-2 設定法3の最上階増幅率 β_t と中間階増幅率 β_c

4-3 提案手法と応答解析の比較

4-3-1 設定法1に対する検討

a. 第2種地盤（短）の入力地震動に対する検討

上部構造の最上階の地震層せん断力係数を、告示2009号による地震層せん断力係数に割増率 α_t を乗じて求めるものであり、 α_t を図3.4-5に示す回帰式((4.3-1)~(4.3-4)式)により求めた場合について検討する。

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 1.61 + 0.31 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-1)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 1.60 + 0.19 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-2)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 1.33 + 0.084 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-3)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、} \quad \alpha_t = 0.94 + 0.018 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-4)$$

設定法1にて求めた地震層せん断力係数と地震応答解析結果との比較を図4.3-1および図4.3-2に示す。検討建物モデルは7層および14層である。これらの左図の縦軸は告示2009号による地震層せん断力係数の設定法1による割増前の値、右図の縦軸は割増後の値である。各階の地震層せん断力係数の割増率は免震層と最上階とで直線的に変化するものとしている。

図4.3-1において免震層の変形は、時刻歴応答解析の免震層最大変形としたものである。図4.3-1より設定法1による割増後の地震層せん断力係数は応答解析結果によく対応していることがわかる。

図4.3-2において免震層の変形は、告示2009号による等価線形化手法による応答スペクトルを用いる方法にて算出した。これによると、提案手法による値はややばらつきは大きいものの、応答解析結果よりは全体としては安全側の設定になっていることがわかる。このばらつきの要因には免震層の応答変形の告示2009号による設定と応答解析値との対応がばらついていることも含まれている。

b. 第1種地盤と第2種地盤（長）の入力地震動との対応に関する検討

a. で用いた補正係数を第1種地盤と第2種地盤（長）の入力地震動による場合にも適用した場合の検討を行う。

図4.3-3、図4.3-4は、第1種地盤の入力地震動に対して図4.3-1、図4.3-2に対応する関係をプロットした図である。

また、図4.3-5、図4.3-6は、第2種地盤（長）の入力地震動に対して、同様に図4.3-1、図4.3-2に対応する関係をプロットした図である。

以上の図より、補正された地震層せん断力係数と応答解析結果との対応にはばらつきが大きくなっているものの、全体的には安全側の方向にばらついているといえる。ただし、ばらつきを少なくするために、地盤種別を卓越周期などで細分化した場合の補正式を用いる方法も考えられる。

例えば、第1種地盤入力に対して、

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 1.18 + 0.38 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-5)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 1.19 + 0.24 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-6)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 1.19 + 0.067 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-7)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 1.03 + 0.011 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-8)$$

第2種地盤のうち比較的長周期成分の卓越する入力に対しては、第2種地盤（長）の結果を用いて、

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 1.56 + 0.17 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-9)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 1.59 + 0.11 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-10)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 1.05 + 0.092 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-11)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、} \quad \alpha_{\tau} = 0.645 + 0.072 (T_{eq}/T_0) \quad (4.3-12)$$

とすることなどが考えられる。

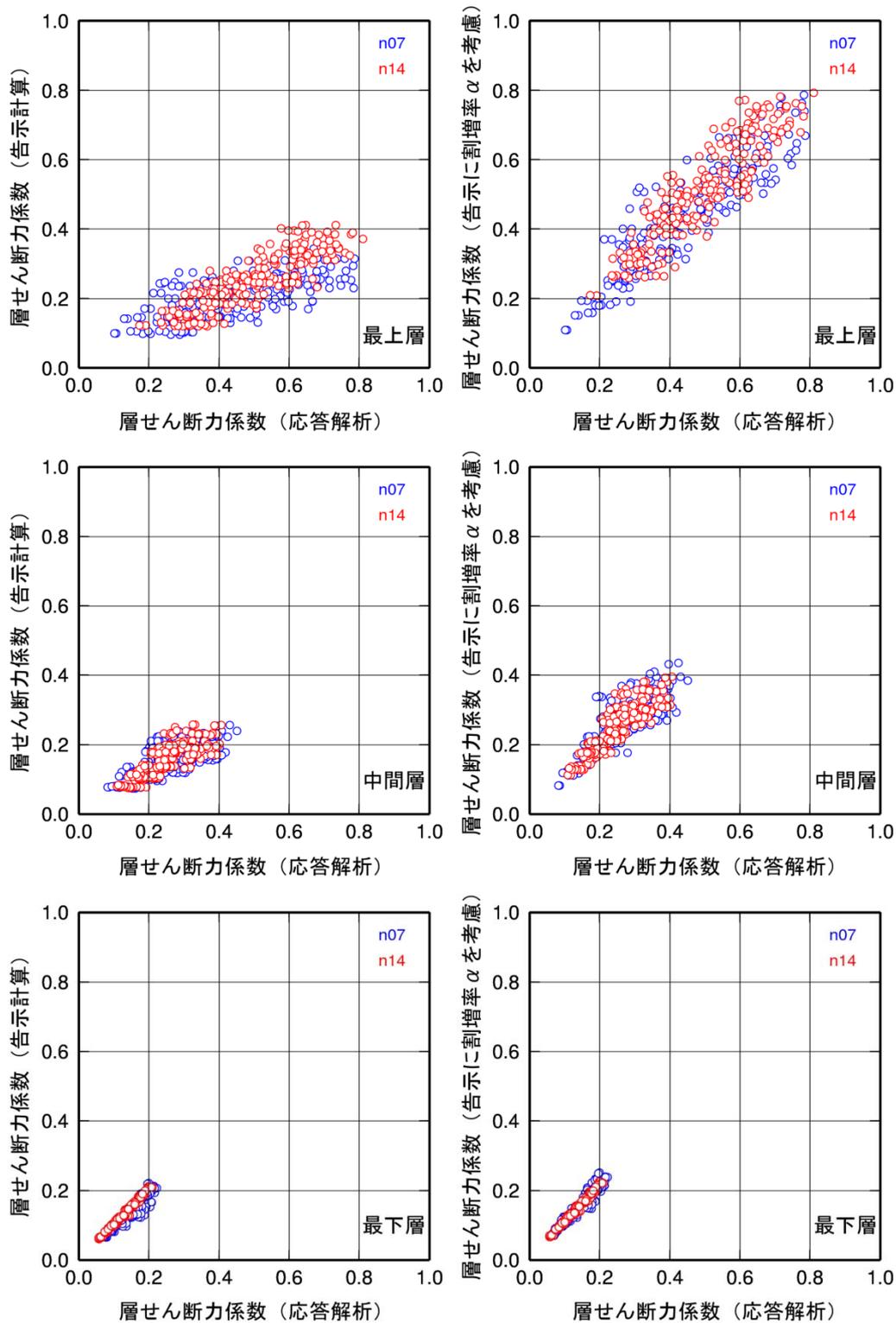


図 4.3-1 応答解析及び告示 2009 号による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

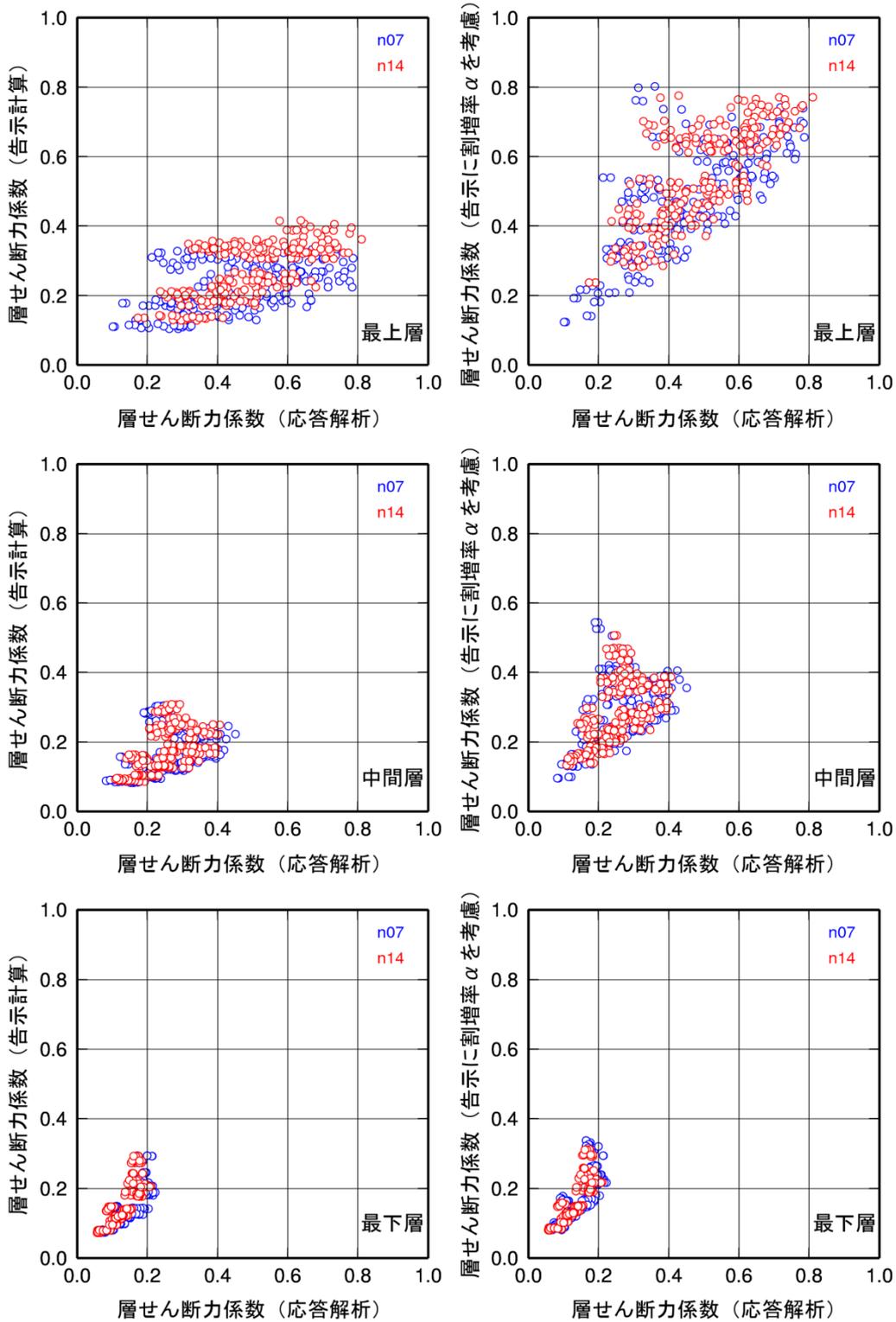


図 4.3-2 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

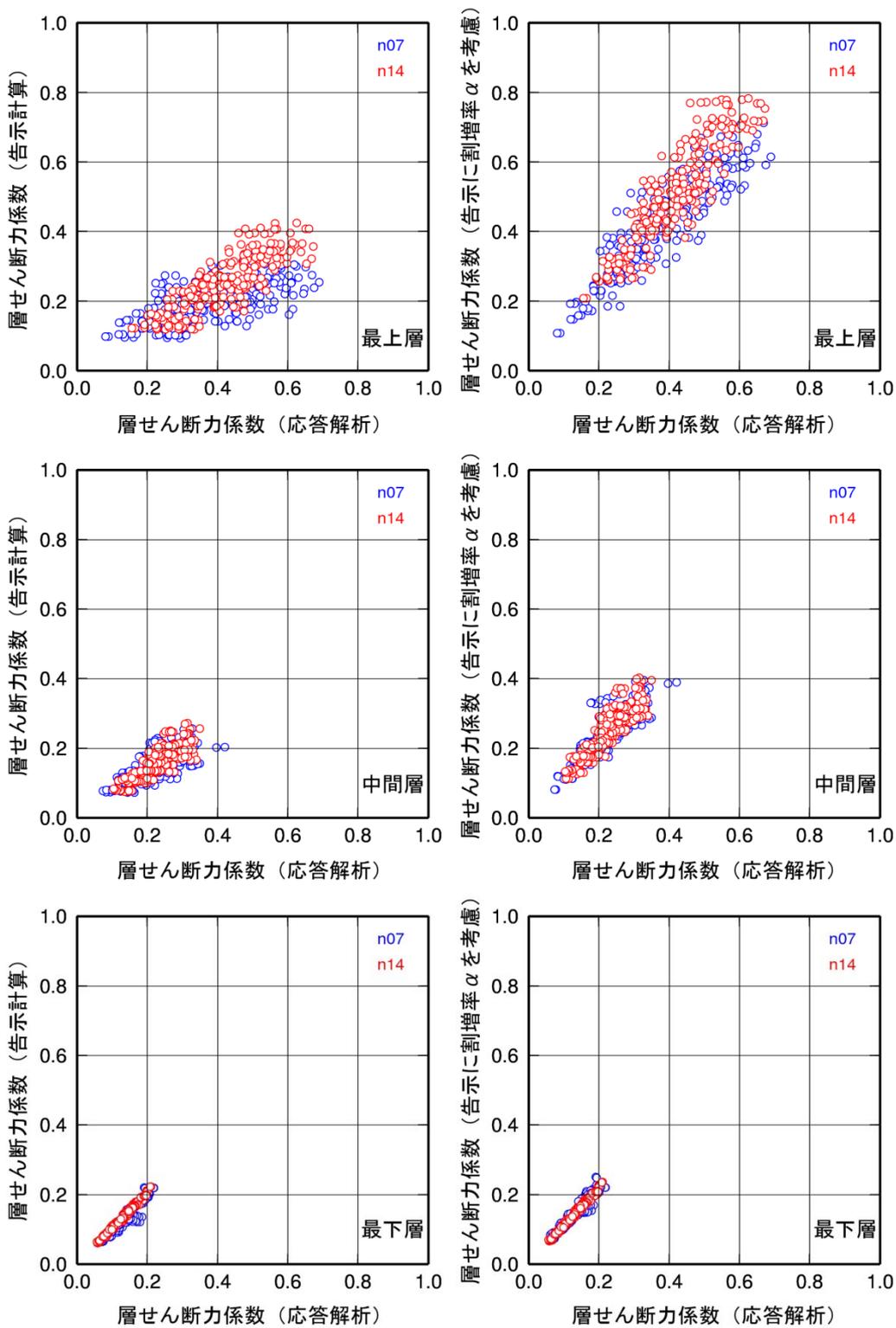


図 4.3-3 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：1 種地盤)

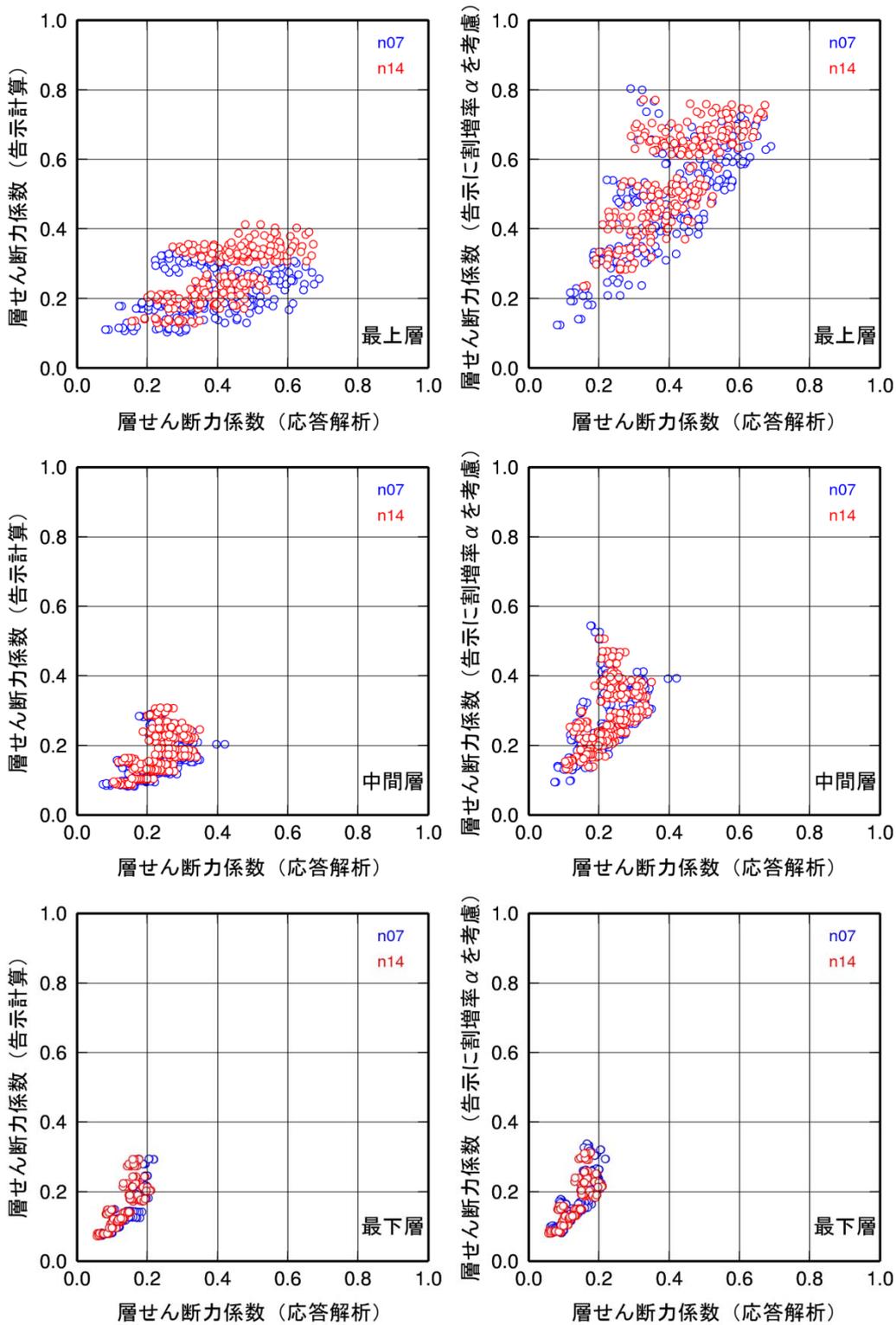


図 4.3-4 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：1 種地盤)

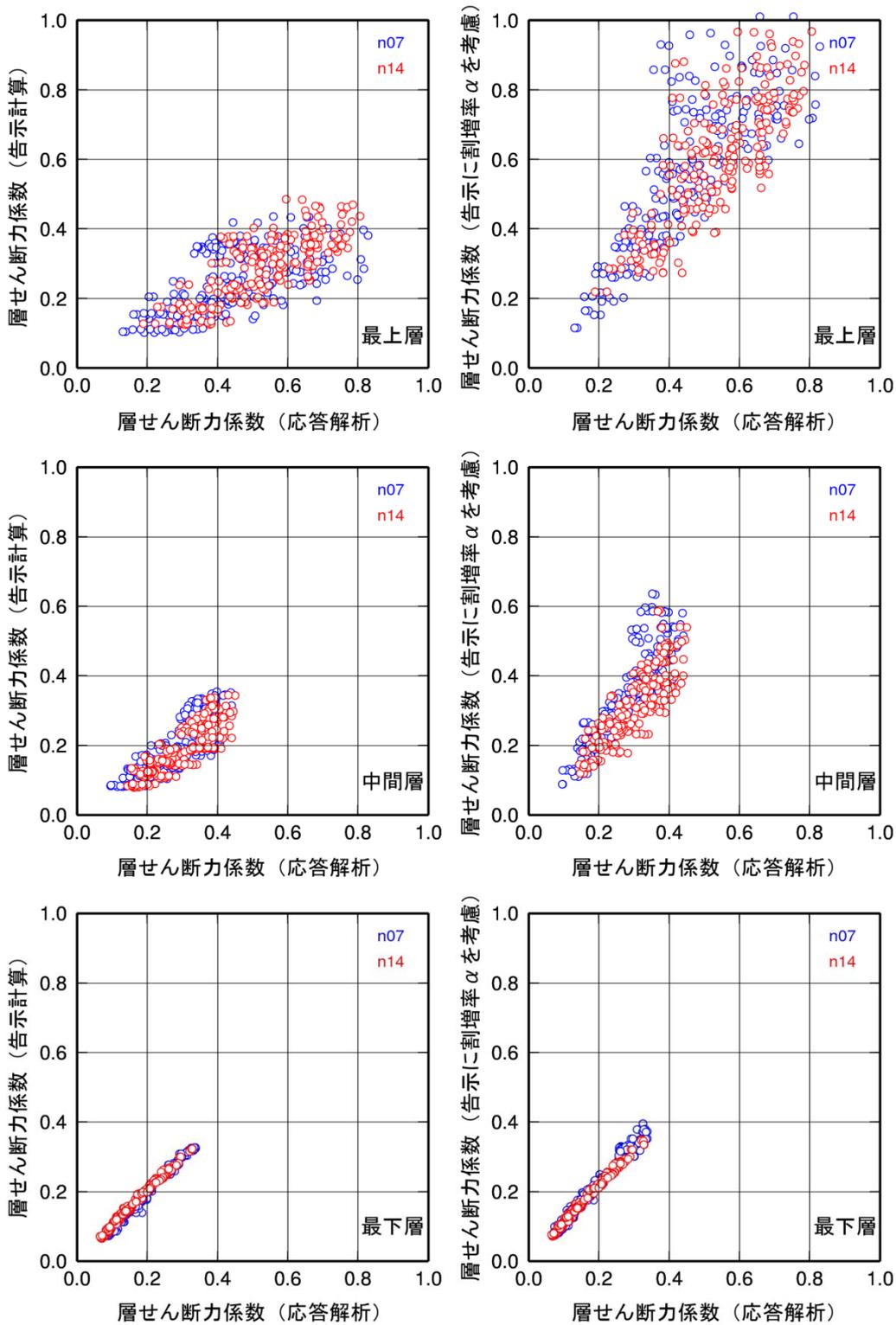


図 4.3-5 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：2 種地盤卓越周期 (長))

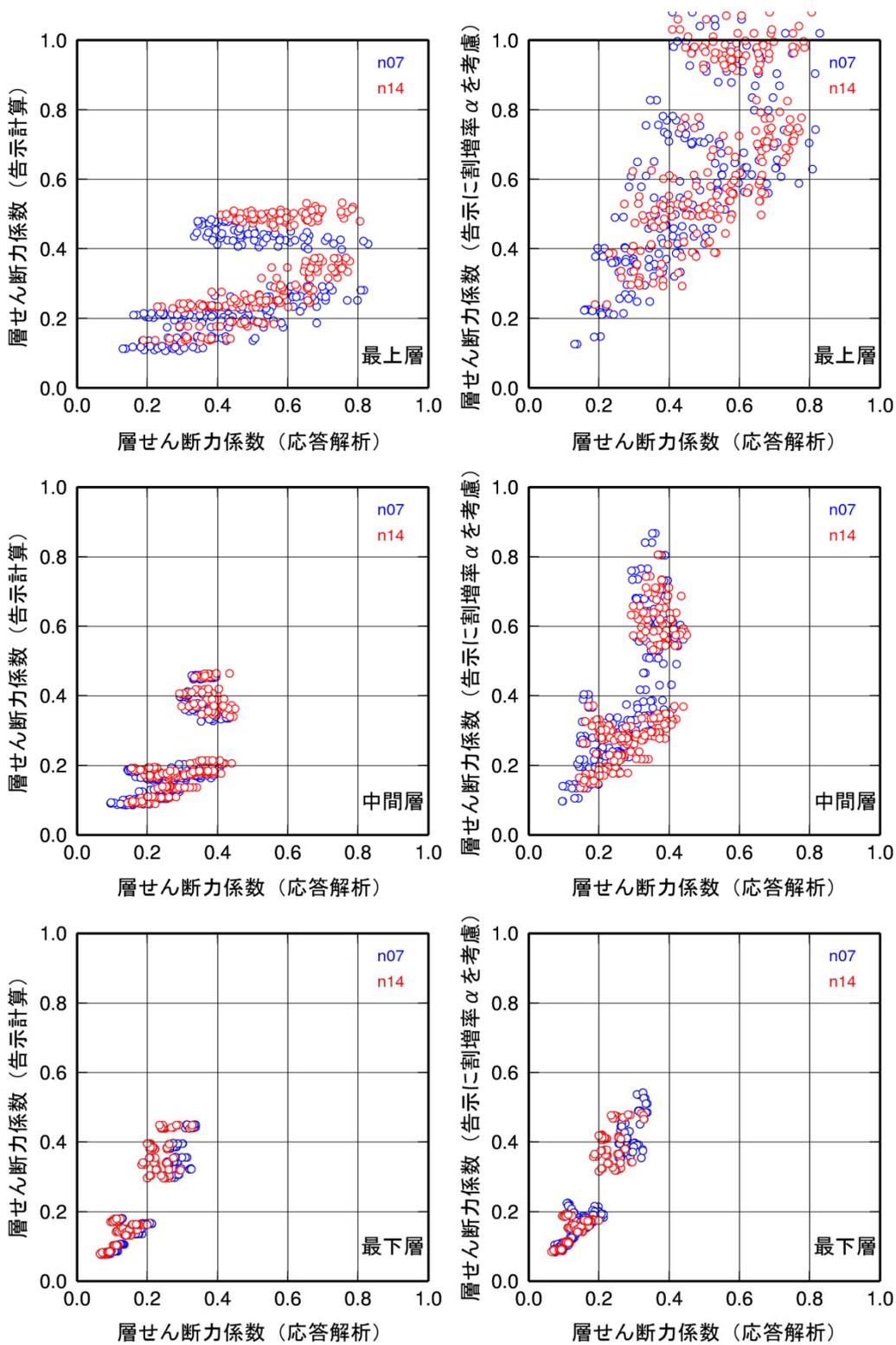


図 4.3-6 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：2 種地盤卓越周期 (長))

4-3-2 設定法 2 に対する検討

a. 第 2 種地盤（短）の入力地震動に対する検討

設定法 2 は、告示 2009 号による免震層のせん断力係数に増幅率 β_t を乗じて上部構造の最上階のせん断力係数を求めるものであり、 β_t は図 3.4-3 に示す回帰式（次式）を用いて以下のように設定する。なお、NL は図 3.4-1 に示す非線形係数である。

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、} \quad \beta_t = 2.19 + 3.95 \text{ NL} \quad (4.3-13)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \beta_t = 2.31 + 3.34 \text{ NL} \quad (4.3-14)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、} \quad \beta_t = 1.66 + 2.58 \text{ NL} \quad (4.3-15)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、} \quad \beta_t = 1.04 + 1.59 \text{ NL} \quad (4.3-16)$$

設定法 2 にて求めた地震層せん断力係数と地震応答解析結果との比較を図 4.3-7 および図 4.3-8 に示す。検討建物モデルは 7 層および 14 層である。これらの左図の縦軸は告示 2009 号による地震層せん断力係数の値、右図の縦軸は設定法 2 による増幅後の値である。設定法 2 における各階の地震層せん断力係数の増幅率は免震層と最上階とで直線的に変化するものとしている。

図 4.3-7 における免震層の変形は、時刻歴応答解析の免震層最大変形としたものである。図 4.3-7 より予測値と応答解析結果の地震層せん断力係数はよく対応していることがわかる。

図 4.3-8 における免震層の変形は、告示 2009 号による等価線形化手法による応答スペクトルを用いる方法にて算出した。これによると、提案手法による値はややばらつきは大きいものの、応答解析結果よりは全体としては安全側の設定になっていることがわかる。このばらつきの要因には免震層の応答変形の告示 2009 号による設定と応答解析値との対応がばらついていることも含まれている。

b. 第 1 種地盤と第 2 種地盤（長）の入力地震動との対応に関する検討

a. で用いた補正係数を第 1 種地盤と第 2 種地盤（長）の入力地震動による場合にも適用した場合の検討を行う。

図 4.3-9、図 4.3-10 は、第 1 種地盤の入力地震動に対して図 4.3-7、図 4.3-8 に対応する関係をプロットした図である。

また、図 4.3-11、図 4.3-12 は、第 2 種地盤（長）の入力地震動に対して、同様に図 4.3-7、図 4.3-8 に対応する関係をプロットした図である。

以上の図より、補正された地震層せん断力係数と応答解析結果との対応にはばらつきが大きくなっているものの、全体的には安全側の方向にばらついているといえる。ばらつきを少なくするために、地盤種別を卓越周期などで細分化した場合の補正式を用いる方法も考えられる。

例えば、第 1 種地盤入力に対して、

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、} \quad \beta_t = 2.11 + 3.14 \text{ NL} \quad (4.3-17)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、} \quad \beta_t = 1.89 + 3.19 \text{ NL} \quad (4.3-18)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、 } \beta_{\tau} = 1.35 + 2.56 NL \quad (4.3-19)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、 } \beta_{\tau} = 1.05 + 1.01 NL \quad (4.3-20)$$

第2種地盤のうち比較的長周期成分の卓越する入力に対しては、第2種地盤（長）の結果を用いて、

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.5 \text{ の時、 } \beta_{\tau} = 1.30 + 5.18 NL \quad (4.3-21)$$

$$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 \text{ の時、 } \beta_{\tau} = 1.58 + 4.59 NL \quad (4.3-22)$$

$$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 \text{ の時、 } \beta_{\tau} = 1.14 + 3.38 NL \quad (4.3-23)$$

$$3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 \text{ の時、 } \beta_{\tau} = 0.99 + 2.11 NL \quad (4.3-24)$$

とすることなどが考えられる。

設定法1および設定法2における補正式 α_t 、 β_t は、各式の定義域内において連続であるが、 T_1/T_0 の定義区間の境では、不連続な値となっている。 T_1/T_0 が定義区間の境近傍の値である場合、 T_1/T_0 のわずかな違いにより α_t 、 β_t が大きく変化することが考えられる。

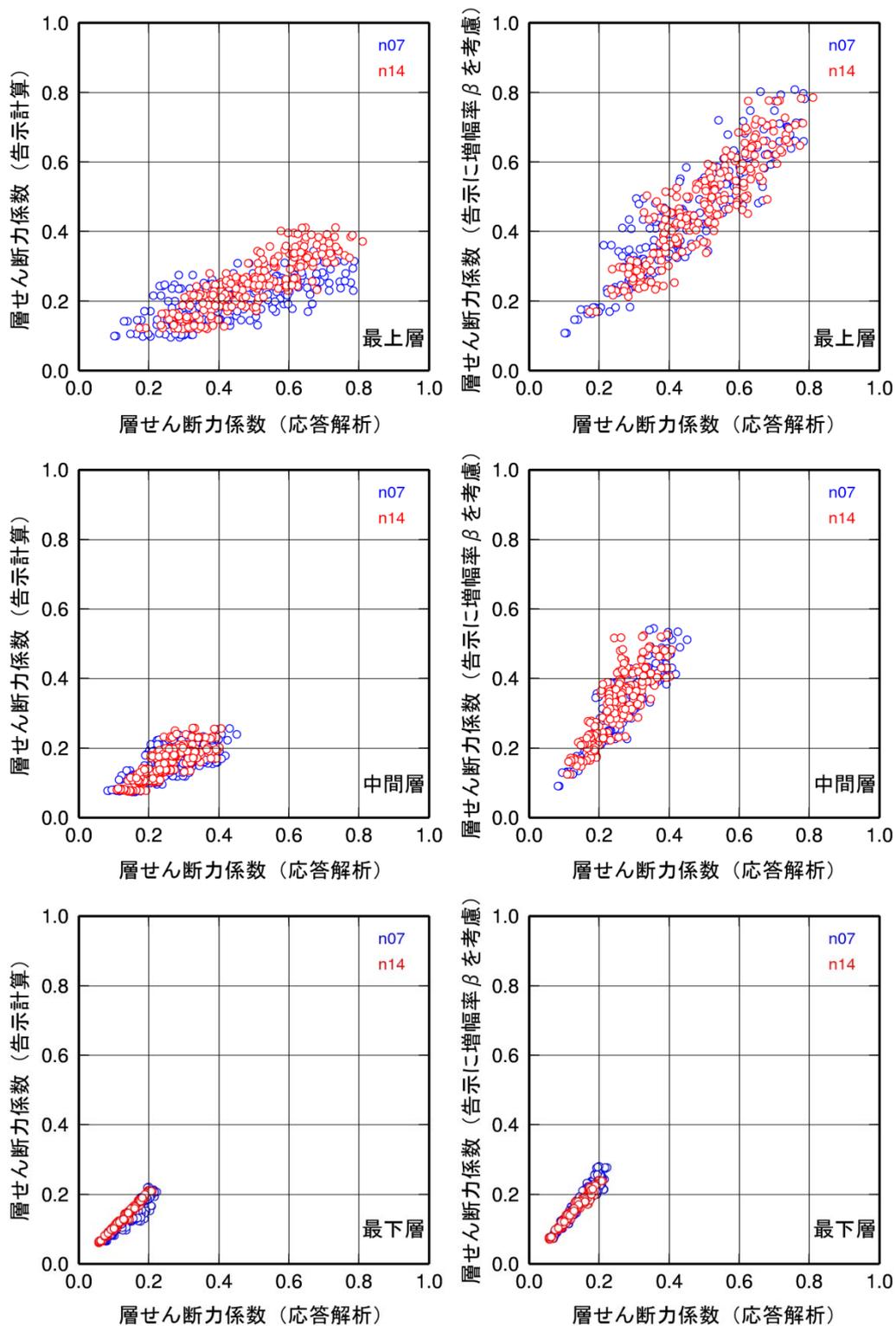


図 4.3-7 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図は設定法 2 による増幅後、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

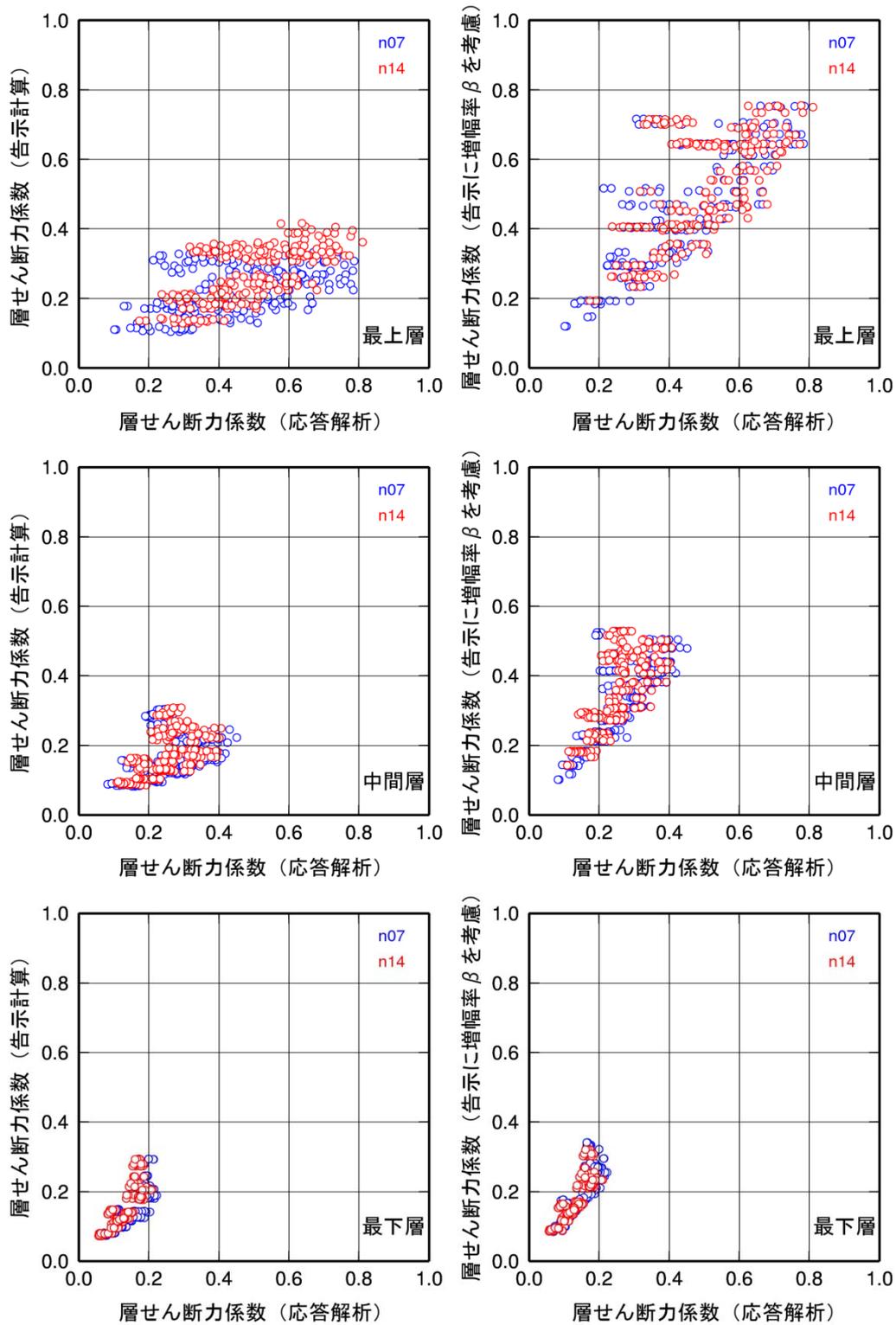


図 4.3-8 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図は設定法 2 による増幅後、入力波：2 種地盤卓越周期 (短)、

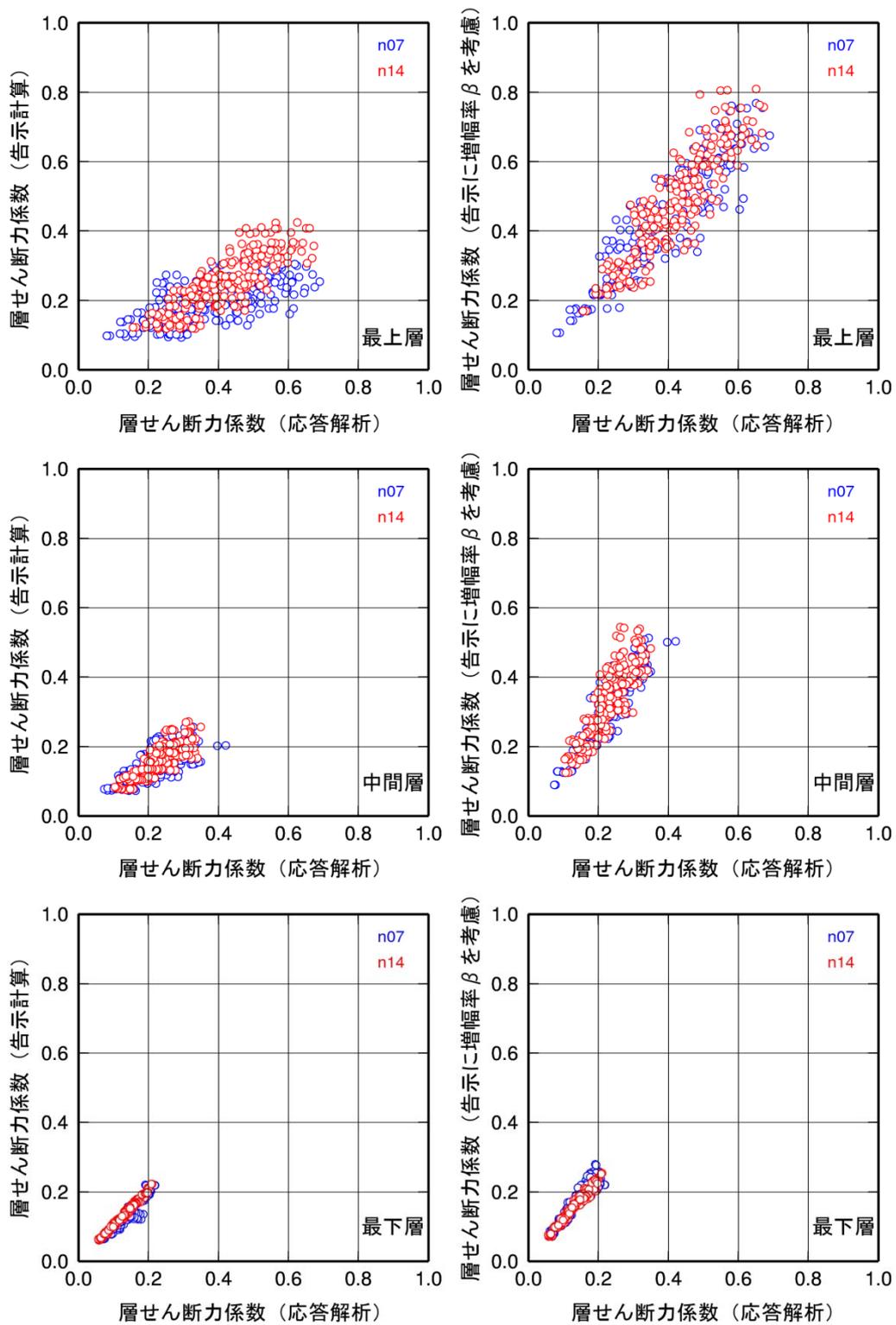


図 4.3-9 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 2 による増幅後、入力波：1 種地盤)

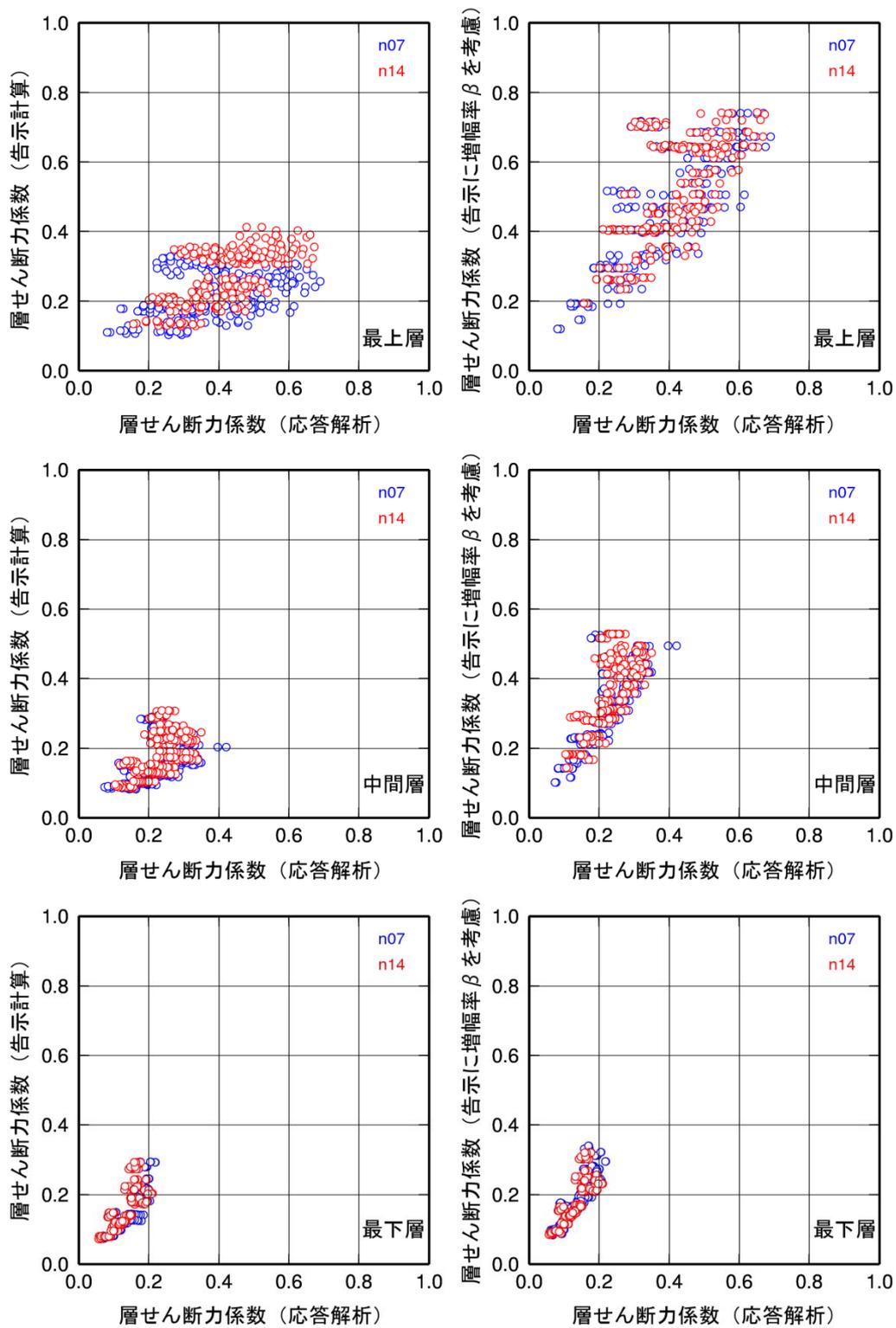


図 4.3-10 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図：設定法 2 による増幅後、入力波：1 種地盤)

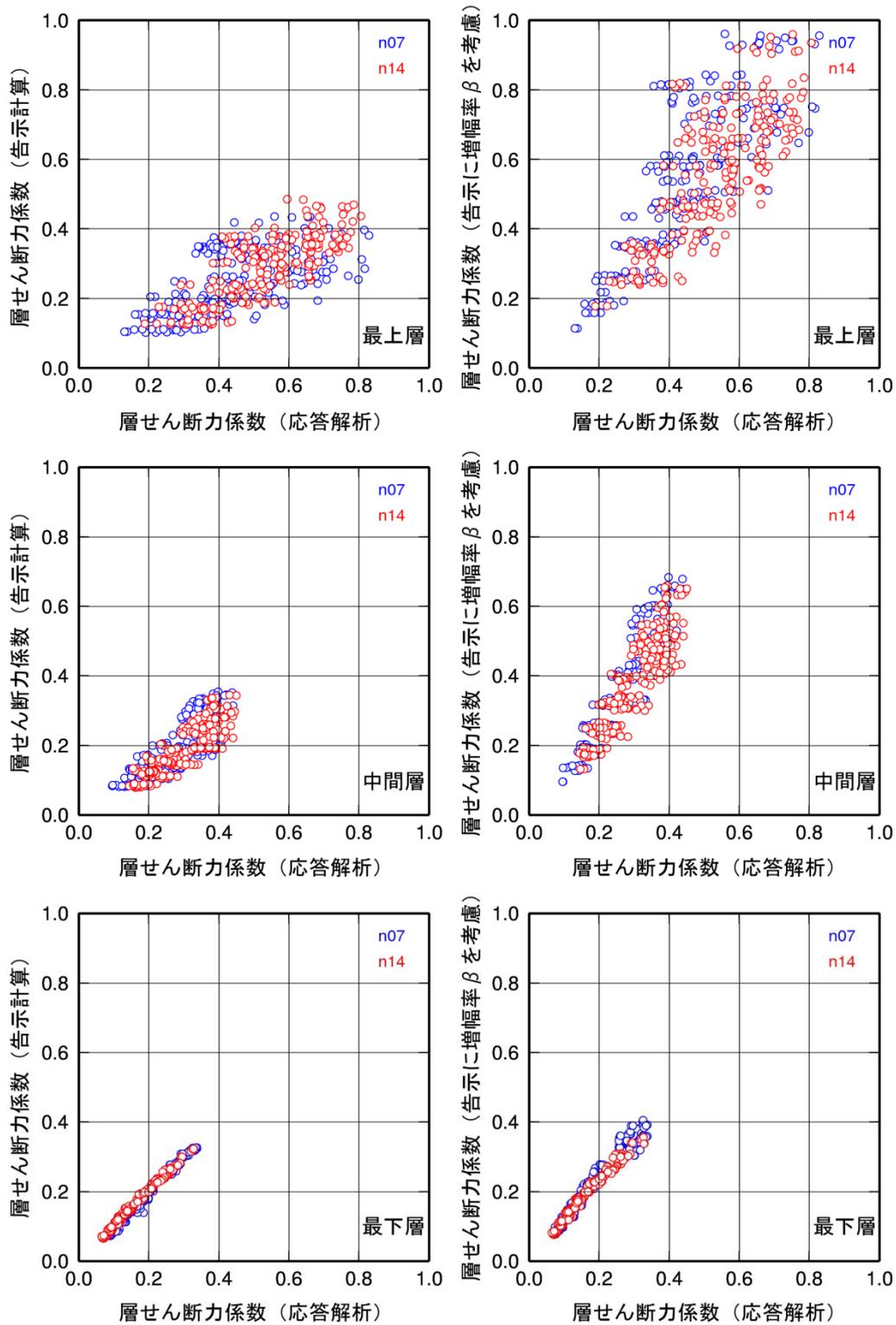


図 4.3-11 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 2 による増幅後、入力波：2 種地盤卓越周期 (長))

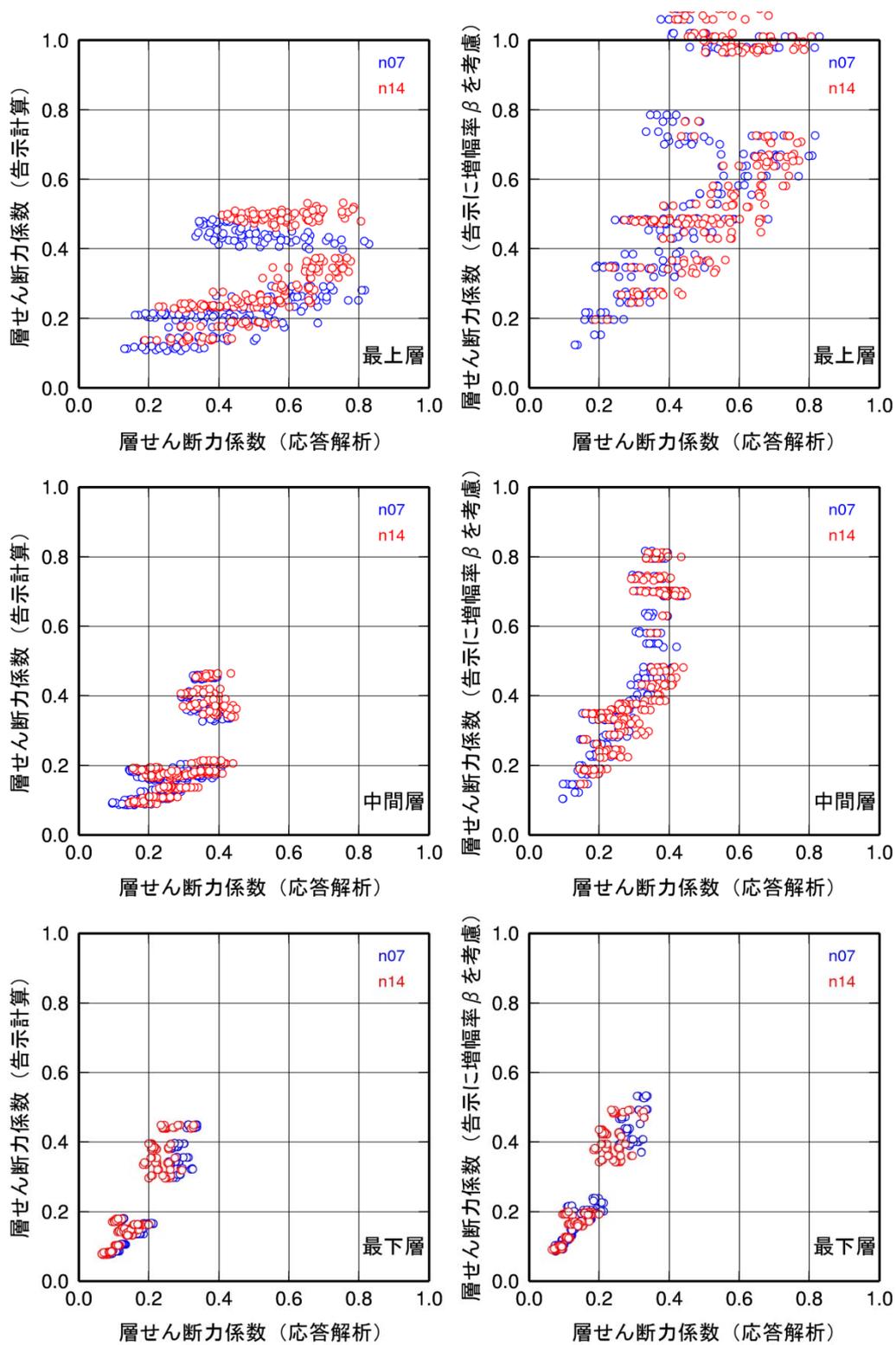


図 4.3-12 応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図は設定法 2 による増幅後、入力波は 2 種地盤卓越周期 (長))

4-4 提案手法の適用性に関する検討

4-4-1 建物階数のパラメータを変えた場合の検討

建物モデルとして、3階建て、5階建て、20階建てのものを、3-2節と同様に設定して、第2種地盤（短）の入力地震動に対する応答解析を行った。

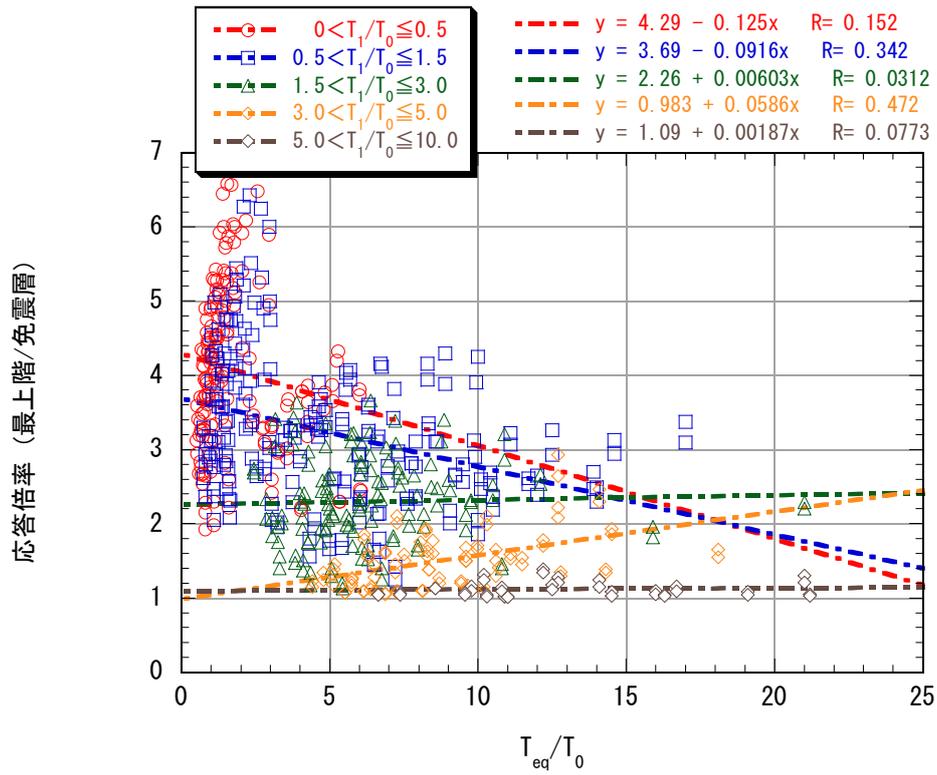
図4.4-1～図4.4-3は、3階建て、5階建て、20階建てにおける免震層の応答解析最大値に対するせん断力係数比（増幅率）であり、図4.4-4～図4.4-6は、応答解析結果のせん断力係数と免震層せん断力係数の比を告示2009号による層せん断力係数と免震層せん断力係数の比で除した値（割増率）である。これらの図は、7層および14層の解析結果を整理した図3.4-2～図3.4-7に対応している。

横軸を T_{eq}/T_0 、縦軸を増幅率とした図4.4-1では、全体としてばらつきが大きく、特に T_{eq}/T_0 が3以下ではその傾向が顕著である。一方、図4.4-2および図4.4-3では、NLの増大とともに増幅率が大きくなる傾向が表れている。図4.4-4～図4.4-6よりNLを用いた場合よりも T_{eq}/T_0 および T_1/T_0 をパラメータとした方が割増率とパラメータとの関係が明確である。以上より3階建て、5階建て、20階建ての増幅率および割増率とパラメータとの関係は、7層および14層の場合とほぼ同様である。

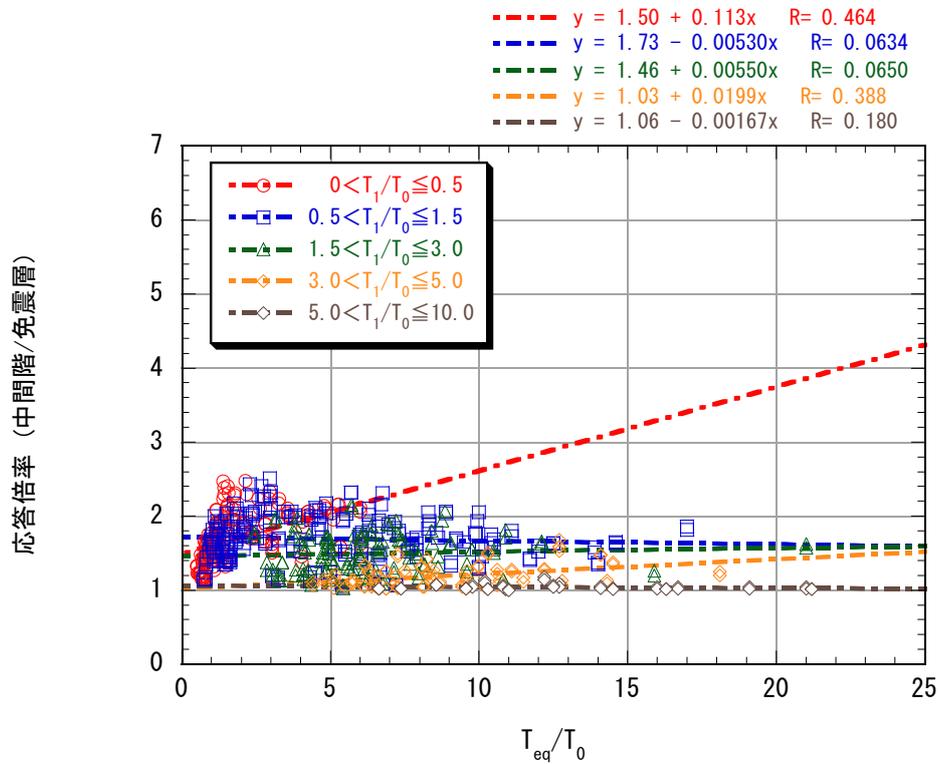
図4.4-7は、免震層の変形を応答解析結果と合わせた時の告示2009号によるせん断力係数を4-2節で示した設定法1（第2種地盤（短）の入力地震動に対する応答結果を用いた回帰式に基づく方法）により補正した場合と、応答解析結果の地震層せん断力係数を比較したものである。なお、建物各層の地震層せん断力係数補正係数は免震層と最上階とで直線的に変化すると仮定したものをプロットしている。図より予測値と応答解析結果のせん断力係数はよく対応していることがわかる。

図4.4-8は、告示2009号で算定した免震層変形と各層のせん断力係数を提案式で補正したものと応答解析結果のせん断力係数とを直接比較したものである。これによると、提案手法による値はややばらつきは大きいものの、応答解析結果よりは全体としては安全側の設定になっていることがわかる。

設定法2でもほぼ同様の傾向となっている（図4.4-9、図4.4-10）。

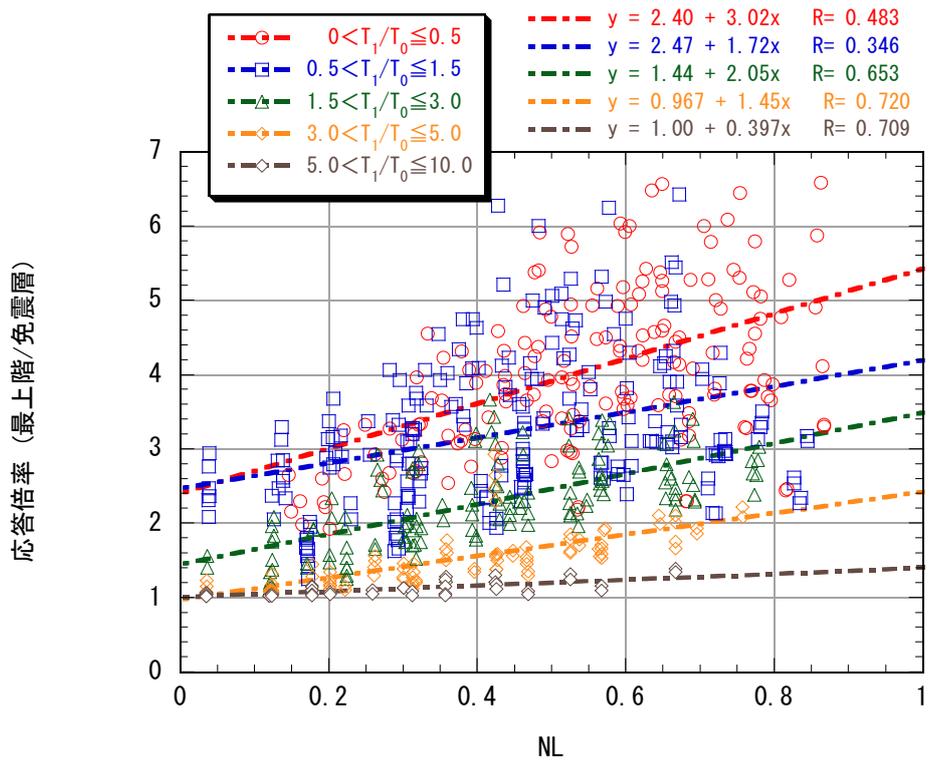


(a) 層せん断力比 (最上階/免震層)

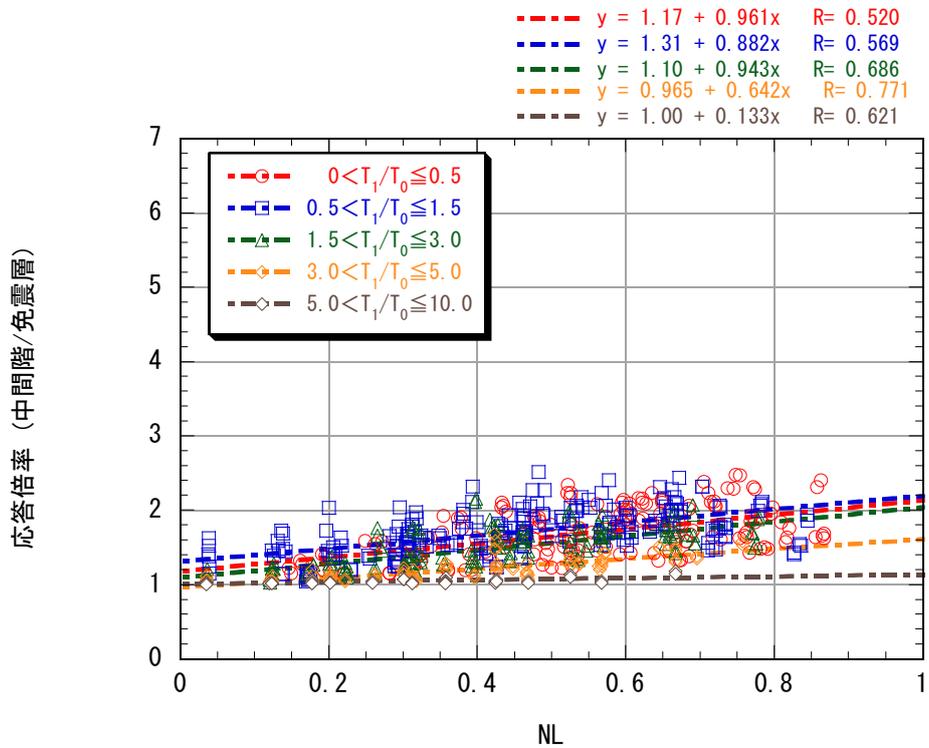


(b) 層せん断力比 (中間階/免震層)

図 4.4-1 $T_{eq}/T_0 \sim$ 免震層に対するせん断力係数比-3・5・20 階-2 種地盤卓越周期 (短)

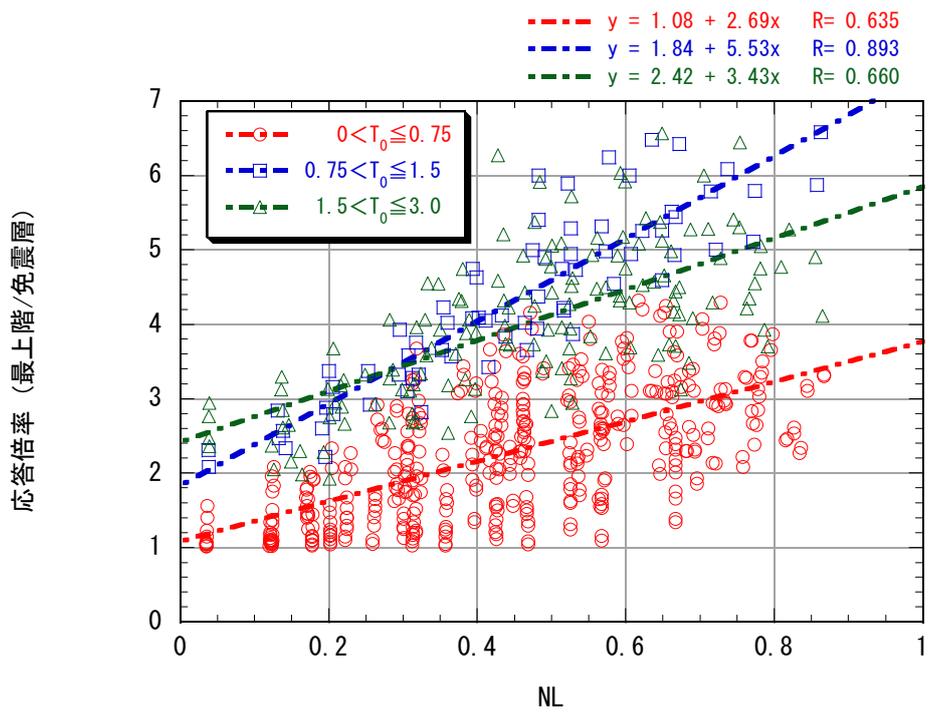


(a) 層せん断力比 (最上階/免震層)

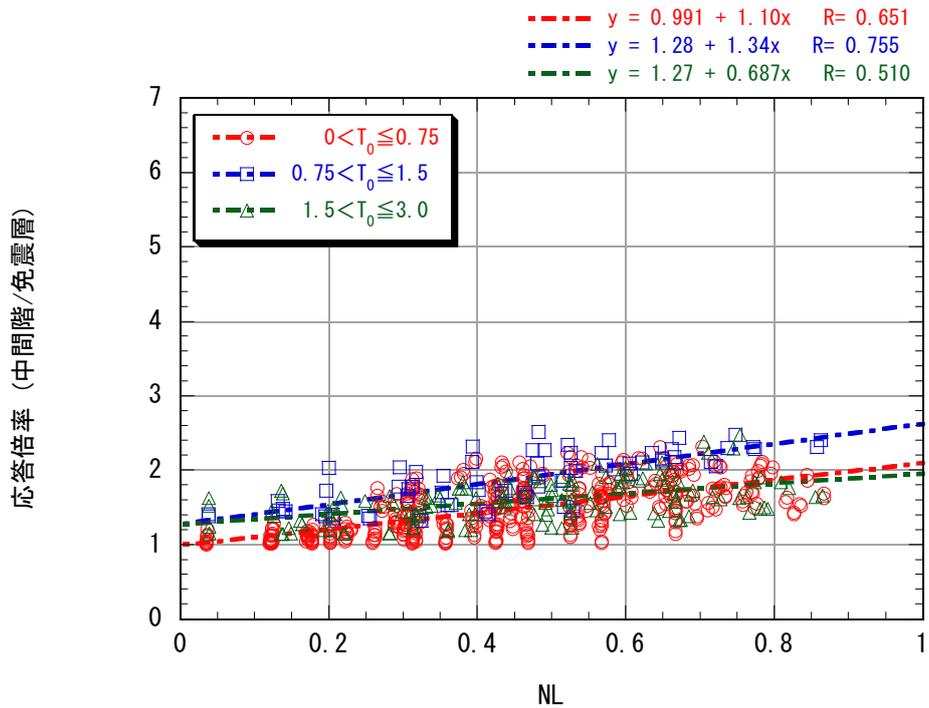


(b) 層せん断力比 (中間階/免震層)

図 4.4-2 NL～免震層に対するせん断力係数比-3・5・20 階-2 種地盤卓越周期 (短)

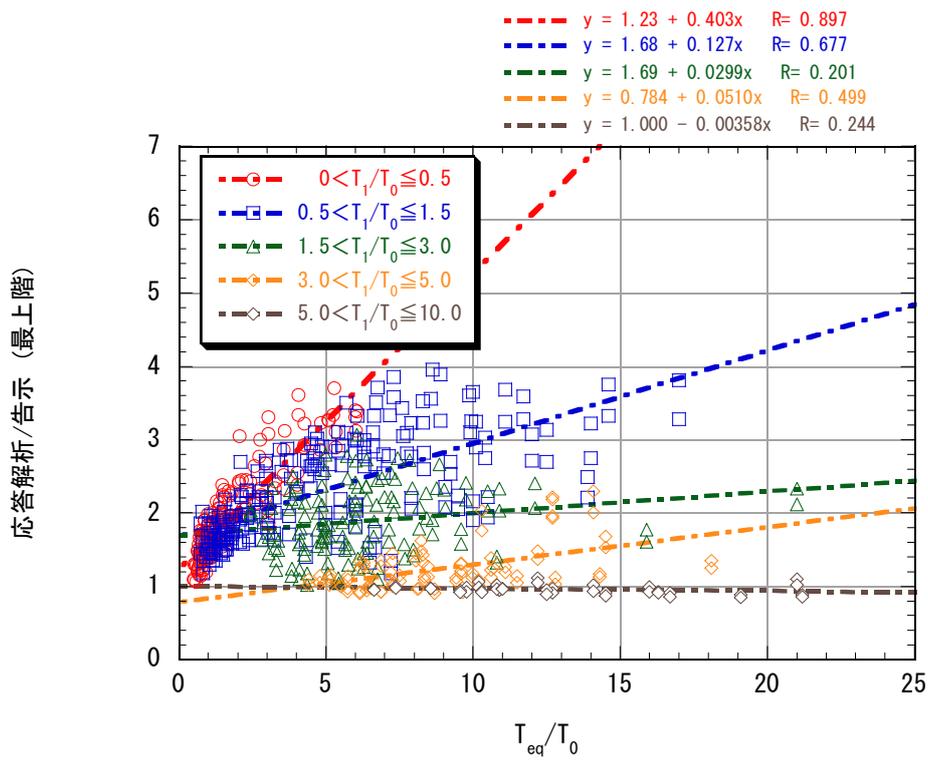


(a) 層せん断力比 (最上階/免震層)

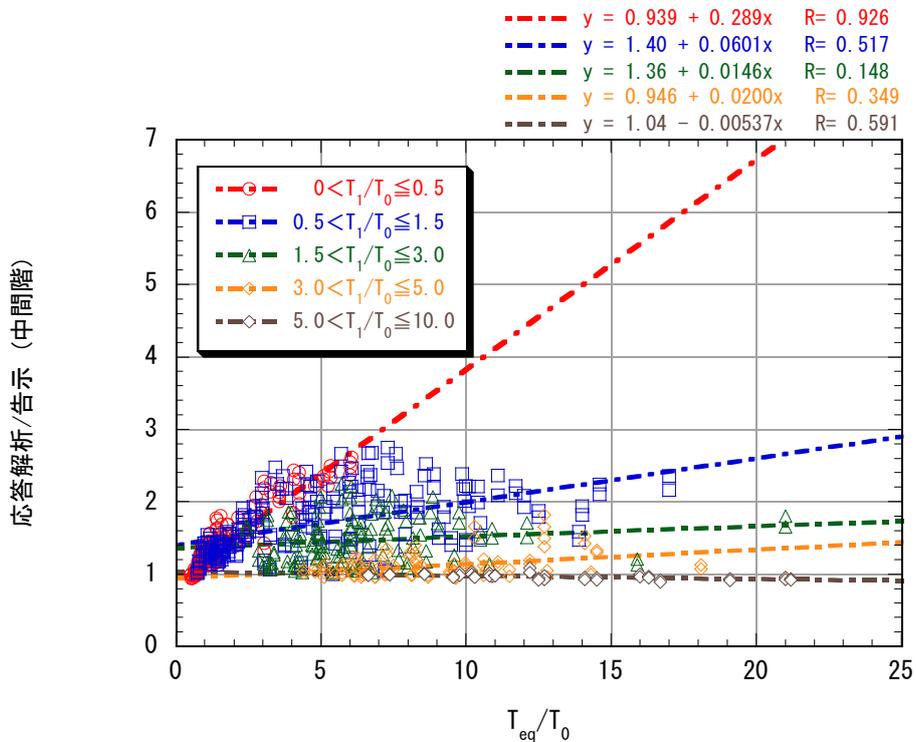


(b) 層せん断力比 (中間階/免震層)

図 4.4-3 NL～免震層に対するせん断力係数比-3・5・20 階-2 種地盤卓越周期 (短)

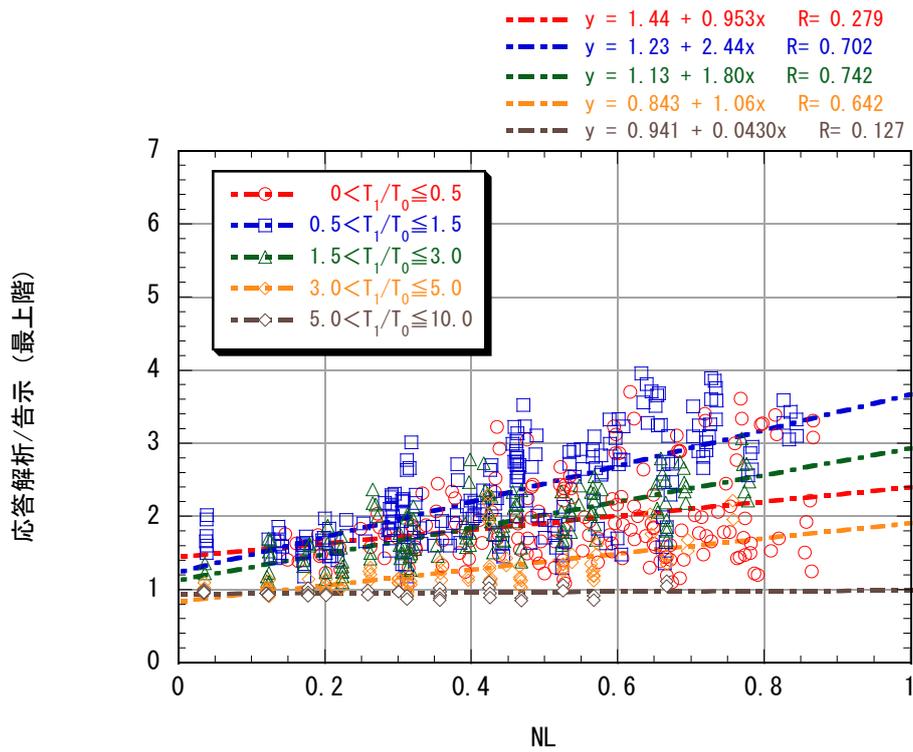


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

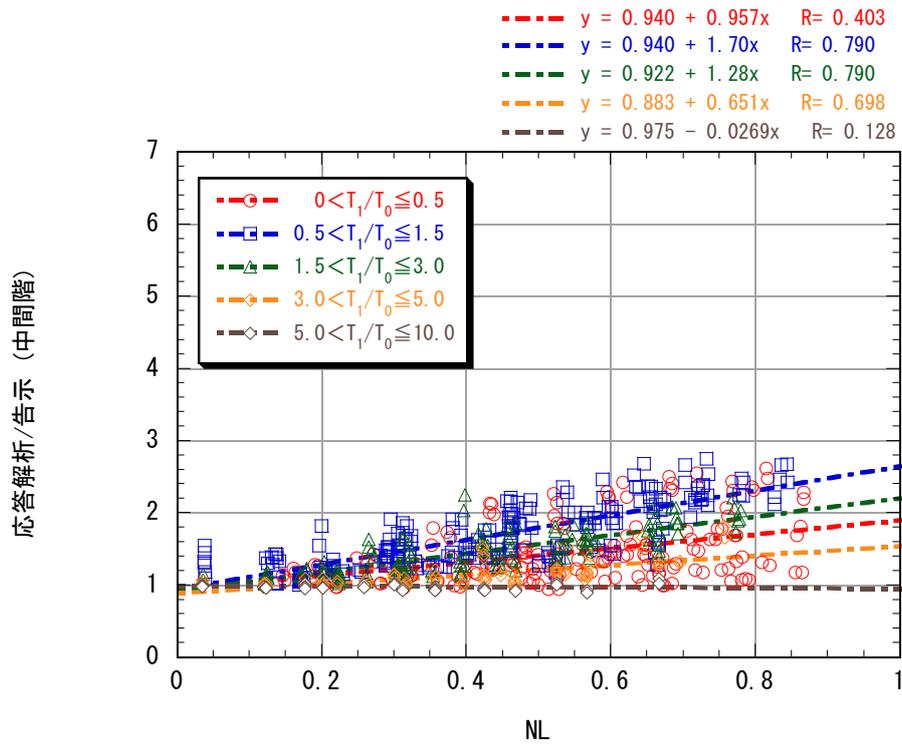


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 4.4.4 $T_{eq}/T_0 \sim$ 告示 2009 号によるせん断力係数に対する応答解析結果の比率-3・5・20 階
2 種地盤卓越周期 (短)

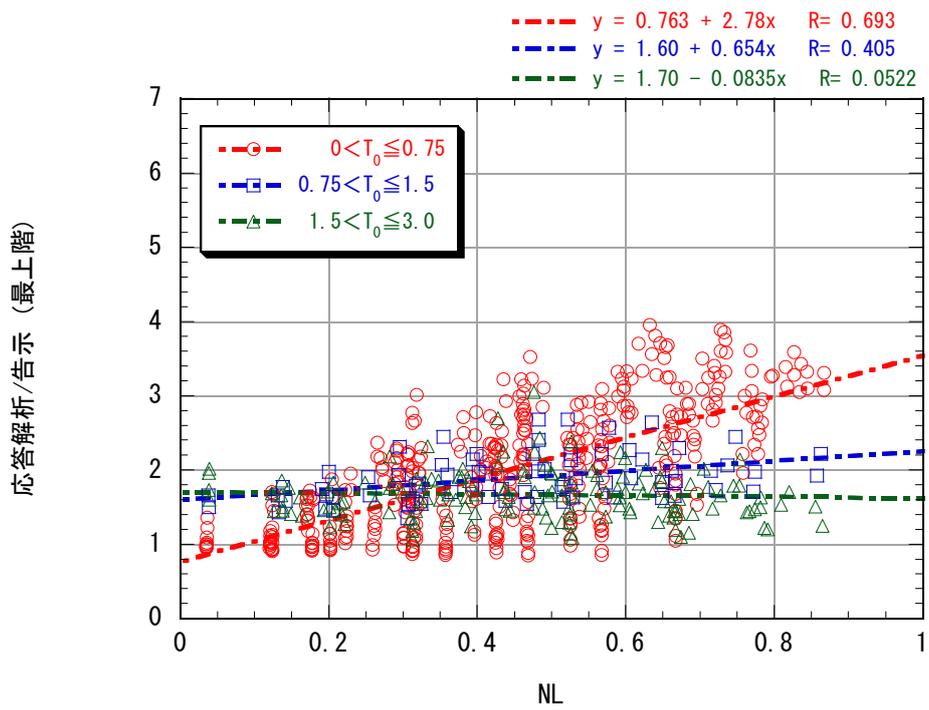


(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

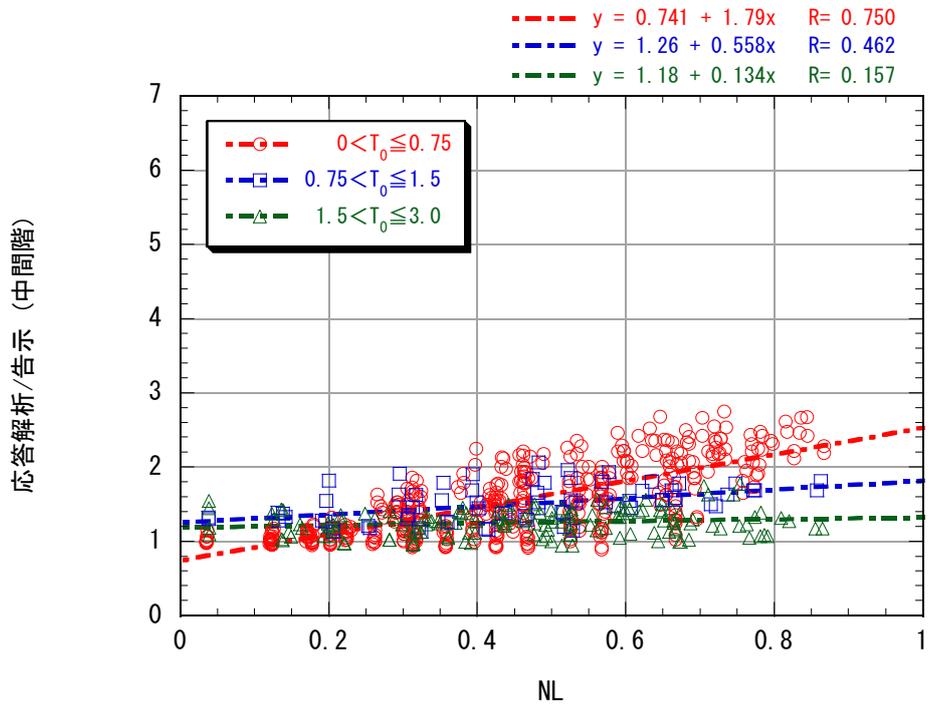


(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 4.4-5 NL～告示 2009 号によるせん断力係数に対する応答解析結果の比率-3・5・20 階
2 種地盤卓越周期 (短)



(a) 最上階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)



(b) 中間階の層せん断力比 (応答解析/告示 2009 号)

図 4.4-6 NL～告示 2009 号によるせん断力係数に対する応答解析結果の比率

3・5・20 階-2 種地盤卓越周期 (短)

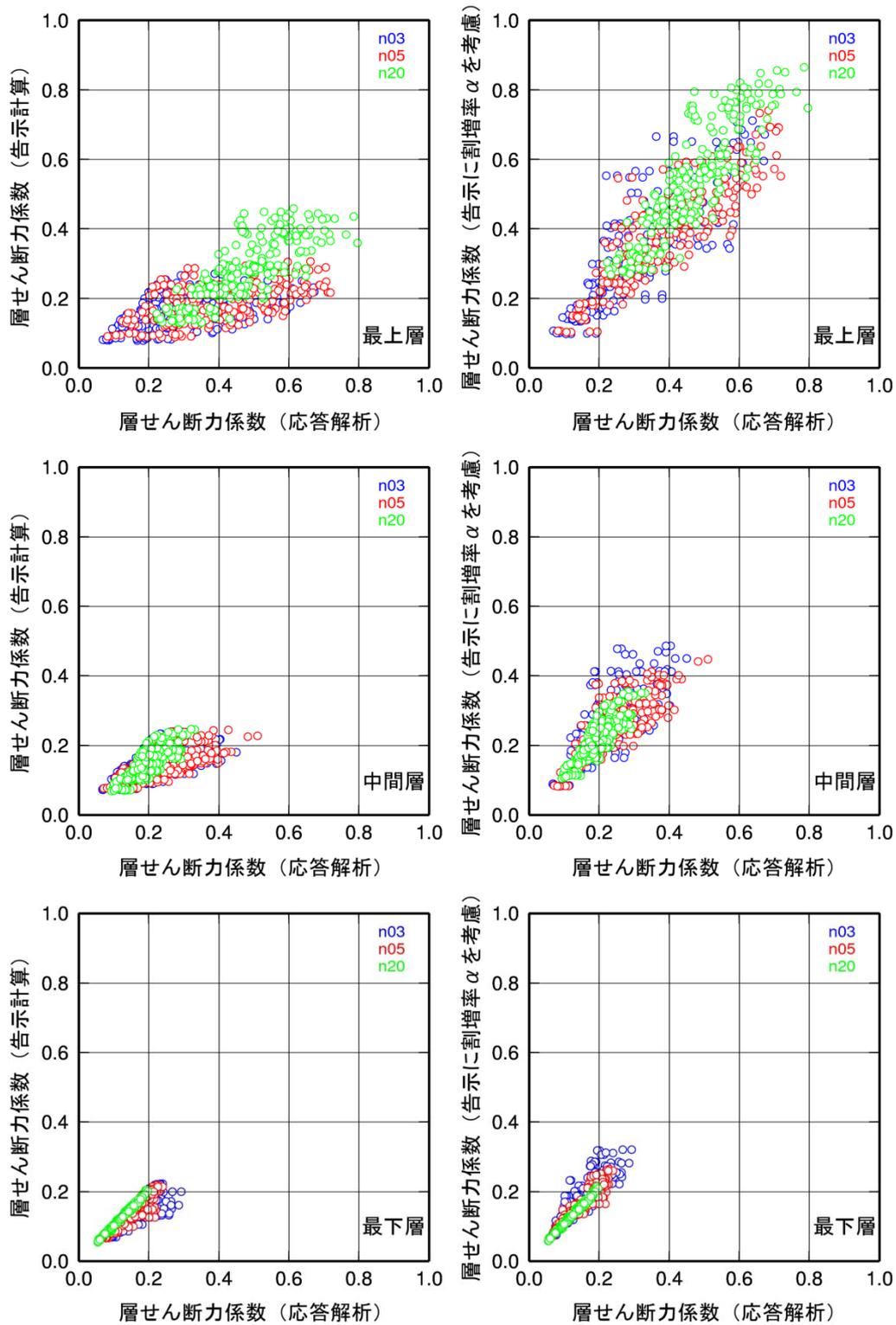


図 4.4-7 3層・5層・20層モデルの応答解析及び告示2009号による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示2009号、右図：設定法1による割増後、入力波：2種地盤卓越周期(短))

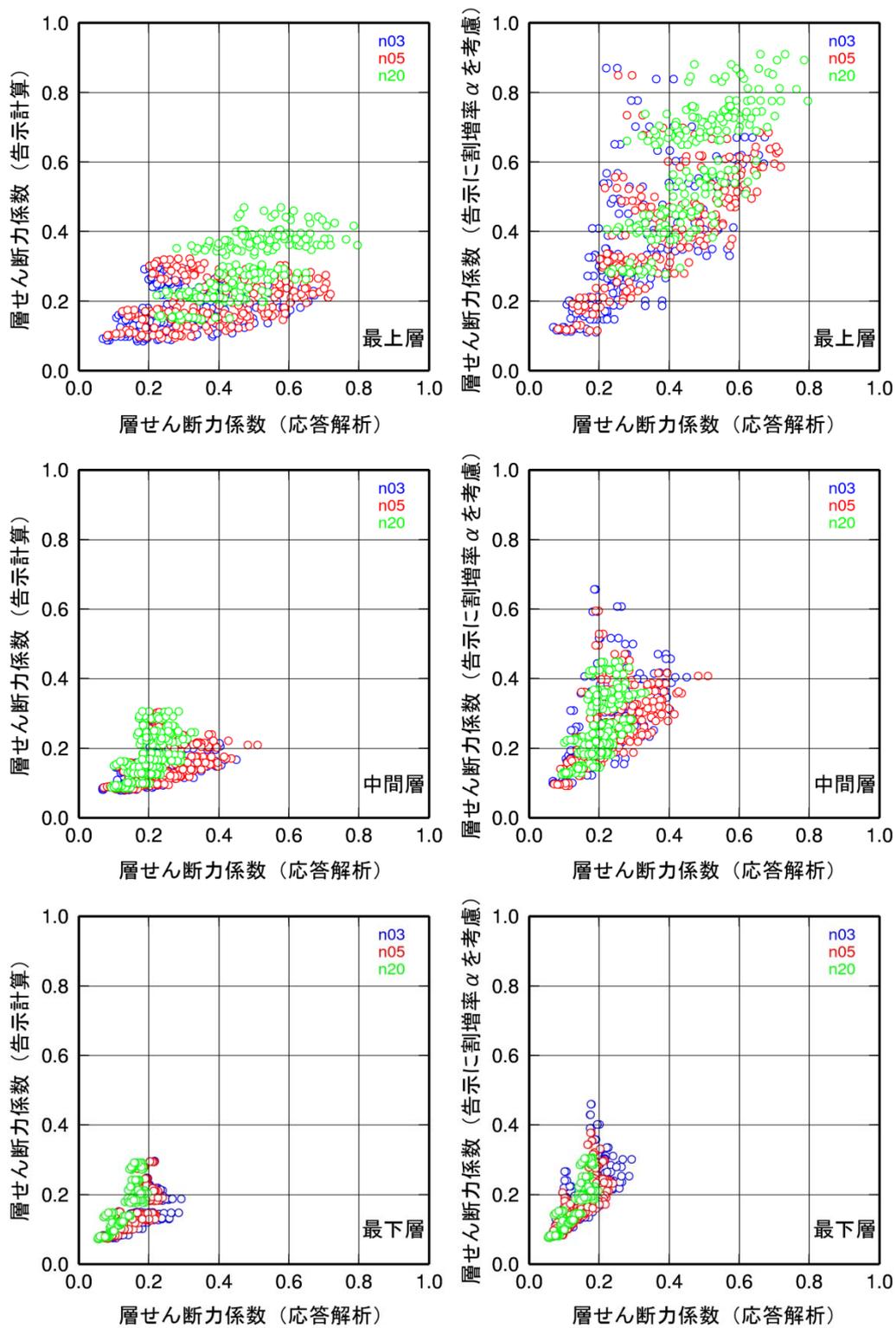


図 4.4-8 3 層・5 層・20 層モデルの応答解析及び告示 2009 号による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

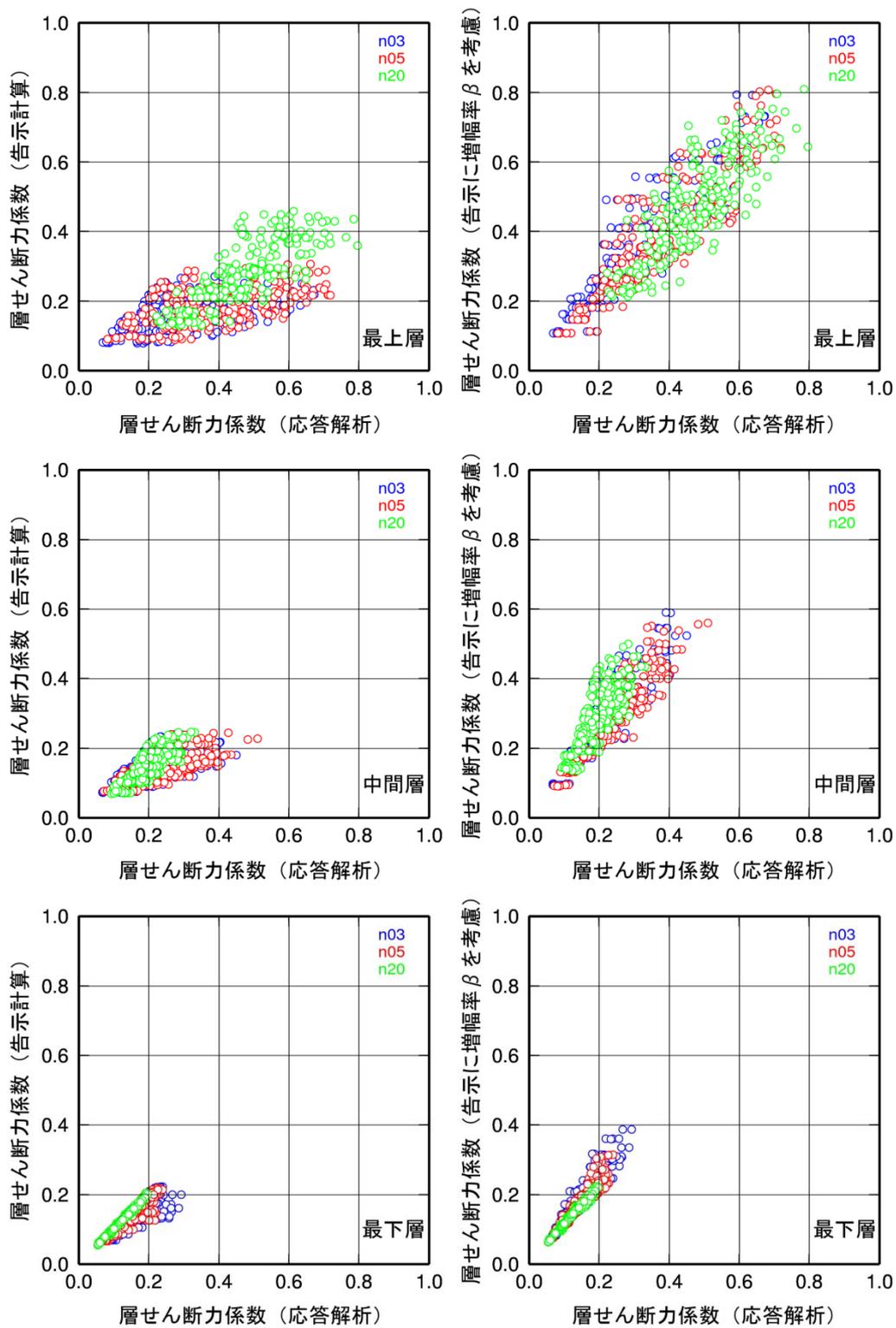


図 4.4-9 3層・5層・20層モデルの応答解析及び告示 2009 号による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 2 による増幅後、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

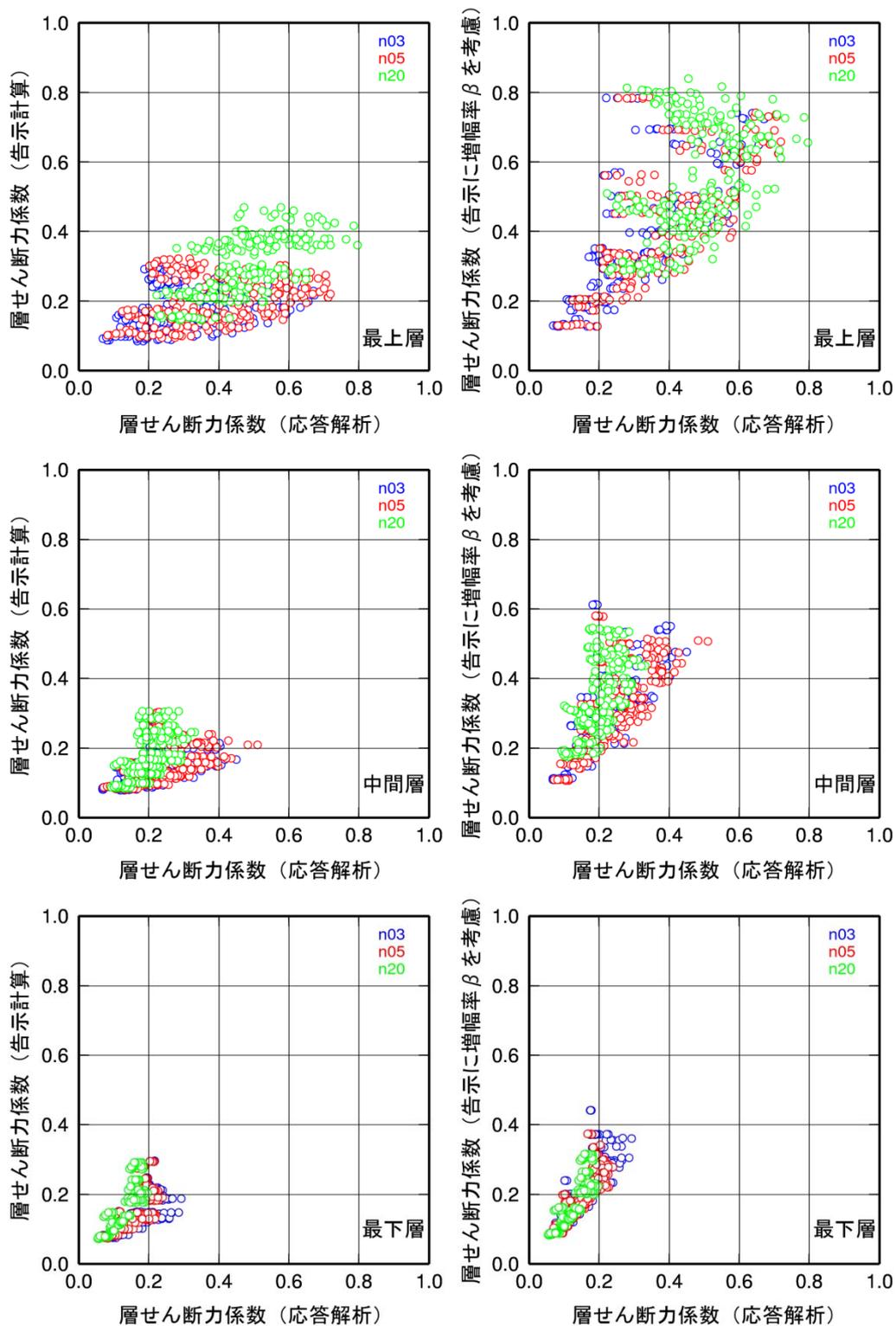


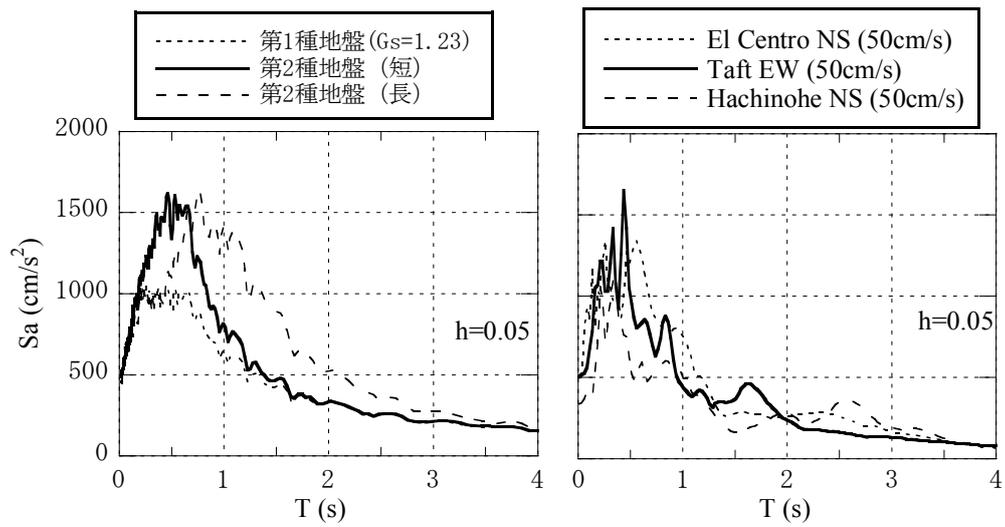
図 4.4-10 3層・5層・20層モデルの応答解析及び告示 2009 号による層せん断力係数 (左図：告示 2009 号、右図：設定法 2 による増幅後、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

4-4-2 異なる入力地震動に対する検討

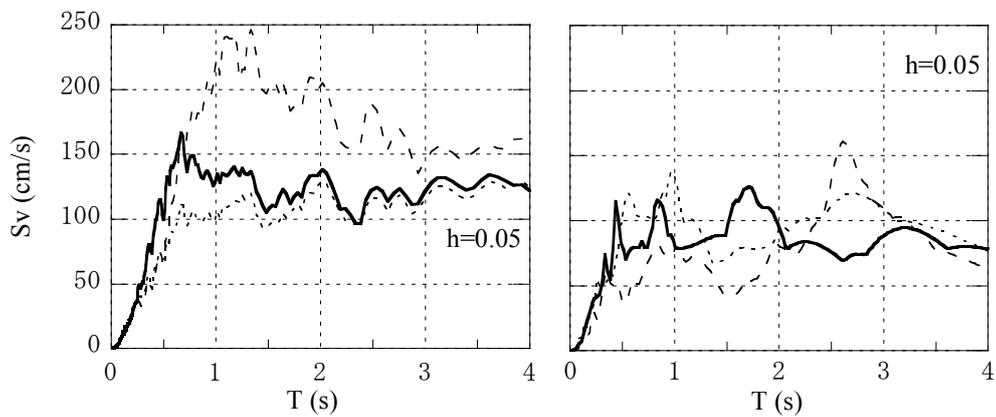
入力地震動として、強震動観測波 3 波（1940 El Centro NS, 1952 Taft EW, 1968 Hachinohe NS）を $V_{max}=50\text{cm/s}$ となるように規準化したものについて検討する。ここで検討する入力地震動の応答スペクトルを比較して図 4.4-11 に示す。

免震層の変形を時刻歴応答解析の最大変形とあわせて、告示 2009 号の増幅率を用いて上部構造の地震層せん断力係数を求めた場合と応答解析結果とを比較したものを図 4.4-12～図 4.4-14 の左側に示す。また、提案した設定法 1（第 2 種地盤（短）の入力地震動に対する応答結果を用いた回帰式に基づく方法）により地震層せん断力係数を求めたものと応答解析結果とを比較したものを図 4.4-12～図 4.4-14 の右側に示す。

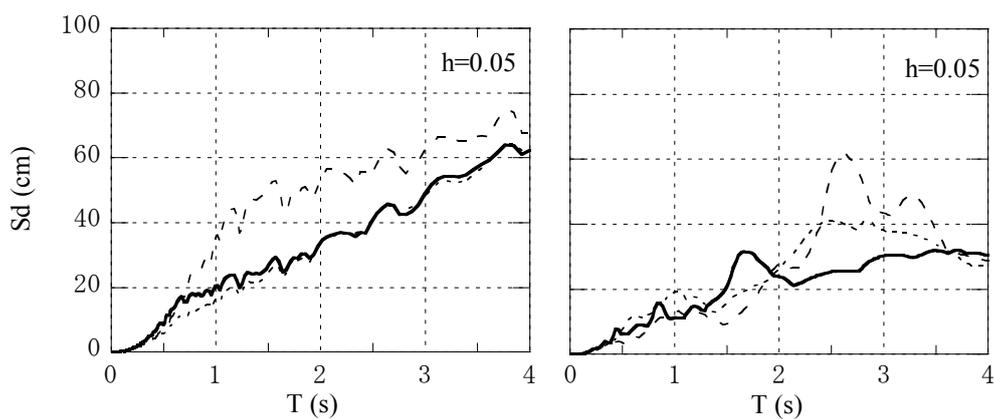
これらの図より、地震動のスペクトル特性によって差はあるが、いずれも全体的には提案法で安全側の推定傾向になっている。これは、ここでの設定に用いた第 2 種地盤（短）の地震動の短周期成分が他の地震動と比較して卓越する形になっているためと考えられる。従って、短周期成分の少ない Hachinohe NS の場合には平均的にかなり安全側の推定となっている。



(a) 加速度応答スペクトル



(b) 速度応答スペクトル



(c) 変位応答スペクトル

図 4.4-11 入力地震動の応答スペクトル (左図は告示波、右図は観測波)

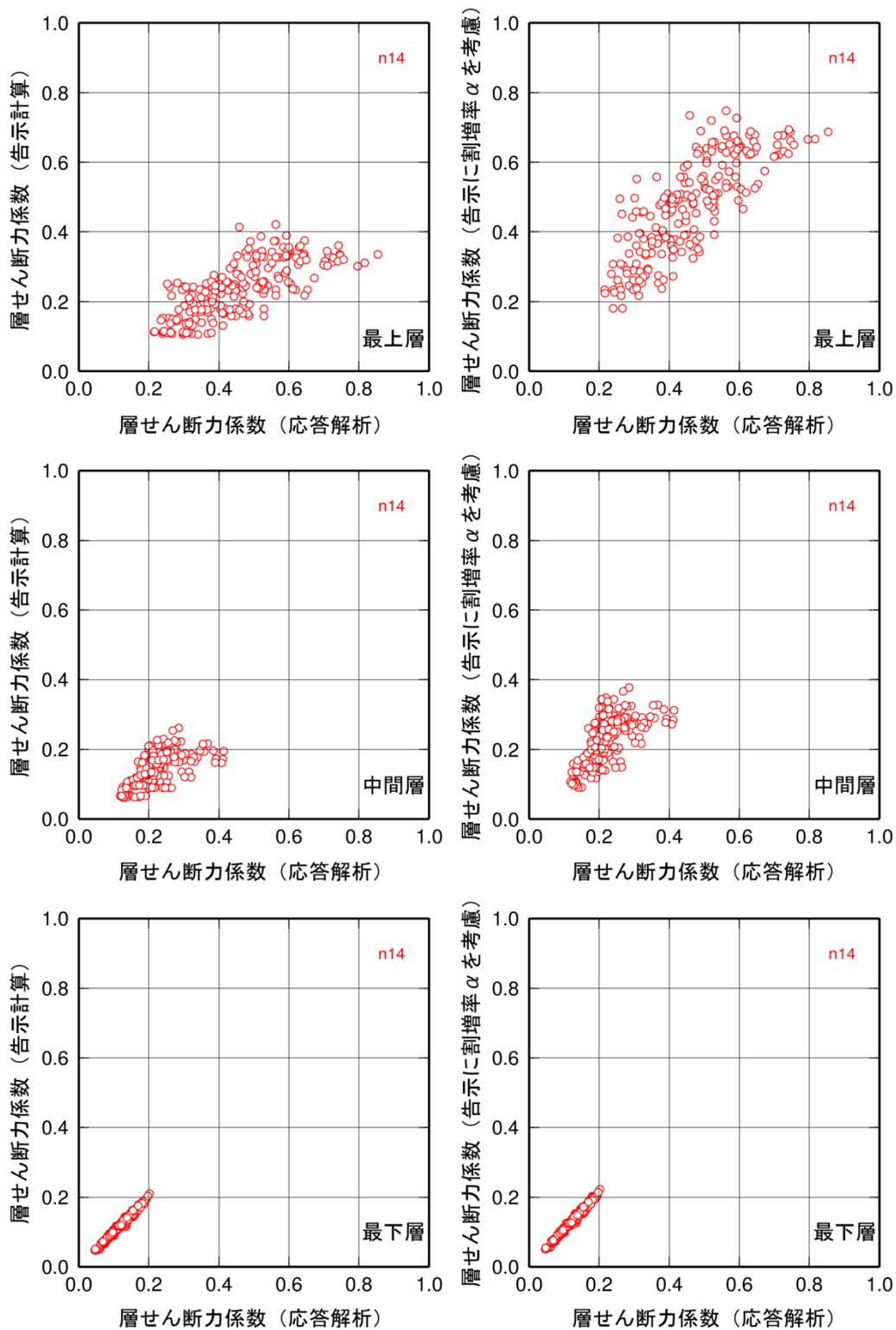


図 4.4-12 14 層モデルの応答解析及び告示 2009 号による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波：EL CENTRO NS 波 (50kine))

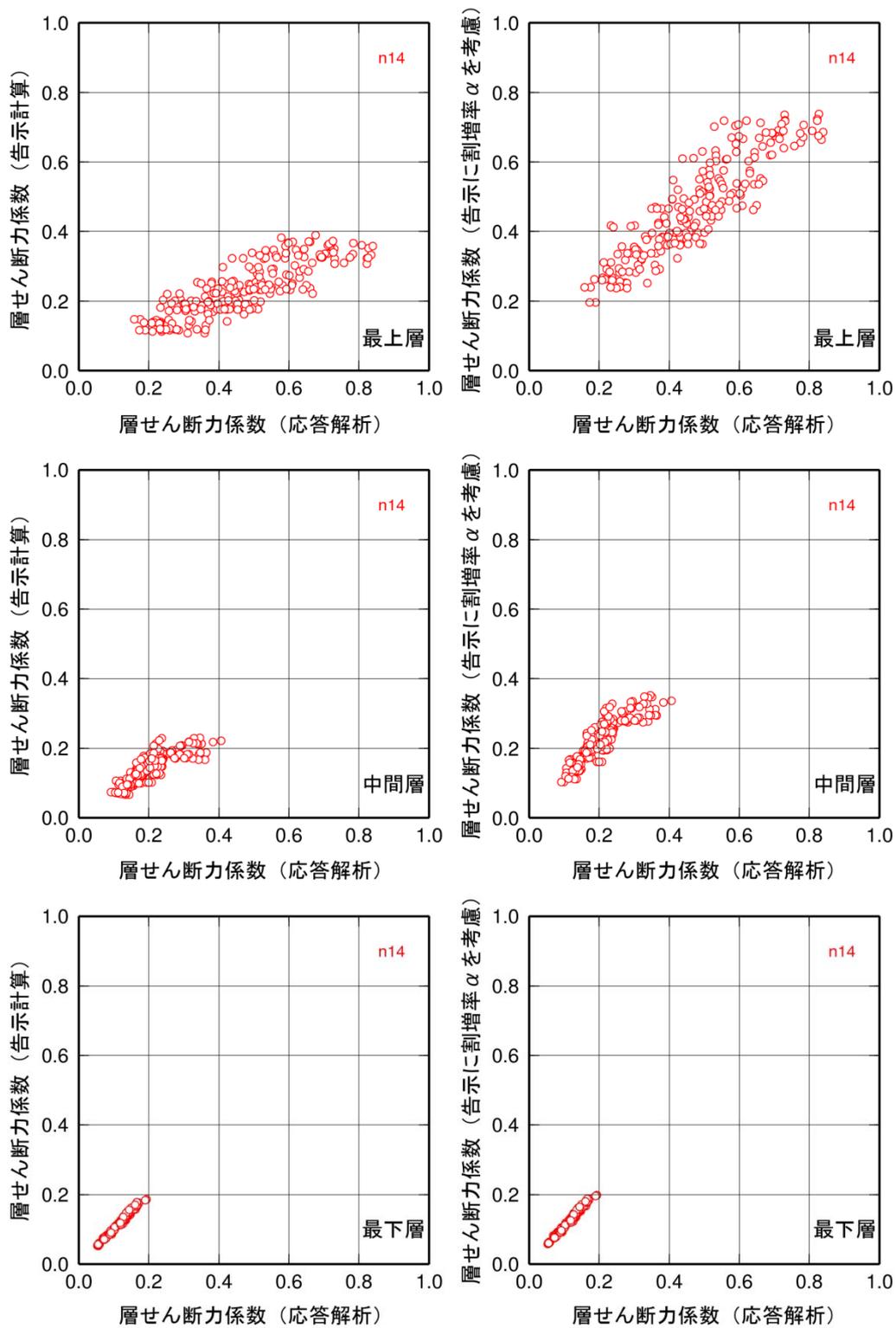


図 4.4-13 14 層モデルの応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図：時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図：設定法 1 による割増後、入力波は TAFT EW 波 (50kine))

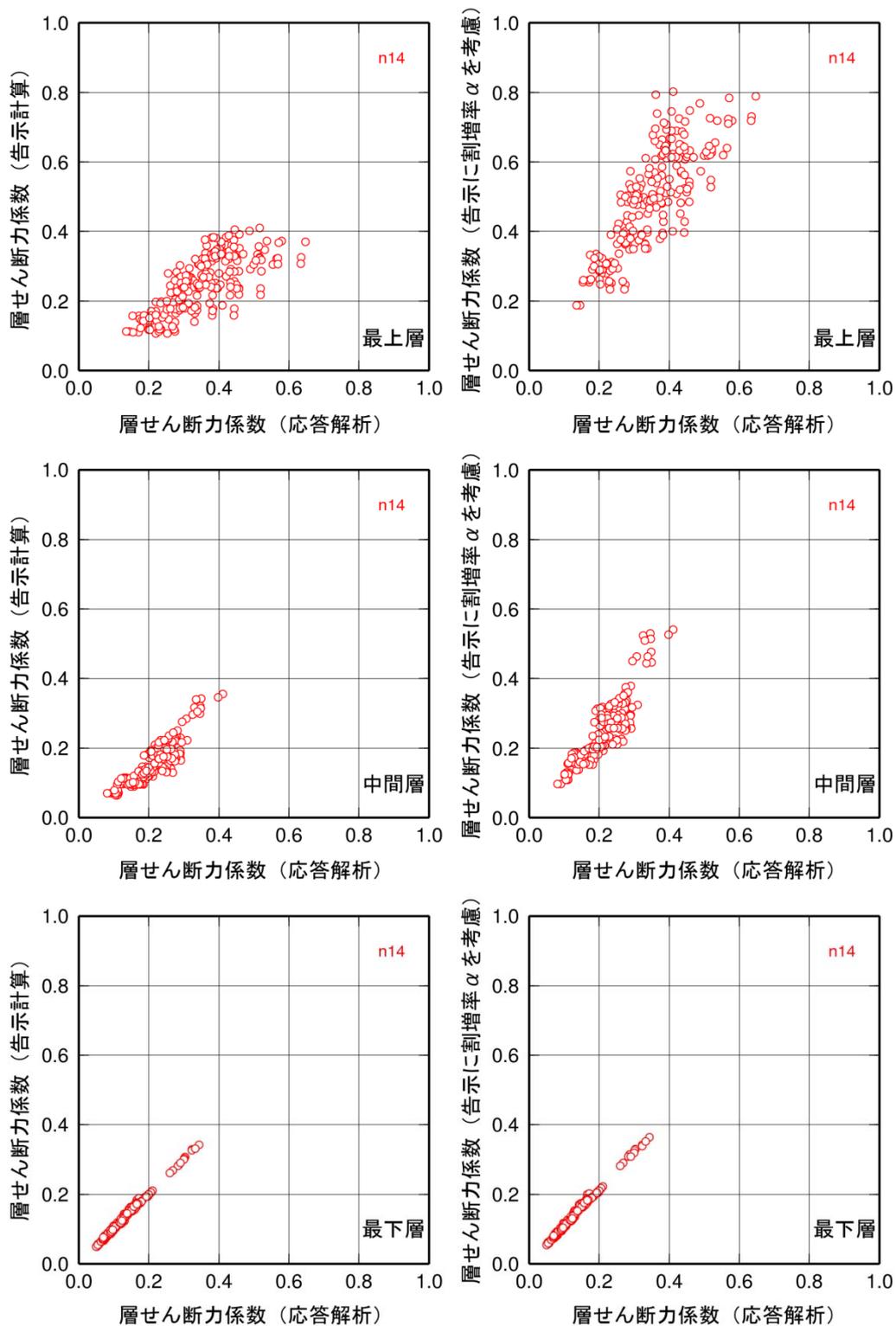


図 4.4-14 14 層モデルの応答解析及び告示 2009 号計算による層せん断力係数 (左図: 時刻歴解析の免震層最大変形を用いた告示 2009 号、右図: 設定法 1 による割増後、入力波: HACHINOHE NS 波 (50kine))

4-4-3 転倒モーメントの算定法に関する検討

本節では転倒モーメントの算定法について検討する。

図 4.4-15 は、3-2 節で実施した上部構造 14 層の建物モデル（減衰定数 2%）について、地震応答解析結果として得られた転倒モーメント時刻歴の最大値と、告示 2009 号の方法により求めた各層のせん断力を基に静的に算定した転倒モーメントを比較したものである。図 4.4-15 に示す 9 つの図上部のタイトルは解析モデルのパラメータを示す。「t25」は、上部構造剛体時の弾性接線周期 T_2 が 2.5 秒であり、「t40」は 4.0 秒、「t60」は 6.0 秒である。また「d0」は免震層の降伏変位が 0.1cm であることを示し、「d1」は 1cm、「d3」は 3cm である。図 4.4-15 より、免震層の降伏せん断力係数が小さな場合を除いて、応答解析結果の方がやや上回る傾向が見られる。

図 4.4-16 は、応答解析結果の最大地震層せん断力を用いて静的に算定した転倒モーメントと、告示 2009 号の方法により求めた各層のせん断力を基に静的に算定した転倒モーメントを比較したものである。前者地震層せん断力が後者と比較して高いことを反映して、転倒モーメントも大きな値となっている。

図 4.4-17 は、応答解析結果の転倒モーメント時刻歴の最大値と、応答解析結果の最大地震層せん断力を用いて静的に算定した転倒モーメントとを比較したものである。静的に算定した転倒モーメントに γ 倍した値が動的な転倒モーメントとすると、 γ はおよそ 0.5 程度となっている。図 4.4-19 に γ の値をプロットした。

図 4.4-18 は、参考のため、免震層の変形について地震応答解析結果と告示 2009 号による方法とを比較したものである。この図で、免震層の応答変形がほぼ一致する免震層パラメータでの比較においても、告示 2009 号の方法により求めた各層のせん断力を基に静的に算定した転倒モーメントよりも応答解析結果の方がやや上回ることが図 4.4-15 からわかる。また、免震層の応答変形がほぼ一致する免震層パラメータでの比較により、応答解析結果の最大地震層せん断力を用いて静的に算定した転倒モーメントは告示 2009 号の方法により求めた各層のせん断力を基に静的に算定した転倒モーメントよりも大きな値となること、動的な転倒モーメントは静的に算定した転倒モーメントのおよそ 0.5 倍程度となっていることが図 4.4-16 および図 4.4-17 よりわかる。

図 4.4-20 および図 4.4-21 と図 4.4-22 および図 4.4-23 は、2 つの解析ケースに対して転倒モーメントの時刻歴とそのフーリエスペクトルを示している。2 つの解析ケースはいずれも、基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期 T_0 が 0.98 秒、減衰定数が 2%、免震層線形要素の上部構造剛体時の弾性接線周期 T_2 が 4 秒である。ただし、ケース 1 は、免震層の完全弾塑性要素の降伏せん断力係数 α_y が 0.03、降伏変位 d_c が 3cm であり、ケース 2 は、 α_y が 0.05、降伏変位 d_c が 0.1cm である。図 4.4-21 および 23 より 2.5Hz 以上の高振動数成分はほとんど見られないことがわかる。

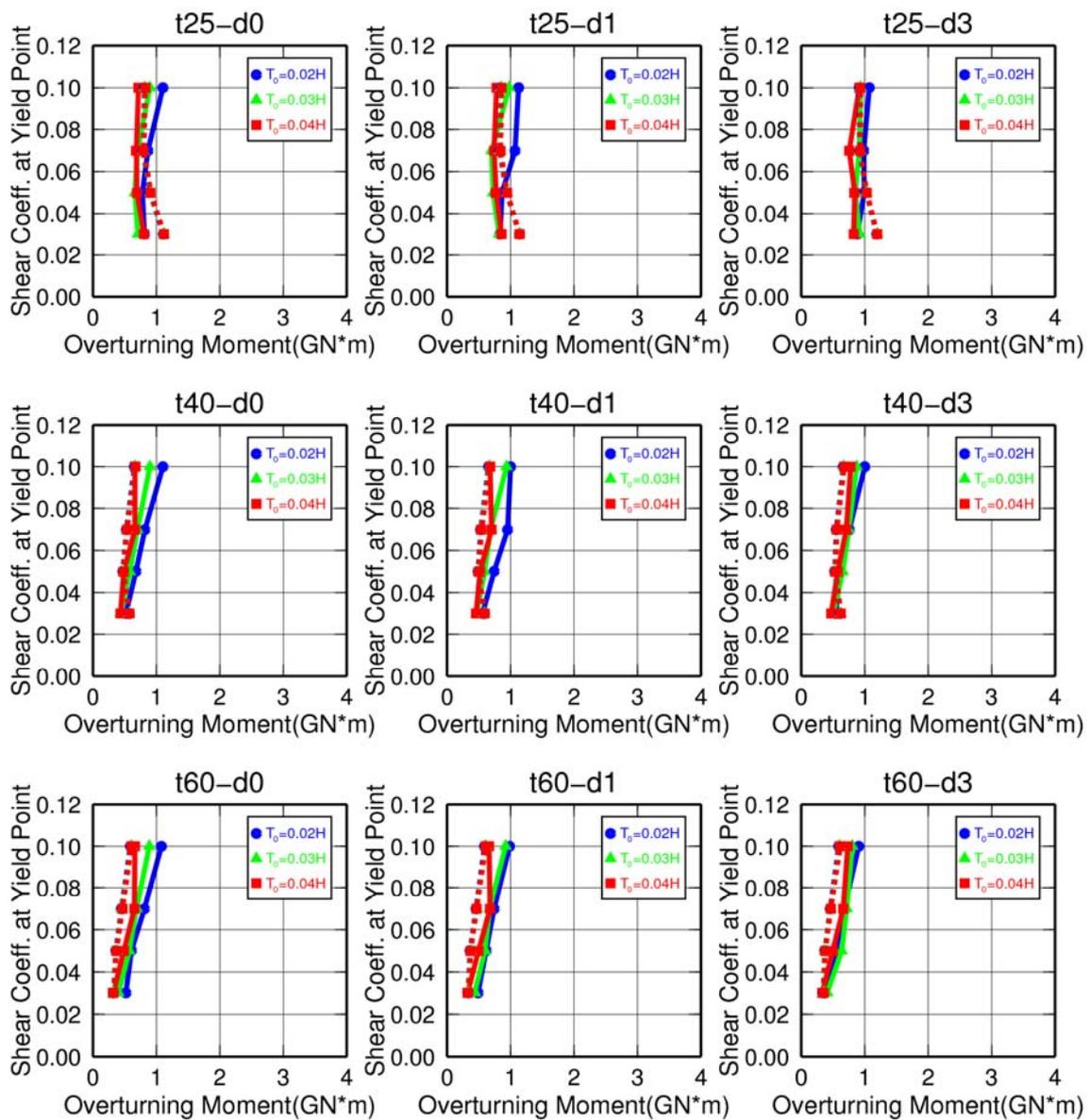


図 4.4-15 14 層モデルの転倒モーメント (実線：時刻歴応答解析結果 (時刻歴データから算定)、点線：告示 2009 号計算結果、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

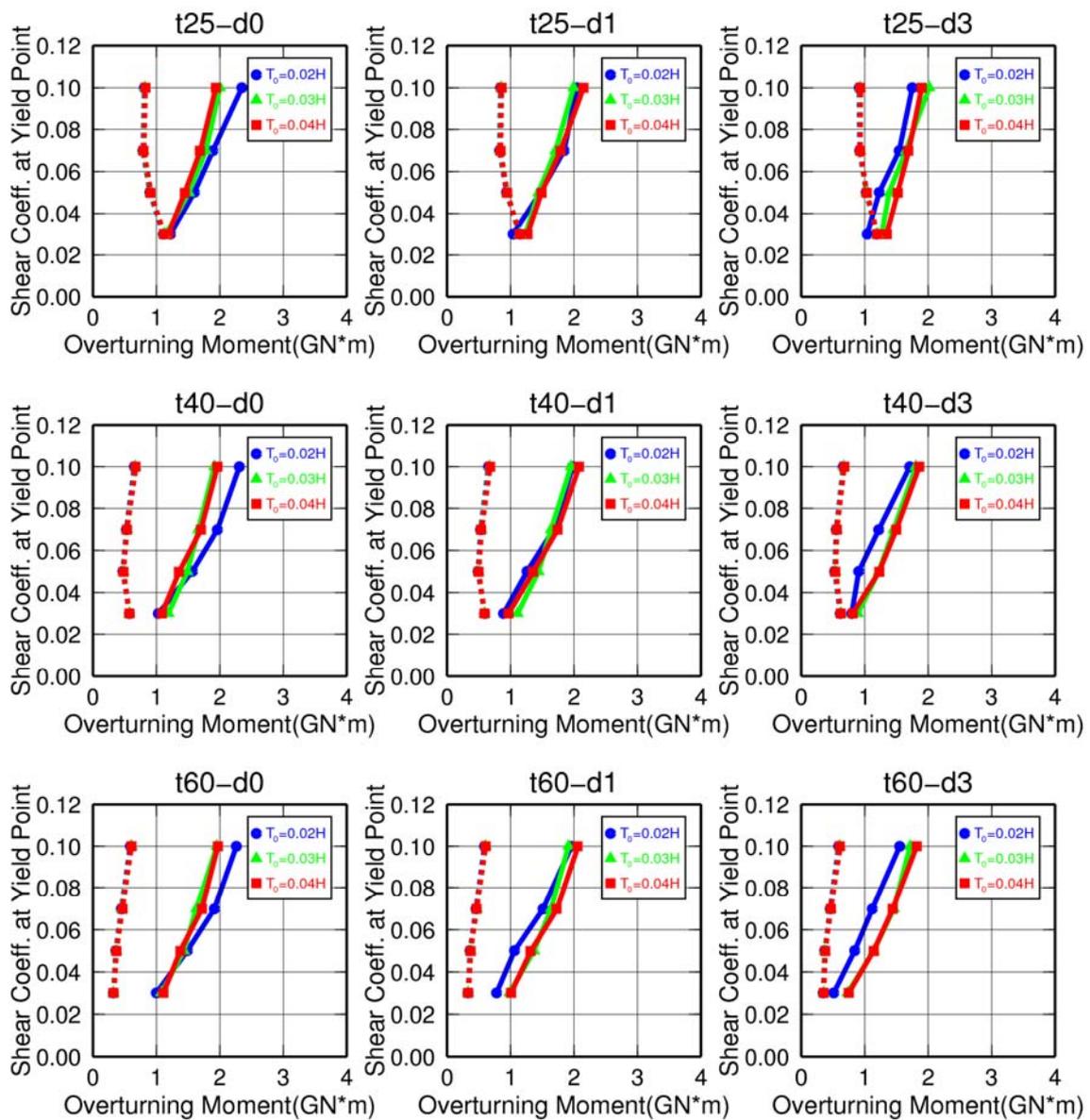


図 4.4-16 14 層モデルの転倒モーメント (実線：時刻歴応答解析結果 (最大応答せん断力から算定)、点線：告示 2009 号計算結果、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

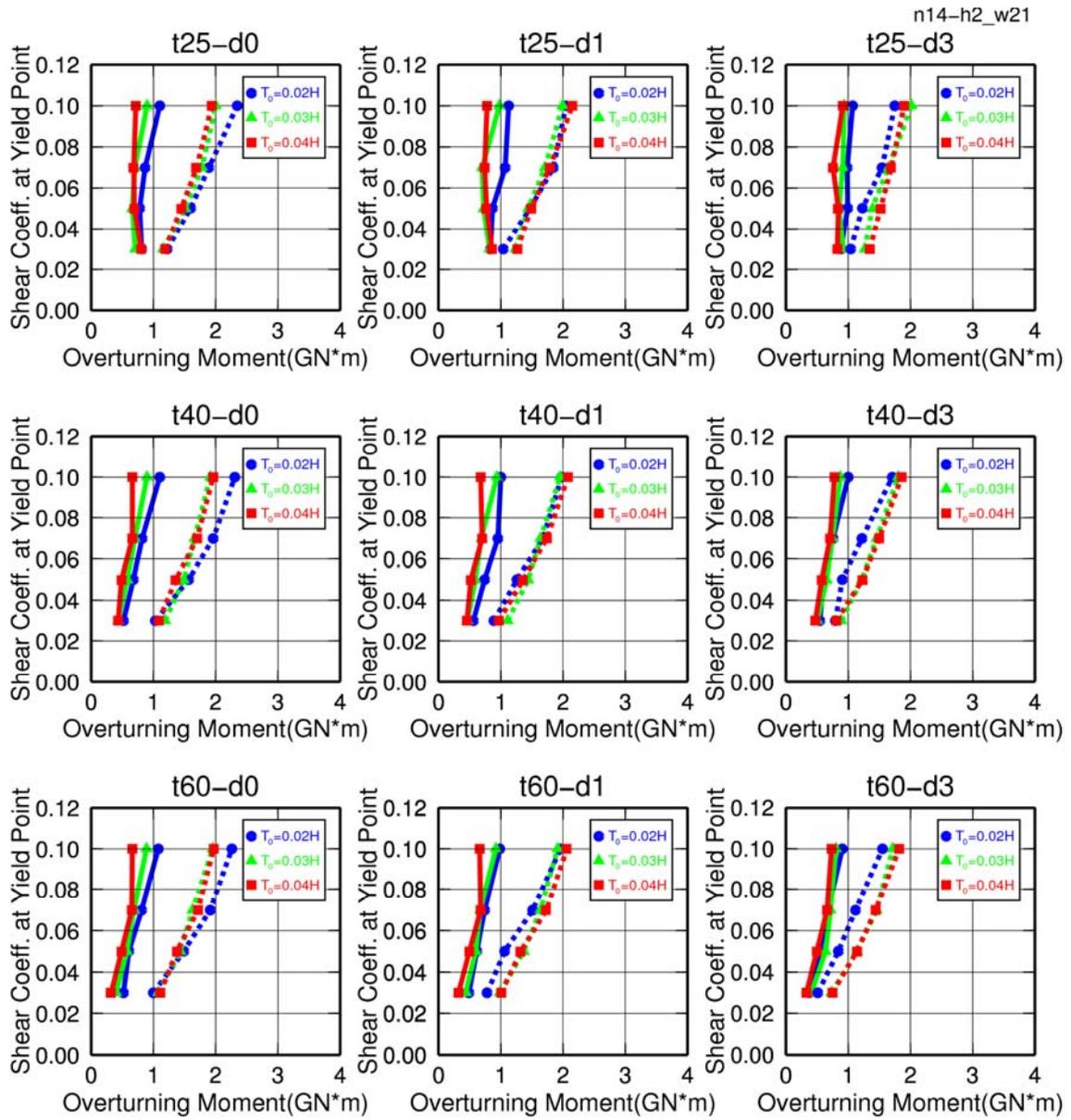


図 4.4-17 14 層モデルの転倒モーメント（実線：時刻歴データから算定、点線：最大応答せん断力から算定、入力波：2 種地盤卓越周期（短））

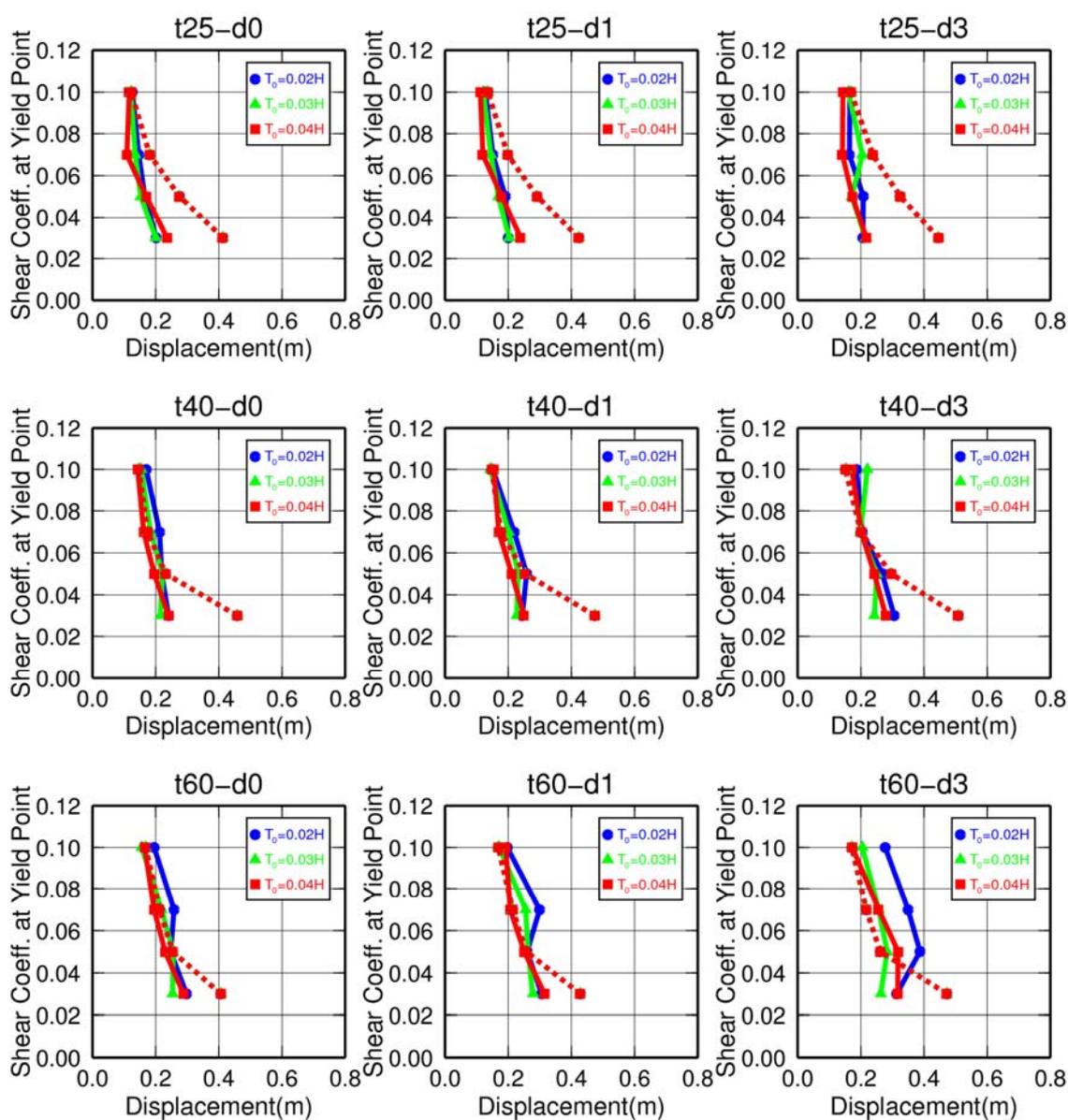


図 4.4-18 14 層モデルの免震層変位 (実線：時刻歴応答解析結果、点線：告示 2009 号計算結果、入力波：2 種地盤卓越周期 (短))

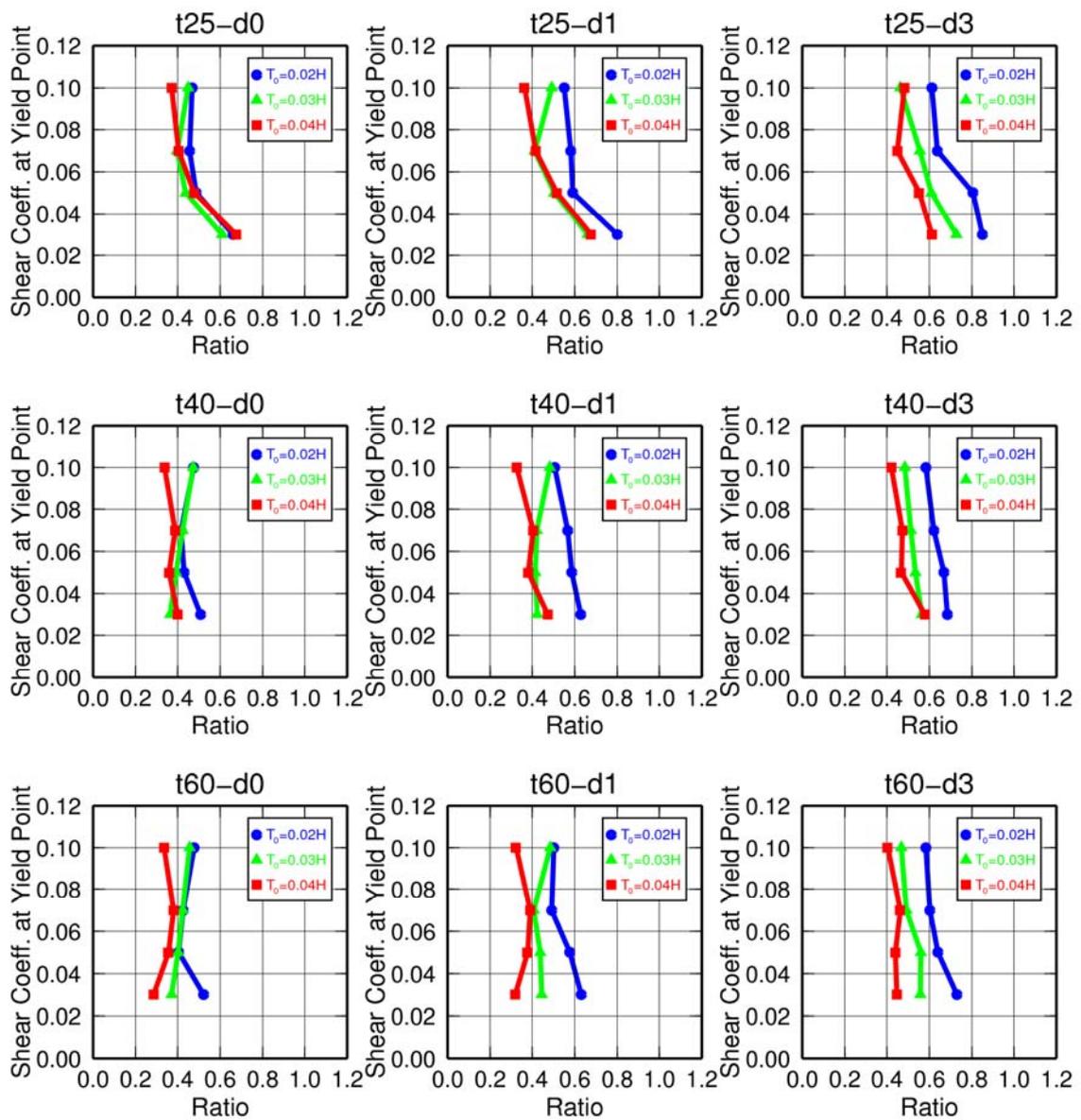


図 4.4-19 14 層モデルの転倒モーメントの比率 (時刻歴データからの算定値/最大応答せん断力からの算定値)、入力波: 2 種地盤卓越周期 (短)

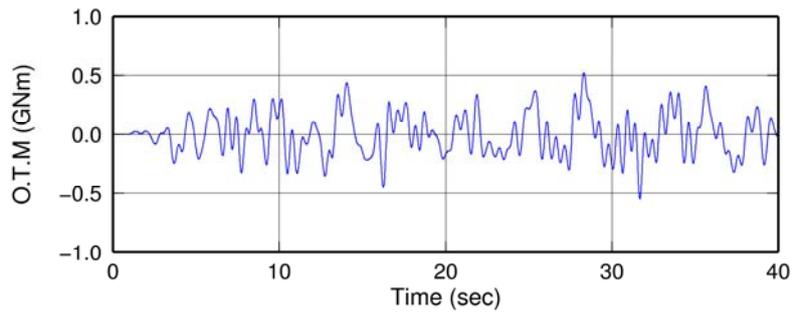


図 4.4-20 ケース 1 (降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm) の転倒モーメントの時刻歴波形

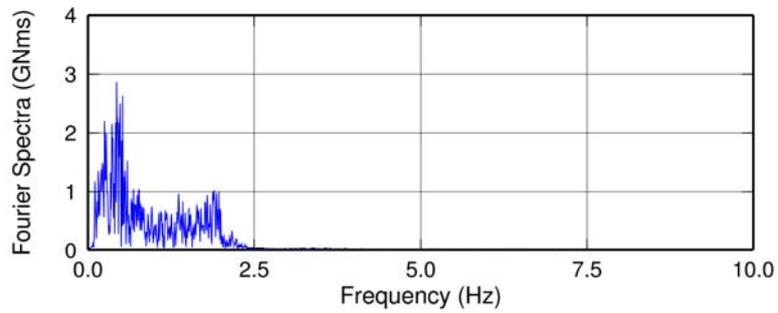


図 4.4-21 ケース 1 (降伏せん断力係数 0.03、降伏変位 3cm) の転倒モーメントのフーリエ振幅

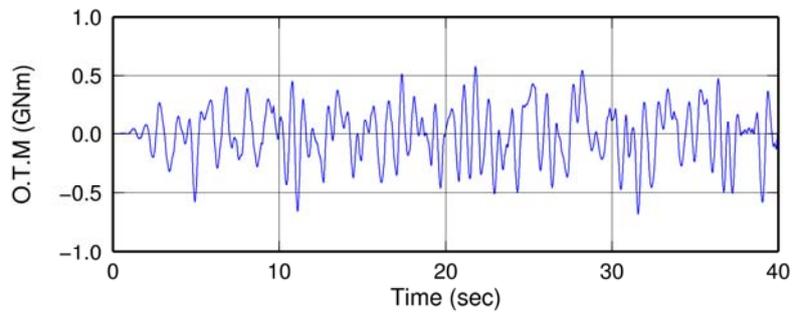


図 4.4-22 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の転倒モーメントの時刻歴波形

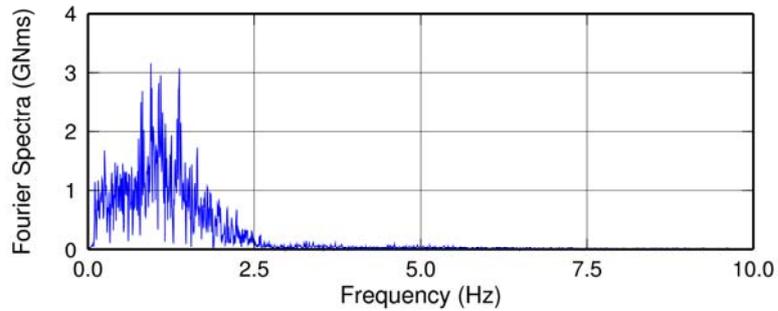


図 4.4-23 ケース 2 (降伏せん断力係数 0.05、降伏変位 0.1cm) の転倒モーメントのフーリエ振幅

4-5 提案手法の基準化に向けたパラメータ平滑化に関する検討

4-5-1 区分毎の回帰式の連続化

4-2 節では、上部構造の最上部の地震層せん断力係数について、告示 2009 号に対する地震層せん断力係数の割増率 α_t の提案および免震層のせん断力係数に対する増幅率 β_t の新たな提案を行った。4-2-1 項で示した α_t および β_t は、 T_1/T_0 の値に応じて、区分けして定式化されており、区分された領域の境界部分では不連続な値となる。よって、 T_1/T_0 が境界付近の値では、小さな T_1/T_0 の違いで α_t および β_t が大きく異なってしまうことが考えられる。

ここでは、4-2 節で示した α_t および β_t をパラメータの変動に対して連続的に変化可能な式にて表現することを試みる。

(1) 設定法 1 における割増率 α_t

図 4.5-1 に設定法 1 の a. (第 2 種地盤 (短)) による割増率 α_t をパラメータに対して 3 次元的にプロットした。 T_1/T_0 が 0.5, 1.5, 3.0 で α_t は不連続となっている。

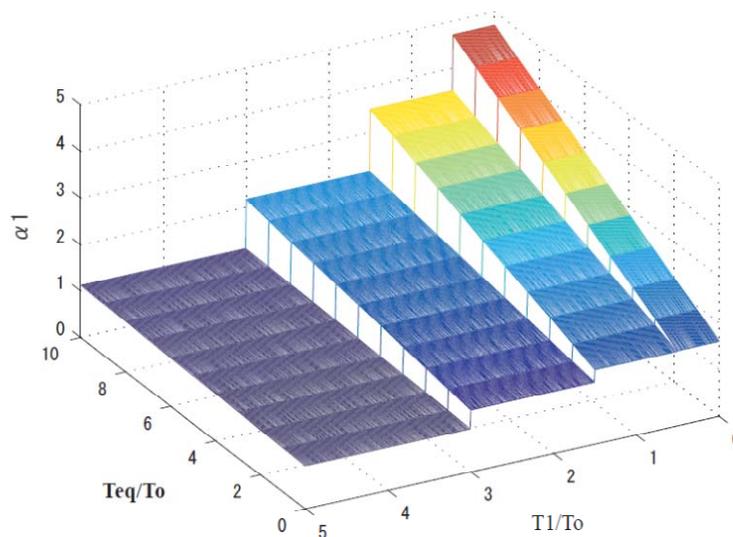


図 4.5-1 設定法 1.a (第 2 種地盤 (短)) の割増率 α_t

α_t を連続関数として表現するため、 T_1/T_0 にて表現する関数 f_1 、 f_2 を用いて α_t は式(4.5-1)のように表せるとする。

$$\alpha_t = f_1(T_1/T_0) + f_2(T_1/T_0) \cdot (T_{eq}/T_0) \quad (4.5-1)$$

以下に、設定法 1 の a. (第 2 種地盤 (短)) の入力地震動に対する関数 f_1 、 f_2 の算定方法を示す。

f_1 、 f_2 を T_1/T_0 に対する線形関数で表現することとし、 f_1 、 f_2 は、最小二乗法を用いて設定する。 α_t は 4-3-1 の式(4-3-1)~(4-3-4)として T_1/T_0 に応じて 4 つに区分けして定義されている。 α_t が不連続となる T_1/T_0 においては、その両側で定義された値の中央値を f_1 、 f_2 の目標値として設定して

いる。図 4.5-2 中の黒点は、 f_1 、 f_2 を求めるために用いたデータ値である。図 4.5-2 より f_1 の値は T_1/T_0 が1以下において、1.6で一定とした。また図 4.5-1 の3次元プロットから T_1/T_0 が3以上では α_t がほぼ1となることから、 f_1 、 f_2 をそれぞれ1および0とするが、一定値とする T_1/T_0 の値は、回帰式との整合性を加味して $T_1/T_0=3.6$ とした。

算出した f_1 、 f_2 は以下の式(4.5-2)および(4.5-3)である。

$$f_1 = \begin{cases} 1.6 & (T_1/T_0 \leq 1.0) \\ -0.23(T_1/T_0 - 1.0) + 1.6 & (1.0 < T_1/T_0 \leq 3.6) \\ 1.0 & (3.6 < T_1/T_0) \end{cases} \quad (4.5-2)$$

$$f_2 = \begin{cases} -0.08(T_1/T_0 - 3.0) + 0.048 & (T_1/T_0 \leq 3.6) \\ 0 & (3.6 < T_1/T_0) \end{cases} \quad (4.5-3)$$

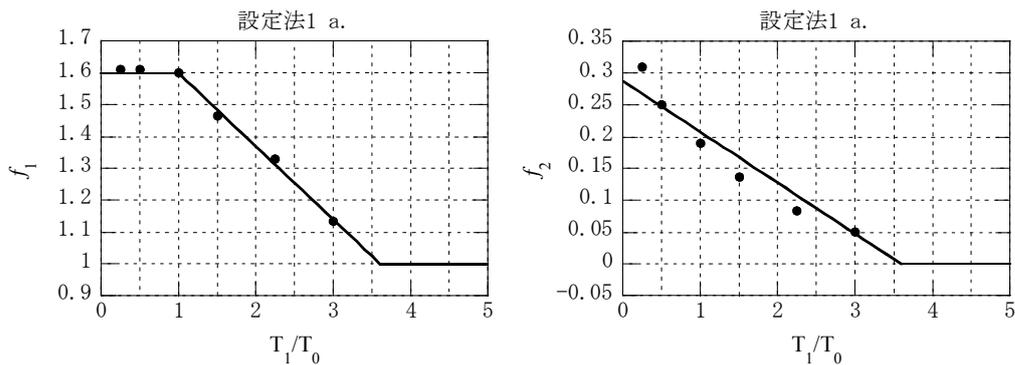
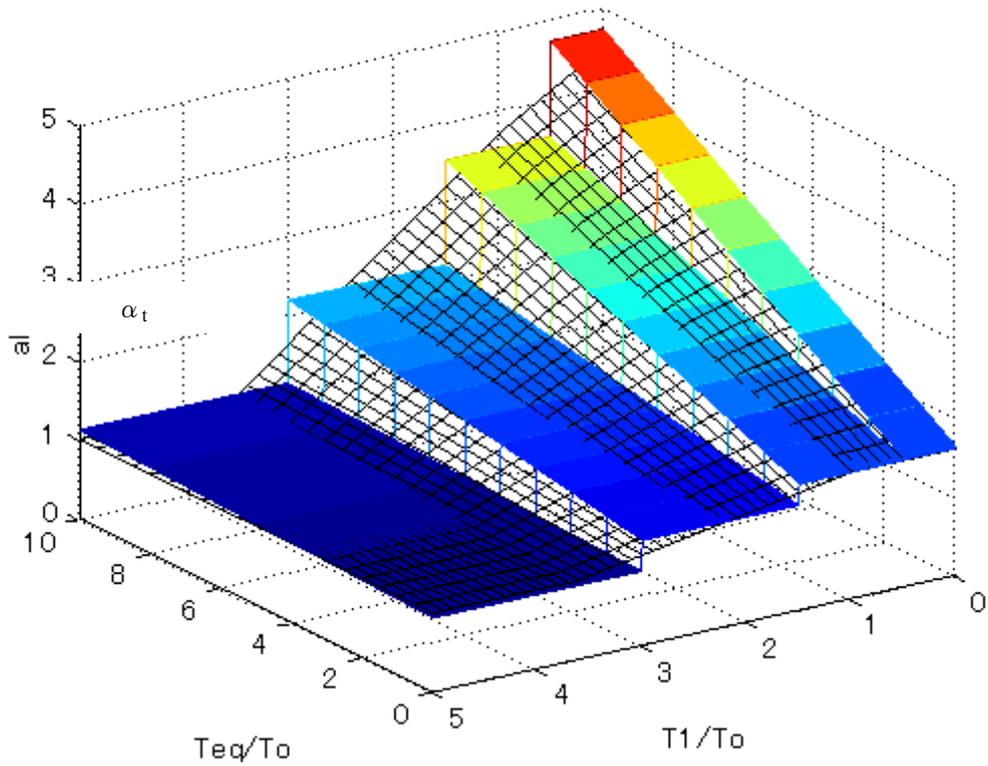


図 4.5-2 割増率 α_1 (第2種地盤 (短)) の f_1 および f_2

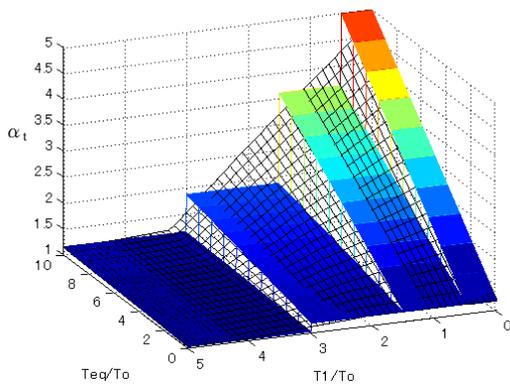
T_1/T_0 と f_1 、 f_2 の関係を図 4.5-2 に示す。実線で示した値がここで提案する f_1 、 f_2 である。 f_1 はデータ点との適合が極めて良好である。 f_2 では、 f_1 ほどの適合性はないものの概ね T_1/T_0 との関係を表現できていると考えられる。さらに適合性を増すために関数を曲線または折れ線にて表現することも可能であるが、ここでは簡便性を優先し線形関数を適用することとする。

割増率 α_t を図 4.5-3(a)に示す。図 4.5-3(a)中のワイヤーメッシュにより表現された空間分布が、(4.5-1)~(4.5-3)式により連続関数にて表現した α_t である。 T_1/T_0 が1未満の小さい値では、元々の α_t よりもやや過小評価となっているが、概ね α_t の値を表現できていることがわかる。

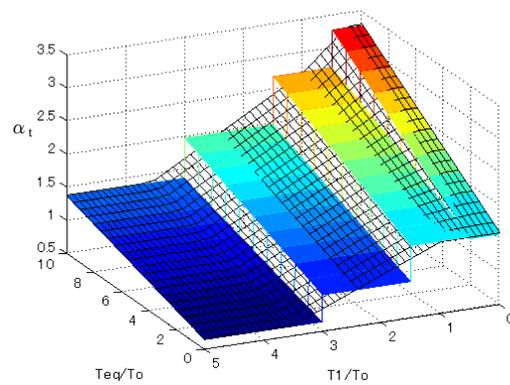
第1種地盤および第2種地盤 (長) における割増率 α_t も第2種地盤 (短) と同様に T_1/T_0 に対して連続的に表現し、図 4.5-3(b)および(c)に示す。これらも割増率 α_t を適切に表現していることがわかる。



(a) 第2種地盤（短）



(b) 第1種地盤



(c) 第2種地盤（長）

図 4.5-3 割増率 α_t の連続関数表示（ワイヤーメッシュ部）

割増率 α_t を T_1/T_0 および T_{eq}/T_0 に対して連続的に表現した式を以下に示す。

a. 第2種地盤（短）の入力に対する割増率

$$0 < T_1/T_0 \leq 1.0 \quad \alpha_t = 1.6 + \{0.288 - 0.080(T_1/T_0)\}(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-4)$$

$$1.0 < T_1/T_0 \leq 3.6 \quad \alpha_t = 1.83 - 0.23(T_1/T_0) + \{0.288 - 0.080(T_1/T_0)\}(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-5)$$

$$3.6 < T_1/T_0 \quad \alpha_t = 1.0 \quad (4.5-6)$$

b. 第1種地盤の入力に対する割増率

$$0 < T_1/T_0 \leq 2.25 \quad \alpha_t = 1.19 + \{0.360 - 0.107(T_1/T_0)\}(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-7)$$

$$2.25 < T_1/T_0 \leq 3.26 \quad \alpha_t = 1.34 - 0.073(T_1/T_0) + \{0.360 - 0.107(T_1/T_0)\}(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-8)$$

$$3.26 < T_1/T_0 \leq 4.25 \quad \alpha_t = 1.34 - 0.073(T_1/T_0) + 0.011(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-9)$$

$$4.25 < T_1/T_0 \quad \alpha_t = 1.03 + 0.011(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-10)$$

c. 第2種地盤（長）の入力に対する割増率

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.25 \quad \alpha_t = 1.58 + 0.17(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-11)$$

$$0.25 < T_1/T_0 \leq 1.0 \quad \alpha_t = 1.58 + (0.190 - 0.080(T_1/T_0))(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-12)$$

$$1.0 < T_1/T_0 \leq 3.5 \quad \alpha_t = 1.95 - 0.37(T_1/T_0) + (0.124 - 0.014(T_1/T_0))(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-13)$$

$$3.5 < T_1/T_0 \leq 3.7 \quad \alpha_t = 0.655 + (0.124 - 0.014(T_1/T_0))(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-14)$$

$$3.7 < T_1/T_0 \quad \alpha_t = 0.655 + 0.072(T_{eq}/T_0) \quad (4.5-15)$$

(2) 設定法2における増幅率 β_t

4-2節で示した設定法2の増幅率 β_t についても、 T_1/T_0 に対して連続となるように定式化を行った。図4.5-4は、第2種地盤（短）の入力地震動に対する増幅率 β_t について、4-2-2項で示した β_t を T_1/T_0 、非線形係数 NL を用いて3次元的に示したものである。 T_1/T_0 が0.5、1.5および3.0において β_t は不連続な値となっていることがわかる。

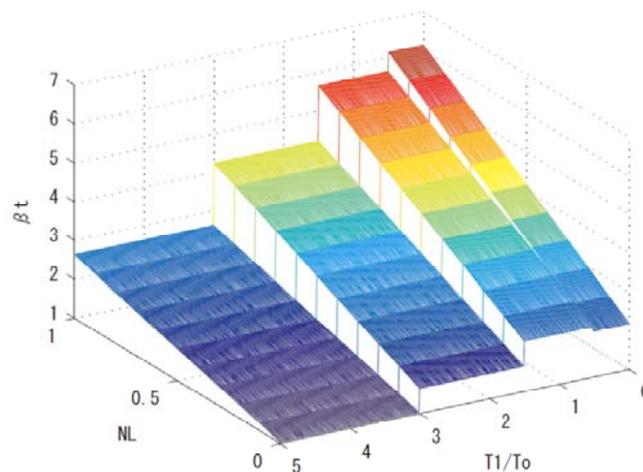
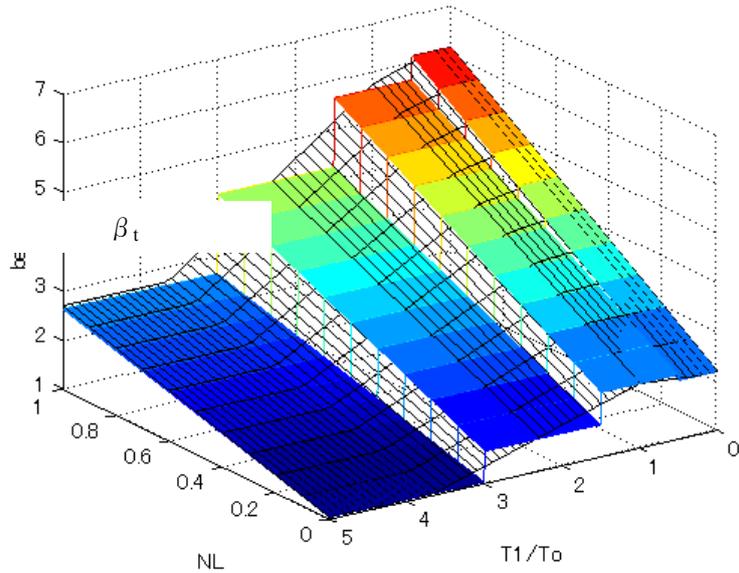


図4.5-4 設定法2.a（第2種地盤（短））の増幅率 β_t

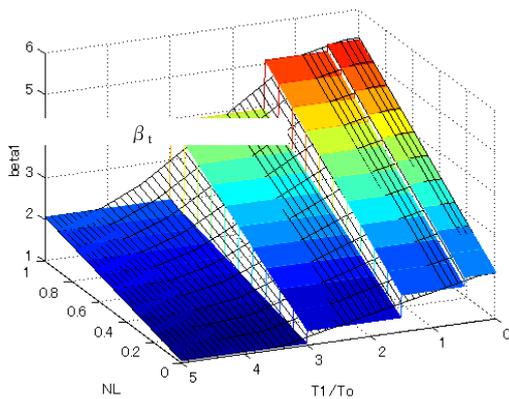
β_t を連続関数として表現するため、 T_1/T_0 にて表現する関数 g_1 、 g_2 を用いて β_t は式(4.5-16)のように表せるものとする。

$$\beta_t = g_1(T_1/T_0) + g_2(T_1/T_0) \cdot NL \quad (4.5-16)$$

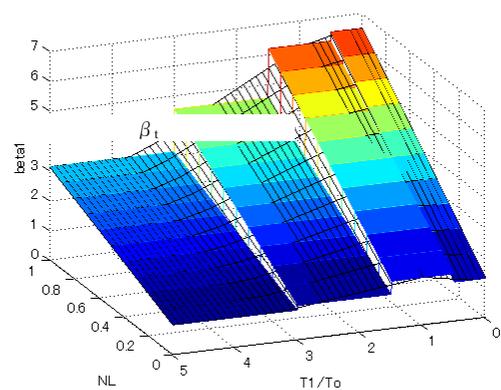
g_1 、 g_2 は、4-2-2項で示した β_t の式より α_t と同様に決定した。 T_1/T_0 を連続的に表現した β_t を図4.5-5に示す。図中における塗りつぶした段状の面が4-2-2項で示した β_t であり、ワイヤーマッシュで表現した曲面がここで提案する β_t である。ワイヤーマッシュの曲面は、 T_1/T_0 方向に対する各階段面の中央部を貫通しており、概ね4-2で示した β_t を表現できている。また、滑らかな形で表現されており、図4.5-4で見られる T_1/T_0 に関する β_t の不連続性が解消されていることがわかる。



(a) 第2種地盤 (短)



(b) 第1種地盤



(c) 第2種地盤 (長)

図4.5-5 設定法2の増幅率 β_t 連続関数表示 (ワイヤーマッシュ部)

増幅率 β_t を T_1/T_0 および NL に対して連続的に表現した式を以下に示す。

a. 第2種地盤 (短) の入力に対する増幅率

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.25 \quad \beta_t = 2.19 + 3.95NL \quad (4.5-17)$$

$$0.25 < T_1/T_0 \leq 1.0 \quad \beta_t = 2.15 + 0.160(T_1/T_0) + \{4.12 - 0.676(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-18)$$

$$1.0 < T_1/T_0 \leq 3.64 \quad \beta_t = 2.79 - 0.480(T_1/T_0) + \{4.12 - 0.676(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-19)$$

$$3.64 < T_1/T_0 \quad \beta_t = 1.04 + 1.66NL \quad (4.5-20)$$

b. 第1種地盤の入力に対する増幅率

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.25 \quad \beta_t = 2.10 + 3.20NL \quad (4.5-21)$$

$$0.25 < T_1/T_0 \leq 1.0 \quad \beta_t = 2.18 - 0.327(T_1/T_0) + 3.20NL \quad (4.5-22)$$

$$1.0 < T_1/T_0 \leq 3.46 \quad \beta_t = 2.18 - 0.327(T_1/T_0) + \{3.90 - 0.700(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-23)$$

$$3.46 < T_1/T_0 \leq 4.13 \quad \beta_t = 1.05 + \{3.90 - 0.700(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-24)$$

$$T_1/T_0 > 4.13 \quad \beta_t = 1.05 + 1.01NL \quad (4.5-25)$$

c. 第2種地盤（長）の入力に対する増幅率

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.25 \quad \beta_t = 1.30 + 5.18NL \quad (4.5-26)$$

$$0.25 < T_1/T_0 \leq 1.0 \quad \beta_t = 1.21 + 0.373(T_1/T_0) + \{5.40 - 0.884(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-27)$$

$$1.0 < T_1/T_0 \leq 3.29 \quad \beta_t = 1.84 - 0.258(T_1/T_0) + \{5.40 - 0.884(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-28)$$

$$3.29 < T_1/T_0 \leq 3.72 \quad \beta_t = 0.99 + \{5.40 - 0.884(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-29)$$

$$T_1/T_0 > 4.13 \quad \beta_t = 0.99 + 2.11NL \quad (4.5-30)$$

(3) 設定法3における増幅率 β_t

4-2節で示した設定法3の増幅率 β_t についても、 T_0 に対して連続となるように定式化を行った。図4.5-6は、増幅率 β_t について、4-2-2項で示した β_t を T_0 、非線形係数 NL を用いて3次的に示したものである。 T_0 が0.75および1.5において β_t は不連続な値となっていることがわかる。

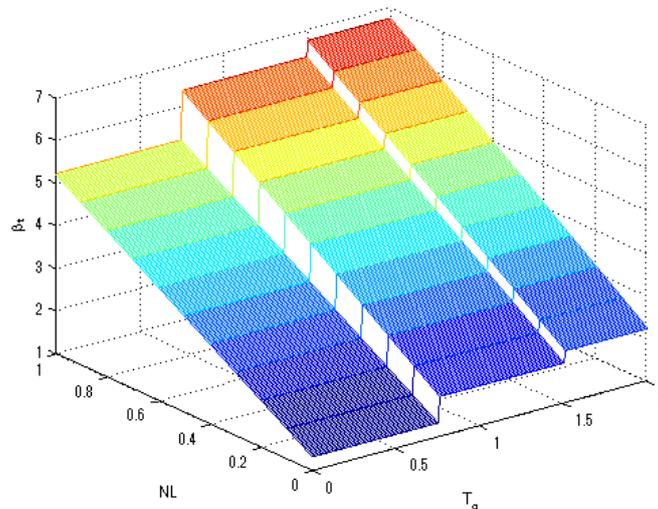


図4.5-6 設定法3の増幅率 β_t

β_t を連続関数として表現するため、 T_0 にて表現する関数 h_1 、 h_2 を用いて β_t は(4.5-31)式のように表せるものとする。

$$\beta_t = h_1(T_0) + h_2(T_0) \cdot NL \quad (4.5-31)$$

h_1 、 h_2 は、4-2節で示した β_t の式より α_t と同様に決定した。 T_0 を連続的に表現した β_t を図4.5-7に示す。図中における塗りつぶした段状の面が4-2-2項で示した β_t であり、ワイヤーマッシュで表現した曲面がここで提案する β_t である。ワイヤーマッシュの曲面は、 T_0 方向に対する各階段面の中央部を貫通しており、概ね4-2-2項で示した β_t を表現できている。また、滑らかな形で表現されており、図4.5-6で見られる T_0 に関する β_t の不連続性が解消されていることがわかる。

増幅率 β_t を T_0 および NL に対して連続的に表現した式を以下に示す。

$$0 < T_0 \leq 0.375 \quad \beta_t = 1.32 + 3.87NL \quad (4.5-32)$$

$$0.375 < T_0 \leq 1.125 \quad \beta_t = 1.015 + 0.813T_0 + (3.60 + 0.72T_0)NL \quad (4.5-33)$$

$$1.125 < T_0 \leq 1.75 \quad \beta_t = 1.426 + 0.448T_0 + (4.23 + 0.16T_0)NL \quad (4.5-34)$$

$$1.75 < T_0 \leq 2.0 \quad \beta_t = 2.21 + 4.51NL \quad (4.5-35)$$

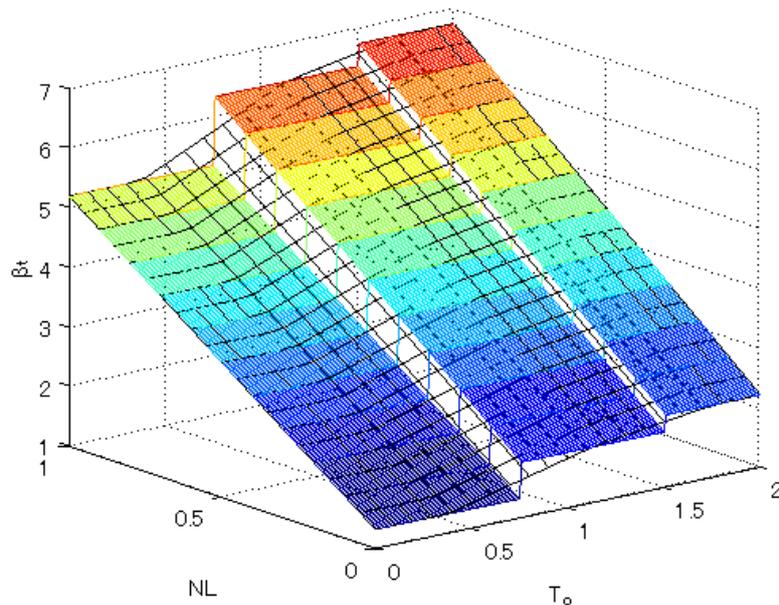


図 4.5-7 設定法3の増幅率 β_t 連続関数表示 (ワイヤーマッシュ部)

4-5-2 複数のパラメータ空間上の平面回帰式

4-5-1 項では、告示 2009 号に対する地震層せん断力係数の割増率 α_t および告示 2009 号に対する免震層のせん断力係数への増幅率 β_t に対して、定義された回帰式の連続化を行った。ただし、 T_1/T_0 の値に応じて 4 つまたは 5 つの区間に場合分けをし、 α_t 、 β_t は区間ごとに異なる関数により定義されているため、やや複雑である。本節では、より使用性を考慮し簡便な形とするために、場合分けを少なくし、複数のパラメータと増幅率 β_t との空間分布から増幅率 β_t の平面による回帰式を算出する。本項における平面回帰式算出の対象は、免震層からの増幅率として上部構造の地震層せん断力係数を設定する設定法 2 および設定法 3 (4-2 節参照) とする。

(1) 設定法 2

設定法 2 における地震層せん断力係数の増幅に関するパラメータは以下の 2 つである。

・ T_1/T_0

T_1 : 免震層 1 次剛性による上部構造剛時の体固有周期

T_0 : 基礎固定時の上部建物の 1 次固有周期

・ h_{eq} : 最大変形時の等価粘性減衰定数

復元力特性がバイリニアの場合、 h_{eq} は $0 \sim 2/\pi$ (≈ 0.64 , 完全剛塑性の場合) となり、非線形係数 NL とは $h_{eq} = (2/\pi) \cdot NL$ の関係がある (3-4-1 項参照)。

入力地震動を第 2 種地盤 (短) とした場合について、地震応答解析のケース数を T_1/T_0 と h_{eq} の値で分類した。結果を表 4.5-1 に示す。なお平面回帰の検討に用いる解析ケースにおいて、基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期が 0.98 となるケースが 7 階モデル、14 階モデル両方に存在するため、7 階モデルの固有周期が 0.98 の解析ケースは検討対象から除外している。表中に色づけしたセルは 10 ケースを超えるものである。 T_1/T_0 が小さい場合 (表中の左側)、 h_{eq} で 0.4~0.8 の頻度が多く、 T_1/T_0 が大きくなるに従い、データ数が多いケースは h_{eq} が小さい値に見られる。 T_1/T_0 が 3 を超えるデータは全 432 ケース中 12 ケース (2.8%) と少なく、その場合では h_{eq} が 0.5 を超えるケースはない。

表 4.5-2 に解析データ数の累積頻度分布を示す。表中の色分けは、 T_1/T_0 で 4 階級に区分されたデータのうち、 h_{eq} を指標としてデータ数がほぼ均等となるような 3 区分 ($T_1/T_0 > 3.0$ では 2 区分) を示し

表 4.5-1 T_1/T_0 と h_{eq} 解析計算条件別データ頻度 (第 2 種地盤 (短))

		T1/T0 = x									合計	
		0<x≤0.25	0.25<x≤0.5	0.5<x≤0.75	0.75<x≤1	1<x≤1.25	1.25<x≤1.5	1.5<x≤2.25	2.25<x≤3	3<x≤4		4<x≤5
0	≤ heq ≤ 0.1 × (2/π)	0	0	0	0	2	2	2	2	0	2	10
0.1 × (2/π)	< heq ≤ 0.2 × (2/π)	4	4	4	5	6	0	8	4	2	2	39
0.2 × (2/π)	< heq ≤ 0.3 × (2/π)	0	4	8	3	4	4	6	4	0	0	33
0.3 × (2/π)	< heq ≤ 0.4 × (2/π)	8	9	8	8	10	4	11	2	2	2	64
0.4 × (2/π)	< heq ≤ 0.5 × (2/π)	10	17	12	8	3	4	9	4	2	0	69
0.5 × (2/π)	< heq ≤ 0.6 × (2/π)	13	10	10	6	7	4	8	2	0	0	60
0.6 × (2/π)	< heq ≤ 0.7 × (2/π)	9	13	10	4	4	4	4	0	0	0	48
0.7 × (2/π)	< heq ≤ 0.8 × (2/π)	10	11	2	2	0	2	0	0	0	0	27
0.8 × (2/π)	< heq ≤ 0.9 × (2/π)	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	10
0.9 × (2/π)	< heq ≤ 2/π	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計		60	72	54	36	36	24	48	18	6	6	360

表 4.5-2 T_1/T_0 と h_{eq} 解析計算条件別データ頻度 累積頻度分布 (第2種地盤 (短))

			$T_1/T_0 \leq 0.5$		$0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5$		$1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0$		$3.0 < T_1/T_0$	
			累積頻度	累積度数分布	累積頻度	累積度数分布	累積頻度	累積度数分布	累積頻度	累積度数分布
0	\leq	$h_{eq} \leq 0.1 \times (2/\pi)$	0	0%	4	2%	6	8%	2	17%
$0.1 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.2 \times (2/\pi)$	10	6%	21	11%	22	28%	6	50%
$0.2 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.3 \times (2/\pi)$	14	9%	47	25%	32	41%	6	50%
$0.3 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.4 \times (2/\pi)$	35	22%	80	43%	49	63%	10	83%
$0.4 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.5 \times (2/\pi)$	68	44%	115	62%	64	82%	12	100%
$0.5 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.6 \times (2/\pi)$	95	61%	150	81%	74	95%	12	100%
$0.6 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.7 \times (2/\pi)$	121	78%	178	96%	78	100%	12	100%
$0.7 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.8 \times (2/\pi)$	144	92%	186	100%	78	100%	12	100%
$0.8 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 0.9 \times (2/\pi)$	156	100%	186	100%	78	100%	12	100%
$0.9 \times (2/\pi)$	$<$	$h_{eq} \leq 2/\pi$	156	100%	186	100%	78	100%	12	100%
合計			156		186		78		12	

表 4.5-3 解析パラメータおよび増幅率の統計データ (第2種地盤 (短))

T_1/T_0	h_{eq}		T_1/T_0	h_{eq}	C_t/C_0	C_t/C_0	C_t/C_0	C_m/C_0	C_m/C_0	C_m/C_0
			(平均)	(平均)	(平均)	(σ)	(平均+ σ)	(平均)	(σ)	(平均+ σ)
0~0.5	0	~ $0.4 \times (2/\pi)$	0.318	0.180	3.07	0.73	3.80	1.501	0.22	1.72
	$0.4 \times (2/\pi)$	~ $0.6 \times (2/\pi)$	0.296	0.319	4.49	0.73	5.22	1.879	0.35	2.23
	$0.6 \times (2/\pi)$	~ $2/\pi$	0.271	0.459	5.62	0.67	6.29	2.359	0.37	2.73
0.5~1.5	0	~ $0.3 \times (2/\pi)$	0.944	0.119	2.76	0.43	3.19	1.535	0.20	1.73
	$0.3 \times (2/\pi)$	~ $0.5 \times (2/\pi)$	0.903	0.249	3.89	0.69	4.58	1.865	0.27	2.13
	$0.5 \times (2/\pi)$	~ $2/\pi$	0.907	0.393	4.79	0.66	5.46	2.263	0.29	2.55
1.5~3.0	0	~ $0.2 \times (2/\pi)$	2.15	0.074	1.95	0.39	2.34	1.307	0.19	1.50
	$0.2 \times (2/\pi)$	~ $0.4 \times (2/\pi)$	2.04	0.185	2.37	0.48	2.84	1.399	0.16	1.56
	$0.4 \times (2/\pi)$	~ $2/\pi$	1.99	0.328	3.27	0.64	3.91	1.757	0.26	2.02
3.0~	0	~ $0.4 \times (2/\pi)$	3.79	0.072	1.23	0.11	1.34	1.080	0.03	1.11
	$0.4 \times (2/\pi)$	~ $2/\pi$	3.48	0.241	1.71	0.17	1.87	1.198	0.05	1.24

ている。表 4.5-2 で示した区分ごとの解析パラメータおよび地震層せん断力係数の免震層に対する最上階の増幅率 C_t/C_0 および中間階の増幅率 C_m/C_0 の統計データを表 4.5-3 に示す。中間階の地震層せん断力係数 C_m としては、7 層モデルの場合は上部構造 3 階と 4 階の値の平均値、14 層モデルでは上部構造 7 階の値とした。

表中の σ は標準偏差を表す。 T_1/T_0 が小さいほど、また h_{eq} が大きいほど、 C_t/C_0 は大きな値となる傾向が現れている。

表 4.5-3 で得られた C_t/C_0 (平均) が T_1/T_0 及び h_{eq} の線形和として表されるように定式化を試みた。回帰計算より (4.5-36) 式が得られた。

$$C_t/C_0 \quad \beta_t = -0.58 \cdot (T_1/T_0) + 6.6 h_{eq} + 2.5 \quad (4.5-36)$$

ただし、上記の値が 1.0 以下の時は、1.0 とする。

また、地震層せん断力係数の免震層に対する中間階の増幅率 $\beta_m = C_m/C_0$ も C_t/C_0 と同様に定式化を行った。

$$C_m/C_0 \quad \beta_m = -0.17 \cdot (T_1/T_0) + 2.0 h_{eq} + 1.4 \quad (4.5-37)$$

ただし、上記の値が 1.0 以下の時は、1.0 とする。

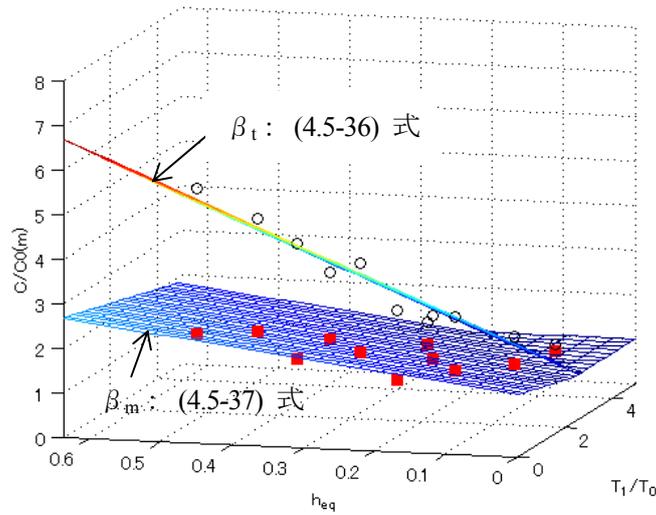


図 4.5-7 設定法 2 におけると解析パラメータの関係 (第 2 種地盤 (短))

(点は解析応答結果統計値、ワイヤメッシュ平面は (4.5-36) 式, (4.5-37) 式を示す)

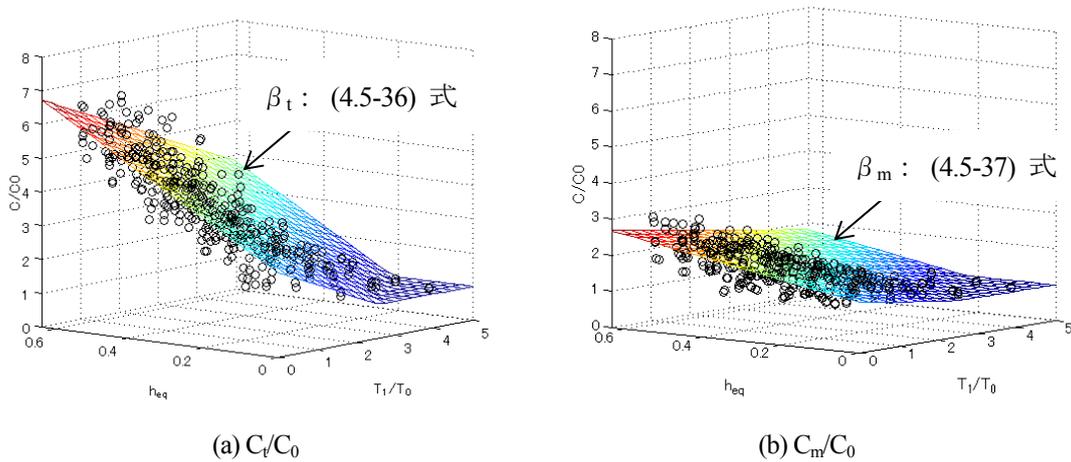


図 4.5-8 解析結果増幅率と設定法 2 の提案式との比較 (第 2 種地盤 (短))

回帰式(4.5-36)および(4.5-37)が表す平面 β_t 、 β_m と解析結果の統計データとの関係を図 4.5-7 に示す。(4.5-36)式、(4.5-37)式はそれぞれ C_t/C_0 および C_m/C_0 の傾向を概ね表現できている。

解析結果の増幅率各データと回帰平面との比較を図 4.5-8 に示す。(4.5-36)式および(4.5-37)式を表す平面がデータの群がりの中央部分を貫通しており、(4.5-36)式および(4.5-37)式がデータ群の平均特性を表現できていることがわかる。

一方、4.5-1 項で示した最上階の増幅率 β_t は (4.5-17)~(4.5-20)式として表されており、 T_1/T_0 に対して場合分けして定義され、(4.5-36)式よりも複雑である。

$$0 < T_1/T_0 \leq 0.25 \quad \beta_t = 2.19 + 3.95NL \quad (4.5-17)$$

$$0.25 < T_1/T_0 \leq 1.0 \quad \beta_t = 2.15 + 0.160(T_1/T_0) + \{4.12 - 0.676(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-18)$$

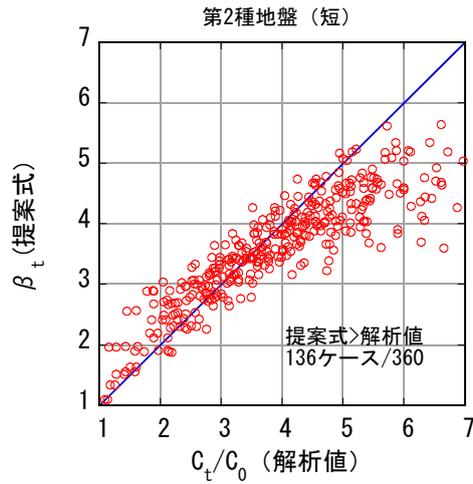


図 4.5-9 β_t 提案式と解析値との関係 ((4-5-17)式~(4-5-20)式、第 2 種地盤 (短))

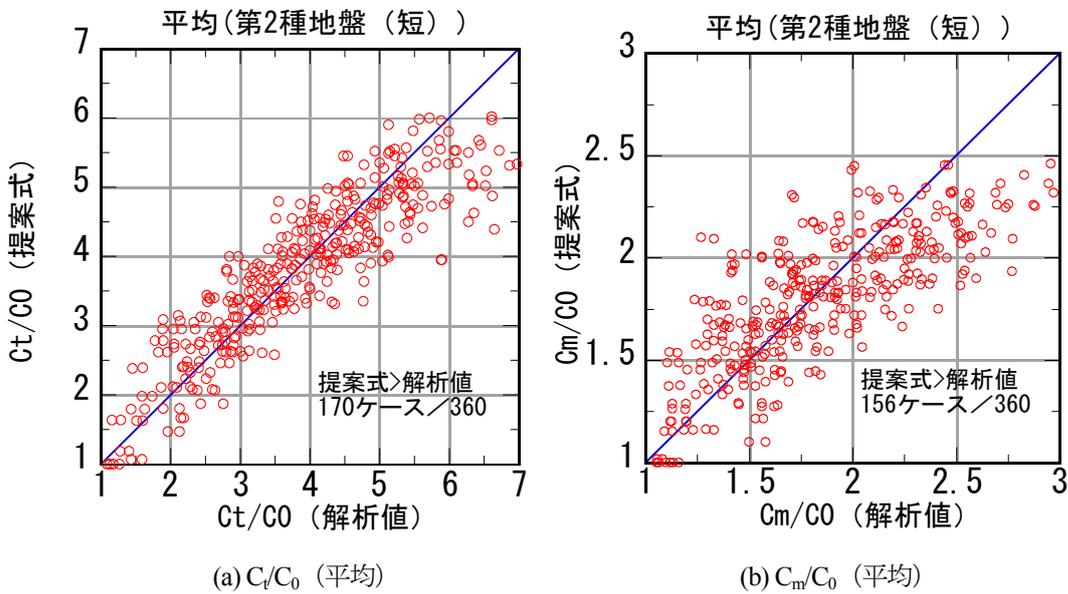


図 4.5-10 設定法 2 における増幅率の提案式 ((4.5-36)式、(4.5-37)式) と解析値との比較 (第 2 種地盤 (短))

$$1.0 < T_1/T_0 \leq 3.64 \quad \beta_t = 2.79 - 0.480(T_1/T_0) + \{4.12 - 0.676(T_1/T_0)\}NL \quad (4.5-19)$$

$$3.64 < T_1/T_0 \quad \beta_t = 1.04 + 1.66NL \quad (4.5-20)$$

(4-5-17)式~(4-5-20)式に示す 4-5-1 項で検討した第 2 種地盤 (短) における β_t の提案式と解析値との関係を図 4.5-9 に示す。提案式が解析値を上回るケースが全 360 ケース中 136 ケースであり、全体の 38%であった。一方、本節で示す提案式(4.5-36)式および(4.5-37)式と解析値の比較を図 4.5-10 に示す。図(a)より C_t/C_0 において提案式が解析値を上回るケースは全体の 47%となり、前節の提案式 β_t よりもその値は大きくなっている。また、図 4.5-9 と図 4.5-10(a)ともに C_t/C_0 が大きな値では、提案式が解析値を下回るものが見られる。図 4.5-10(b)より C_m/C_0 で提案式が解析値を上回るケースは全体の 43%であり、 C_t/C_0 と同様に C_m/C_0 においても解析値が大きくなる場合に提案式が解析値よりも小さくなる場

合が多くなっていることがわかる。

第1種地盤および第2種地盤（長）における時刻歴応答解析結果の増幅率と設定法2の β_t を表す(4.5-36)式および β_m を表す(4.5-37)式との比較を図4.5-11に示す。いずれの図からも、提案式より求めた増幅率は概ね解析結果による増幅率を上回る傾向にあることがわかる。

上部構造の最上階の地震層せん断力係数 C_t 、中間階の地震層せん断力係数 C_m を設定法2に基づいて求めた。告示2009号による免震層の応答変位を用いた場合と時刻歴応答解析による免震層最大変位を用いた場合との比較を図4.5-12に示す。それぞれ図の横軸は時刻歴応答解析の値、縦軸は設定法による増幅率を(4.5-36)式および(4.5-37)式を用いて算出し、左図は告示2009号による免震層の応答変位を用いて算出した場合、右図は時刻歴応答解析による免震層変位を用いた場合である。右図に対して左図は点のばらつきがやや大きくなる傾向にある。入力地震動が第2種地盤（短）と異なる場合の解析結果との比較を図4.5-13に示す。図4.5-13の各図は図4.5-12の左図にある告示2009号による変位による算出結果と同様の傾向を示していることがわかる。

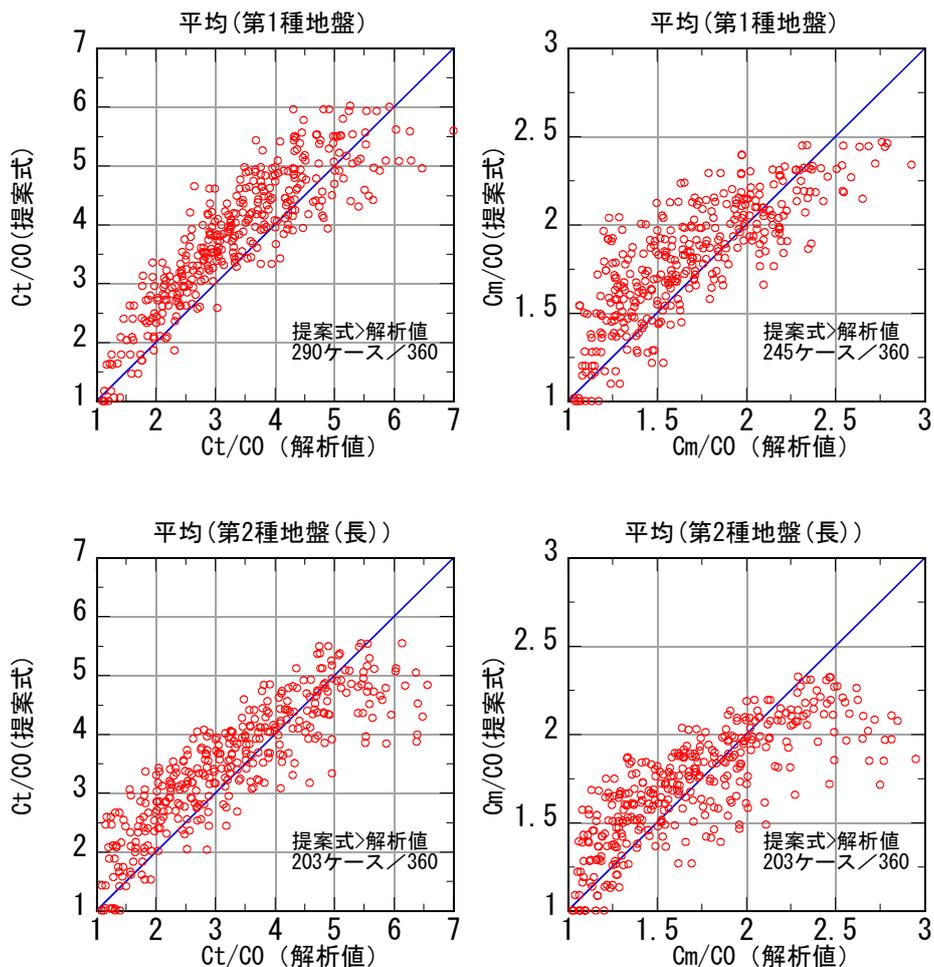


図4.5-11 設定法2 第1種地盤および第2種地盤（長）における増幅率

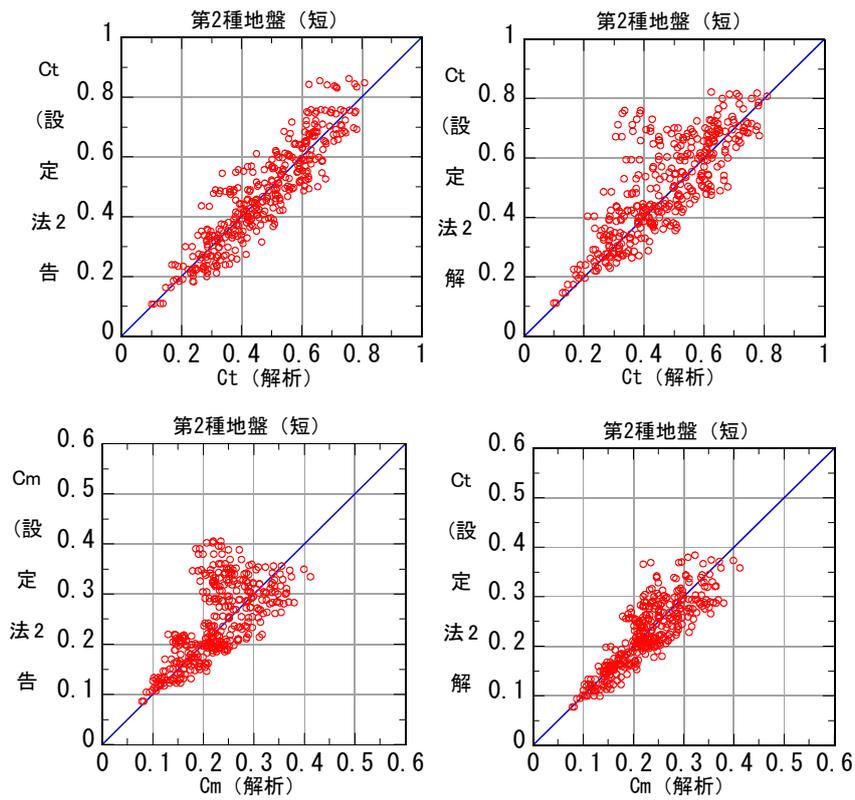


図 4.5-12 設定法 2 による C_t および C_m 免震層変位算定法による違い
(左：告示 2009 号、右：時刻歴解析)

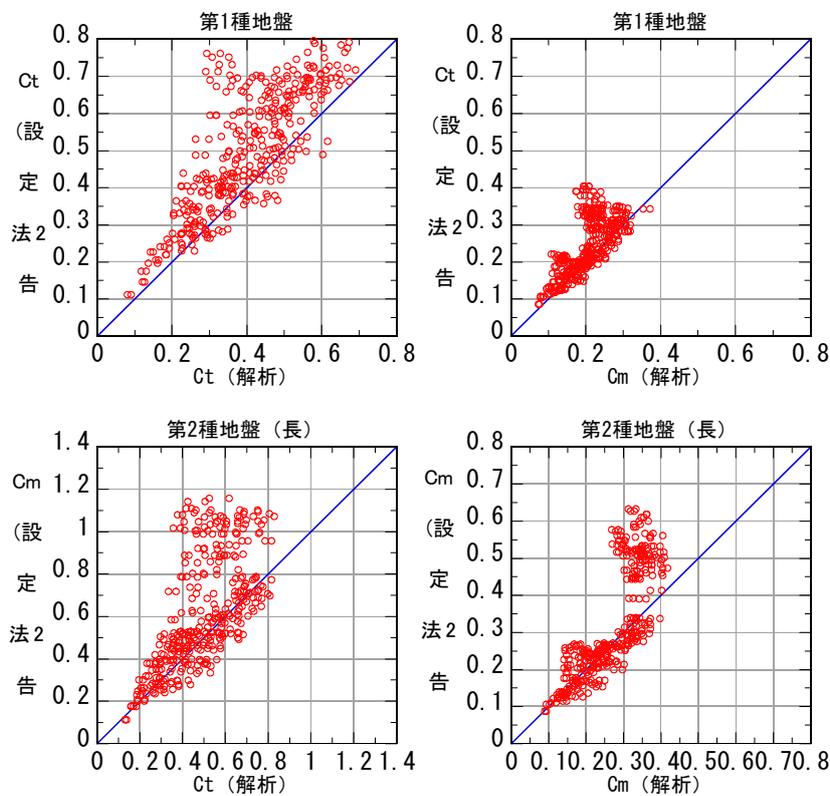


図 4.5-13 告示 2009 号による変位を用いた設定法 2 の C_t と C_m (第 1 種地盤、第 2 種地盤 (長))

(2) 設定法3

設定法3において増幅率に関与するパラメータは以下の2つである。

- T_0
- h_{eq}

4-2-1項で示した平面化を施す前の設定法3と増幅率解析結果と解析パラメータの関係を図4.5-14に示す。非線形係数NLが大きく、かつ T_0 が長いときに応答結果および設定法3による増幅率は、ともに大きくなる傾向にある。解析パラメータの範囲において、設定法3の βt は1.46~5.99となった。図4.5-15に設定法3と増幅率との関係を示す。提案式が解析結果を上回るのは、全432ケース中235ケースであり、全体の54%に相当する。これは設定法3が解析結果の平均的な傾向を表現する定式化となっているためである。設定法3と解析値の比は0.64~1.84であった。

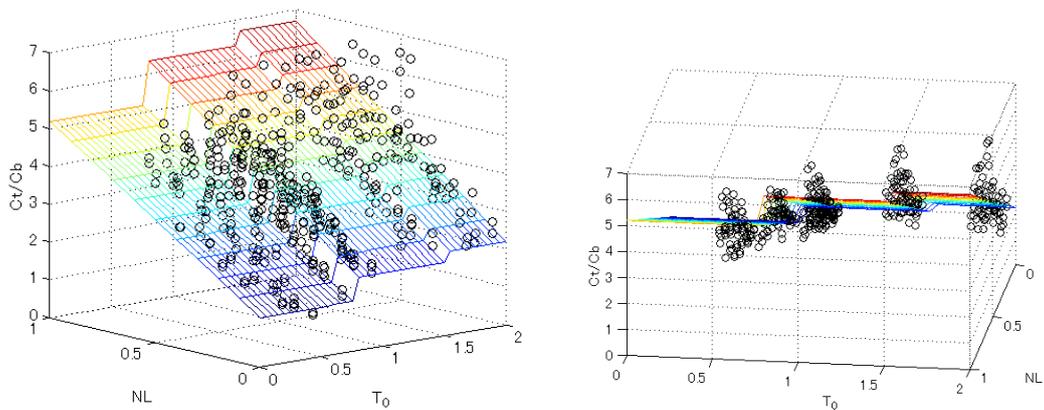


図4.5-14 4-2-1項で示した設定法3および増幅率解析結果と解析パラメータの関係

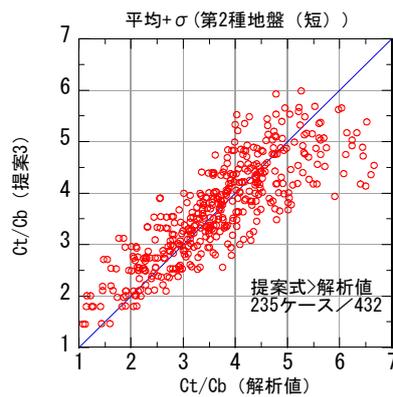


図4.5-15 設定法3と増幅率との関係

表 4.5-4 T_0 と h_{eq} 解析計算条件別データ頻度 累積頻度分布 (第2種地盤 (短))

				T0															
				0.49	累積 度数	累積 度数 分布	0.735	累積 度数	累積 度数 分布	0.98	累積 度数	累積 度数 分布	1.47	累積 度数	累積 度数 分布	1.96	累積 度数	累積 度数 分布	
0	\leq	h_{eq}	\leq	0.1*2/π	2	2	3%	2	2	3%	2	2	3%	2	2	3%			
0.1*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.2*2/π	8	10	14%	8	10	14%	8	10	14%	7	9	13%	8	10	14%
0.2*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.3*2/π	8	18	25%	8	18	25%	6	16	22%	5	14	19%	6	16	22%
0.3*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.4*2/π	11	29	40%	14	32	44%	14	30	42%	14	28	39%	11	27	38%
0.4*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.5*2/π	15	44	61%	12	44	61%	14	44	61%	13	41	57%	15	42	58%
0.5*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.6*2/π	12	56	78%	12	56	78%	12	56	78%	14	55	76%	10	52	72%
0.6*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.7*2/π	10	66	92%	8	64	89%	10	66	92%	9	64	89%	11	63	88%
0.7*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.8*2/π	4	70	97%	6	70	97%	4	70	97%	6	70	97%	7	70	97%
0.8*2/π	<	h_{eq}	\leq	0.9*2/π	2	72	100%	2	72	100%	2	72	100%	2	72	100%	2	72	100%
0.9*2/π	<	h_{eq}	\leq	2/π	0	72	100%	0	72	100%	0	72	100%	0	72	100%	0	72	100%
合計					72		72		72		72		72		72		72		72

表 4.5-5 区分ごとの h_{eq} , C_t/C_0 および C_m/C_0 の解析値から求めた統計データ

(a) $T_0=0.49$

h_{eq}			T_0	h_{eq} (平均)	C_t/C_0 (平均)	C_t/C_0 (σ)	C_t/C_0 (平均+ σ)	C_m/C_0 (平均)	C_m/C_0 (σ)	C_m/C_0 (平均+ σ)
0	\sim	$0.3 \times 2/\pi$	0.49	0.114	1.66	0.56	2.22	1.16	0.11	1.26
$0.3 \times 2/\pi$	\sim	$0.6 \times 2/\pi$	0.49	0.285	3.07	1.06	4.13	1.68	0.35	2.03
$0.6 \times 2/\pi$	\sim	$2/\pi$	0.49	0.454	5.06	1.19	6.25	2.44	0.34	2.78

(b) $T_0=0.74$

h_{eq}			T_0	h_{eq} (平均)	C_t/C_0 (平均)	C_t/C_0 (σ)	C_t/C_0 (平均+ σ)	C_m/C_0 (平均)	C_m/C_0 (σ)	C_m/C_0 (平均+ σ)
0	\sim	$0.3 \times 2/\pi$	0.74	0.115	2.25	0.43	2.68	1.27	0.13	1.40
$0.3 \times 2/\pi$	\sim	$0.6 \times 2/\pi$	0.74	0.279	3.75	0.68	4.43	1.90	0.31	2.21
$0.6 \times 2/\pi$	\sim	$2/\pi$	0.74	0.461	5.42	0.72	6.14	2.63	0.28	2.91

(c) $T_0=0.98$

h_{eq}			T_0	h_{eq} (平均)	C_t/C_0 (平均)	C_t/C_0 (σ)	C_t/C_0 (平均+ σ)	C_m/C_0 (平均)	C_m/C_0 (σ)	C_m/C_0 (平均+ σ)
0	\sim	$0.3 \times 2/\pi$	0.98	0.112	2.52	0.38	2.89	1.60	0.17	1.77
$0.3 \times 2/\pi$	\sim	$0.6 \times 2/\pi$	0.98	0.281	3.86	0.75	4.61	2.01	0.33	2.33
$0.6 \times 2/\pi$	\sim	$2/\pi$	0.98	0.445	5.36	0.78	6.15	2.53	0.24	2.77

(d) $T_0=1.47$

h_{eq}			T_0	h_{eq} (平均)	C_t/C_0 (平均)	C_t/C_0 (σ)	C_t/C_0 (平均+ σ)	C_m/C_0 (平均)	C_m/C_0 (σ)	C_m/C_0 (平均+ σ)
0	\sim	$0.3 \times 2/\pi$	1.47	0.106	2.77	0.36	3.13	1.49	0.16	1.65
$0.3 \times 2/\pi$	\sim	$0.6 \times 2/\pi$	1.47	0.284	4.38	0.84	5.21	1.84	0.32	2.16
$0.6 \times 2/\pi$	\sim	$2/\pi$	1.47	0.451	5.46	0.67	6.14	2.22	0.18	2.40

(e) $T_0=1.96$

h_{eq}			T_0	h_{eq} (平均)	C_t/C_0 (平均)	C_t/C_0 (σ)	C_t/C_0 (平均+ σ)	C_m/C_0 (平均)	C_m/C_0 (σ)	C_m/C_0 (平均+ σ)
0	~	$0.3 \times 2/\pi$	1.96	0.113	2.77	0.53	3.30	1.54	0.15	1.69
$0.3 \times 2/\pi$	~	$0.6 \times 2/\pi$	1.96	0.285	4.23	0.80	5.04	1.65	0.26	1.91
$0.6 \times 2/\pi$	~	$2/\pi$	1.96	0.444	5.36	0.65	6.00	2.01	0.21	2.21

T_0 と h_{eq} を指標とした解析計算条件別データ頻度と累積頻度分布（第2種地盤（短））を表4.5-4に示す。なお平面回帰の検討に用いる解析ケースにおいて、基礎固定時の上部構造の1次固有周期が0.98となるケースが7階モデル、14階モデル両方に存在するため、7階モデルの固有周期が0.98の解析ケースは検討対象から除外している。 h_{eq} は $0.3 \times 2/\pi$ (≈ 0.19) $\sim 0.7 \times 2/\pi$ (≈ 0.45) に集中して分布している様子がわかる。また、 $0.9 \times 2/\pi$ (≈ 0.57) を超える h_{eq} のケースは見られないことがわかる。

各 T_0 において、 h_{eq} を i) $0 \sim 0.3 \times 2/\pi$ 、ii) $0.3 \times 2/\pi \sim 0.6 \times 2/\pi$ 、iii) $0.6 \times 2/\pi \sim 2/\pi$ の3階級に区分し、区間内の h_{eq} 、 C_t/C_0 および C_m/C_0 の解析値から求めた統計データ（平均 m および標準偏差 σ ）を算出した結果を表4.5-5に示す。これから C_t/C_0 （平均）をその際の T_0 及び h_{eq} の線形和として表されるように定式化を試み、回帰計算より(4.5-38)式が得られた。

$$C_t/C_0 \quad \beta_t = 0.55T_0 + 8.7h_{eq} + 0.80 \quad (4.5-38)$$

また、 C_m/C_0 も C_t/C_0 と同様に回帰計算より(4.5-39)式が得られた。

$$C_m/C_0 \quad \beta_m = 0.17T_0 + 2.6h_{eq} + 0.94 \quad (4.5-39)$$

(4.5-38)式および(4.5-39)式が表すメッシュ平面と表4.5-5に示した解析結果から求めた各区分の統計データを空間上に点としてプロットし図4.5-16に示す。(4.5-38)式は図中の黒丸点(C_t/C_0 を示すデータ)、(4.5-39)式は図中の赤い四角の点(C_m/C_0 を示すデータ)の近傍を通過しており、回帰結果が妥当であることがわかる。

図4.5-17に(4.5-38)式および(4.5-39)式で示す平面と応答結果による増幅率との比較を示す。図中の点は解析結果から求めた増幅率である。(4.5-38)式および(4.5-39)式で表される平面が応答結果を表す点群の中央付近に位置している様子がわかる。

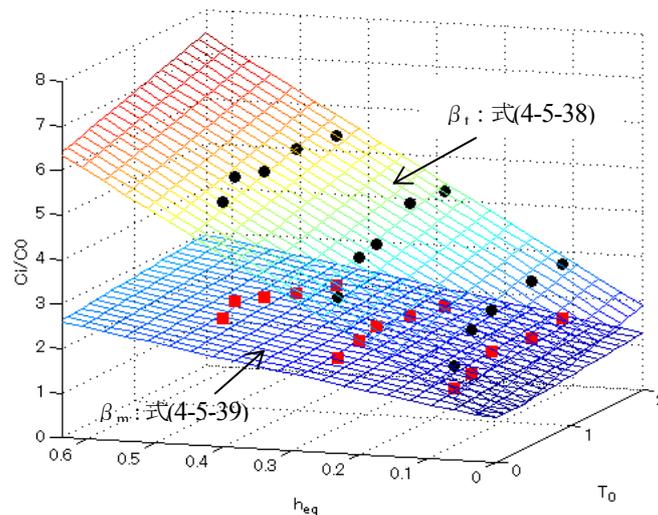


図4.5-16 設定法3に基づいた増幅率と解析値から求めた統計データの関係

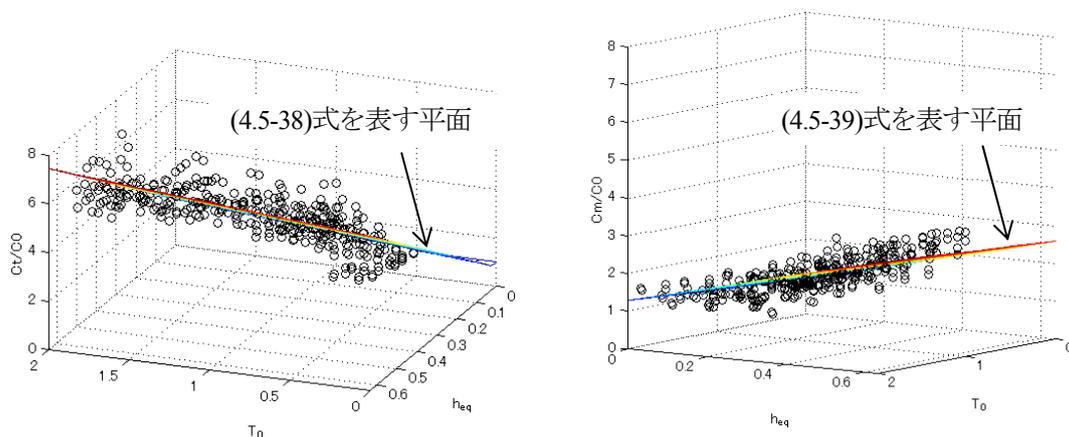


図 4.5-17 設定法 3 の C_t/C_0 および C_m/C_0 と全解析結果の比較

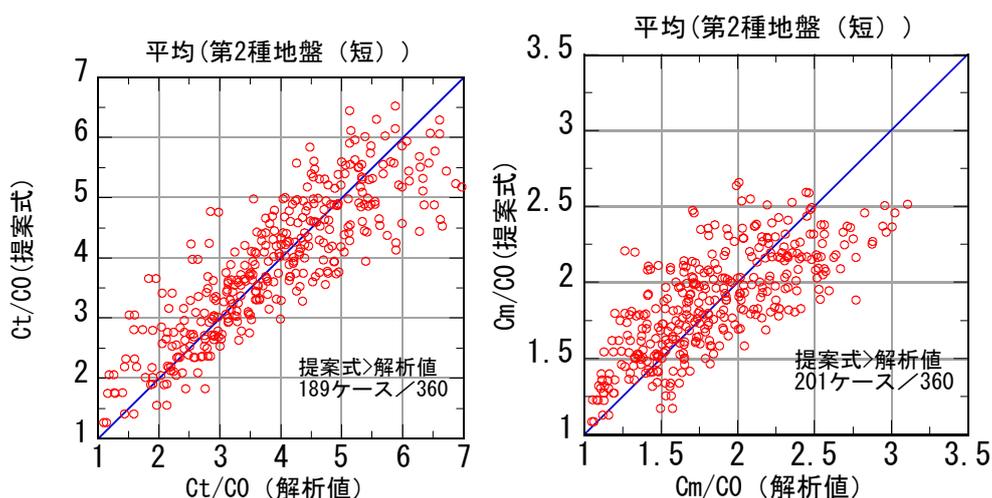


図 4.5-18 設定法 3 における増幅率の解析値と提案式の比較

設定法 3 に基づいた (4.5-38)式および(4.5-39)式を増幅率と応答解析による増幅率との比較を図 4.5-18 に示す。(4.5-38)式による最上階の増幅率 C_t/C_0 が解析結果から求めた増幅率を上回るケースは全 360 ケース中 189 ケースであり、全体の 53%に相当する。また、(4.5-39)式による中間階の増幅率 C_m/C_0 が解析結果の増幅率を上回るケースは全 360 ケース中 201 ケースであり、全体の 56%に相当する。

第 1 種地盤および第 2 種地盤（長）における時刻歴応答解析結果の増幅率と設定法 3 の β_1 を表す (4.5-38)式および β_m を表す(4.5-39)式との比較を図 4.5-19 に示す。いずれの図からも、提案式より求めた増幅率は概ね解析結果による増幅率を上回る傾向にあることがわかる。

告示 2009 号による免震層の応答変位を用いた場合と時刻歴応答解析による免震層最大変位を用いた場合との比較を図 4.5-20 に示す。それぞれ図の横軸は時刻歴応答解析の値、縦軸は設定法による増幅率を(4.5-38)式および(4.5-39)式を用いて算出し、左図は第 2009 号による免震層の応答変位を用いて

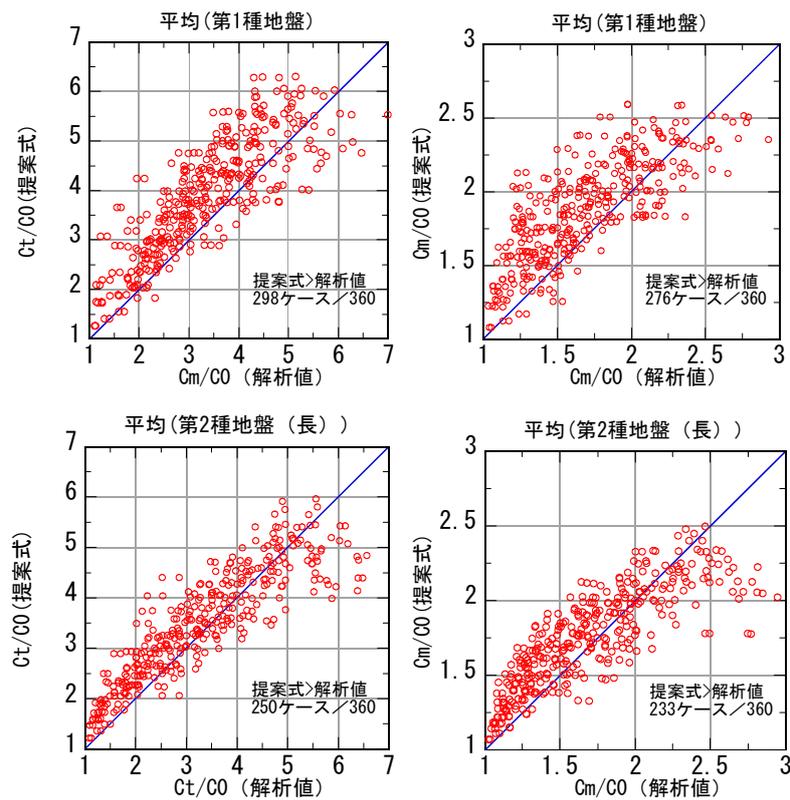


図 4.5-19 設定法 3 第 1 種地盤および第 2 種地盤 (長) における増幅率

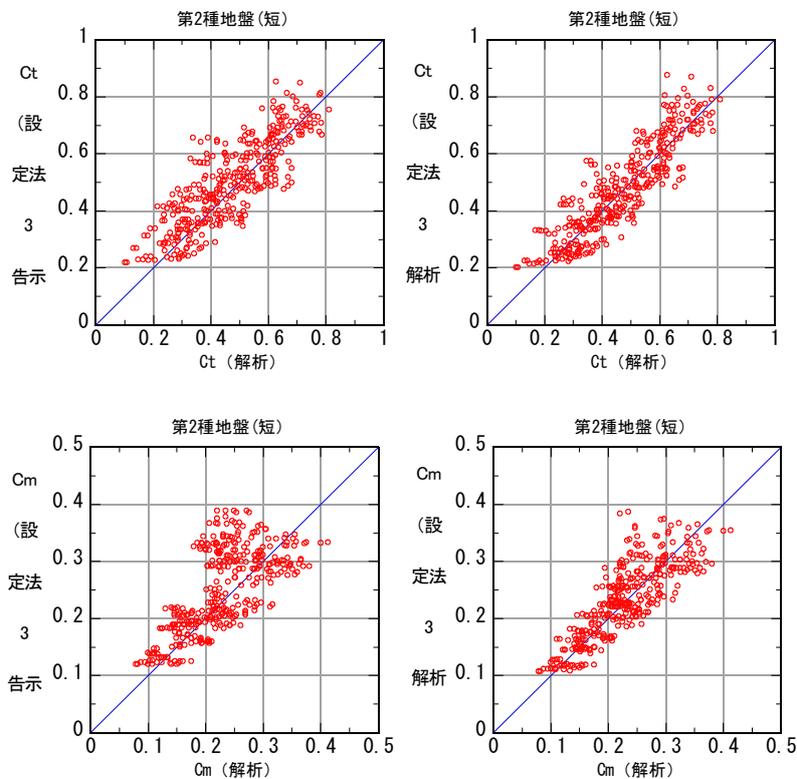


図 4.5-20 設定法 3 による C_t および C_m 免震層変位算定法による違い
(左：告示 2009 号、右：時刻歴解析)

算出した場合、右図は時刻歴応答解析による免震層変位を用いた場合である。右図に対して左図は点のばらつきがやや大きくなる傾向にある。図 4.5-20 は地震動入力第 2 種地盤（短）の場合であった。告示 2009 号による変位を用いて求めた設定法 3 の(4.5-38)式、(4.5-39)式による C_t 、 C_m において、入力地震動が第 2 種地盤（短）と異なる場合の解析結果との比較を図 4.5-21 に示す。図 4.5-21 の各図は図 4.5-20 の左図にある告示 2009 号で求めた変位による算出結果と同様の傾向を示していることがわかる。

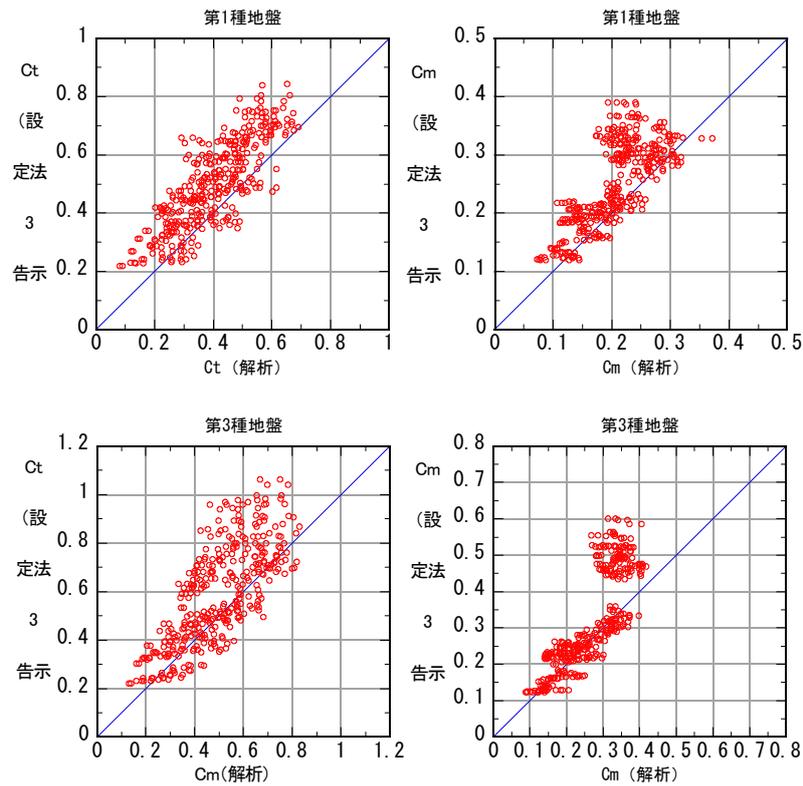


図 4.5-21 告示 2009 号による変位を用いた設定法 3 の C_t と C_m （第 1 種地盤、第 2 種地盤（長））

4-5-3 平均値からのばらつきを考慮した平面回帰式

4-5-2 項では、設定法 2 および 3 に対して、解析パラメータおよび時刻歴応答解析の地震層せん断力係数の増幅率における平均値に基づいた平面回帰式を算出した。本節では、時刻歴応答解析の地震層せん断力係数の増幅率における平均値からのばらつきを考慮した平面回帰式を算出する。本項における平面回帰式算出の対象は、4-5-2 項と同様に設定法 2 および設定法 3 (4-2 節参照) とする。

(1) 設定法 2

表 4.5-3 に示した解析パラメータおよび増幅率の統計データ (第 2 種地盤 (短)) において、解析パラメータ T_1/T_0 および h_{eq} の区分ごとにおける地震層せん断力係数の免震層に対する最上階の増幅率 C_i/C_0 および中間階の増幅率 C_m/C_0 の「平均」および「平均+標準偏差: σ 」の値を算出している。ここでは、増幅率を「平均+ σ 」の値を用いて、増幅率を解析パラメータ T_1/T_0 および h_{eq} による平面にて表す。なお、データの分布が正規分布とした場合、データが「平均+ σ 」以下に含まれる割合は 84.1% となる。 C_i/C_0 は以下の (4.5-40) 式となった。

$$C_i/C_0 (\text{平均} + \sigma) \beta_i = -0.72 \cdot (T_1/T_0) + 7.0h_{eq} + 3.2 \quad (4.5-40)$$

ただし、上記の値が 1.0 以下の時は、1.0 とする。

また、地震層せん断力係数の免震層に対する中間階の増幅率 C_m/C_0 も C_i/C_0 と同様に定式化を行った。 C_m としては、7 層モデルの場合は上部構造 3 階と 4 階の値の平均値、14 層モデルでは上部構造 7 階の値とした。

$$C_m/C_0 (\text{平均} + \sigma) \beta_m = -0.23 \cdot (T_1/T_0) + 2.2h_{eq} + 1.7 \quad (4.5-41)$$

ただし、上記の値が 1.0 以下の時は、1.0 とする。

(4.5-40) 式および (4.5-41) 式で表した平面と C_i/C_0 および C_m/C_0 の区分ごとのデータとの対応を図 4.5-22 に示す。図中の白丸の点は C_i/C_0 (平均+ σ) のデータを、赤い四角の点は C_m/C_0 (平均+ σ) のデータを示す。各々の点群は、(4.5-40) 式および (4.5-41) 式で表された平面のごく近傍に存在している。

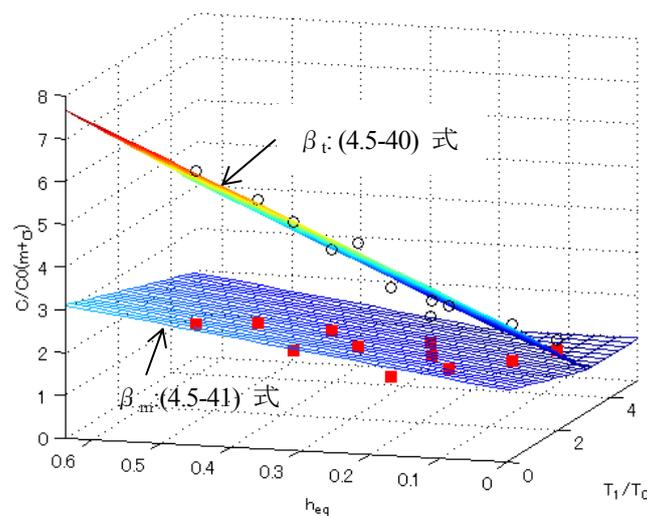


図 4.5-22 設定法 2 に基づいた増幅率 (ばらつき考慮) と解析値から求めた統計データの関係
(点は解析応答結果統計値、ワイヤーメッシュ平面は(4.5-40)式および(4.5-41)式を示す)

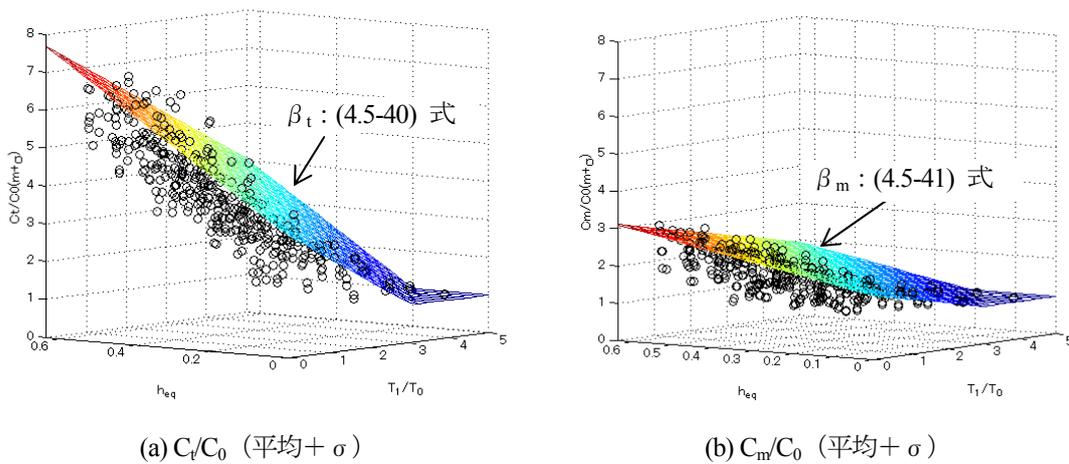


図 4.5-23 解析結果増幅率と設定法 2 の提案式との比較 (第 2 種地盤 (短) 全解析データ)

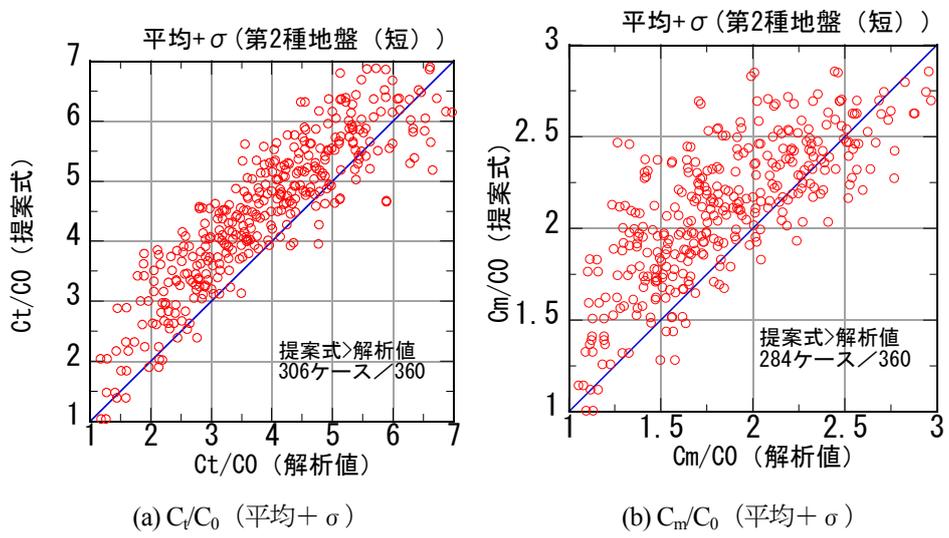


図 4.5-24 設定法 2 における増幅率の解析値と提案式の比較 (第 2 種地盤 (短))

第 2 種地盤 (短) の入力地震動における C_t/C_0 (平均+ σ) の解析全ケースと式(4.5-40)を表す平面との関係を図 4.5-23(a)に示す。 T_1/T_0 が小さい場合では、 h_{eq} が 0.3 を超える場合において C_t/C_0 が 6~7 となる場合が見られるが、(4.5-40)式ではこの領域を過小評価する場合が見られる。ただし、他の領域では(4.5-40)式による増幅率を示す平面が応答解析結果の○を上回る傾向にある。 T_1/T_0 が 3 以上であり、かつ h_{eq} が 0.2 を下回る場合、上部構造の増幅率は 1 程度となる。 C_m/C_0 は、3 未満の値であることが図 4.5-23 (b)からわかる。 T_1/T_0 が小さいほど、また h_{eq} が大きいほど C_m/C_0 の値は大きくなっている。この傾向は C_t/C_0 と同様である。(4.5-41)式が表す平面は C_m/C_0 の解析結果を示す点群の上方をかすめるように定義されている。

第 2 種地盤 (短) における C_t/C_0 および C_m/C_0 の連続化提案式である(4.5-40)式、(4.5-41)式と解析値との関係を図 4.5-24 に示す。図(a)で示す提案式(4.5-40)では全体の 85% (360 ケース中 306 ケース) において、また提案式(4.5-41)では全体の 79% (360 ケース中 284 ケース) において提案式の値は解析に

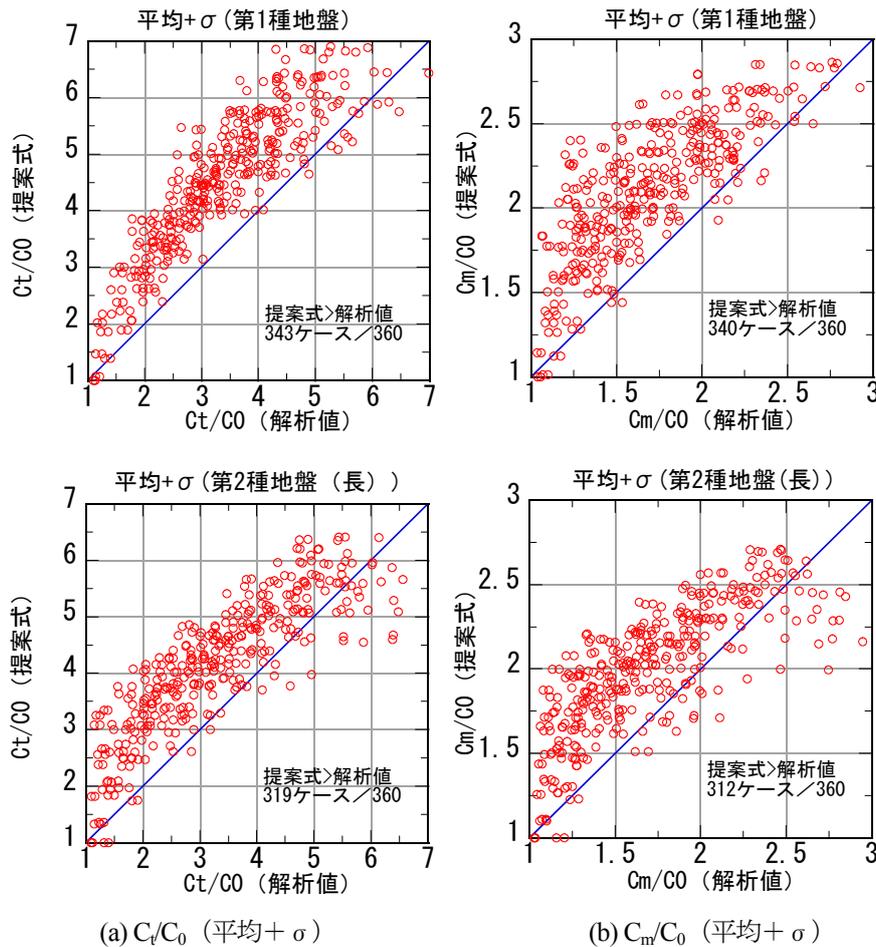


図 4.5-25 設定法 2 第 1 種地盤および第 2 種地盤 (長) における増幅率

よる増幅値を上回る。 C_t/C_0 (平均+ σ)の(提案式)/(解析値)は最小 0.78(解析ケース:n14e4h2i60a03d0、 $T1/T_0=0.187$ 、 $h_{eq}=0.304$ 、 $C_0=0.062$ 、提案式:5.2、解析値:6.7)、最大 2.03(解析ケース:n14e4h3i25a03d0、 $T1/T_0=0.187$ 、 $h_{eq}=0.105$ 、 $C_0=0.177$ 、提案式:3.8、解析値:1.9)であった。

第 1 種地盤および第 2 種地盤 (長) における C_t/C_0 、 C_m/C_0 の解析結果と(4.5-40)および(4.5-41)式で示した増幅率との比較を図 4.5-25 に示す。第 1 種地盤の結果において、提案式が解析結果を上回るケースは、 C_t/C_0 で 95%、 C_m/C_0 で 94%であった。大部分のケースで提案式は解析結果に対して安全側の評価となっている。また、第 2 種地盤 (長) の場合においても、 C_t/C_0 で 89%、 C_m/C_0 で 87%のケースで提案式の値が解析結果の増幅率を上回る結果であった。

上部構造の最上階の地震層せん断力係数 C_t 、中間階の地震層せん断力係数 C_m を設定法 2 に基づいて求めた。告示 2009 号による免震層の応答変位を用いた場合と時刻歴応答解析による免震層最大変位を用いた場合との比較を図 4.5-26 に示す。それぞれ図の横軸は時刻歴応答解析の値、縦軸は設定法 2 による増幅率を式(4.5-40)および(4.5-41)式を用いて算出し、左図は告示 2009 号による免震層の応答変位を用いて算出した場合、右図は時刻歴応答解析による免震層変位を用いた場合である。右図に対して左図は点のばらつきがやや大きくなる傾向にある。

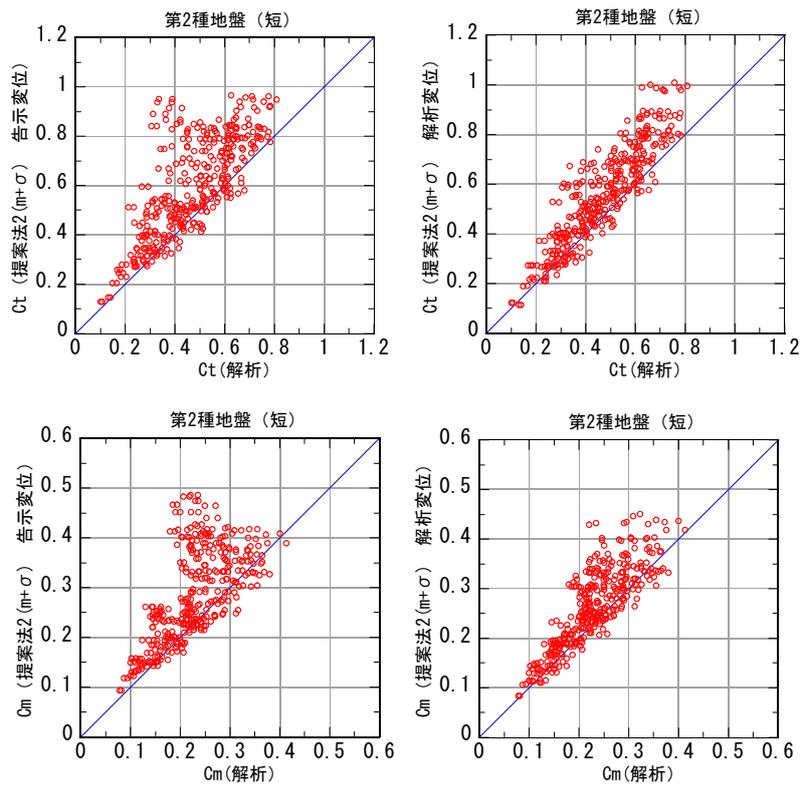


図 4.5-26 設定法 2 による C_t および C_m 免震層変位算定法による違い
(左：告示 2009 号、右：時刻歴解析)

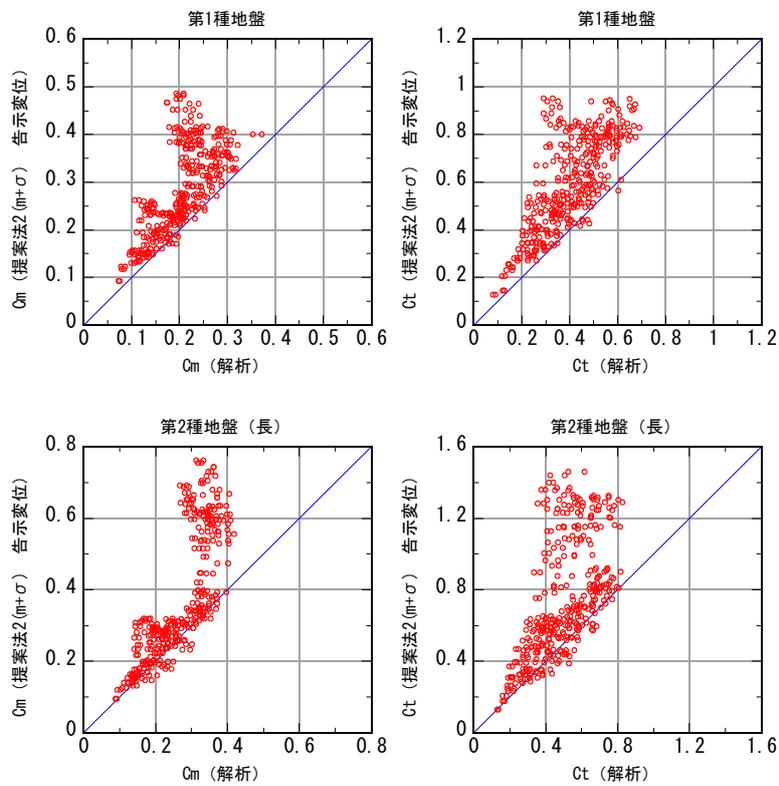


図 4.5-27 告示 2009 号による変位を用いた設定法 2 の C_t と C_m (第 1 種地盤、第 2 種地盤 (長))

第1種地盤および第2種地盤（長）の場合における上部構造の最上階の地震層せん断力係数 C_t および中間階の地震層せん断力係数 C_m を、告示2009号の方法により求めた免震層の応答変位をもとに設定法2の(4-5-40)式および(4-5-41)式により算出した。図4.5-27に示す。告示2009号による免震層の応答変位、地震層せん断力係数ならびに(4-5-40)式の増幅率より求めた頂部の地震層せん断力係数 C_t が解析結果の C_t の1.5倍を超えるケース数を表4.5-6に示す。これらより、免震層の接線周期 T_2 が2.5sと短く、かつ免震層の降伏せん断力係数 C_y が小さい場合に、(4-5-40)式から算出される C_t が解析値に対して1.5倍以上大きな値となっている。さらに表4.5-6(b)の色つき部のケース（告示2009号から求めた免震層変位による C_t が解析結果 C_t の1.5倍を超える場合で $T_2=2.5s$ 、 $C_y=0.03$ および 0.05 の場合）における C_0 （告示）/ C_0 （解析）と C_t （告示）/ C_t （解析）の関係を図4.3-28に示す。図4.3-28より上記のケースでは、告示2009号で算出された免震層の応答変位が時刻歴応答解析の最大変位の1.8倍程度となっている場合があり、これらでは免震層の応答変位評価の段階で安全側に評価されている。

表4.5-6 設定法2で告示2009号の免震層変位による C_t が解析結果 C_t の1.5倍を超えるケース数

(b)第1種地盤

$C_t(\text{告示})/C_t(\text{解析}) > 1.5$		$C_y(\text{免震層降伏せん断力係数})$			
		0.03	0.05	0.07	0.1
T_2 (s)	2.5	27	29	22	17
	4	24	6	5	5
	6	6	2	2	3

(b)第2種地盤（短）

$C_t(\text{告示})/C_t(\text{解析}) > 1.5$		$C_y(\text{免震層降伏せん断力係数})$			
		0.03	0.05	0.07	0.1
T_2 (s)	2.5	25	22	5	2
	4	12	0	1	1
	6	0	1	0	2

(c)第2種地盤（長）

$C_t(\text{告示})/C_t(\text{解析}) > 1.5$		$C_y(\text{免震層降伏せん断力係数})$			
		0.03	0.05	0.07	0.1
T_2 (s)	2.5	27	28	30	28
	4	24	8	3	1
	6	0	0	1	1

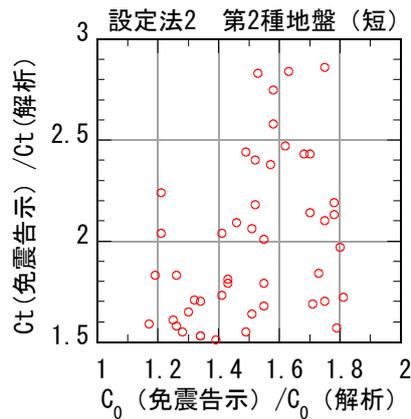


図 4.3-28 告示 2009 号の免震層変位による C_t が解析結果 C_t の 1.5 倍を超える場合で T_2 (免震層の 2 次剛性周期) = 2.5s、 C_y (免震層の降伏せん断力係数) = 0.03 および 0.05 の場合の C_0 (告示) / C_0 (解析) と C_t (告示) / C_t (解析) の関係

(2) 設定法 3

設定法 2 と同様に、設定法 3 においてもデータのばらつきを考慮した平面の定式化を行った。前節の表 4.5-5 で示した区分ごとの h_{eq} 、 C_f/C_0 (平均+ σ : 標準偏差) および C_m/C_0 (平均+ σ : 標準偏差) を用いて、 C_f/C_0 および C_m/C_0 の平面回帰を実施した。回帰計算より (4.5-42) 式および (4.5-43) 式が得られた。

$$C_f/C_0 (m+\sigma) \quad \beta_f=0.40T_0+9.7 h_{eq}+1.3 \quad (4.5-42)$$

$$C_m/C_0 (m+\sigma) \quad \beta_m=0.13T_0+3.1 h_{eq}+1.1 \quad (4.5-43)$$

ただし、 β_t および β_m の値が 1.0 以下の時は、1.0 とする。

(4.5-42) 式および (4.5-43) 式で表した平面と C_f/C_0 および C_m/C_0 の区分ごとのデータとの対応を図 4.5-29 に示す。図中の黒丸の点は C_f/C_0 (平均+ σ) のデータを、赤い四角の点は C_m/C_0 (平均+ σ) のデータを示す。各々の点群は、(4.5-42) 式および (4.5-43) 式で表された平面のごく近傍に存在していることがわかる。

図 4.5-30 に (4.5-42) 式および (4.5-43) 式で示す平面と応答結果による増幅率との比較を示す。図中の点は解析結果から求めた増幅率である。(4.5-42) 式および (4.5-43) 式で表される平面が応答結果を表す点群の上方に位置していることがわかる。

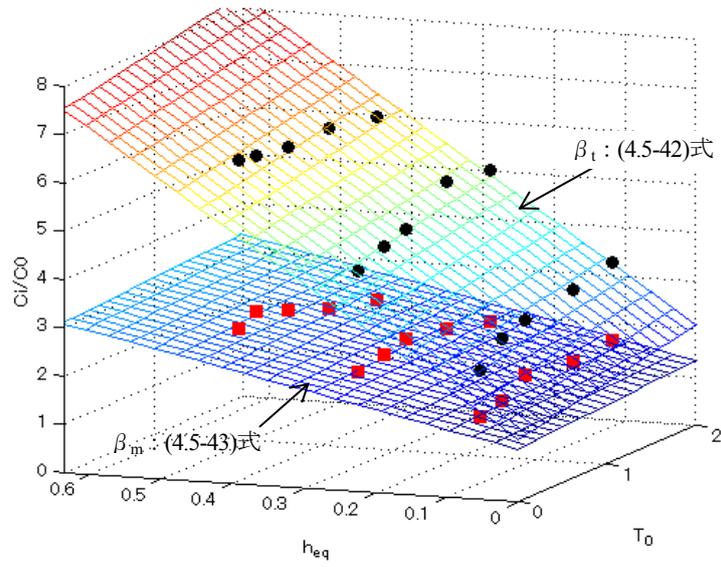


図 4.5-29 設定法 3 に基づいた増幅率（ばらつき考慮）と解析値から求めた統計データの関係
 （点は解析応答結果統計値、ワイヤーメッシュ平面は(4.5-42)式および(4.5-43)式を示す）

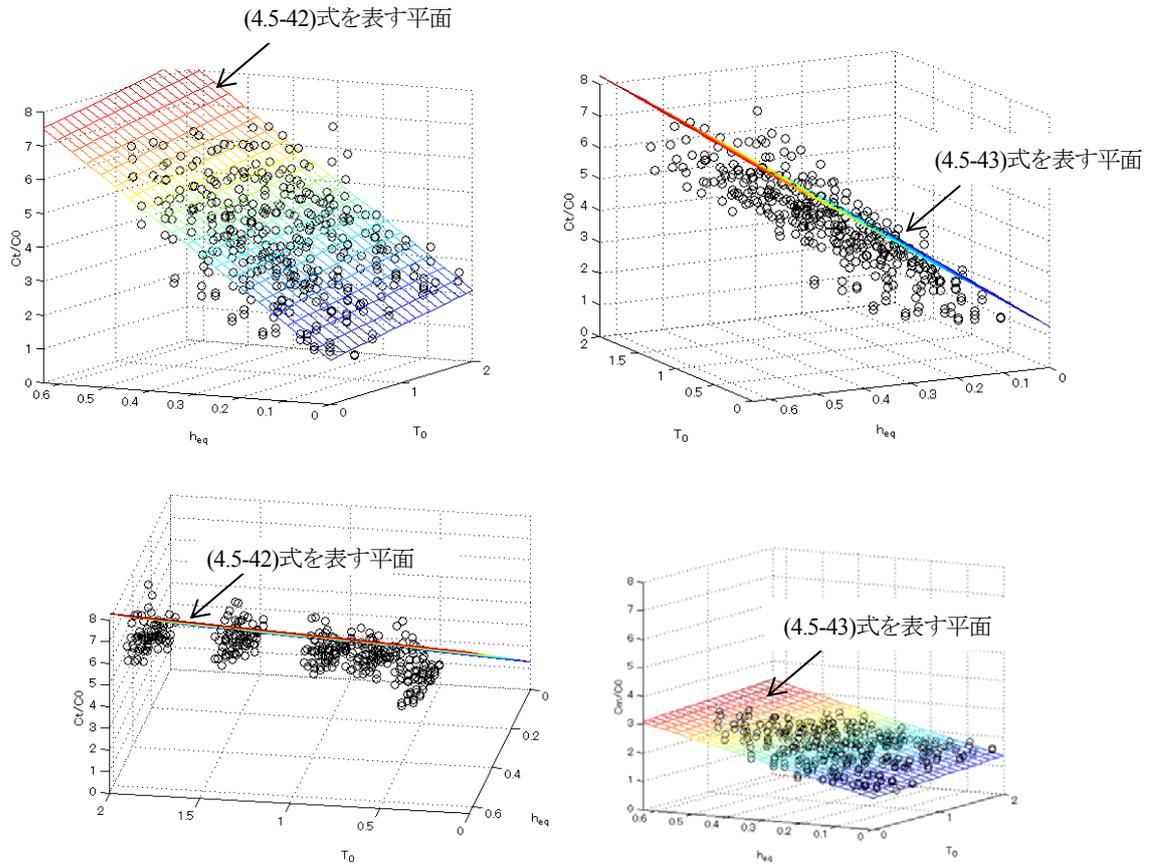


図 4.5-30 解析結果増幅率と設定法 3 の提案式との比較（第 2 種地盤（短）全解析データ）

設定法3に基づいた(4.5-42)式および(4.5-43)式の増幅率と応答解析による増幅率との比較を図4.5-31に示す。提案式(4.5-42)による最上階の増幅率 C_t/C_0 が解析結果から求めた増幅率を上回るケースは全360ケース中303ケースであり、全体の84%に相当する。また、提案式(4.5-43)による中間階の増幅率 C_m/C_0 が解析結果の増幅率を上回るケースは全360ケース中289ケースであり、全体の80%に相当する。4-5-2項で提案した平均データを用いた場合と比較し、ばらつきを考慮した平面回帰式では、解析値の増幅率を上回るケースが全360ケースのうち、 C_t/C_0 では、189ケースから303ケースに、 C_m/C_0 は、201ケースから289ケースに増加した。

図4.5-31で示した解析ケースは、第2種地盤（短）の場合であった。第1種地盤および第2種地盤（長）の解析ケースにおいて、設定法3のばらつきを考慮した(4.5-42)式および(4.5-43)式による増幅率と解析結果による増幅率との比較を図4.5-32に示す。第2種地盤（短）の場合と同様に、(4.5-42)式および(4.5-43)式の定式化においてばらつきを考慮したデータを用いたことにより、平均データを用いた提案式(4.5-40)および式(4.5-41)よりも解析値の増幅率を上回るケースが増加している。

4-5-2 および 4-5-3 項にて提案した増幅率の平面回帰式が解析値の増幅率を上回る解析ケース数と割合を表4.5-7に示す。設定法2および設定法3ともに本節で示す平均+ σ の増幅率に基づいた回帰式は、前節で示した平均に基づいた増幅率による回帰式よりも解析値の増幅率を上回る割合が高くなっている。

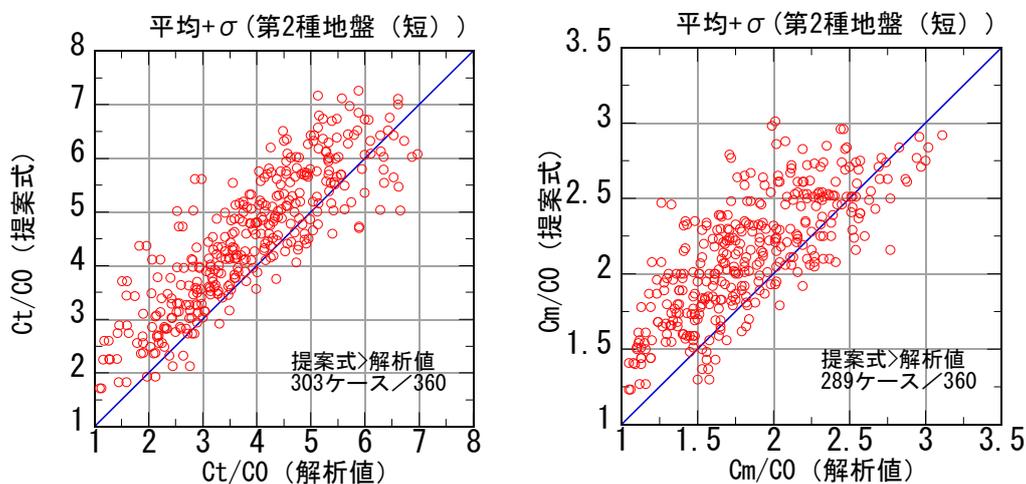


図4.5-31 設定法3における増幅率の解析値と提案式の比較

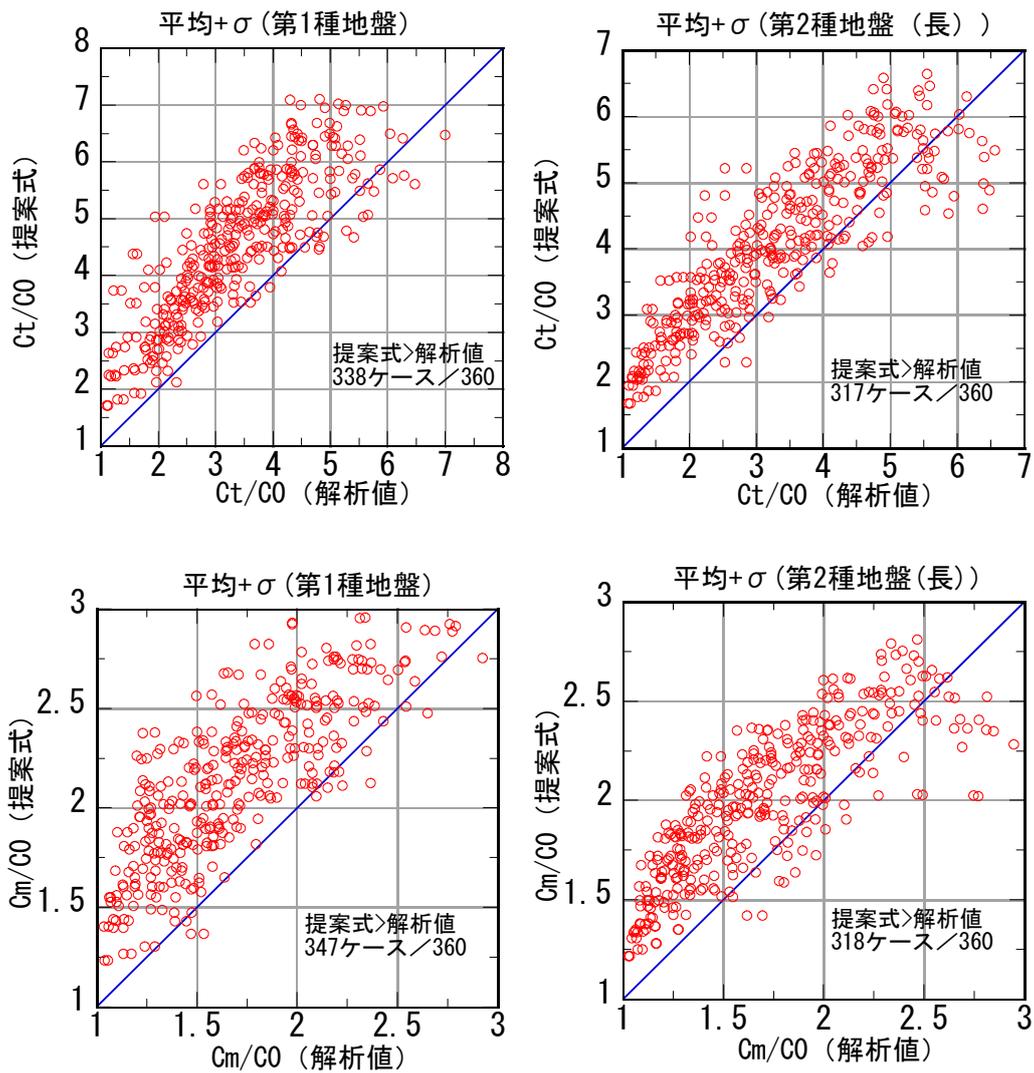


図 4.5-32 設定法 3 第 1 種地盤および第 2 種地盤 (長) における増幅率

表 4.5-7 提案式が解析値を上回る解析ケース数と割合

	地盤	C_t/C_0		C_m/C_0	
		(平均+ σ)	(平均)	(平均+ σ)	(平均)
設定法 2	第 1 種	343 (95%)	290 (81%)	340 (94%)	245 (68%)
	第 2 種短	306 (85%)	170 (47%)	284 (79%)	156 (43%)
	第 2 種長	319 (89%)	241 (67%)	312 (87%)	203 (56%)
設定法 3	第 1 種	338 (94%)	298 (83%)	347 (96%)	276 (77%)
	第 2 種短	303 (84%)	189 (53%)	289 (80%)	201 (56%)
	第 2 種長	317 (88%)	250 (69%)	318 (88%)	233 (65%)

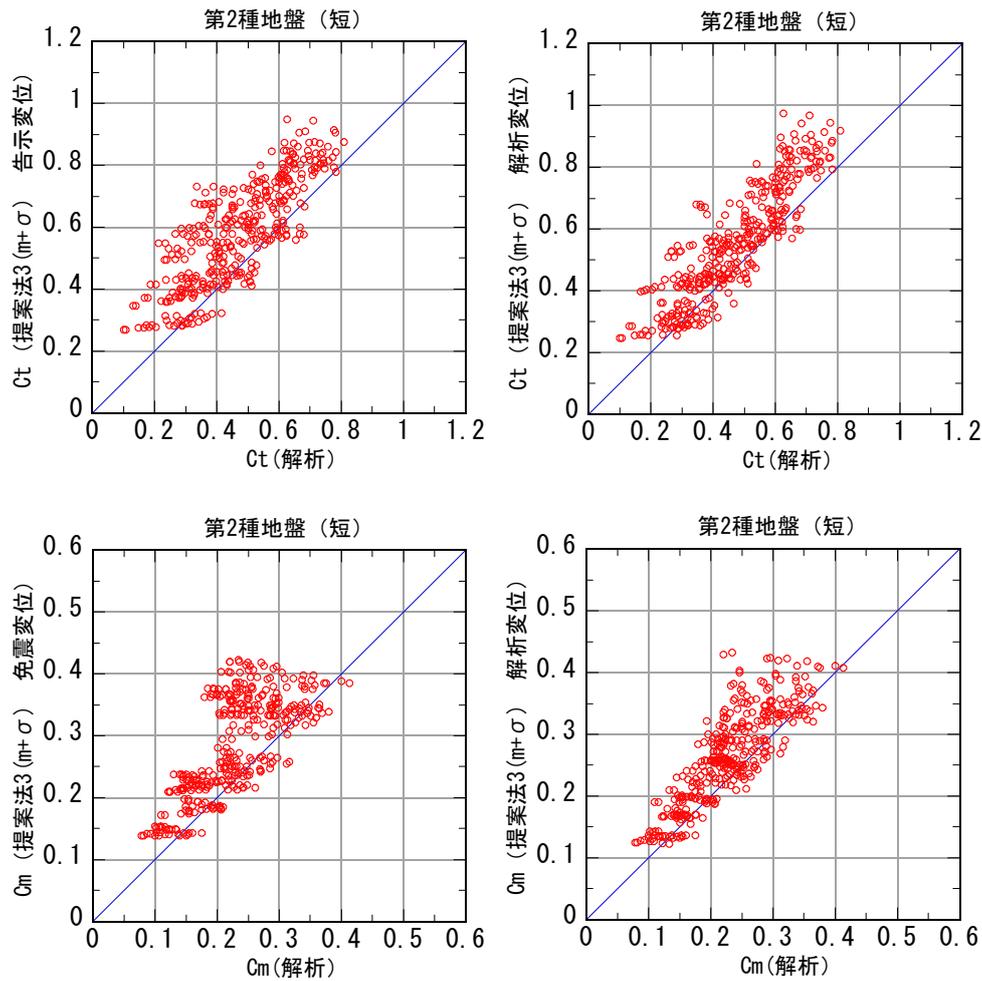


図 4.5-33 設定法 3 による C_t および C_m 免震層変位算定法による違い
(左：告示 2009 号、右：時刻歴解析)

頂部の地震層せん断力係数 (C_t) および中間階の地震層せん断力係数 (C_m) について、横軸に解析結果、縦軸に設定法 3 のばらつきを考慮した増幅率提案式から算出した地震層せん断力係数を図 4.5-33 に示す。左側の図は告示 2009 号から求めた免震層応答変位から算出した増幅率(4.5-42)式および(4.5-43)式を用いた場合、右側の図は時刻歴応答解析の最大変位による増幅率を用いた場合である。左側と右側で点の分布は大きく異なっていないことが認められる。図 4.5-26 の設定法 2 と比較すると、設定法 3 の方がデータのばらつきが小さく、右肩上がりの分布となっている。図 4.5-34 は、第 1 種地盤および第 2 種地盤 (長) のケースで免震層変位、免震層の最大地震層せん断力係数を告示 2009 号から算出して求めた C_t および C_m を縦軸に、解析結果の C_t および C_m を横軸とした図である。第 1 種地盤の C_m および C_t 、第 2 種地盤 (長) の C_t ともに点の分布は右肩上がりの傾向となっている。第 2 種地盤 (長) の C_m においても、ほとんどのデータが青線よりも上に位置しており、提案式は解析結果に対して安全側の評価となっている。告示 2009 号による免震層の応答変位、地震層せん断力係数ならびに(4.5-42)式の増幅率より求めた頂部の地震層せん断力係数 C_t が解析結果の C_t の 1.5 倍を超える

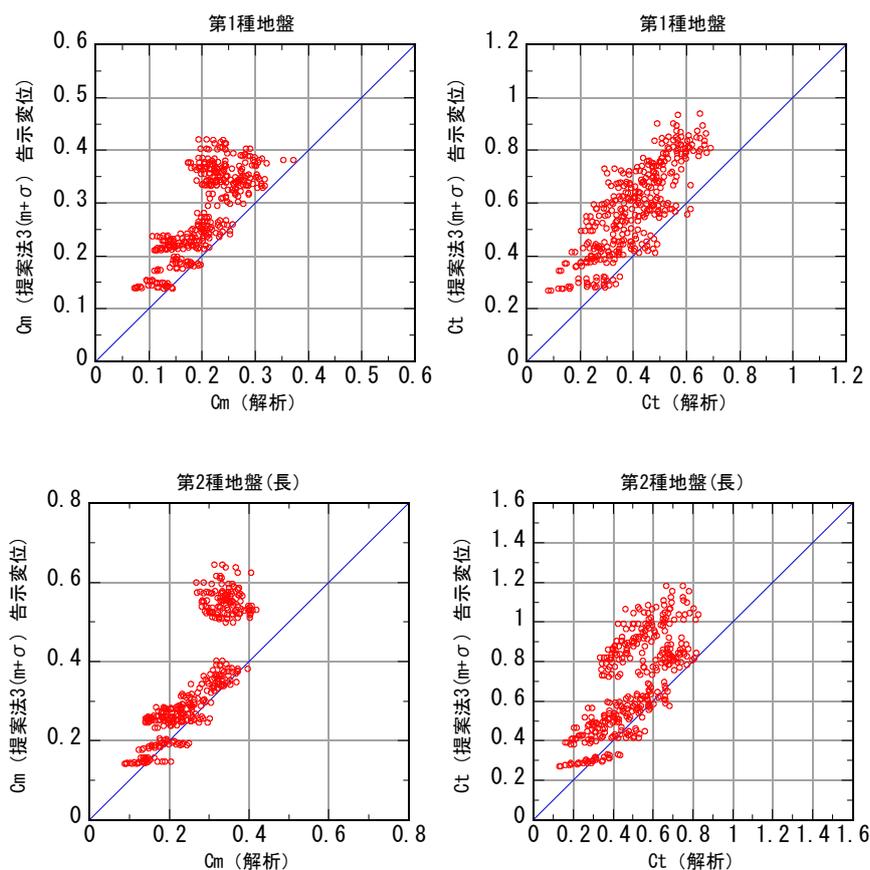


図 4.5-34 告示 2009 号による変位を用いた設定法 3 の Ct と Cm (第 1 種地盤、第 2 種地盤長)

ケース数を表 4.5-8 に示す。これらより、免震層の接線周期 T_2 が 2.5s と短く、かつ免震層の降伏せん断力係数 C_y が小さい場合に、(4.5-42)式から算出される C_t が解析値に対して 1.5 倍以上大きな値となる傾向にあることがわかる。

表 4.5-9 に図 4.5-26 (設定法 2、第 2 種地盤 (短)) および図 4.5-33 (設定法 3、第 2 種地盤 (短)) における解析結果の C_t および C_m と設定法で求めた値との相関係数を示す。時刻歴応答解析の変位を用いた場合では設定法 2 および 3 とほぼ同程度の値となっている。一方、告示 2009 号による変位を用いた場合では、設定法 3 の方が C_t および C_m とともに相関係数が大きい。

表 4.5-8 設定法 3 で告示 2009 号の免震層変位から求めた C_t が解析 C_t の 1.5 倍を超えるケース数

(b)第 1 種地盤

$C_t(\text{告示})/C_t(\text{解析}) > 1.5$		C_y			
		0.03	0.05	0.07	0.1
T2 (s)	2.5	30	23	15	14
	4	21	8	8	12
	6	10	5	7	11

(b)第 2 種地盤 (短)

$C_t(\text{告示})/C_t(\text{解析}) > 1.5$		C_y			
		0.03	0.05	0.07	0.1
T2 (s)	2.5	26	9	3	2
	4	9	3	2	2
	6	6	2	2	2

(c)第 2 種地盤 (長)

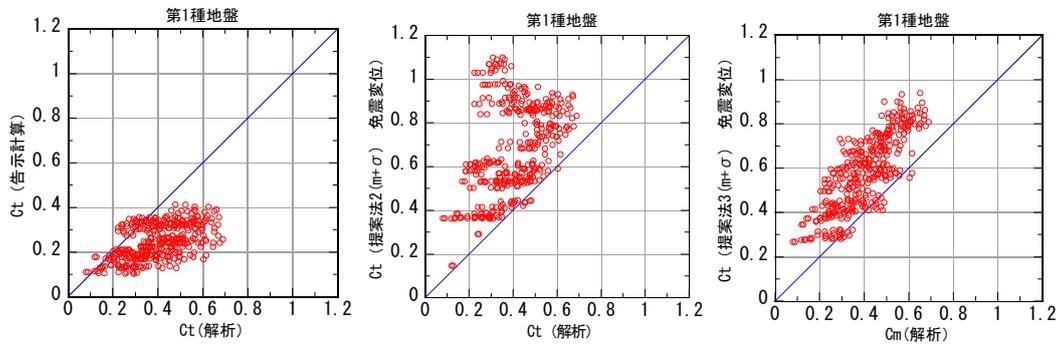
$C_t(\text{告示})/C_t(\text{解析}) > 1.5$		C_y			
		0.03	0.05	0.07	0.1
T2 (s)	2.5	29	30	30	17
	4	14	8	4	2
	6	5	3	2	2

表 4.5-9 設定法による C_t , C_m と時刻歴解析結果による C_t , C_m との相関係数

	時刻歴解析変位使用		告示変位使用	
	C_t	C_m	C_t	C_m
設定法 2	0.900	0.839	0.745	0.646
設定法 3	0.881	0.840	0.815	0.709

告示 2009 号ならびに応答変位を用いた設定法 2 および 3 (ばらつき考慮時) による最上階の地震層せん断力係数 C_t を縦軸に、時刻歴解析結果の C_t を横軸として図 4.5-35 に示す。告示 2009 号による値は、ほとんどの場合で解析結果の値を下回る結果となった。一方、本節で提案した設定法 2 および 3 ともにほとんどのケースで解析結果を上回る値となっている。また、設定法 3 のばらつきが設定法 2 よりも小さくなっていることがわかる。

設定法 2 および 3 において、免震層変位を告示 2009 号による値から算出した最上階の地震層せん断力係数 $C_t (m+\sigma)$ を図 4.5-36 に示す。図中の○は設定法で求めた値が解析結果の値以上となる場合、●は設定法による値が解析結果を下回る場合である。図(a)の設定法 2 の場合では、●のほとんどが

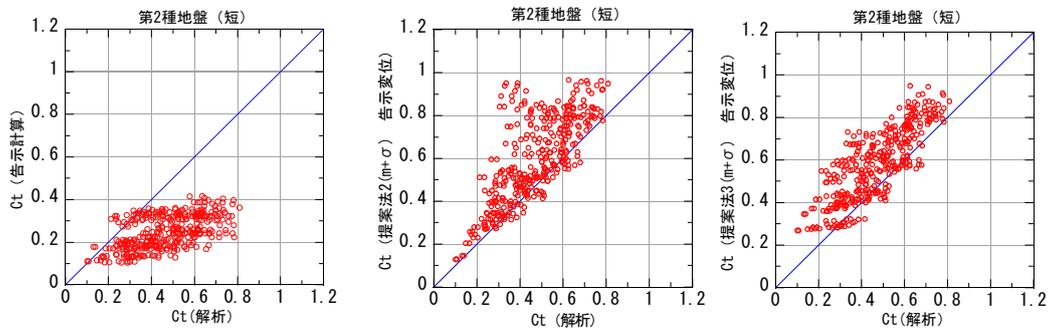


(a)告示 2009 号

(b)設定法 2

(c)設定法 3

(i) 第 1 種地盤

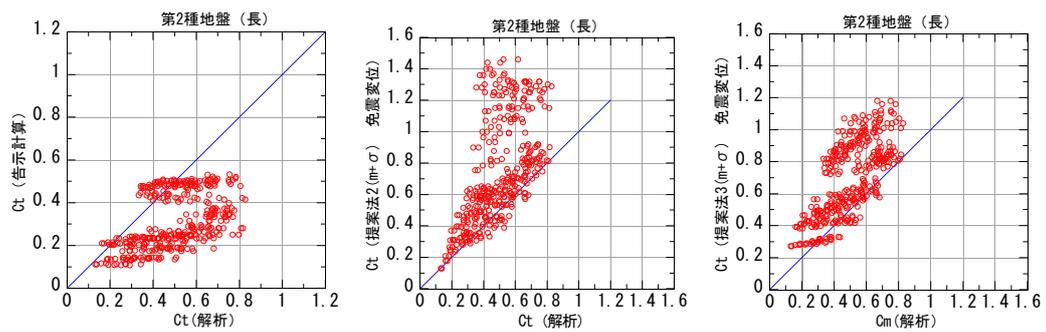


(a)告示 2009 号

(b) 設定法 2

(c) 設定法 3

(ii) 第 2 種地盤 (短)



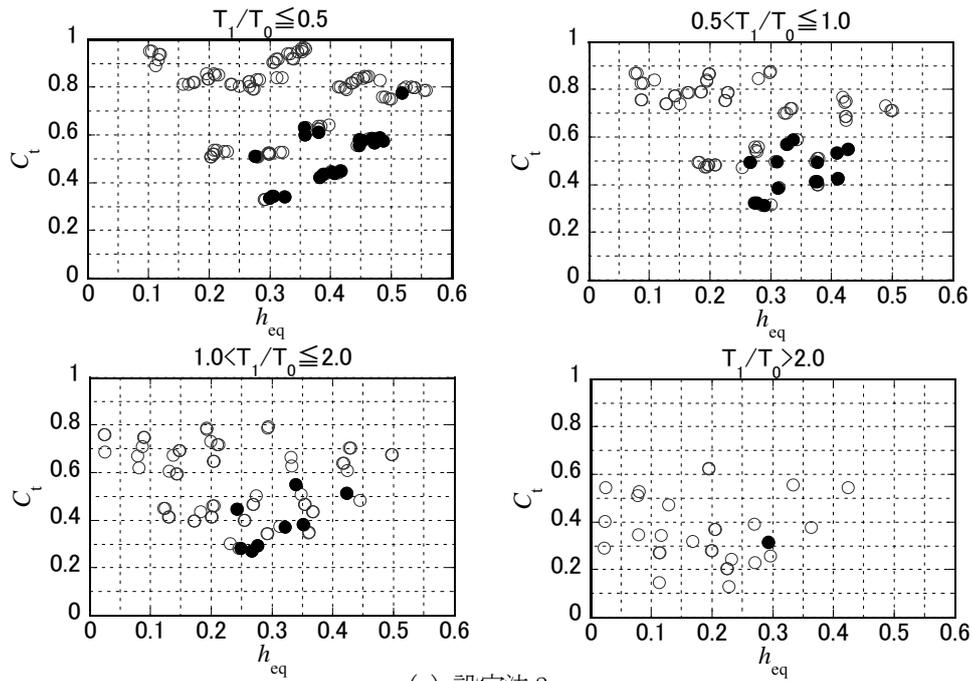
(a)告示 2009 号

(b)設定法 2

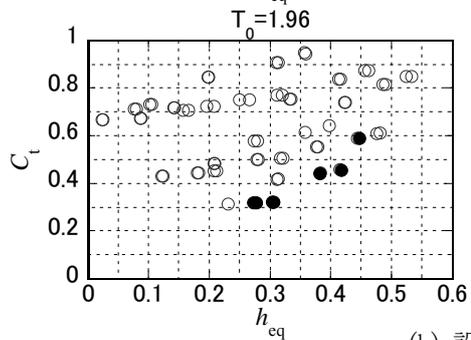
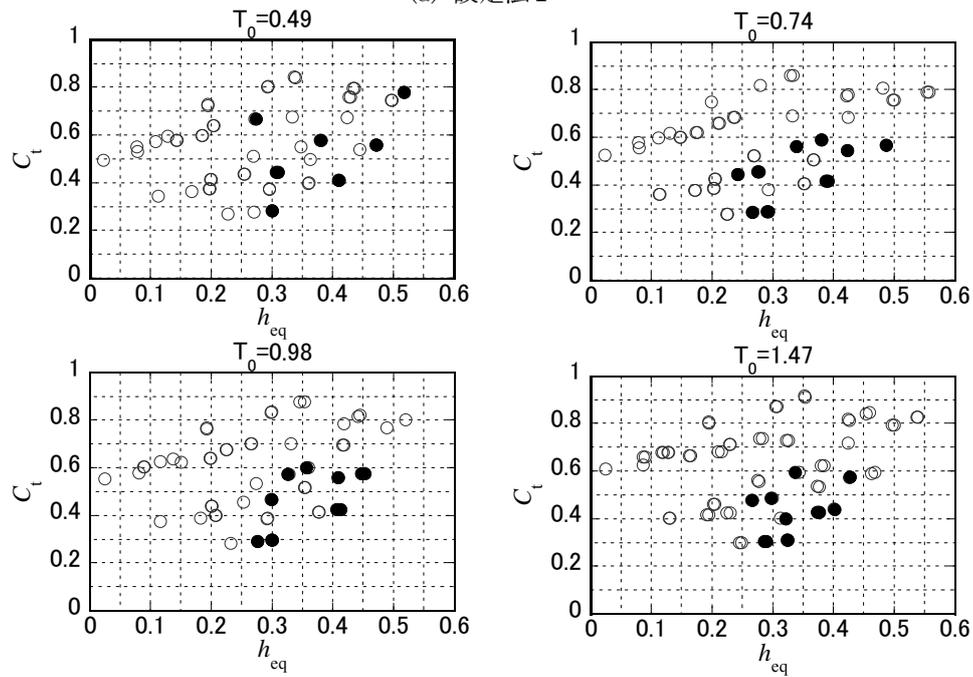
(c)設定法 3

(iii) 第 2 種地盤 (長)

図 4.5-35 最上階の地震層せん断力係数 C_t



(a) 設定法 2



(b) 設定法 3

○ : 提案式 \geq 解析
● : 提案式 $<$ 解析

図 4.5-36 最上階の地震層せん断力係数 C_t ($m+\sigma$) (免震層変位：告示 2009 号)

T_1/T_0 が2以下であり、 C_t が0.6より小さい領域に集中して分布している。図(b)の設定法3では、各 T_0 において●が分布しているものの、図(a)と同様に C_t が0.7より小さい領域に分布している。提案式の C_t が解析値を下回る場合における解析パラメータを表4.5-10に示す。免震層の弾性接線周期 T_1 が6.0sの場合におけるケースで設定法による値が解析値を下回るケースが多くなっている。また、設定法3では免震層降伏変位が0.1cmの場合でも解析値を下回るケースが多くなっていることがわかる。

表 4.5-10 提案式の C_t (免震層変位：告示2009号) が
解析結果の C_t を下回る場合における解析パラメータ (第2種地盤 (短))

(a) 設定法2 45/360 ケース

階数		上部構造固有周期		上部構造減衰		免震層降伏せん断力係数	
特性値	ケース数	特性値	ケース数	特性値	ケース数	特性値	ケース数
7層	15	0.02H	14	2%	40	0.03W	10
14層	30	0.03H	21	3%	5	0.05W	17
		0.04H	10			0.07W	17
						0.1W	1

免震層降伏変位		免震層 弾性接線周期	
特性値	ケース数	特性値	ケース数
0.1cm	21	2.5s	0
1cm	19	4.0s	10
3cm	5	6.0s	35

(b) 設定法3 53/360 ケース

階数		上部構造固有周期		上部構造減衰		免震層降伏せん断力係数	
特性値	ケース数	特性値	ケース数	特性値	ケース数	特性値	ケース数
7層	23	0.02H	22	2%	38	0.03W	15
14層	30	0.03H	24	3%	15	0.05W	20
		0.04H	7			0.07W	17
						0.1W	1

免震層降伏変位		免震層 弾性接線周期	
特性値	ケース数	特性値	ケース数
0.1cm	34	2.5s	1
1cm	18	4.0s	15
3cm	1	6.0s	37

4-5-4 パラメータが変動したときの影響

4-5-3 項で示した設定法2 および3において平均値からのばらつきを考慮した平面回帰式において、環境や経年等による解析パラメータの変化が増幅率 β にどの程度影響を与えるかを評価した。解析事例として、ここでは以下の場合を考える。

=解析条件=

7階建ての免震建築物を想定する。

$T_0=0.49s$ 、免震層の降伏せん断力係数 $\alpha_y=0.05$ 、降伏変位 $0.1cm$ 、 $T_1/T_0=1.83$ 、 $T_2=4.0s$

このとき、免震層の最大応答変位 $D_{max}=0.25m$ 、 $h_{eq}=0.256$

免震材料の構成は、LRBからなるものとする。

表2.3-40より 免震層の復元力の変動は、

切片荷重： +側 1.44倍 -側 0.69倍
2次剛性： +側 1.31倍 -側 0.70倍

ここで、上記の特性変動による h_{eq} の変化を算出する。この際、 D_{max} は $0.25m$ から変化しないと考える。表4.5-11にパラメータ変動と増幅率 β の関係を示す。 β_t は最上階の増幅率、 β_m は中間階の増幅率を示す。免震層復元力の特性変動は $0.7\sim 1.4$ であるが、 β の変化率は設定法2では $0.97\sim 1.14$ 、設定法3では $1.04\sim 1.10$ となった。

表4.5-11 にパラメータ変動と増幅率 β_t の関係

(a) 設定法2 (平均+標準偏差)

特性変動	種別	T_1 の変化	h_{eq} の変化	変動時の β	β の変化率
+	β_t	0.83	1.16	4.18	1.14
	β_m			2.00	1.09
-	β_t	1.20	1.09	3.57	0.97
	β_m			1.81	0.98

(a) 設定法3 (平均+標準偏差)

特性変動	種別	h_{eq} の変化	変動時の β	β の変化率
+	β_t	1.16	4.38	1.10
	β_m		2.08	1.07
-	β_t	1.09	4.21	1.06
	β_m		2.03	1.04

4-5-5 3層、5層、20層モデルの検討

前節までの検討は、7層および14階モデルによるものであった。本節では、3層、5層および20層の建物モデルに対して、設定法2および設定法3による地震層せん断力係数を算出し、時刻歴応答解析結果との比較を行う。応答解析の入力地震動は3-2節で示した第2種地盤（短）とした。

時刻歴応答解析結果の免震層変位を用いた設定法2および3の増幅率を図4.5-37および4.5-38に示す。図(a)で示す平均を用いた評価は、図(b)で示す平均+ σ に対してよりも解析値よりも大きく評価する解析ケースが多い。 C_t/C_o （最上階の地震層せん断力係数増幅率）は、図4.5-37の設定法2の方が設定法3よりもばらつきが小さく、解析値の増幅率との差が小さいことがわかる。

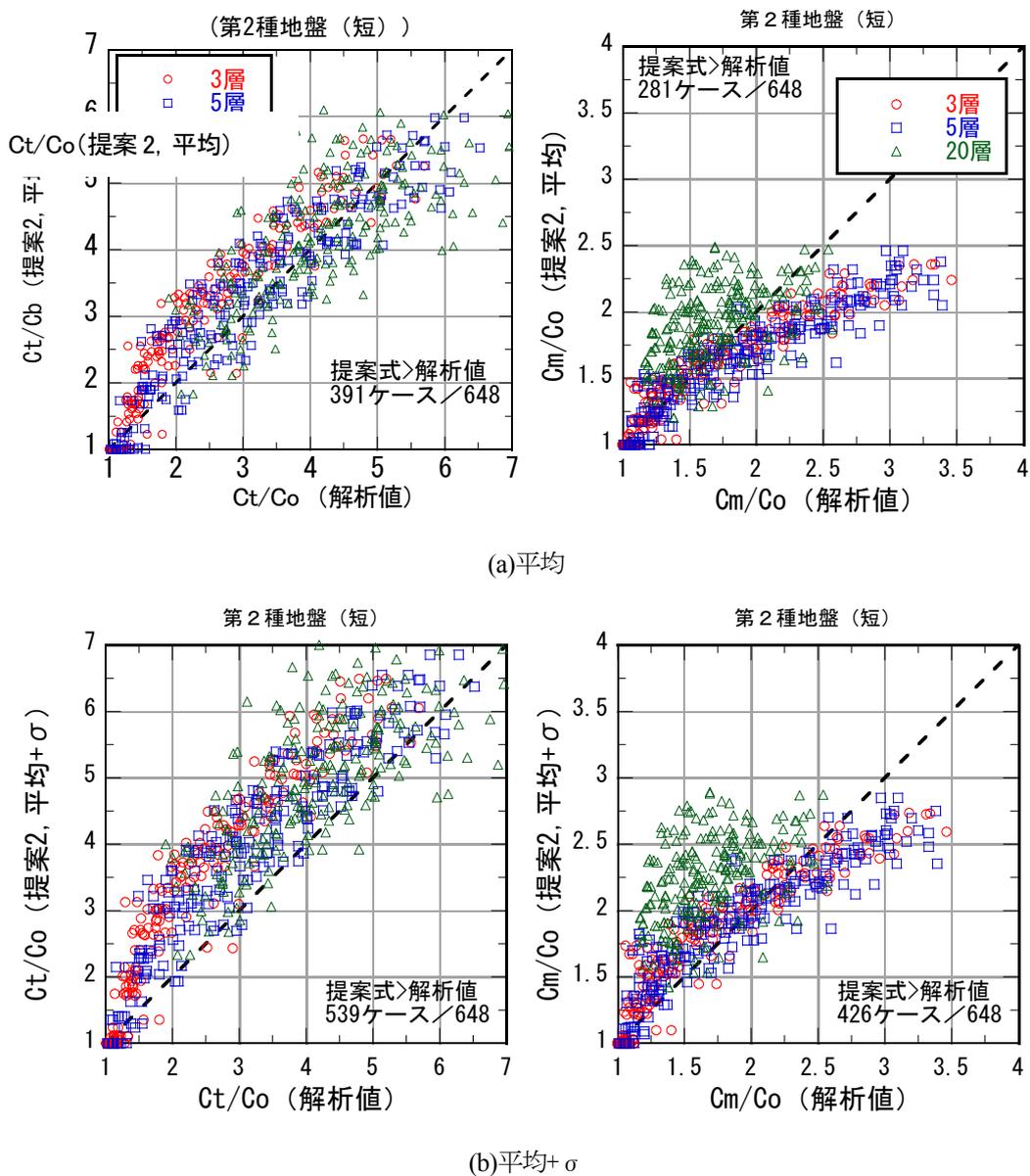


図 4.5-37 時刻歴応答解析変位を用いた設定法2の増幅率

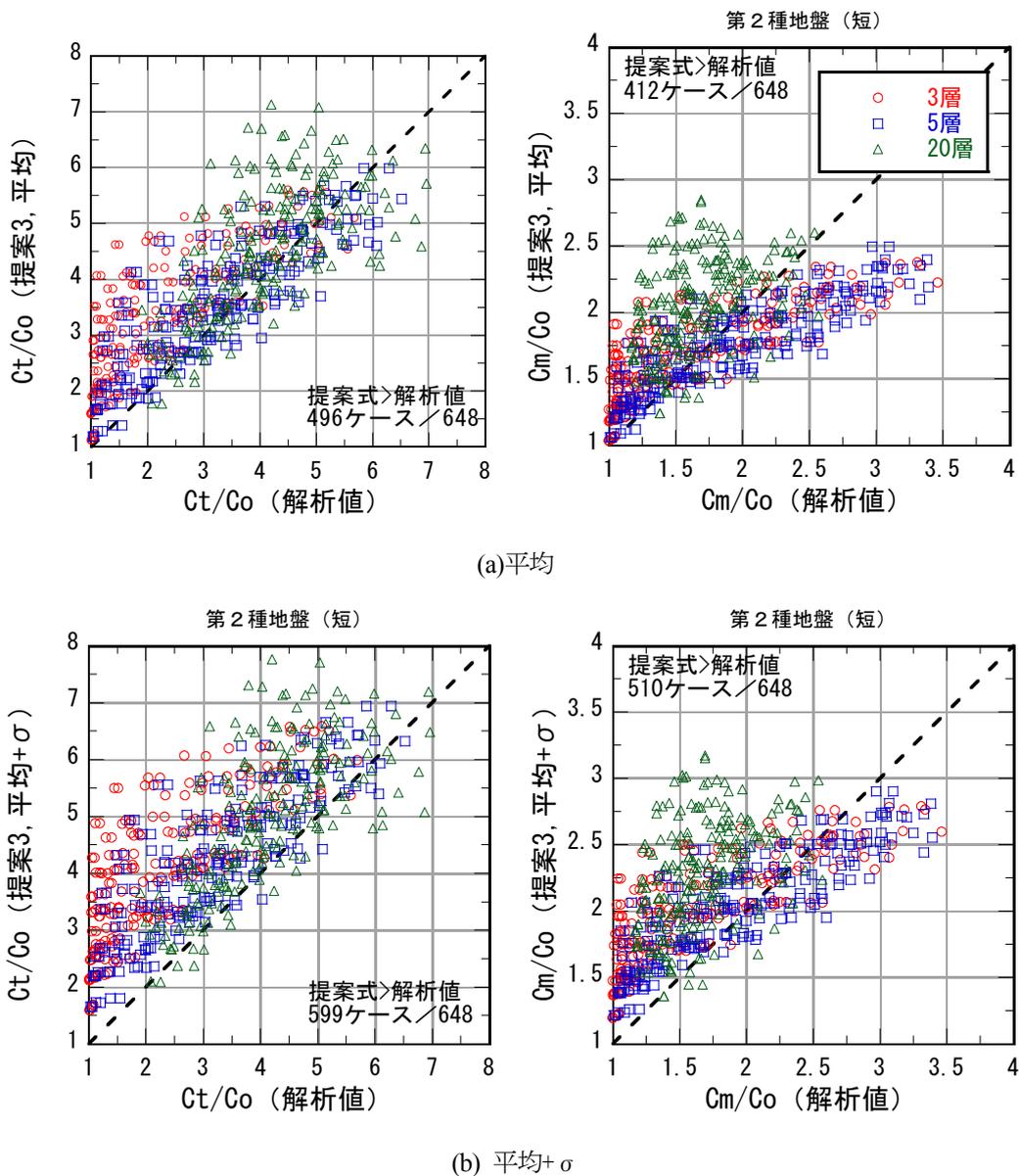
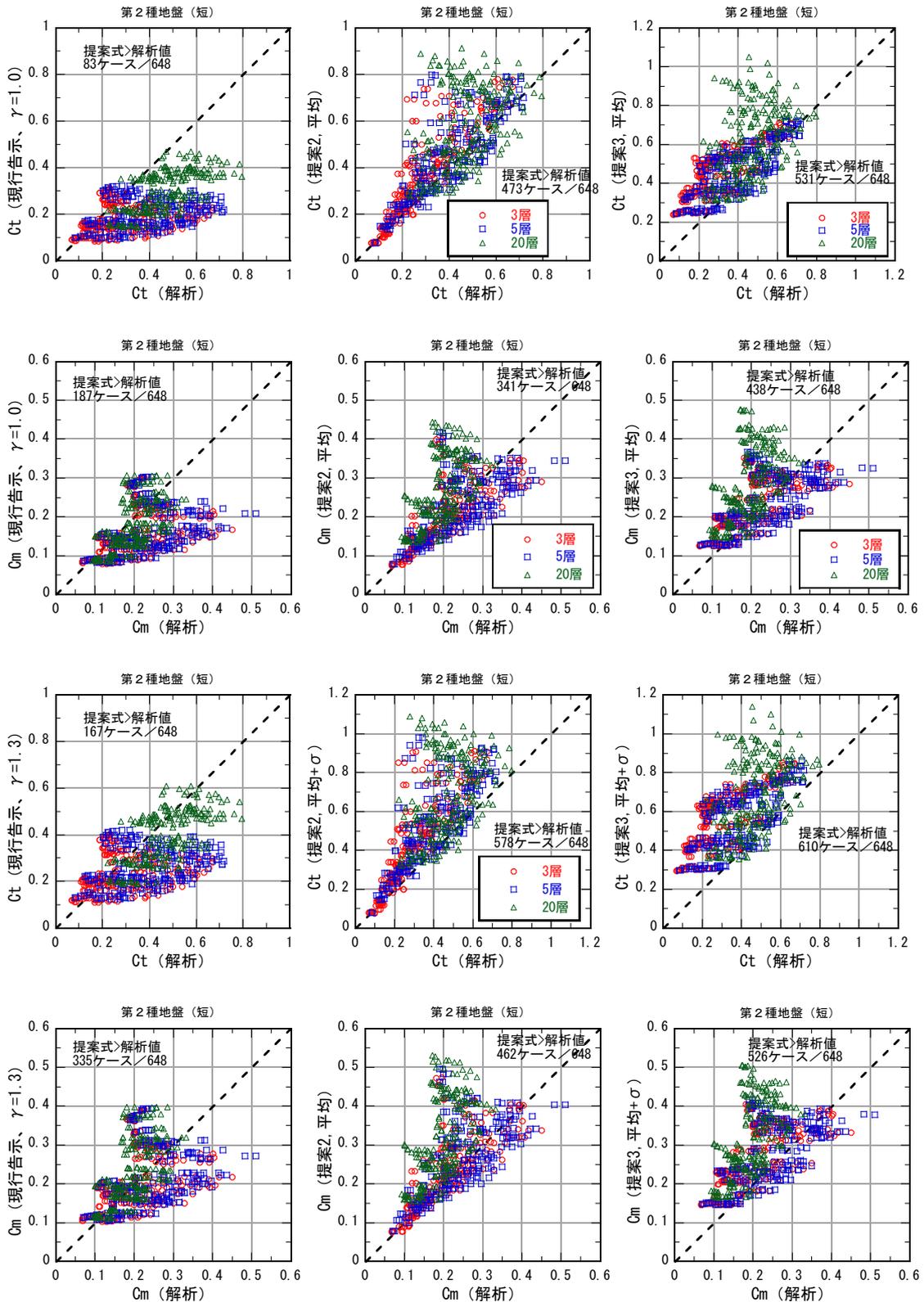


図 4.5-38 時刻歴応答解析変形を用いた設定法 3 の増幅率

C_m/C_o (中間階の地震層せん断力係数増幅率) は、設定法 2 および設定法 3 とともに、3 層および 5 層では解析結果の増幅率に対してやや過小に、20 層では過大評価となる傾向にある。ただし、平均+ σ による評価では、解析値に対して安全側の評価となるケースが平均による評価式を用いた場合よりも多くなっている。

告示 2009 号による免震層応答変位を用いた地震層せん断力係数を図 4.5-39 に示す。図中の横軸は時刻歴応答解析結果の地震層せん断力係数である。図(a)の縦軸は告示 2009 号の手法で求めた地震層せん断力係数であり、免震層特性のばらつき等を表す係数 γ が 1.0 の場合と 1.3 の場合を示した。告示 2009 号による地震層せん断力係数が解析値よりも大きくなるケースの割合は、 $\gamma=1.0$ において、最上階で全体の 13%、中間階で 29% である。 $\gamma=1.3$ では、解析値よりも大きくなるケースの割合が $\gamma=$



(a) 告示2009号

(b) 設定法2

(c) 設定法3

図 4.5-39 告示2009号の免震層応答変位結果による地震層せん断力係数の算出

1.0 に対して倍程度となった。一方、設定法 2 の場合では、平均に基づく評価式では C_t で 73%、 C_m で 53% が解析結果より大きな値として評価する。平均+ σ による評価式では、 C_t で 89%、 C_m で 71% となっており、安全側評価となるケースの割合が上昇する。設定法 3 では、平均に基づく評価式において C_t で 82%、 C_m で 68% となり、平均+ σ による評価式では C_t で 94%、 C_m で 81% であった。以上より、本節の検討ケースの中で安全側の評価ケースの割合が最も大きくなる地震層せん断力設定法は、設定法 3 の平均+ σ であった。

4-5-6 観測波に対する検討

上部構造の地震層せん断力係数に対する設定法2および設定法3に対して、14層モデルにおける強震動観測波の時刻歴応答解析結果と比較した。入力地震動は、強震動観測波3波（1940 El Centro NS, 1952 Taft EW, 1968 Hachinohe NS）を $V_{max}=50\text{cm/s}$ となるように規準化したものである。

免震層の変形を時刻歴応答解析の最大変形とし、告示2009号の増幅率を用いて上部構造の地震層せん断力係数を求めた場合と時刻歴応答解析の最大地震層せん断力係数とを比較したものを図4.5-40～図4.5-45の左側に示す。また、提案した設定法2および設定法3により地震層せん断力係数を求めたものと時刻歴応答解析結果との比較を図4.5-40～図4.5-45の中列および右列に示す。 C_t は最上階の14階の地震層せん断力係数であり、 C_m は中間階である7階の地震層せん断力係数である。図4.5-40～図4.5-45にて設定法2および設定法3による上部構造の地震層せん断力係数算出時に用いる免震層の応答変形は、時刻歴応答解析の免震層最大変位とした。図4.5-40～図4.5-45の各図中の横軸はいずれの図も時刻歴応答解析の最大値である。図4.5-40～図4.5-45の中列および右列において、上段のグラフ縦軸は平均的な傾向を表現した式（4-5-2項参照）を用いた場合、下段のグラフ縦軸は平均からのばらつきを考慮した式（4-5-3項参照）を用いた場合を示す。

これらの図より、告示2009号により算定した地震層せん断力係数は、時刻歴応答解析の最大地震層せん断力係数に対してやや過小評価となる傾向であることがわかる。一方、地震動の波形によって差はあるが、4-5-2項および4-5-3項で提案した設定法2および設定法3は、時刻歴応答解析結果に対して全体的に安全側の推定傾向になっている。これは、ここでの設定に用いた第2種地盤（短）の地震動の短周期成分が他の地震動と比較して卓越する形になっているためと考えられる。従って、短周期成分の少ない Hachinohe NS の場合には平均的にかなり安全側の推定となっている。

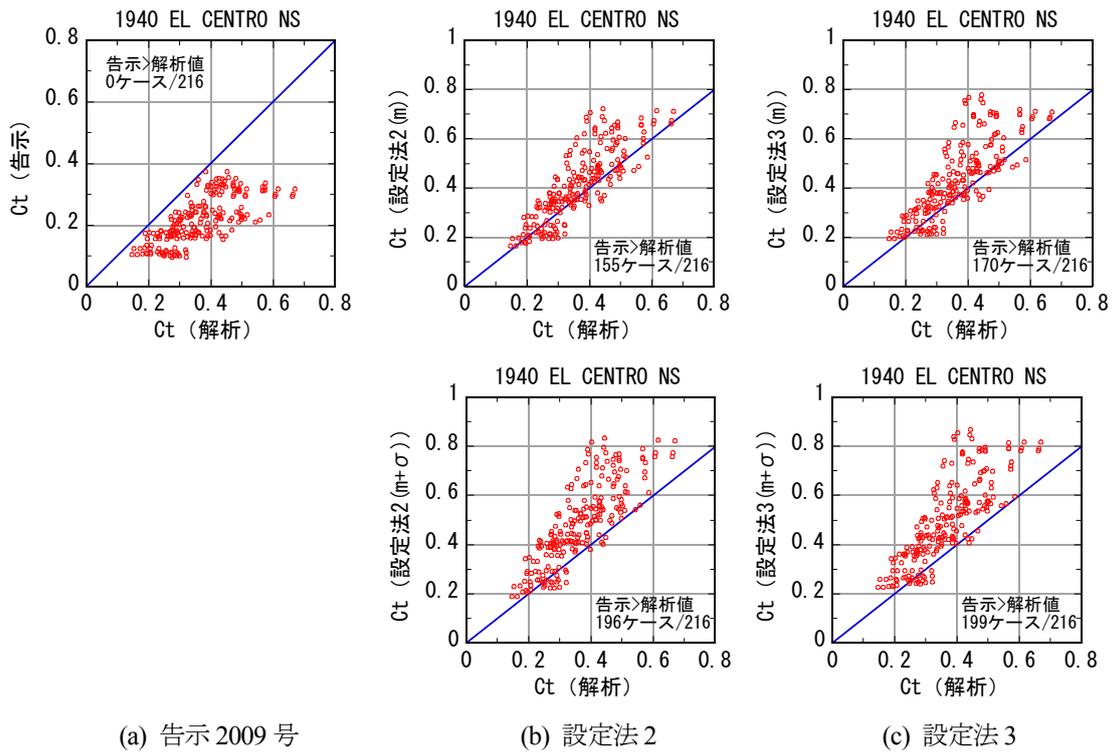


図 4.5-40 最上階層せん断力係数の比較、入力地震動は 1940 El Centro NS 50kine

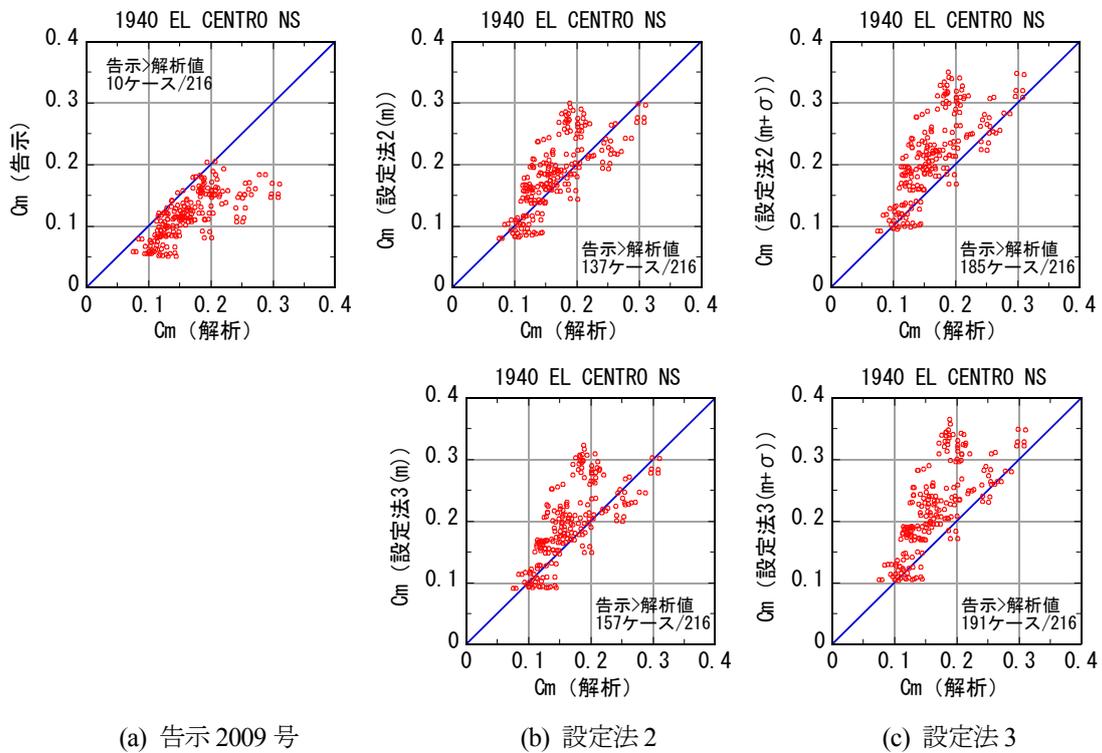


図 4.5-41 中間階層せん断力係数の比較、入力地震動は 1940 El Centro NS、50kine

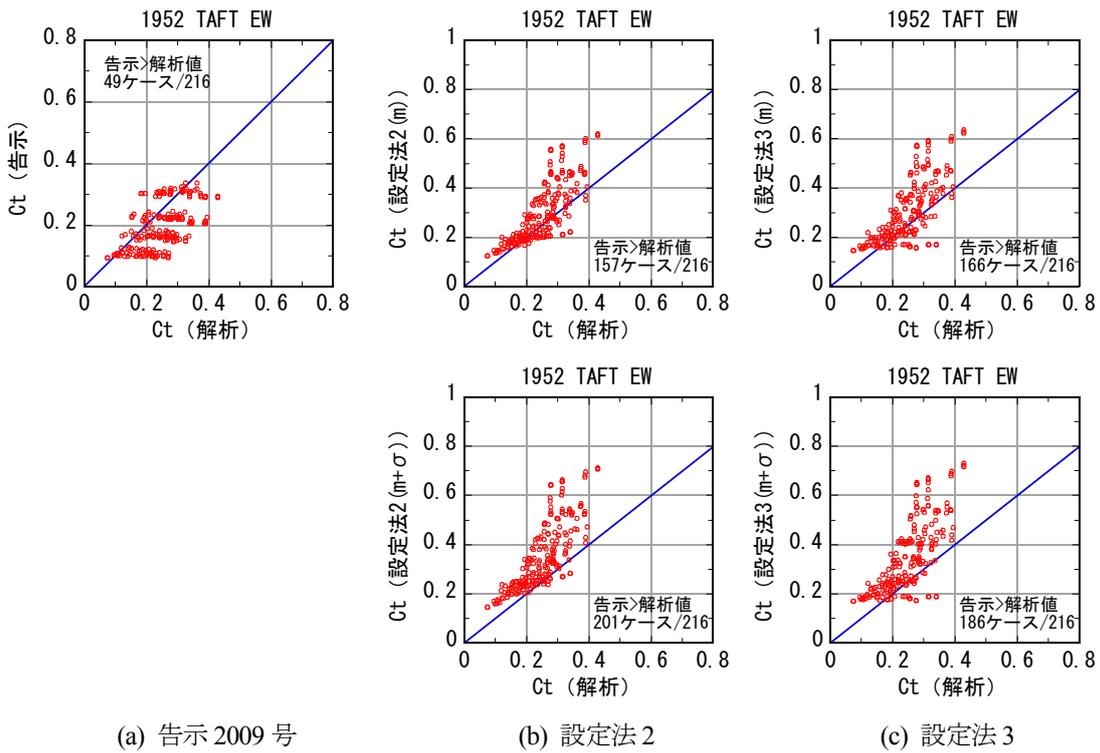


図 4.5-42 最上階層せん断力係数の比較 1952 Taft EW、50kine

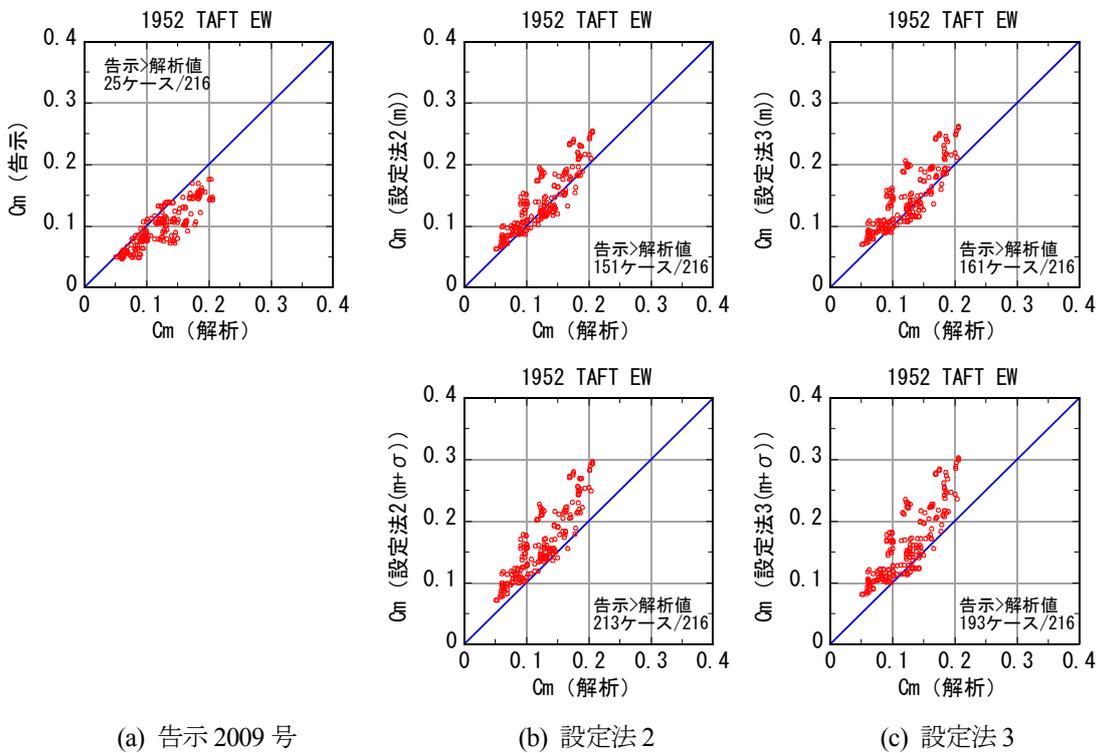


図 4.5-43 中間階層せん断力係数の比較 1952 Taft EW、50kine

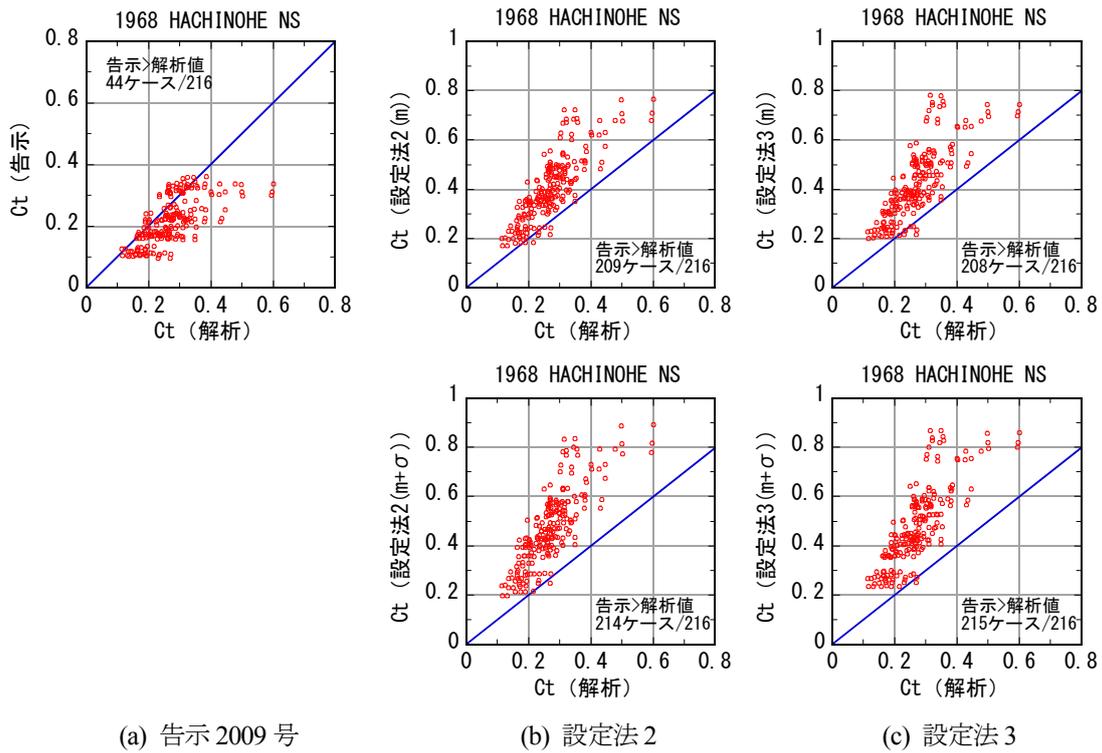


図 4.5-44 最上階層せん断力係数の比較 1968 Hachinohe NS、50kine

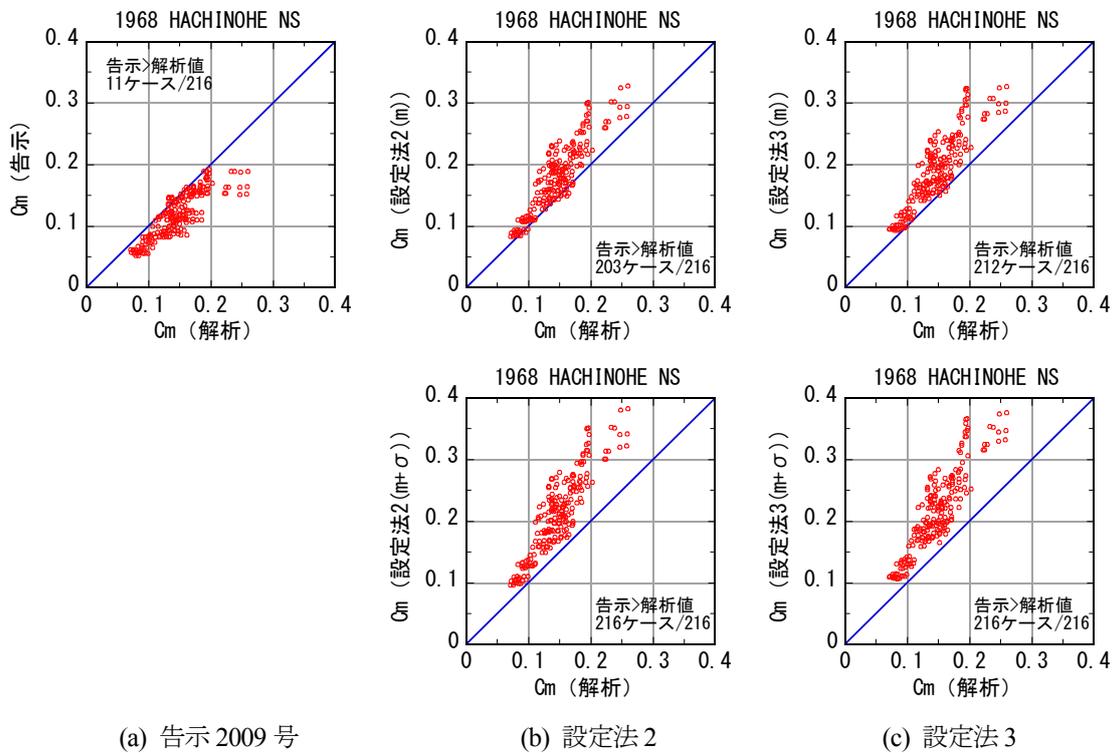


図 4.5-45 中間階層せん断力係数の比較 1968 Hachinohe NS、50kine で基準化

4-5-7 粘性系ダンパーによる影響

本章のこれまでの検討において免震層のエネルギー吸収要素は、弾塑性系を対象としていた。本項では、免震層に粘性ダンパーが設置されている場合に対して、上部構造の地震層せん断力係数分布の適用方法ならびにその妥当性を検証する。ここでの検討における上部構造は14層である。

図4.5-46および図4.5-47はバイリニア型復元力特性を有する免震層に減衰定数5%分の粘性減衰を付加した場合の地震層せん断力係数を示し、図4.5-48および図4.5-49では、バイリニア型復元力特性を有する免震層に減衰定数10%分の粘性減衰を付加した場合の層せん断力係数を示す。免震層のバイリニア履歴のパラメータは表3.2-1に示すものと同じである。図4.5-46および図4.5-48は最上階の場合であり、図4.5-47および図4.5-49は中間階の場合である。いずれの図の横軸も時刻歴解析結果である。縦軸は左側から、告示2009号の場合、設定法2の場合、設定法3の場合を示している。また、設定法2および設定法3の図において、上段の(m)は、4-5-2項で示した回帰平面による提案式を用いた場合であり、下段の(m+σ)は4-5-3項で示した平均からのばらつきを考慮した提案式による場合である。設定法2および設定法3による地震層せん断力係数の増幅率算出において、等価減衰定数 h_{eq} は、バイリニア履歴の免震層最大変形時に基づいた値を用いており、粘性減衰付加分を見込んでいない。告示2009号による地震層せん断力係数は、ほとんどの事例で時刻歴応答解析結果よりも過小評価となっている。一方、設定法2および設定法3の場合では、回帰平面による提案式を用いた場合(縦軸に(m)の表記がある図)では、縦軸と横軸が等しい直線が点群の中央を貫いており、解析結果とよい対応を示していることがわかる。また、平均からのばらつきを考慮した提案式による場合(縦軸に(m+σ)の表記がある図)では、縦軸と横軸が等しい直線が点群やや下側を貫くことから、平均からのばらつきを考慮した提案式は、回帰平面による提案式よりもやや安全側の評価となっていることがわかる。

設定法2および設定法3の算出において、免震層の最大変位を時刻歴応答解析結果の値として算出した場合を図4.5-50および図4.5-51に示す。図4.5-46~4.5-49と同様に、回帰平面による提案式を用いた場合(縦軸に(m)の表記がある図)では、縦軸と横軸が等しい直線が点群の中央を貫いており、解析結果とよい対応を示し、また、平均からのばらつきを考慮した提案式による場合(縦軸に(m+σ)の表記がある図)では、縦軸と横軸が等しい直線が点群やや下側を貫く。これらの傾向は、告示2009号による応答スペクトル法から求めた免震層の応答変位を用いた設定法2および設定法3による結果と同様の結果となった。

免震層が線形弾性要素と粘性減衰要素からなり、付加する粘性減衰を減衰定数が5%、10%、20%にした場合について、本節で示す設定法2および3との比較を行った。設定法2および3ともに、上部構造の地震層せん断力係数の増幅率算出に用いた等価減衰定数は、付加する減衰定数の値としている。設定法2では T_1 がパラメータの1つであり、免震層が線形弾性要素と粘性減衰要素の場合、本来 T_1 を決めることはできない。ただし、ここでは、 $T_1=T_2$ （上部構造を剛とした場合の線形弾性要素による接線周期）とした場合、また、 $T_1/T_0=0$ として層せん断力係数の増幅率を算出した。これらの時刻歴応答解析結果との比較を図4.5-52および図4.5-53に示す。 $T_1=T_2$ とした場合は、 $T_1/T_0=0$ とした場合と比べ、地震層せん断力係数を小さく評価する。設定法2の増幅率算出式では、 T_1/T_0 が大きくなると、上

部構造の増幅が抑えられることを表現しているが、 $T_1/T_0=0$ では上記の増幅抑制を式の上で無視したこととなっている。図 4.5-53 より、 $T_1/T_0=0$ とした場合では、すべての検討結果において時刻歴応答解析結果よりも大きく地震層せん断力係数を評価することができている。図 4.5-54 に設定法 3 と時刻歴応答解析結果との地震層せん断力係数の比較を示す。設定法 3 では、回帰平面による提案式を用いた場合においても、時刻歴応答解析より大きな増幅率として算出しているケースが多い。ばらつきを考慮した場合においては、最上階の地震層せん断力係数で全ケース、中間階の地震層せん断力係数では 1 ケースを除く全ケースにおいて、設定法 3 により求めた地震層せん断力係数が時刻歴応答解析を上回る値となった。免震層が線形弾性要素と粘性減衰要素からなる場合の告示 2009 号で求めた上部構造の地震層せん断力係数を図 4.5-55 に示す。告示 2009 号で求めた地震層せん断力係数が時刻歴応答解析結果を上回るのは、最上階、中間階ともに全 27 ケース中 2 ケースである。図 4.5-52～4.5-54 では、図 4.5-52 の左図の 6 ケースが時刻歴応答解析結果を上回るケース数の最小値である。これより、告示 2009 号は設定法 2 および設定法 3 の場合よりも時刻歴応答解析結果を上回る割合が小さくなっていることがわかる。

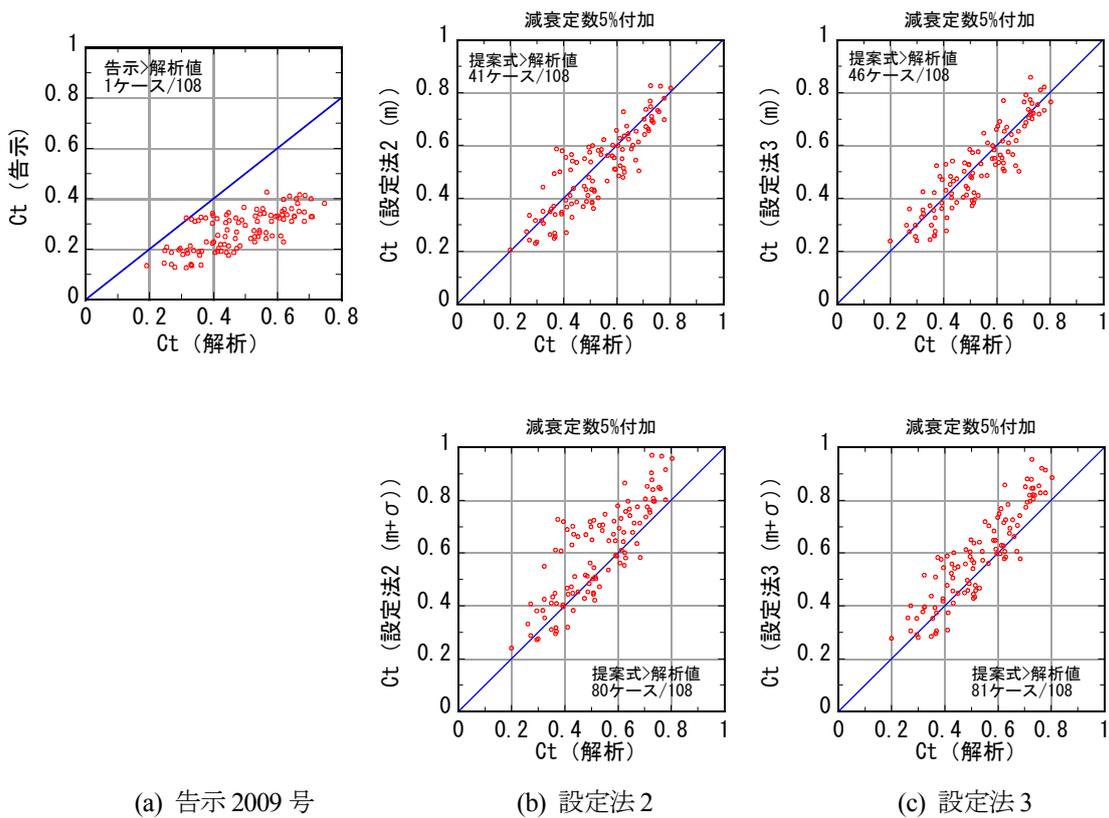


図 4.5-46 最上階層せん断力係数の比較、バイリニア履歴に減衰定数 5%分の粘性減衰付加

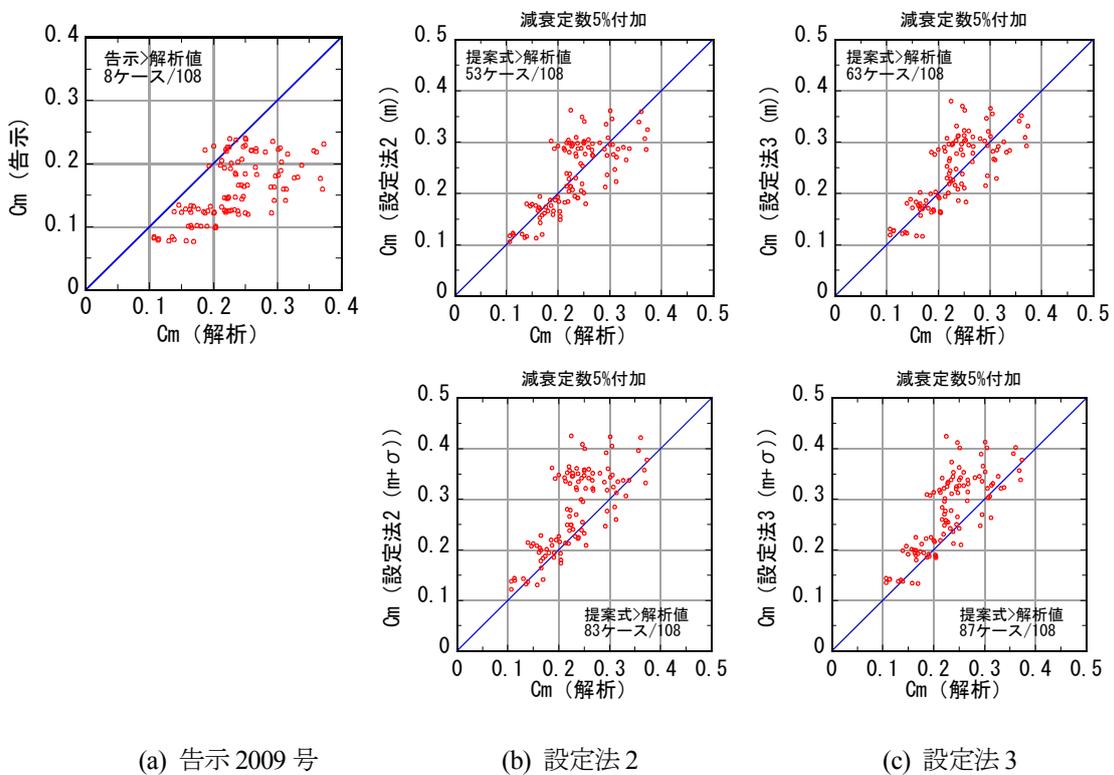


図 4.5-47 中間階層せん断力係数の比較、バイリニア履歴に減衰定数 5%分の粘性減衰付加

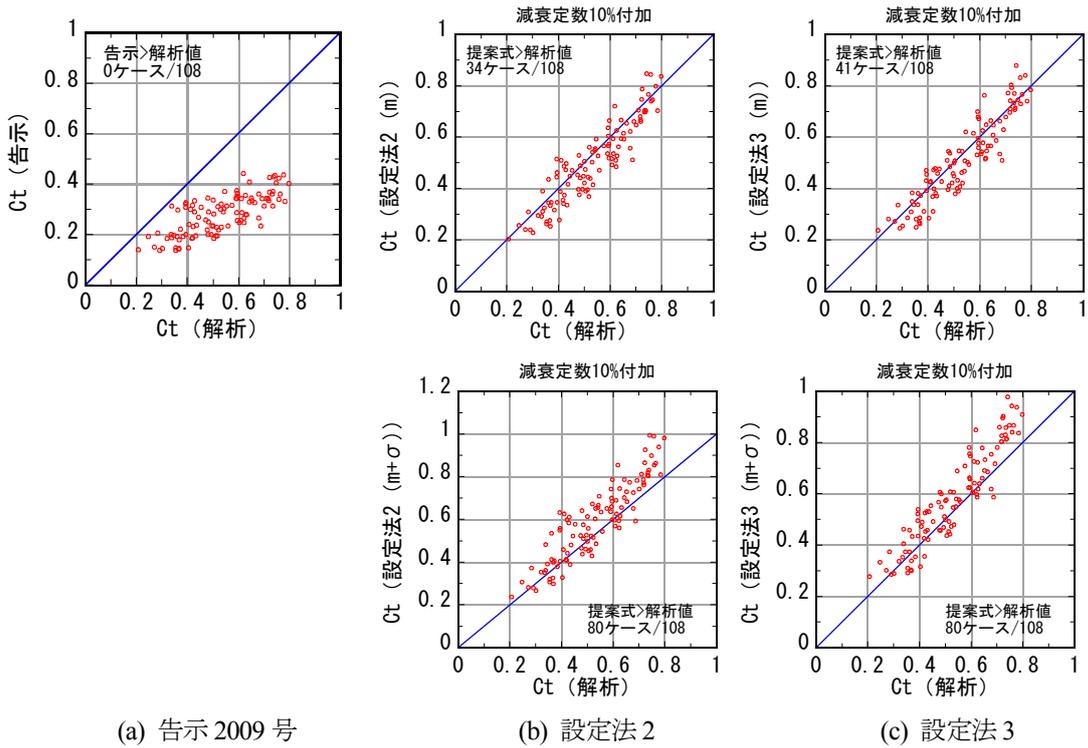


図 4.5-48 最上階層せん断力係数の比較、バイリニア履歴に減衰定数 10%分の粘性減衰付加

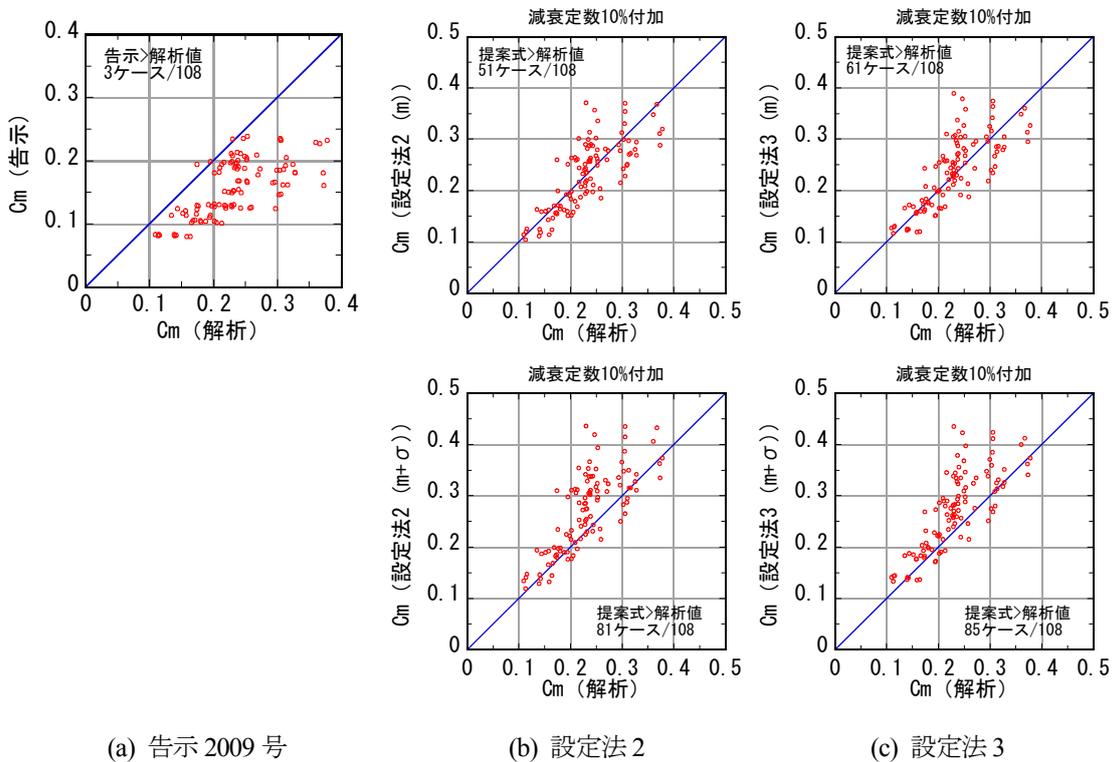
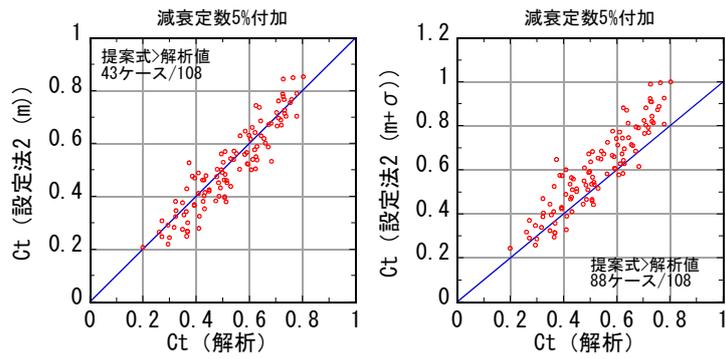
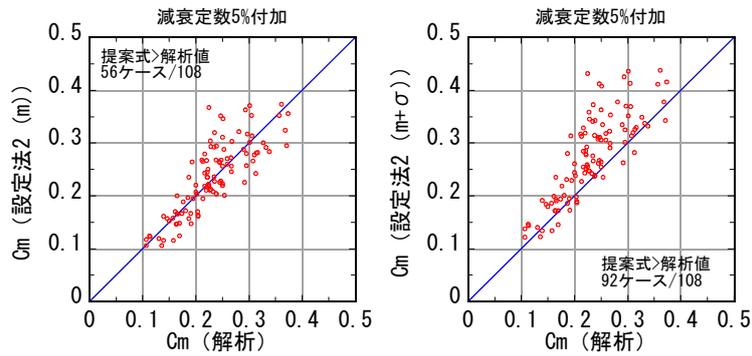


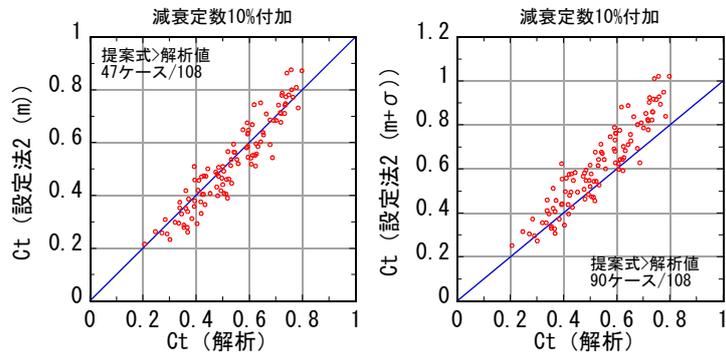
図 4.5-49 中間階層せん断力係数の比較、バイリニア履歴に減衰定数 10%分の粘性減衰付加



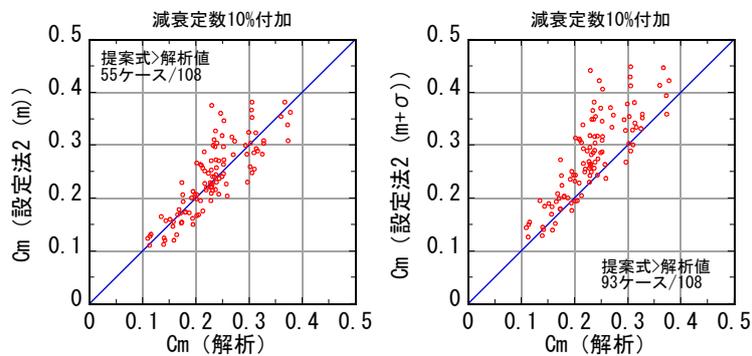
(a) 最上階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 5%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮



(b) 中間階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 5%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮

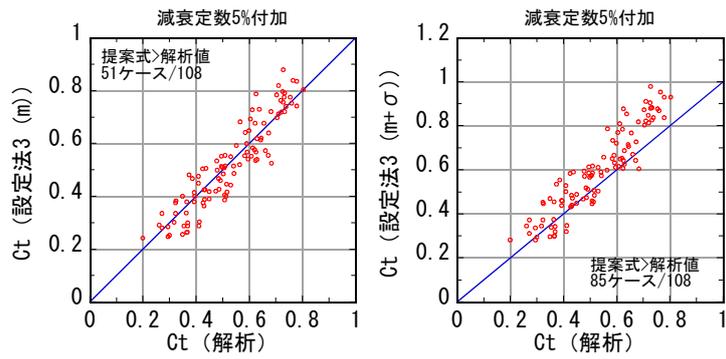


(c) 最上階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 10%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮

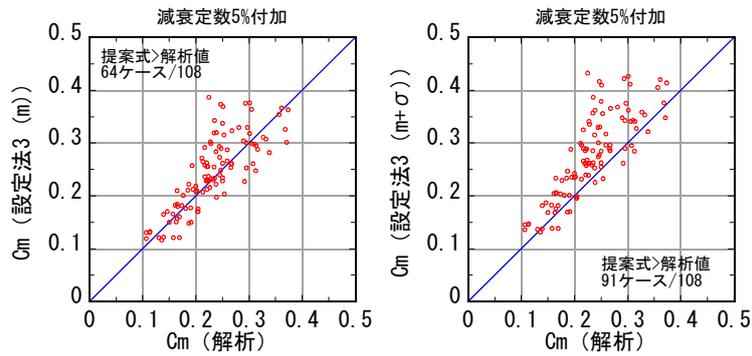


(d) 中間階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 10%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮

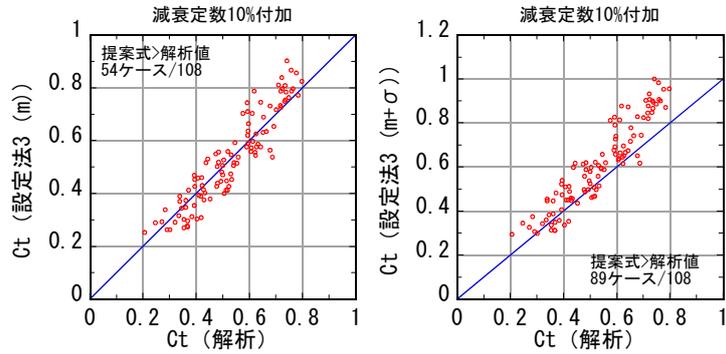
図 4.5-50 時刻歴解析結果の層せん断力係数と設定法 2 (免震層変位：時刻歴解析結果) との比較



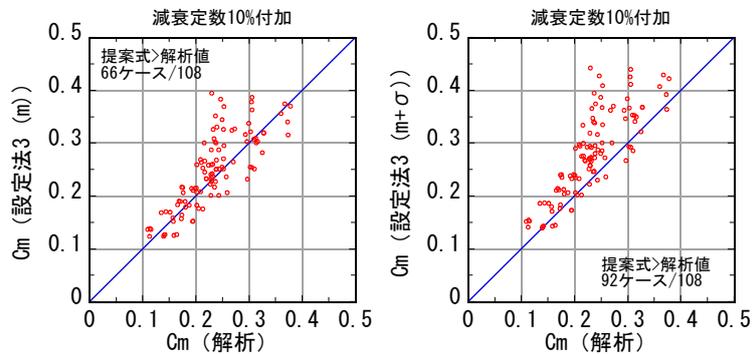
(a) 最上階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 5%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮



(b) 中間階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 5%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮

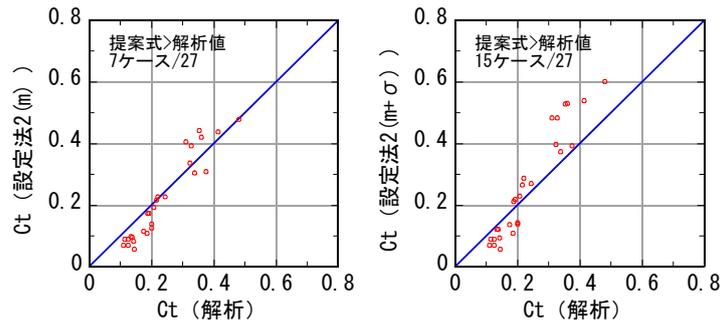


(c) 最上階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 10%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮

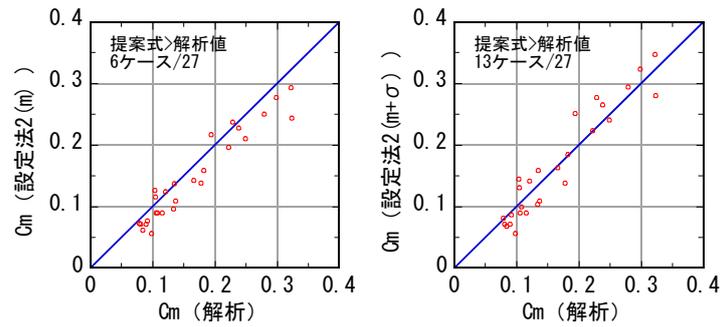


(d) 中間階の層せん断力係数 バイリニアに減衰係数 10%付加 左図：平均、右図：ばらつき考慮

図 4.5-51 時刻歴解析結果の層せん断力係数と設定法 3 (免震層変位：時刻歴解析結果) との比較

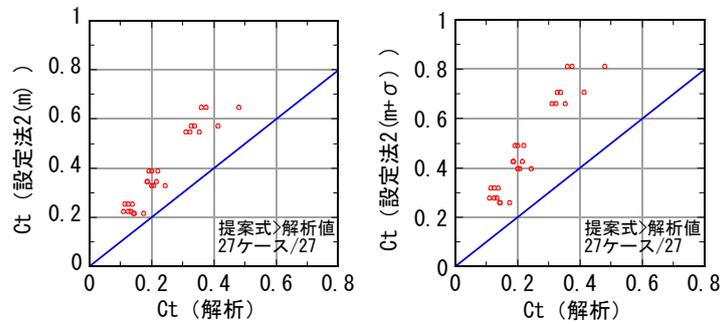


(a) 最上階の層せん断力係数

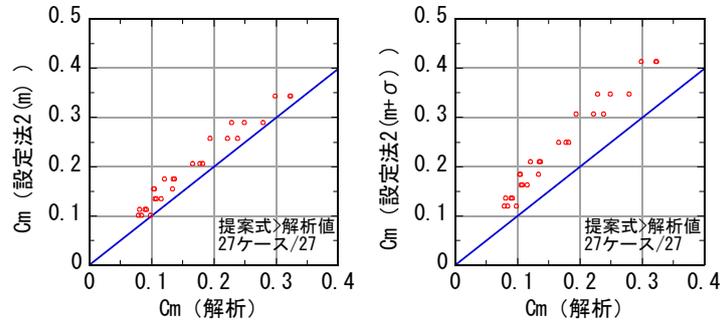


(b) 中間階の層せん断力係数

図 4.5-52 設定法 2 ($T_1=T_2$) と時刻歴解析結果との比較、粘性減衰のみ ($h=5\%$ 、 10% 、 20%)、左図：平均、右図：ばらつき考慮

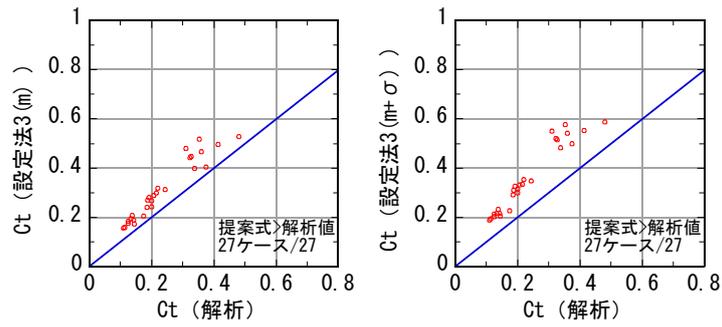


(a) 最上階の層せん断力係数

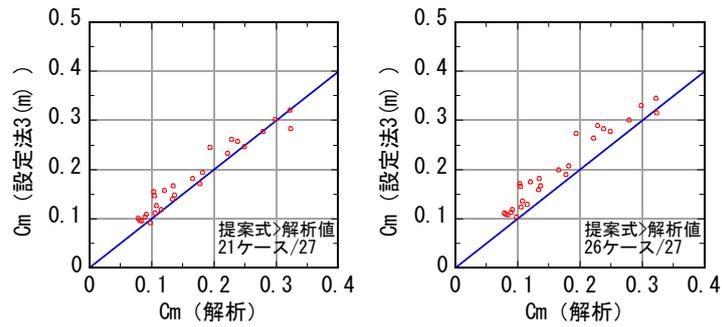


(b) 中間階の層せん断力係数

図 4.5-53 設定法 2 ($T_1/T_0=0$) と時刻歴解析結果との比較、粘性減衰のみ ($h=5\%$ 、 10% 、 20%)、左図：平均、右図：ばらつき考慮

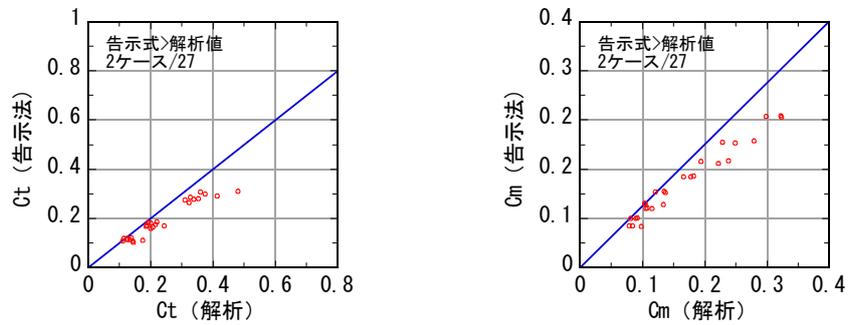


(a) 最上階の層せん断力係数



(b) 中間階の層せん断力係数

図 4.5-54 設定法 3 と時刻歴解析結果との比較、粘性減衰のみ (h=5%、10%、20%)、左図：平均、右図：ばらつき考慮



(a) 最上階の層せん断力係数

(b) 中間階の層せん断力係数

図 4.5-55 告示 2009 号と時刻歴解析結果との比較、粘性減衰のみ (h=5%、10%、20%)

4-6 設計用地震層せん断力の算出方法の提案

告示 2009 号第 6 の構造計算で求めるフローチャートを図 4.6-1 に示す。本資料の検討内容は図中の「7. 地震時の上部構造の安全性」に関する事項である。

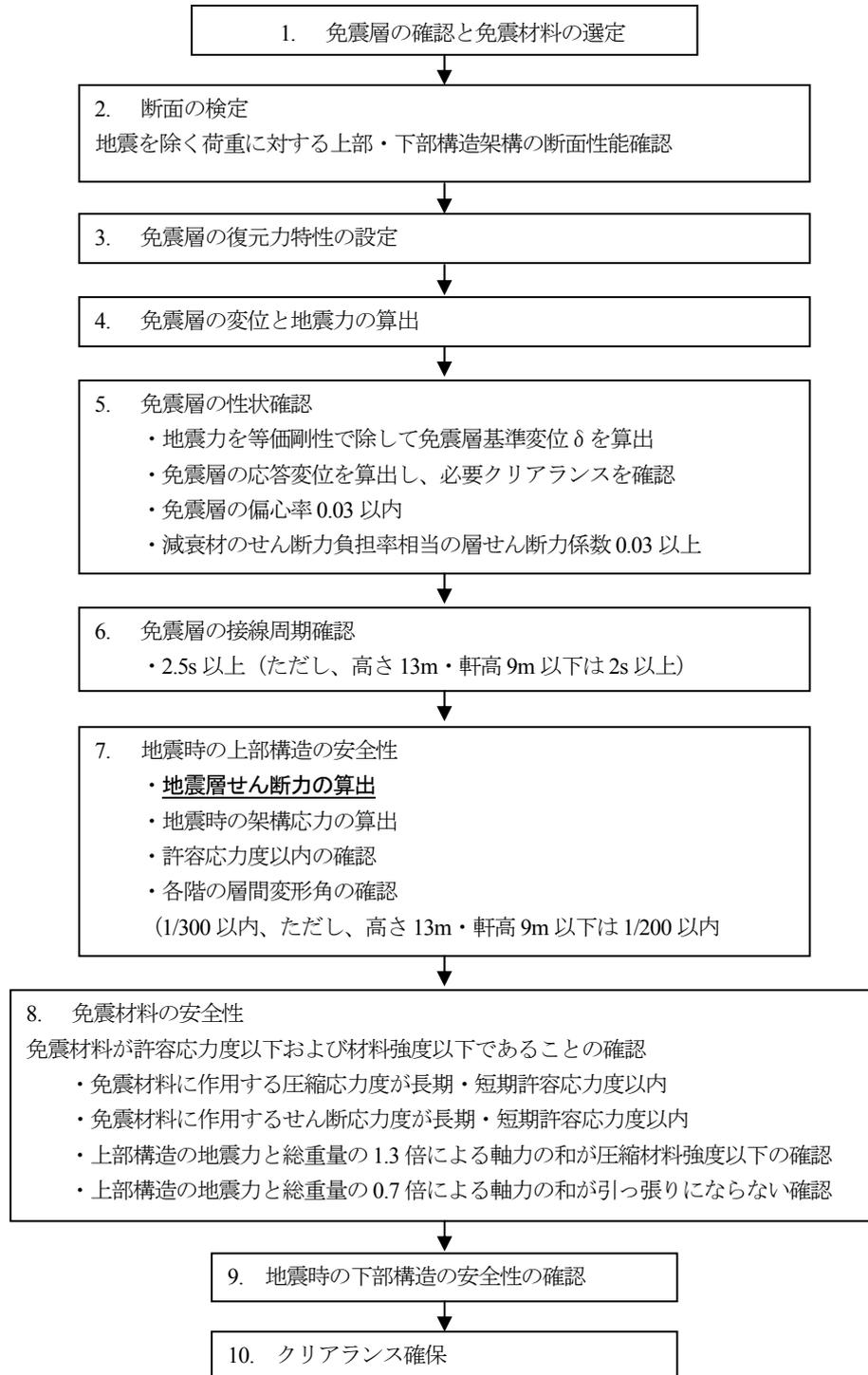


図 4.6-1 免震建築物の告示 2009 号第 6 の構造計算フローチャート

本節では、4-5-2 項および 4-5-3 項で算出した設定法 2 および設定法 3 に基づき、地震層せん断力の具体的な算出方法について述べる。

○地震層せん断力の算出法

1) 免震層の復元力特性パラメータの算出

- ・ 上部構造を剛体と仮定した場合の免震層の初期剛性に基づく固有周期 T_1
- ・ 図 4.6-1 の計算フロー図内「5. 免震層の性状確認」で算出する免震層の基準変位 δ 時における定常ループ時の等価減衰定数 h_{eq}

2) 基礎固定時の上部構造 1 次固有周期 T_0 の算出

3) 免震層の地震層せん断力および層せん断力係数 C_0 (免震層の基準変位 δ 時) の算出

4) 1) および 2) で求めた値をもとに、バイリニア型の免震層復元力による上部構造の地震層せん断力の増幅率 (最上階 C_t /免震層 C_0 、中間階 C_m /免震層 C_0) を算出

a) 設定法 2 に基づく増幅率の算出

- | | | |
|-----------|---------|--|
| ・ 最上階の増幅率 | 平均 | $\beta_t = -0.58 \cdot (T_1/T_0) + 6.6 h_{eq} + 2.5$ |
| | 平均+標準偏差 | $\beta_t = -0.72 \cdot (T_1/T_0) + 7.0 h_{eq} + 3.2$ |
| ・ 中間階の増幅率 | 平均 | $\beta_m = -0.17 \cdot (T_1/T_0) + 2.0 h_{eq} + 1.4$ |
| | 平均+標準偏差 | $\beta_m = -0.23 \cdot (T_1/T_0) + 2.2 h_{eq} + 1.7$ |

b) 設定法 3 に基づく増幅率の算出

- | | | |
|-----------|---------|--|
| ・ 最上階の増幅率 | 平均 | $\beta_t = 0.55 T_0 + 8.7 h_{eq} + 0.80$ |
| | 平均+標準偏差 | $\beta_t = 0.40 T_0 + 9.7 h_{eq} + 1.3$ |
| ・ 中間階の増幅率 | 平均 | $\beta_m = 0.17 T_0 + 2.6 h_{eq} + 0.94$ |
| | 平均+標準偏差 | $\beta_m = 0.13 T_0 + 3.1 h_{eq} + 1.1$ |

5) 最上階および中間階以外の層における増幅率を、免震層の増幅率を 1 とし、直線分布にて算出

6) 粘性系減衰材による上部構造の地震層せん断力の増幅を考慮

7) 当該層の重量に各層の増幅率と免震層の地震層せん断力係数を乗じ、上部構造の各層の地震層せん断力を算出

なお、免震層の環境変化ならびに経年による復元力特性の変化については、当該建物の条件、耐用年数を鑑みて、適宜考慮することとする。

以下に、上記の手法にならって鉄筋コンクリート造 11 階建の建物について、上部構造の地震層せん断力を算出した事例を示す。

検討例 1 11階建て鉄筋コンクリート造

a) 建物概要

本事例は、「免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説」¹⁾に記載されている「計算例2 鉄筋コンクリート造11階建て共同住宅」である。軒高は31.66mである。

上部構造と基礎の間に天然ゴム系積層ゴム支承、鋼棒ダンパーおよび鉛ダンパーを設置した免震建築物である。基準階伏図を図4.6-2に、Y1通り軸組図を図4.6-3に示す。

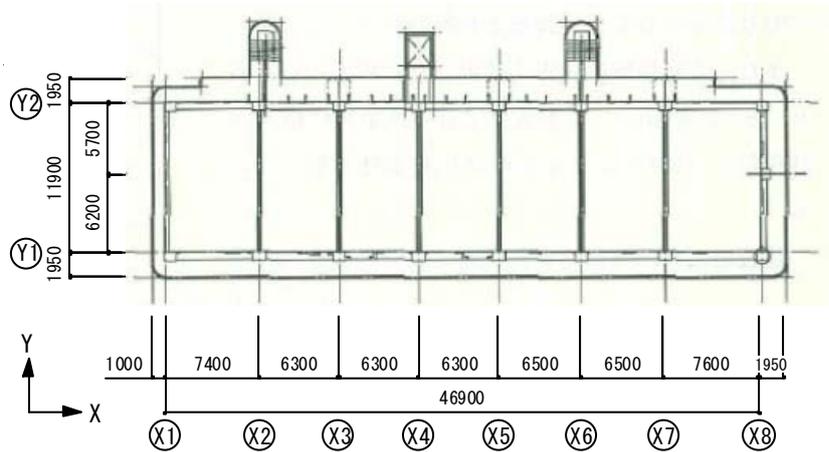


図 4.6-2 基準階伏図

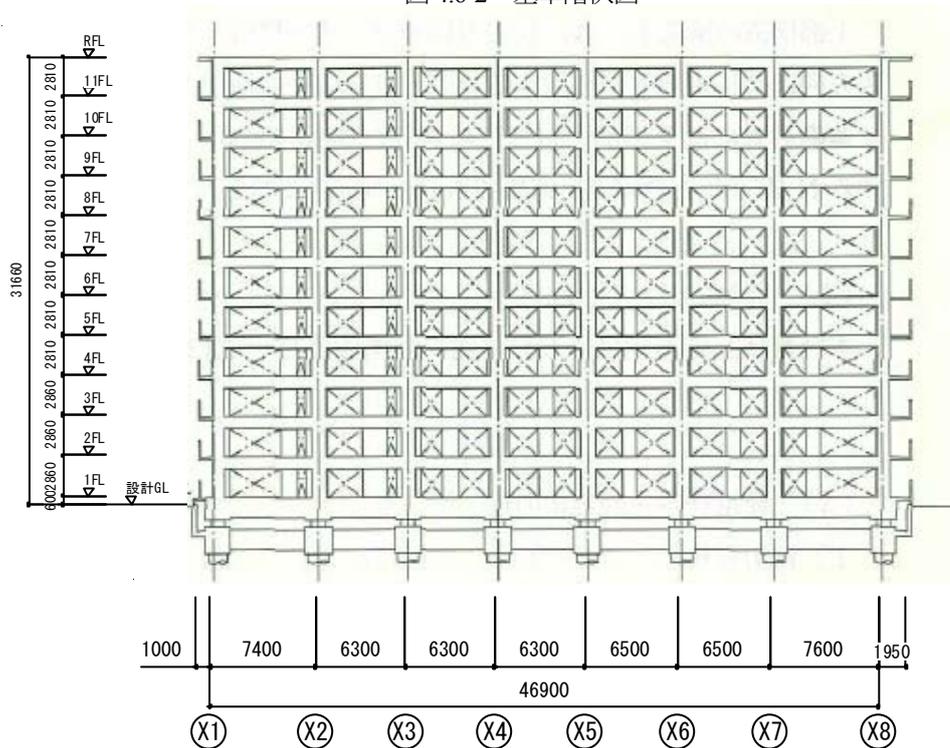


図 4.6-3 Y1 通り軸組図

b) 免震材料の特性

各免震材料の配置を図4.6-4に示す。免震材料の特性を表4.6-1に示す。

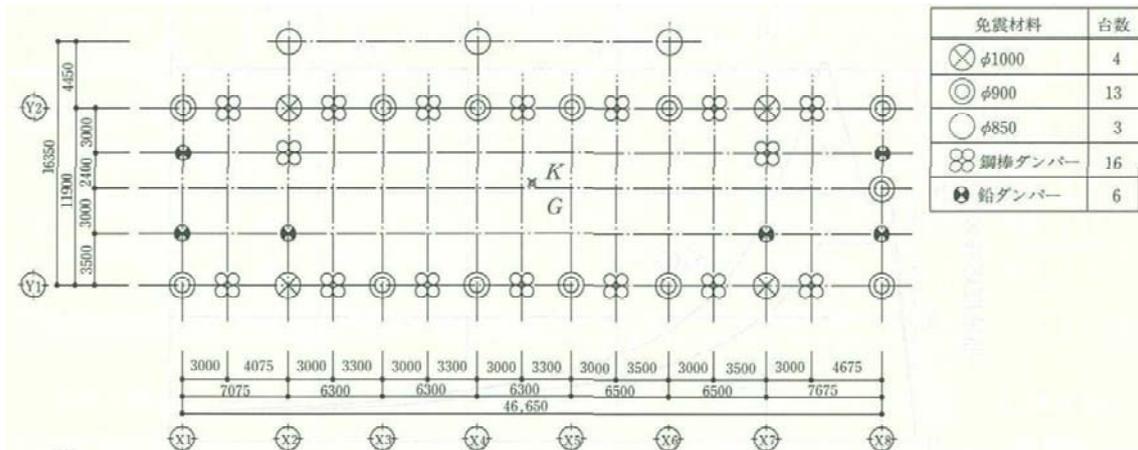


図 4.6-4 免震材料配置図

表 4.6-1 各免震材料の特性

		積層ゴム			鋼棒 ダンパー	鉛ダンパー
		φ 800	φ 900	φ 1000		
水平剛性 (kN/m)	初期剛性	1340	1210	980	71110	12000
	2次剛性	-	-	-	0	0
降伏荷重 (kN)		-	-	-	290	90
降伏変位 (m)		-	-	-	0.0408	0.0075
数量		4	13	3	16	6

c) 免震層の復元力特性

免震層の降伏変位を鋼棒ダンパーの降伏変位 $\delta_y=0.0408\text{m}$ とする。

免震層の初期剛性 $K_1=6161/0.0408=151,005(\text{kN/m})$

免震層の2次剛性 $K_2=24,051(\text{kN/m})$

上部構造の総質量 $M=10,522(\text{t})$

上部構造を剛体と仮定した場合の免震層の初期剛性に基づく固有周期 $T_1=2\pi\sqrt{\frac{M}{K_1}}=1.66(\text{s})$

上部構造を剛体と仮定した場合の免震層の2次剛性に基づく固有周期 $T_2=2\pi\sqrt{\frac{M}{K_2}}=4.16(\text{s})$

地震力を等価剛性で除して免震層基準変位 δ を算出

免震層の基準変位 $\delta=0.348(\text{m})$

免震層基準変位時における定常ループの等価減衰定数 h_{eq} を算出 $h_{eq}=0.215$

d) 基礎固定時の上部構造1次固有周期 T_0

軒高 (31.66m) を建築物の高さ h と考え、略算法により算出。

$$T_0=0.02h=0.02 \times 31.66=0.633(\text{s})$$

e) 免震層の地震時せん断力（免震層の基準変位 δ 時）の算出

免震層の基準変位 $\delta = 0.348(\text{m})$ 時の免震層の地震時せん断力 Q_0

$$Q_0 = 5,180 \text{ (ダンパー)} + 8,370 \text{ (積層ゴム)} = 13,550(\text{kN})$$

免震層の地震時せん断力係数 C_0

$$C_0 = \frac{Q_0}{Mg} = \frac{13,550}{10,522 \times 9.8} = 0.131$$

f) 上部構造の地震時せん断力の増幅率の算出

4-5-2項および4-5-3項で示した設定法2および設定法3により求めた上部構造の地震時せん断力係数の増幅率 C_{ri}/C_0 および各層の地震時せん断力係数 C_{ri} を表 4.6-2 に示す。最上階および中間階以外の層における地震時せん断力係数の増幅率は、免震層の増幅率を1として直線分布にて算出した。表中には告示 2009 号による地震時せん断力係数 C_{ri} を示す。告示 2009 号における免震材料のばらつき、環境及び経年変化に関する係数は $\gamma = 1.0$ とした。

表 4.6-2 各層の地震時せん断力係数の増幅率および地震時せん断力係数

階	Wi(t)	現行告示 $\gamma=1.0$ Cri	設定法2					設定法3			
			平均		平均+ σ			平均		平均+ σ	
			Cri/Co	Cri	Cri/Co	Cri	Cri	Cri/Co	Cri	Cri/Co	Cri
11	782	0.213	2.398	0.314	2.817	0.369	3.019	0.395	3.639	0.477	
10	918	0.184	2.214	0.290	2.590	0.339	2.762	0.362	3.313	0.434	
9	845	0.172	2.029	0.266	2.363	0.310	2.505	0.328	2.988	0.391	
8	857	0.164	1.845	0.242	2.137	0.280	2.248	0.295	2.662	0.349	
7	865	0.158	1.661	0.218	1.910	0.250	1.992	0.261	2.337	0.306	
6	865	0.153	1.476	0.193	1.683	0.220	1.735	0.227	2.012	0.264	
5	865	0.148	1.349	0.177	1.518	0.199	1.551	0.203	1.772	0.232	
4	865	0.145	1.279	0.168	1.414	0.185	1.441	0.189	1.617	0.212	
3	874	0.141	1.210	0.158	1.311	0.172	1.331	0.174	1.463	0.192	
2	876	0.138	1.140	0.149	1.207	0.158	1.221	0.160	1.309	0.171	
1	916	0.135	1.070	0.140	1.104	0.145	1.110	0.145	1.154	0.151	
免震層	994	0.131	1.000	0.131	1.000	0.131	1.000	0.131	1.000	0.131	

g) 検討例の条件に近い7層モデルの時刻歴応答解析結果との比較

3-2節で示した7層モデルの時刻歴応答解析結果の中からc)～e)より検討例の条件に近いモデルと比較を行う。表 4.6-2 に解析パラメータの比較を示す。免震層の降伏せん断力係数 α_y はどちらも 0.05 である。時刻歴応答解析の入力地震動は、図 3.2-6 で示す第2種地盤（短）の特性を基に作成した模擬地震動である。

表 4.6-2 検討例1と7層モデルの時刻歴応答解析の解析パラメータ比較

	To(s)	T ₁ (s)	T ₂ (s)	α_y	d _y (m)
検討例1	0.633	1.66	4.16	0.05	0.0408
7層モデル	0.735	1.55	4.0	0.05	0.03

表 4.6-3 検討例 1 と 7 層モデルの地震層せん断力係数比較

	Cri				Cri/Co			
	検討例 1 告示 2009 号	検討例 1 設定法 2 平均+ σ	検討例 1 設定法 3 平均+ σ	7 層 モデル	検討例 1 告示 2009 号	検討例 1 設定法 2 平均+ σ	検討例 1 設定法 3 平均+ σ	7 層 モデル
最上 階	0.213	0.369	0.477	0.354	1.63	2.82	3.64	3.13
中間 階	0.151	0.210	0.248	0.184	1.15	1.60	1.89	1.63
免震 層	0.131	0.131	0.131	0.113	1.00	1.00	1.00	1.00

表 4.6-3 に地震層せん断力係数の比較を示す。7 層モデルの中間階および最上階の地震層せん断力係数 (Cri) は、設定法 2 の平均+ σ に近い値であった。また時刻歴結果の増幅率 (Cri/Co) も設定法 2 の平均+ σ の結果に近い値であった。7 層モデルの結果に対して、告示 2009 号では過小、設計法 3 の平均+ σ ではやや過大の評価となった。

