

耐震設計に用いる変位増幅係数に関する検討

渡邊学歩¹・川島一彦²

¹正会員 修士（工） 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-1-2 緑が丘1号館 M1-10
²F会員 工博 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. はじめに

じん性にに基づく構造物の耐震設計法では、弾性地震力を荷重低減係数で除して要求耐力を推定する¹⁾。²⁾ これにより、構造物の保有耐力がこれ以上になるように設計を行えば耐震性が確保されたことになる。しかし、構造物の損傷レベルおよび倒壊の危険性の有無は、地震時に生じる変位に大きく依存することから、地震時の応答変位が構造物にどの程度発生するかを検討する必要がある^{3), 4), 5)}。

著者らは現在までに荷重低減係数の周期特性や地盤種別依存性について検討⁶⁾を通じて、要求耐力の特性について詳細に検討を行ってきた。本論文では構造物に生じる線形および非線形の応答変位の比を変位増幅係数と定義し、非線形最大応答変位の推定に関して検討を行ったので、これについて報告を行う。

2. 変位増幅係数の定義

構造物を1自由度の完全弾塑性形としてモデル化し、線形応答および非線形応答を示すと図-1のようになる。 δ_{EL} 、 δ_{NL} および δ_Y は線形、非線形最大応答変位、および降伏変位である。また、 F_R^{EL} は弾性地震力、 F_Y が降伏耐力であり、 F_R^{NL} は要求耐力を表しており、同時に非線形地震力を表している。

変位増幅係数 D_μ は非線形応答変位 δ_{NL} を弾性応答変位 δ_{EL} で除して求められる。構造に生じるじん性率（以下、目標じん性率と呼ぶ）を μ_T とすると、固有周期 T の系における変位増幅係数 D_μ は

$$D_\mu = \frac{\delta_{NL}(\mu, h_{NL}, T)}{\delta_{EL}(T, h_{EL})} \quad (1)$$

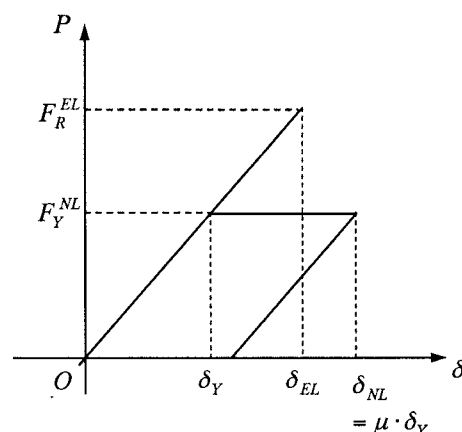


図-1 1自由度系における応答履歴

ここで、 h_{EL} および h_{NL} は弾性系および弾塑性系で考慮する粘性減衰定数である。本研究では、線形応答と非線形応答のエネルギー吸収が等しくなることを目標として、非線形応答では計算の過程で自動的に考慮される履歴減衰によるエネルギー吸収を差し引いた残りのエネルギー吸収に相当する粘性減衰として、 $h_{EL} = 5\%$ 、 $h_{NL} = 2\%$ と仮定した。履歴特性としては最も基本的な完全弾塑性型のBilinearモデルを仮定している。

なお、一般に経験則として用いられるエネルギー一定則および変位一定則では変位増幅係数 D_μ は次式の通りとなる。

$$D_\mu = \mu / \sqrt{2\mu - 1} \quad (\text{エネルギー一定則}) \quad (2)$$

$$D_\mu = 1 \quad (\text{変位一定則}) \quad (3)$$

3. 代表的な地震動記録に対する変位増幅係数

1995年兵庫県南部地震の際に観測された神戸海洋気象台記録（NS成分）⁷⁾に対して、固有周期 T が0.5秒で、目標じん性率 μ_T を4とした場合の線形

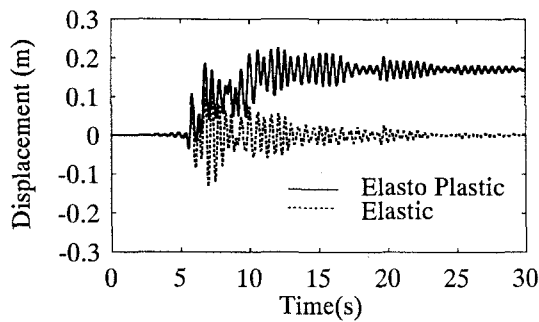


図-2 目標じん性率 μ_T を 4 とした場合の固有周期 0.5 秒の系の応答変位

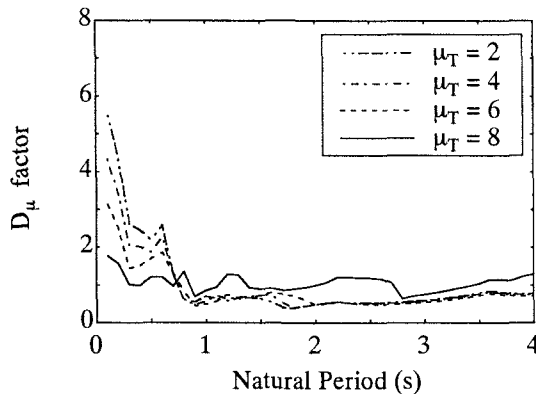
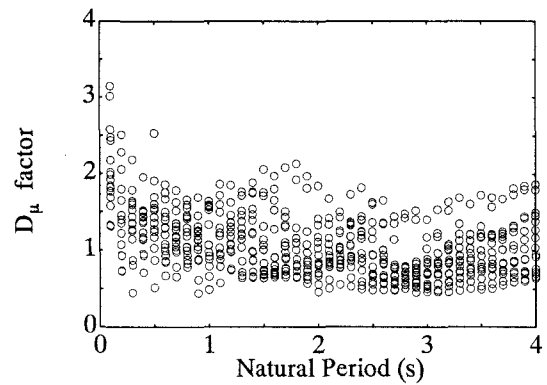


図-3 神戸海洋気象台 NS 成分記録に対する変位増幅係数 D_μ

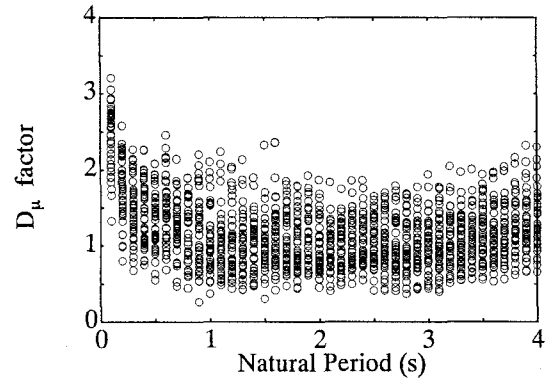
および非線形の応答変位を示すと図-2のようになる。線形および非線形の応答変位は、それぞれ、時刻 7.02秒および12.12秒において振幅が $\delta_{EL} = -132\text{mm}$ および $\delta_{NL} = 225\text{mm}$ で最大となる。したがって、式(2)より変位増幅係数を求めると $D_\mu = 1.70$ となる。非線形応答では、地震終了後には169mmもの残留変位 δ_r が生じており、これは最大応答変位 δ_{NL} の75%に相当する。地震終了後に生じる残留変位は地震後の構造物の機能性や復旧に大きな影響を与えるために、非常に興味深い。しかし、残留応答変位については、別途検討することとして、ここでは変位増幅係数について検討を行う。

異なる固有周期 ($T = 0.1 \sim 4.0$ 秒) および目標じん性率 ($\mu_T = 2, 4, 6, 8$) に対して同様の解析を行った場合の変位増幅係数 D_μ をスペクトル表示したものを図-3に示す、

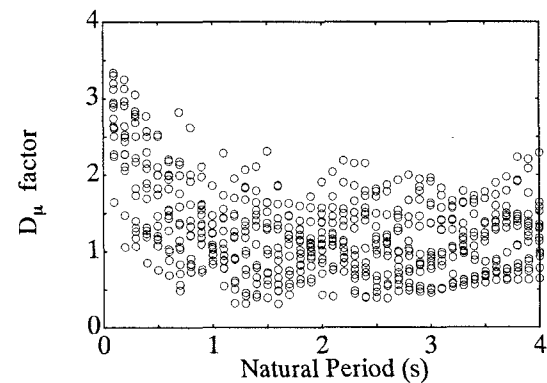
変位増幅係数 D_μ は、固有周期 T が1.0秒付近までは固有周期が長くなるにつれて漸減し、その後は1.0に漸近する。例えば、目標じん性率 $\mu_T = 4$ の場合では、固有周期 T が0.1~1.0秒にかけて、変位増幅係数 D_μ は3.14~0.49まで減少している。その後は、周期が長くなるにつれて、変位増幅係数 D_μ は1に漸近していく。



(a) I 種地盤



(b) II 種地盤



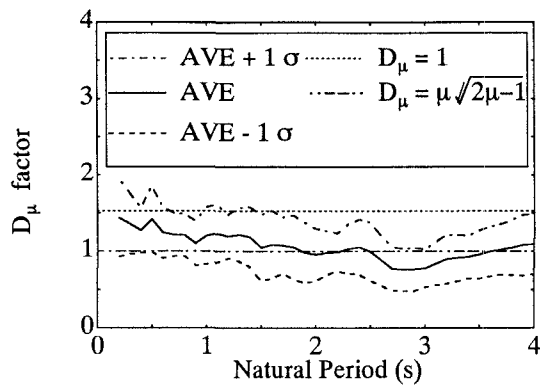
(c) III 種地盤

図-4 地震動による変位増幅係数 D_μ の分布 (目標じん性率 $\mu_T = 4$ の場合)

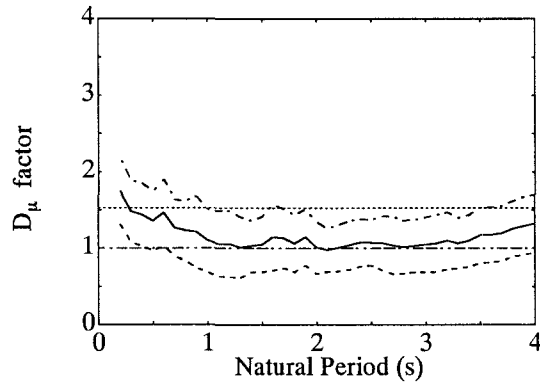
4. 変位増幅係数の周期依存性および地盤種別依存性

同様の解析を、震源深さ60km以浅の63回の浅発地震により得られた70成分の強震記録に対して行った。道路橋示方書の地盤種別区分により分類すると、I種、II種、III種地盤に対して、それぞれ16, 39, 15成分である。

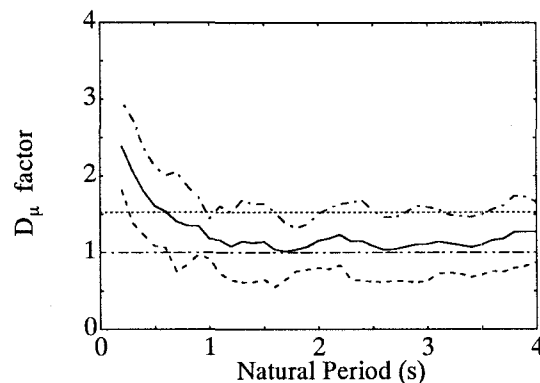
目標じん性率 μ_T を4とした場合の変位増幅係数 D_μ が、地盤種別によりどのような違いがあるかを示した結果が図-4である。変位増幅係数 D_μ は地震動によって大きく変化するために、同一固有周期



(a) I 種地盤

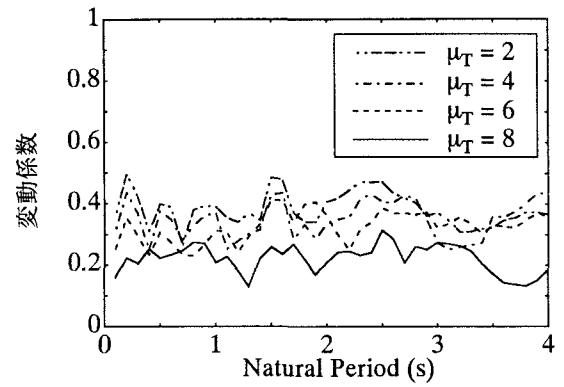


(b) II 種地盤

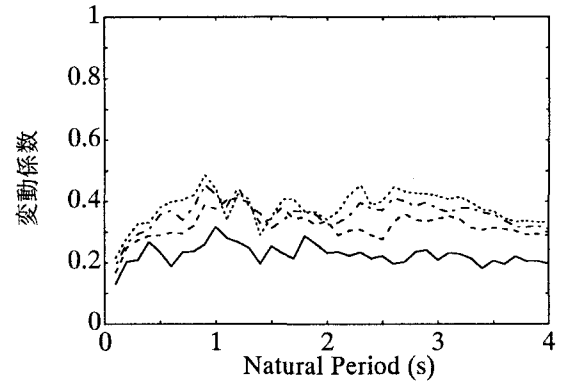


(c) III 種地盤

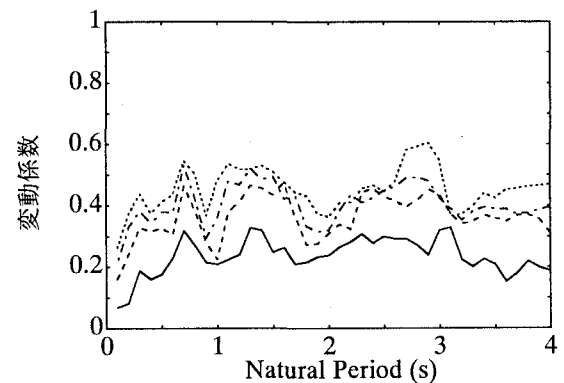
図-5 変位増幅係数 D_μ の平均値の分布 (目標じん性率 $\mu_T = 4$ の場合)



(a) I 種地盤



(b) II 種地盤



(c) III 種地盤

図-6 変位増幅係数 D_μ の変動係数 (目標じん性率 $\mu_T = 4$ の場合)

T において異なる値を示す。例えば、I種地盤では、 $T = 1.0$ sec の場合に D_μ は $0.49 \sim 1.63$ の範囲でまで変化する。同様に、II種地盤およびIII種地盤ではそれぞれ、 $0.37 \sim 2.10$ および $0.82 \sim 1.86$ の範囲で変化する。このような、変位増幅係数 D_μ について、平均値 ± 1 倍の標準偏差の分布を示したのが図-5である。比較のために、エネルギー一定則および変位一定則による変位増幅係数の値も示している。固有周期 T が1秒より長くなると、変位増幅係数 D_μ の平均値は地盤種別によらずほぼ1となり、変位一定則の適用性が良いことを示している。また、変位増幅係数 D_μ の平均値+1倍の標準偏差の値はエネルギー一定則による推定値に近い値を示している。一方、固

有周期 T が1秒よりも短い領域では、地盤条件がI種、II種、III種と変化して、地盤が軟らかくなるにつれて、変位増幅係数 D_μ が大きくなる。

図-6には各周期における変位増幅係数 D_μ の変動係数を示す。I種地盤の場合には、目標じん性率 μ_T が2の場合には固有周期が変化しても、変動係数は概ね0.2程度の値となっている。これに対して、目標じん性率 μ_T が4, 6および8の場合には、変動係数は0.3~0.5程度となり、目標じん性率 μ_T が2の場合の変動係数に比べて大きくなる。II種およびIII種地盤についても同様の傾向が見られる。以上のことから、地震動毎の変位増幅係数 D_μ の変動は非常に大きく、平均値の1.2~1.5倍程度の非線形応答が発生

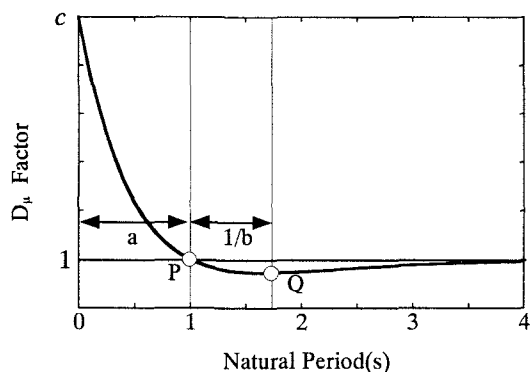


図-7 式(4)による変位増幅係数 D_μ のモデル化

する可能性がある。

5. 変位増幅係数の推定モデルの定式化

図-4に示した変位増幅係数 D_μ を推定するために、次式のように定式化する。

$$D_\mu = \Omega(T) + 1 \quad (4)$$

$$\Omega(T) = -(c-1) \cdot \frac{T-a}{ae^{bT}} \quad (5)$$

ここで、パラメーター a 、 $a+1/b$ は図-7に示すように、変位増幅係数 D_μ が変位一定則による推定値1および最小となる点Pおよび点Qの固有周期を表わしている。また、周期が0および ∞ となるときの極限は次式に示すとおりとなる。

$$\lim_{T \rightarrow 0} D_\mu = c \quad (6)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} D_\mu = 1 \quad (7)$$

式(4)による変位増幅係数 D_μ は図-7のように変化し、固有周期が長くなると変位一定則による推定値 $D_\mu=1$ に収束し、固有周期が短くなると $D_\mu=c$ に収束する。パラメーター a 、 b および c はLevenberg-Merquart法⁸⁾による非線形回帰分析により求めることとする。

表-1 には式(4)のパラメーター a 、 b および c の値を、表-2 には回帰モデルの相関係数を示す。相関係数はじん性率が大きくなるにつれて高くなるが、最大でも 0.78 とそれほど高くはない。なお、後述するように計算値と推定値の一致度は必ずしも悪くない。これは、回帰式が平均値の特徴はうまく表わしているが、平均値まわりのばらつきについては係数 a 、 b 、 c を変化させるだけではうまく説明することはできないためである。

表-1 回帰モデルの回帰係数

(a) 係数 a

μ_T	I 種地盤	II 種地盤	III 種地盤
2	1.93	1.90	1.78
3	1.92	1.74	1.70
4	1.78	1.50	1.73
5	1.74	1.36	1.74
6	1.68	1.48	1.72
7	1.69	1.52	1.69
8	1.61	1.47	1.76
10	1.71	1.50	1.78

(a) 係数 a

μ_T	I 種地盤	II 種地盤	III 種地盤
2	3.09	2.78	2.48
3	3.32	2.28	2.35
4	3.09	2.00	2.41
5	2.86	1.83	2.43
6	2.80	1.91	2.40
7	2.93	1.95	2.34
8	2.70	1.88	2.38
10	2.78	1.88	2.37

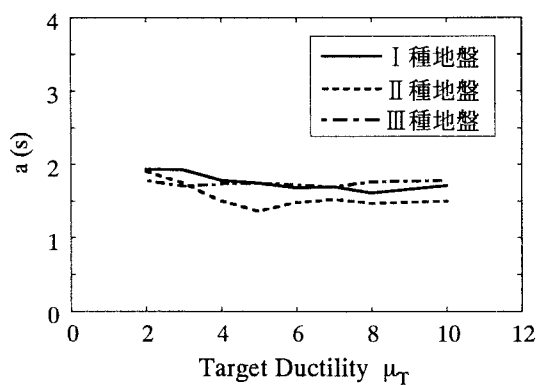
(a) 係数 a

μ_T	I 種地盤	II 種地盤	III 種地盤
2	1.39	1.57	1.74
3	1.58	2.06	2.40
4	1.79	2.56	3.01
5	2.07	3.07	3.64
6	2.23	3.52	4.24
7	2.38	3.96	4.83
8	2.65	4.41	5.53
10	2.75	5.30	6.75

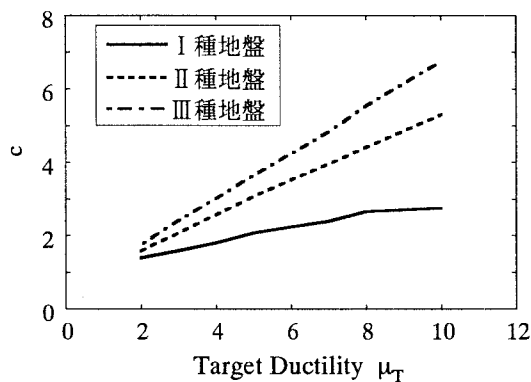
表-2 回帰モデルの相関係数

μ_T	I 種地盤	II 種地盤	III 種地盤
2	0.224	0.231	0.306
3	0.415	0.396	0.486
4	0.473	0.489	0.578
5	0.547	0.555	0.649
6	0.562	0.615	0.675
7	0.595	0.658	0.703
8	0.611	0.684	0.738
10	0.616	0.724	0.781

図-8 は係数 a および c を示した結果である。係数 a は地盤種別にはあまり依存しておらず、目標じん性率が大きくなるにつれて徐々に小さくなり、係数 a は 1.5~2 程度の範囲で変化する。係数 a は、図-7 に示した様に、変位一定則の適用性が良い固有周期を表していることから、固有周期が 2 秒より



(a) 回帰係数 a



(c) 回帰係数 c

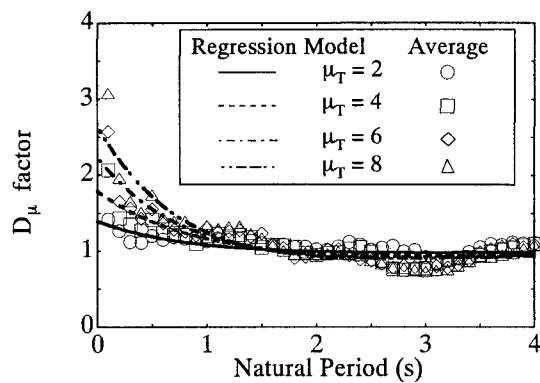
図-8 回帰モデルにおける回帰係数

長くなると変位一定則の適用性が良いことを示している。

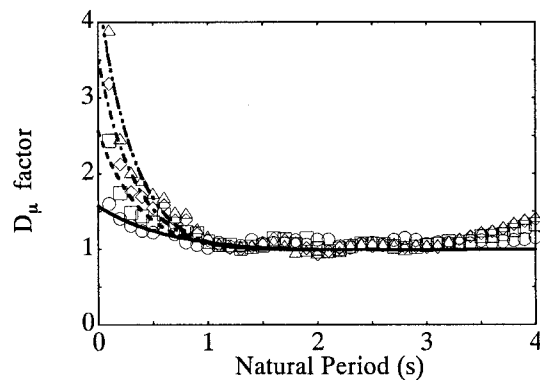
係数 c は地盤が柔らかくなるにつれて大きくなり、目標じん性率に応じて線形的に大きくなる。図-7 に示した様に、係数 c が大きくなると、短周期領域での変位増幅係数 D_μ が大きくなることから、短周期領域で非線形応答変位が大きくなることを示している。

図-9 には表-1 に示した、回帰係数を用いて式(4)より求めた変位増幅係数 D_μ の計算値と図-5 に示した変位増幅係数 D_μ の平均値を目標じん性率 $\mu_T = 2, 4, 6, 8$ の場合について示す。いずれの地盤種別においても、式(4)より求めた変位増幅係数 D_μ は変位増幅係数 D_μ の固有周期特性をよく表している。目標じん性率 μ_T が 2 の場合には、相関係数が 0.22 と非常に低かったが、平均値と式(4)による計算値は高い一致度を有している。図-6 にも示したように地震動毎の変位増幅係数 D_μ の変動が大きく、このように平均値周りのばらつきが大きい場合には式(4)のパラメータの変化だけではその変動をよく表せないために、相関係数が低くなるためである。

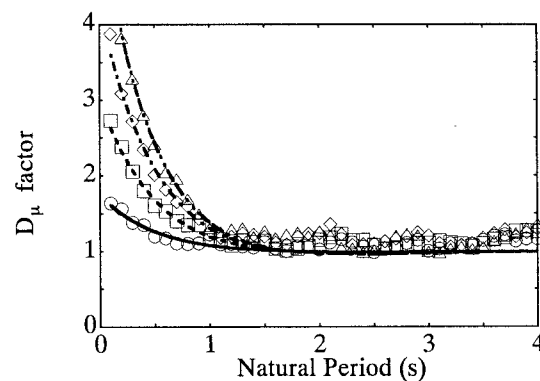
図-10 には、式(4)で示した回帰モデルによる変位増幅係数 D_μ の計算値が式(2)に示したエネルギー一定則の値と等しくなる周期 T_e を示す。I種地盤で



(a) I種地盤



(b) II種地盤



(c) III種地盤

図-9 回帰モデルにおける回帰係数

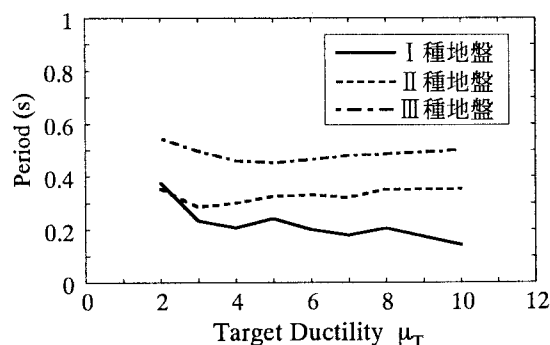


図-10 変位増幅係数 D_μ がエネルギー一定則による推定値と等しくなる固有周期

は、目標じん性率 μ_T が大きくなるにつれて周期 T_e は 0.37~0.14秒と短くなる。しかし、II種およびIII種地盤では目標じん性率 μ_T によらず、周期 T_e はそ

れぞれ0.33秒および0.48秒付近でエネルギー一定則の適用性が良いことを示している。また、I種、II種、III種と地盤が軟らかくなるにつれて、エネルギー一定則の適用性がよい周期帯は長周期側にシフトする。

ただし、図-4に示したように、同一周期帯でも変位増幅係数 D_μ は大きく変動し、図-6に示したように変位増幅係数 D_μ は平均値の1.3～1.5倍程度の値となることから、エネルギー一定則の適用性が良い固有周期帯は図-10に示した周期よりも長い周期帯である。

6. 結論

わが国の地盤上で観測された70成分の地震動記録に基づいて変位増幅係数の特性を検討するとともにその推定式を提案した。本研究結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 図-4および図-6に示したように、変位増幅係数 D_μ は同一周期でも地震動によって大きく変化をする。標準偏差の1倍分の変動を考慮すると、変位増幅係数 D_μ は平均値の1.5倍程度大きくなる。
- 2) 固有周期 T が1秒より長い周期帯では、地盤種別によらず変位増幅係数 D_μ の平均値は変位一定則による推定値にほぼ等しく、平均値+1倍の標準偏差を考慮した変位増幅係数 D_μ はエネルギー一定則による推定値 $\mu_T / \sqrt{2\mu_T - 1}$ に等しくなる。
- 3) 固有周期 T が1秒よりも短い領域では、周期が短く、また地盤が軟らかくなるにつれて変位増幅係数 D_μ は大きくなる。
- 4) 地震動毎に大きく変動する変位増幅係数 D_μ を定量的に取り扱うために、式(4)による回帰モデルを提案した。式(4)の回帰モデルの回帰係数 a 、 $a + 1/b$ および c は明確な物理的意味を有する。
- 5) 回帰分析の結果、得られた回帰係数 a は地盤種別や目標じん性率 μ_T によらず $a \approx 2$ 程度の値が得られた。これは、固有周期が2秒より長くなると変位一定則の適用性が良いことを示す。
- 6) 提案した変位増幅係数 D_μ の回帰モデルによる推定値と実地震波記録に対する変位増幅係数 D_μ の平均値の間には非常に高い一致度が見られ、回帰モデルが変位増幅係数 D_μ の平均値をよく表す。

7) 提案した回帰モデルから、エネルギー一定則の適用性が良い周期帯を調べた結果、I種地盤では目標じん性率に応じて0.14秒～0.37秒、II種地盤およびIII種地盤では目標じん性率によらずほぼ一定値で、それぞれ、0.33秒および0.48秒付近となる。

参考文献

- 1) Priestley, M. J. M., Seible, F. and Calvi, G. M.: "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.
- 2) Ye, L. and Otani, S.: "Maximum Seismic Displacement of Inelastic Systems Based on Energy Concept", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol. 28, pp. 1283-1499, 1999.
- 3) Miranda, E. and Ruiz-Gracia, J.: "Evaluation of Approximate Methods to Estimate Maximum Inelastic Displacement Demands", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol. 31, pp. 539-560, 2002
- 4) Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E.: "Inelastic Displacement Ratios for Evaluation of Existing Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol. 32, pp. 1237-1258, 2003
- 5) Lin, Y. Y. and Chang, K. C.: "Comparison of Displacement Coefficient Method and Capacity", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol. 33, pp. 35-48, 2004
- 6) 渡邊学歩, 川島一彦: 荷重低減係数の特性に関する研究, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp. 115-128, 2000.
- 7) (財) 日本気象学会: 気象庁87型電磁式強震計データ, 平成7年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録, 1995
- 8) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Betterling, W. T. and Flannery, B. P.: "Numerical Recipes in Fortran 77, Second Edition, The Art of Science Computing", Cambridge University Press, pp. 678-683, 1996