

論文 限界耐力計算におけるRC造建物の安全限界応答変位に関する研究

和泉 信之*1・石岡 拓*2・藤堂 正喜*3・千葉 脩*4

要旨: RC造建物の限界耐力計算では, 等価線形化法で算定された応答値が限界値を上回らないことを求めている。本論文では, 1質点系弾塑性モデルの時刻歴地震応答解析を行い, 限界耐力計算における応答変形の算定精度を検討した。まず, 等価線形化法の適用条件として, 応答変形の大きな片寄りが生じない範囲を示した。次に, 等価減衰の各評価式の精度を検討して, 等価減衰を用いた応答変形の推定精度を評価した。さらに, 復元力特性の算定精度等による応答変形のばらつきを考慮し, RC造建物の限界耐力計算に用いる安全限界時の応答変位を検討した。

キーワード: RC造建物, 限界耐力計算, 地震応答解析, 限界変形, 復元力特性

1. はじめに

限界耐力計算は, 地震時における鉄筋コンクリート造(以下, RC造と呼ぶ)建物の応答値が部材特性に基づく限界値を上回らないことを検証する性能評価型設計法¹⁾である(図-1)。地震時の応答値は, 建物を定常振動する等価な周期および減衰特性を有する1自由度に縮約した振動系と考えて, 等価線形化法に基づく応答スペクトル解析法により求める。したがって, 限界耐力計算では, 大地震時の安全性の検証には安全限界時の応答値を精度良く評価することが極めて重要な課題となる。

本研究では, RC造への等価線形化法の適用に関する課題として, 応答変形の片寄りおよび等価減衰の評価方法を取り上げる。等価線形化法では, 弾塑性応答値を, 剛性の低下と減衰の増大を考慮した等価線形系の応答値で求める。等価線形系は, 応答時にその原点を中心に振動するので, 応答変形の片寄りが大きく振動の中心が原点から移動する場合には, 等価線形化法の適用が難しい。また, 等価線形系の応答値の推定には, 等価減衰の評価が重要である。

次に, RC造特有の課題として, 復元力特性の評価に起因する応答値のばらつきを取り上げる。RC造建物の応答値は, コンクリートの実強度分布や復元力特性の評価精度等により, 設計モデルの応答値に比べてばらつく。

本論文では, RC造1質点系弾塑性モデルの時刻歴地震応答解析を行い, 応答変形を評価する。各ケースの応答値の分析から, まず, 応答変形の片寄りについて検討する。次に, 等価減衰の算定式による応答変形の推定精度を評価する。さらに, 復元力特性の算定精度等による応答変形のばらつきを評価して, 設計に用いる安全限界時の応答変位を検討する。

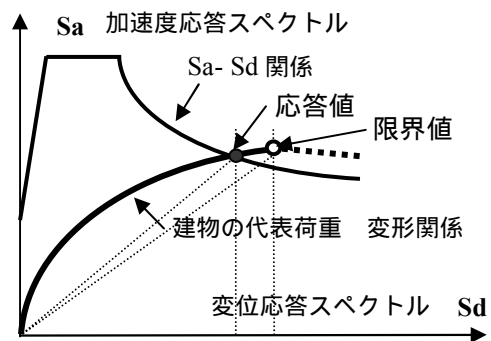


図-1 限界耐力計算の応答値と限界値

*1 戸田建設(株)構造設計部主管 博(工)(正会員)
 *2 戸田建設(株)技術研究所 工修
 *3 戸田建設(株)技術研究所マネージャー 工博
 *4 戸田建設(株)技術研究所所長 工修 (正会員)

2. 解析概要

2.1 解析方法

本解析では、RC 造建物を対象とした 1 質点系弾塑性モデルの時刻歴地震応答解析を行う。解析モデルの復元力特性は、トリリニア型の TAKEDA モデル²⁾とする。内部粘性減衰は瞬間剛性比例型 ($h1=3\%$) とする。

2.2 解析ケース

固有周期，降伏耐力，第 2 剛性をパラメータとする解析ケースを表 1 に示す。ケース 1 は等価線形化法の検討を，ケース 2 は復元力特性のばらつきの検討を目的とする。

復元力特性の設定では，ケース A がコンクリート強度の上昇等による第 1 点の変動，ケース B が降伏変位の評価精度等による第 2 点の変動，ケース C がそれらの組合せを考慮するものであ

る。なお，コンクリートの実強度の設計強度に対する比率は，材料強度のばらつき(平均値 1.25，変動係数 0.10)³⁾を参考に 1.45 と設定して，第 1 剛性の増大比を 1.2 とする。また，降伏変位は，降伏点剛性低下率の算定式の精度 ($\pm 30\%$ の範囲に全資料の 90%が入る程度)⁴⁾を参考に設定する(図 3)。

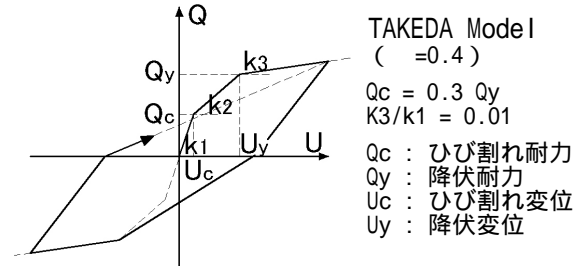


図 2 1 質点系解析モデルの復元力特性

表 1 解析モデルの諸元

ケース	T	C	k2/k1	ケース	T	C	k2/k1						
d1k1	0.50	0.2	0.1	ケース A	d1k2a	0.46	0.2						
d1k2*			0.2		d2k2a		0.4						
d1k3			0.3		d3k2a		0.3						
d1k4			0.4		d4k2a		0.2						
d2k1		0.4	0.1		d5k2a		0.91	0.4	0.152				
d2k2*			0.2		d6k2a		0.3						
d2k3			0.3		d7k2a		0.2						
d2k4			0.4		d8k2a		0.23	0.4					
d3k1		0.3	0.1		d9k2a		0.3	ケース B		d1k2b1	0.2	0.50	0.4
d3k2*			0.2		d2k2b1		0.50			0.4			
d3k3			0.3		d3k2b1		0.3						
d3k4			0.4		d4k2b1		0.2						
d4k1		0.2	0.1		d5k2b1		1.00			0.4	0.297		
d4k2*			0.2		d6k2b1		0.3						
d4k3			0.3		d7k2b1		0.2						
d4k4			0.4		d8k2b1		0.25			0.4			
d5k1	1.00	0.1	d9k2b1	0.3	ケース C	d1k2b2	0.2			0.50			0.4
d5k2*		0.2	d2k2b2	0.50		0.4							
d5k3		0.3	d3k2b2	0.3									
d5k4		0.4	d4k2b2	0.2									
d6k1	0.3	0.1	d5k2b2	1.00		0.4	0.151						
d6k2*		0.2	d6k2b2	0.3									
d6k3		0.3	d7k2b2	0.2									
d6k4		0.4	d8k2b2	0.25		0.4							
d7k1	0.2	0.1	d9k2b2	0.3		ケース 2		d1k2c1	0.2			0.226	0.4
d7k2*		0.2	d2k2c1	0.46				0.4					
d7k3		0.3	d3k2c1	0.3									
d7k4		0.4	d4k2c1	0.2									
d8k1	0.25	0.1	d5k2c1	0.91				0.4	0.226				
d8k2*		0.2	d6k2c1	0.3									
d8k3		0.3	d7k2c1	0.2									
d8k4		0.4	d8k2c1	0.23				0.4					
d9k1	0.3	0.1	d9k2c1	0.3	ケース C			d1k2c2		0.2	0.115		0.4
d9k2*		0.2	d2k2c2	0.46				0.4					
d9k3		0.3	d3k2c2	0.3									
d9k4		0.4	d4k2c2	0.2									
d1k1	ケース 2 パラメータ k2/k1 の値 T, C の組合せ	0.2	0.1	d5k2c2			0.91	0.4		0.115			
d2k1				0.2			d6k2c2	0.3					
d3k1				0.3			d7k2c2	0.2					
d4k1				0.4			d8k2c2	0.23					0.4
d5k1				0.4		0.1	d9k2c2	0.3				0.115	
d6k1						0.2	d1k2c2	0.2					
d7k1						0.3	d2k2c2	0.46					0.4
d8k1						0.4	d3k2c2	0.3					
d9k1				0.3		0.1	d4k2c2	0.2	0.115				
d1k2						0.2	d5k2c2	0.91					0.4
d2k2						0.3	d6k2c2	0.3					
d3k2						0.4	d7k2c2	0.2					
d4k2				0.25	0.1	d8k2c2	0.23	0.4			0.115		
d5k2					0.2	d9k2c2	0.3						
d6k2					0.3	d1k2c2	0.2						
d7k2					0.4	d2k2c2	0.46	0.4					
d8k2	0.2	0.1	d3k2c2	0.3	0.115								
d9k2		0.2	d4k2c2	0.2									
d1k3		0.3	d5k2c2	0.91		0.4							
d2k3		0.4	d6k2c2	0.3									
d3k3	0.3	0.1	d7k2c2	0.2		0.115							
d4k3		0.2	d8k2c2	0.23			0.4						
d5k3		0.3	d9k2c2	0.3									
d6k3		0.4	d1k2c2	0.2									
d7k3	0.2	0.1	d2k2c2	0.46			0.4	0.115					
d8k3		0.2	d3k2c2	0.3									
d9k3		0.3	d4k2c2	0.2									
d1k4		0.4	d5k2c2	0.91			0.4						
d2k4	0.4	0.1	d6k2c2	0.3			0.115						
d3k4		0.2	d7k2c2	0.2									
d4k4		0.3	d8k2c2	0.23					0.4				
d5k4		0.4	d9k2c2	0.3									

ケース 2 パラメータ k2/k1 の値 T, C の組合せ
 T: 固有周期(秒)
 C: 降伏耐力係数
 k2/k1: 第 2 剛性比
 *: ケース 2 と比較する基本ケース

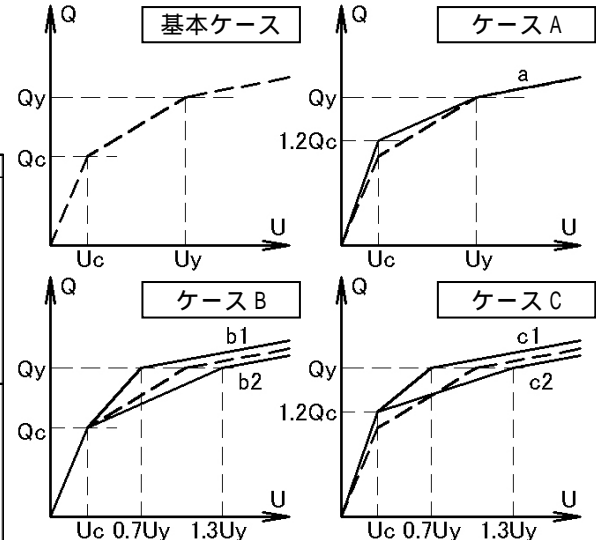


図 3 特性点のばらつきの設定

表 2 検討用地震動(単位:cm/s²)

観測波・模擬波		最大加速度
EL centro, 1940, NS		512
Hachinohe, 1968, NS		310
Tohoku Univ., 1978, NS		357
JMA Kobe, 1995, NS		818
BCJ-L2E(位相: EL centro)		405
BCJ-L2		356
告示波(工学的基盤)		最大加速度
位相特性	BCJ-L2	343
	EL centro NS	372
	Hachinohe NS	375
	JMA Kobe NS	393
	Taft, 1952, EW	413
告示波(第2種地盤)		最大加速度
位相特性	BCJ-L2	495
	EL centro NS	506
	Hachinohe NS	587
	JMA Kobe NS	659
	Taft, 1952, EW	670

2.3 検討用地震動

検討用地震動を表 2 に示す。告示波は、限界耐力計算における工学的基盤と第 2 種地盤相当の加速度応答スペクトルに基づいた模擬地震動波形（図 - 4）である。

ケース 1 の検討には、表 2 に示す全波形を用いるが、ケース 2 の検討には、限界耐力計算における応答変位のばらつきを評価するため、告示波のみを用いる。

3. 解析結果と考察

3.1 応答変形の片寄り

建物の応答変形は、部材の降伏に伴い、塑性変形が片寄り、定常的な応答との差が大きくなることがある。この塑性変形の片寄りを表す指標として、片寄り比率（ α ）を用いる。 α は、最大塑性率（ μ_{max} ）を正負塑性率（ μ_{mean} ）で除した値とする（図 - 5）。

ケース 1 の片寄り比率と最大塑性率の関係を図 - 6 に示す。なお、塑性率が 1 未満の解析結果は表示しない。 α には、降伏耐力係数による違いは顕著には見られない。鉄骨造建物に多く用いられる標準型トリリニア型の復元力特性による同様の解析結果⁵⁾と比較すれば、 α は比較的小さい傾向が見られる。 μ_{max} の範囲別に、 α の平均値（ α_{mean} ）を図中に記す。塑性変形の片寄りは、地震動の特性により異なるが、最大変位が大きくなると除荷時の変形が大きくなり、片寄りが生じやすいと考えられる。しかし、

RC 造は最大変位後の原点指向性が強いので、鉄骨造に比べれば明瞭ではないが、 α_{mean} は μ_{max} が大きくなるに従い、やや大きくなる傾向が見られる。 μ_{max} が 5 以下の場合では、 α_{mean} は 1.1 程度であり、本解析の範囲では、RC 造の塑性変形の片寄りは比較的小さい傾向がある。

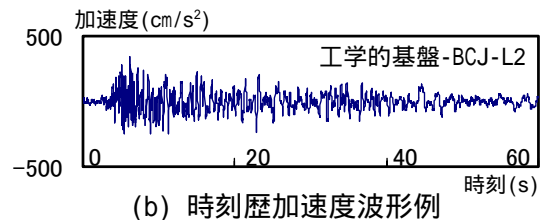
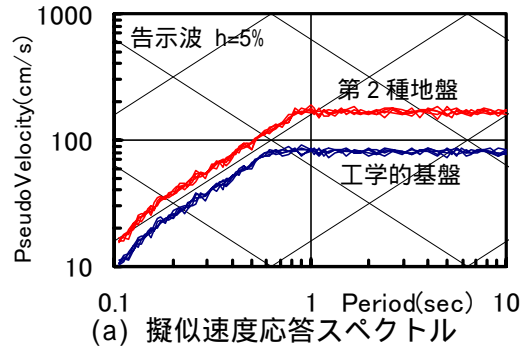
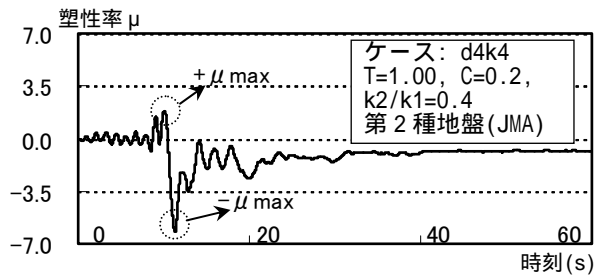


図 - 4 告示波の応答スペクトルと波形例



$$\text{片寄り比率: } \alpha = \mu_{max} / \mu_{mean}$$

$$\text{最大塑性率: } \mu_{max} = \max(|+\mu_{max}|, |-\mu_{max}|)$$

$$\text{正負平均塑性率: } \mu_{mean} = (|+\mu_{max}| + |-\mu_{max}|) / 2$$

図 - 5 応答変形の時刻歴例と片寄り比率

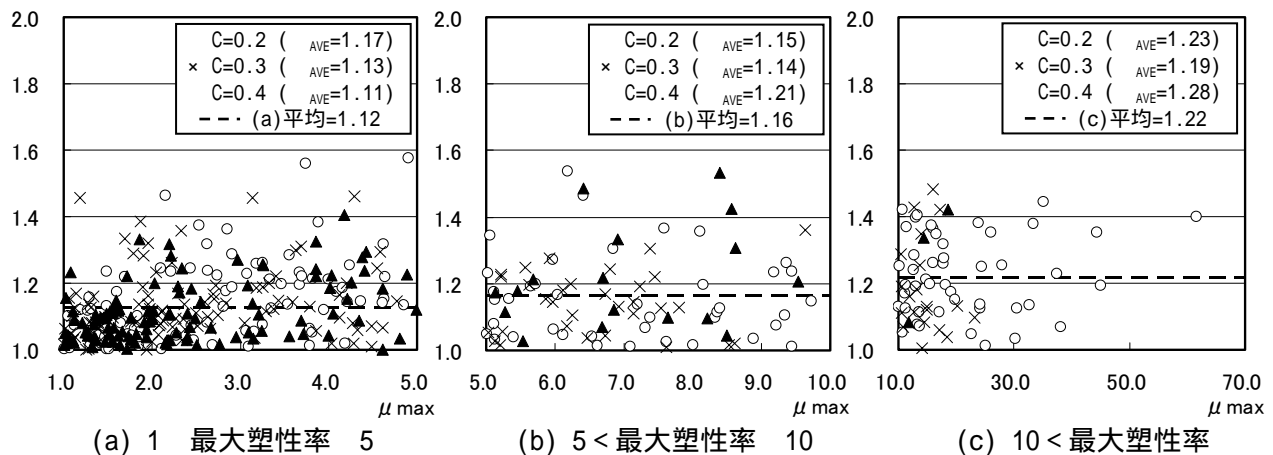


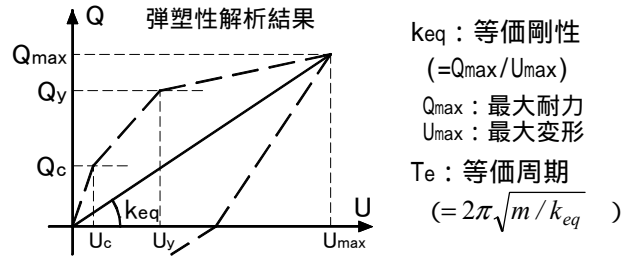
図 - 6 応答変形の片寄り比率と塑性率

3.2 等価減衰の評価

等価粘性減衰は、4 種類の評価方法により算定する。 h_r は、等価周期時に等価線形解析による最大応答変形が弾塑性解析による最大変形と等しくなるように算定した変形等価減衰である。 h_{eq1} は、いわゆる応答エネルギー等価減衰である。 h_{eq2} は、定常応答した 1 サイクルの履歴エネルギーに対応した等価粘性減衰に h_1 を加算した値である。 h_{eq3} は、限界耐力計算の関連告示における建物の減衰性を表す値である。なお、等価周期は最大応答変形時の等価剛性から算定する(図-7)。

変形等価減衰 h_r と 3 種類の減衰との比較を図-8 に示す。 h_r と比べて、 h_{eq1} 、 h_{eq2} は大きく評価する傾向が見られる。一方、 h_{eq3} の平均値は h_{eq1} 、 h_{eq2} に比べてやや対応が良いが、3 種類の減衰ともばらつきが大きい。

次に、 h_{eq1} 、 h_{eq2} 、 h_{eq3} の 3 種類の減衰を用い



$$h_{eq1} = \frac{-\int_0^t \ddot{y}_0 \dot{y} dt}{2\omega_e \int_0^t \dot{y}^2 dt} \quad (1)$$

\ddot{y}_0 : 地動加速度, y : 応答変位, $\omega_e = 2\pi/T_e$

$$h_{eq2} = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1 + \frac{U_c}{U_y}}{1 + \frac{Q_c}{Q_y}} \cdot \left(\frac{U_{max}}{U_y} \right)^{0.4} \cdot \frac{1 - \frac{k_3 U_y}{Q_y} + \frac{k_3 U_{max}}{Q_y}}{\frac{U_{max}}{U_y}} \right) + h_1 \quad (2)$$

$$h_{eq3} = 0.25 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{Df}} \right) + 0.05, \quad Df = \frac{\Delta s Q_d}{\Delta d Q_s} \quad (3)$$

$\Delta d = U_y$, $\Delta s = U_{max}$, $Q_d = Q_y$, $Q_s = Q_{max}$

図-7 等価周期と等価減衰の評価式

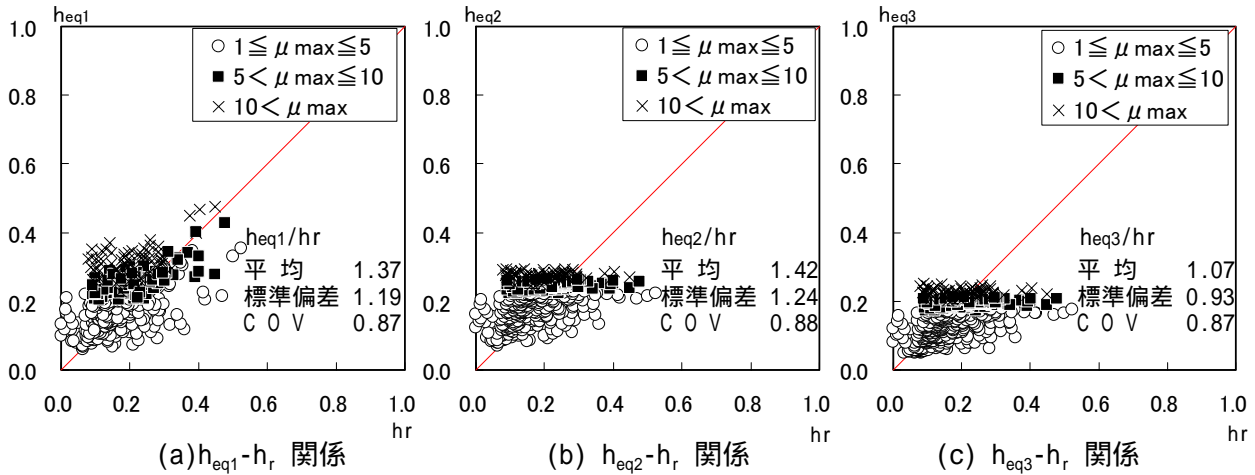


図-8 各等価減衰の関係

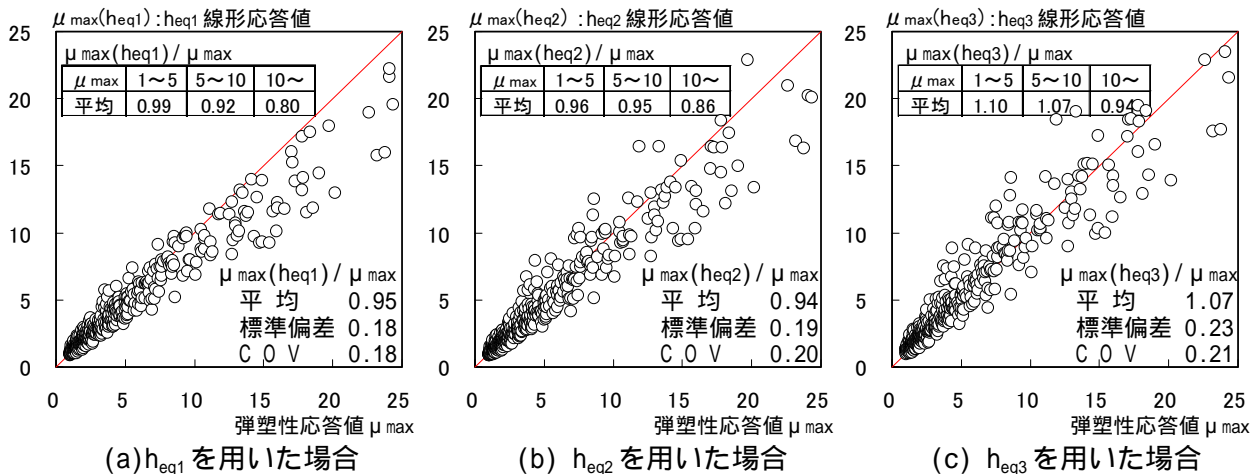


図-9 等価減衰を用いた時刻歴線形解析と時刻歴弾塑性解析の比較

た線形解析結果と弾塑性解析結果との比較を図 - 9 に示す。弾塑性解析結果と比べて、 h_{eq1} 、あるいは h_{eq2} による塑性率は、やや小さい傾向があり、塑性率が大きい程、その傾向がやや強く見られる。一方、 h_{eq3} による塑性率は、弾塑性解析結果に対して、平均値が 1.07、変動係数が 0.21 で、やや大きい傾向がある。

塑性率が 5 程度以下の範囲では、3 種類の減衰を用いた等価線形解析結果とも弾塑性解析結果と比較的良好な対応を示している。

3.3 特性点の変動に対する応答値の評価

特性点をかえた 3 ケースの復元力特性を用いた弾塑性解析結果の一例を図 - 10 に示す。第 1 点の耐力を大きくしたケース A では、塑性率

は基本モデルよりやや小さくなる傾向が見られる。第 2 点の変形を変動させたケース B では、塑性率は基本モデルの値の前後にばらついていく。ケース A と B を組合せたケース C では、ケース B とほぼ同様の傾向である。

これらの応答値の変動を評価するため、基本モデルの応答変位に対するケース C の応答変位の比率（以下、変位変動比と呼ぶ）を降伏耐力比に応じて図 - 11 に示す。図中の × 印は変位変動比の平均値である。変位変動比は、工学的基盤波では 0.50~1.44、第 2 種地盤波では、0.64~1.53 である。また、降伏変位を小さく設定したケース C2（図 3）の変位変動比は、降伏変位を大きく設定したケース C1 に比べて大きい

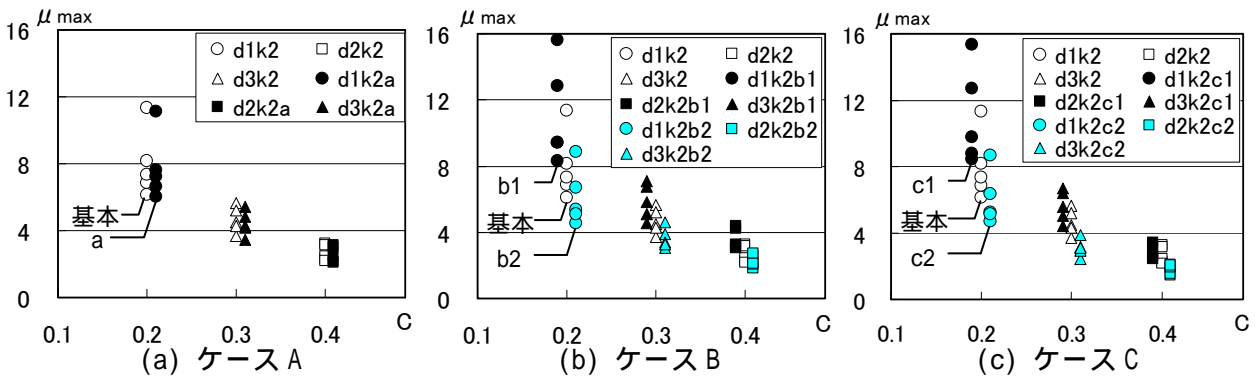


図 - 10 特性点の違いによる応答値の分布例（第 2 種地盤波）

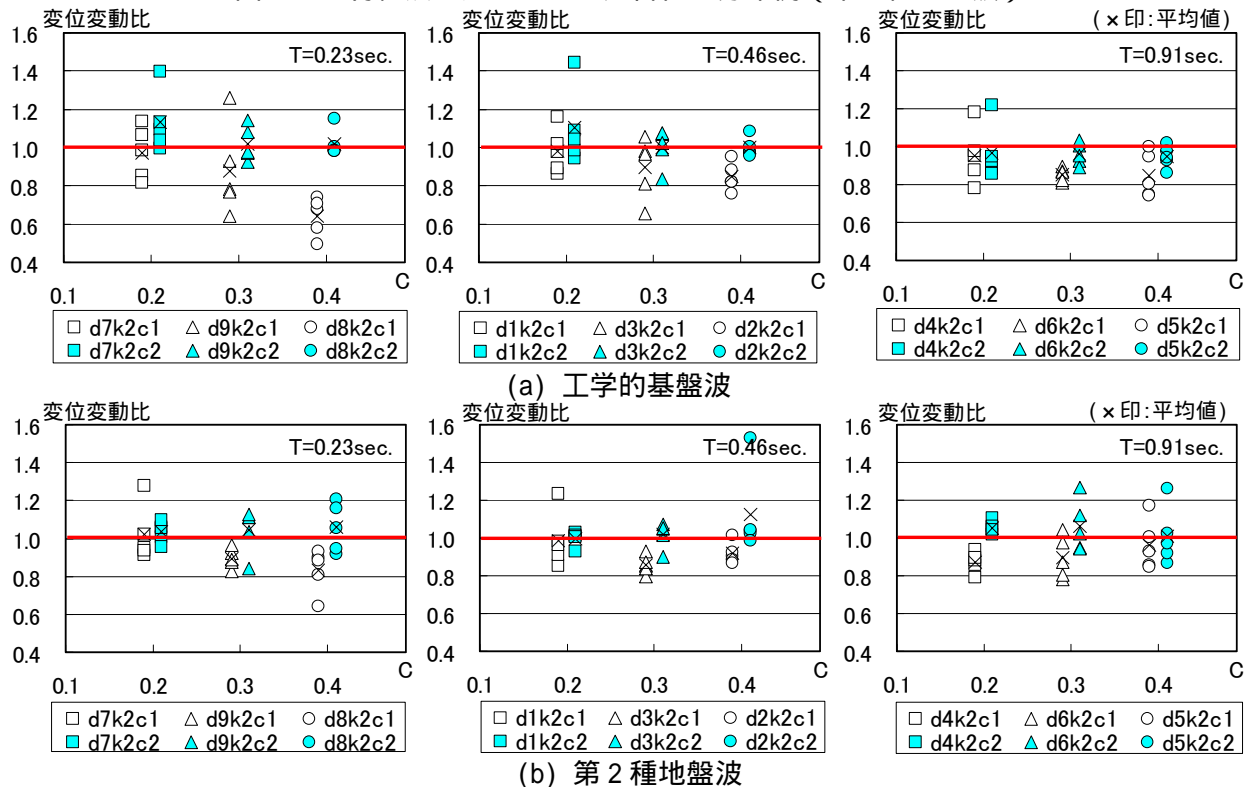


図 - 11 特性点の違いによる変位変動比（ケース C）

傾向が見られる。なお、本解析結果の範囲内では、降伏耐力係数、あるいは地盤による変位変動比の違いは、顕著に見られない。

各ケースの変位変動比の平均値(図 - 11 中の×印)は、工学的基盤波では 0.64~1.13, 第 2 種地盤波では, 0.83~1.12 であり, 応答変形の平均的な増大率は, 1.1 程度である。

4. 設計用安全限界変位の設定

限界耐力計算の安全限界耐力の確認では、安全限界時の応答変位以上の設定変位(以下、設計用安全限界変位と呼ぶ)において、必要限界耐力を上回り、部材の変形が限界変形以下であることを検証する(図 - 12)。そのため、設計用安全限界変位の設定には、応答変位のばらつきを考慮する必要がある。本解析では、限られた不確定要因や地震動を扱っているため、応答値のばらつきを確率統計的に評価することは今後の課題としたい。ここでは、実用的な方法として安全限界時の応答変位の割増しによる設計用安全限界変位の設定方法を考える。そこで、前章までの解析結果から、この割増し率を求める。

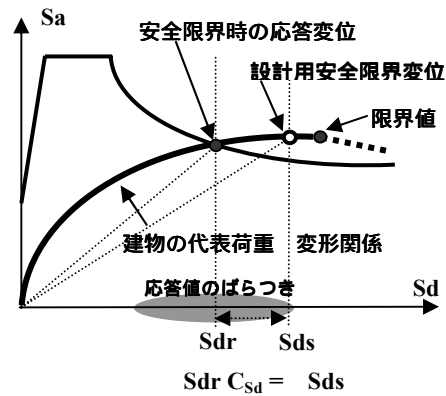
3.2 項で述べた弾塑性応答変形に対する等価線形応答変形の比率の平均値は 1.07, 標準偏差は 0.23 である。(平均値-標準偏差)のばらつきを考慮して、応答変形の増大率として、簡略的にこの比率の逆数を用いた場合、増大率は 1.2 となる。また、3.3 項で述べた応答変形の平均的な増大率は、1.1 である。

これらの増大率を考慮すると、安全限界時の応答変位の割増し率は、少なくとも 1.3 程度以上とすることが考えられる。

5. 結論

これまでの RC 造建物を対象とした 1 質点系弾塑性解析から得られた知見を以下に示す。

- (1) 塑性率が 5 程度以下となる応答範囲では、応答変形の片寄りは比較的小さい。
- (2) 各評価式による等価減衰は、変形等価減衰に対してばらつきが大きい。



安全限界時の応答変位の割増し率 C_{sd}

図 - 12 設計用安全限界変位の設定

- (3) 限界耐力計算の等価減衰を用いた線形応答変形は、弾塑性応答変形に対して比較的对応が良く、その比率の平均値は 1.1 程度、変動係数は 0.2 程度である。
- (4) コンクリートの実強度や降伏変位の評価精度等を考慮した場合、応答変形の平均的な増大率は、1.1 程度である。
- (5) RC 造建物の設計用安全限界変位は、(3) および(4)に示す応答値のばらつきを考慮して設定することが望ましい。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課: 限界耐力計算, 建築物の構造関係技術基準解説書, pp.305-325, 2001
- 2) Takeda, T., M.A. Sozen and N.M. Nielsen : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, Dec.1970
- 3) 日本建築学会: 建築物の限界状態設計指針, pp.75, 2002
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.57-58, 1999
- 5) 石岡拓, 和泉信之, 竹中啓之, 藤堂正喜, 千葉脩: 等価線形化法による応答変形の推定に関する検討(その 1 等価粘性減衰と塑性変形の片寄り), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.365-366, 2003.9