

断層近傍地震動に対する残留変位の推定に関する検討

渡邊 学歩¹

¹東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail:gakuho.w.aa@m.titech.ac.jp

橋梁構造物に強震動が作用し、構造部材の変形特性に強い非線形性が生じると、地震後に残留変位として塑性変形が残る可能性がある。現在の耐震設計では、残留変位は性能規定型耐震設計において、構造物の地震後の復旧可能性を表す重要な指標となっている。強震動が作用した場合に構造物に生じる残留変位は、地震動によって大きく変動することが知られているが、残留変位の発生に大きな影響を及ぼす要因について十分な検討がなされているとはいえないなどの課題が残されている。ここでは、断層近傍地震動を受ける構造物に生じる残留変位に関して解析を行ったので、その結果について報告する。

Key Words : residual displacement, near-field ground Motion, dynamic nonlinear analysis, bridge, seismic design

1. はじめに

橋梁構造物が強震動を受けた場合に、構造部材が弾性状態にあるように設計することは経済性や使用性の制約上困難である。このため、非線形領域での構造部材の変形性能を十分に確保した上で、構造部材の非線形化に伴う橋梁構造物に作用する地震力の低減、応答変位の増大を考慮して行う耐震設計法が、国際的にも広く採用されている^{1), 2), 3)}。

橋梁構造物に強震動が作用し、構造部材の変形特性に強い非線形性が生じると、地震後に残留変位として塑性変形が残る可能性がある。実際に、1995年の兵庫県南部地震では、阪神高速道路の高架橋では大きな曲げ損傷を受けながらも構造物の倒壊は免れたが、大きな残留変位が生じた。また、残留変位により1度以上残留傾斜を生じると、その橋脚は地震後に復旧することができず、撤去新設されたことが報告されている^{4), 5)}。このような背景により現在では、残留変位は性能規定型耐震設計において、構造物の地震後の復旧可能性を表す重要な指標となっている。

構造物に強震動が作用した場合に生じる残留変位については、非線形解析が盛んに行われるようになった1970年代から知られている⁶⁾。しかし、橋梁構造物の地震後の復旧可能性という視点にたち、地震後に生じる残留変位について解析的なアプローチを

行ったのは川島、MacRaeらである^{7), 8), 9)}。川島、MacRaeらは、可能最大残留変位という概念を用いた残留変位比応答スペクトルの提案を行っており、この結果は、1996年以降我が国の道路橋耐震設計の規定に導入されている。星隈ら¹⁰⁾はRC橋脚の非線形履歴特性をTakeda型剛性劣化型モデルを用いて表した場合のRC橋脚に生じる残留変位について、我国で観測された63波形の強震記録を基に検討を行っており、地盤種別と残留変位比応答スペクトルの形状には有意な関係が認められない、残留変位比と固有周期の間にも有意な相関がなくばらつきが大きいとしている。さらに、解析モデルの材料非線形性にTakeda型剛性劣化型モデル¹¹⁾を仮定した場合の残留変位比の平均値は0.2となり、Bilinear型完全弾塑性モデルを仮定した場合の残留変位比の平均値0.6に比べて小さくなることを示している。

このように、非線形領域での構造要素の変形性能を考慮した耐震設計において、構造物に生じる残留変位の推定およびその低減法の開発が重要であり、残留変位の発生に大きな影響を及ぼす要因については十分な検討がなされていないなどの課題が残されている。一方、兵庫県南部地震以降、断層近傍地震動による社会基盤施設への災害がたびたび発生している。断層近傍地震動は繰り返し回数が少ないにもかかわらず、激甚な災害をもたらす地震動であり、こうした地震動が残留変位に与える影響について検討

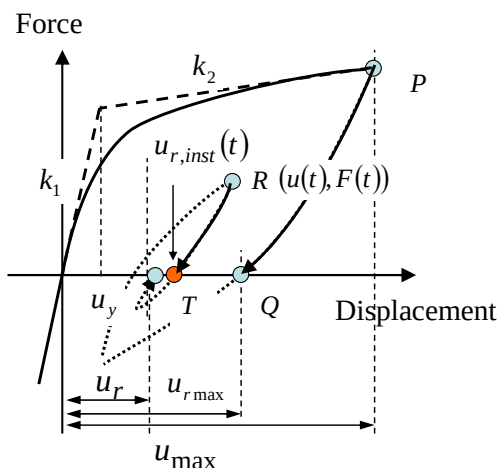


図-1 強震動が作用した場合の非線形履歴と残留変位

が必要である。本研究では、震源深さ40km以浅の浅発地震で観測された150波の強震記録を基に、断層からの距離が残留変位比に及ぼす影響を検討し、断層近傍地震動により生じる残留変位の推定に関して検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 非線形地震応答における残留変位と残留変位比

橋梁構造物を非線形履歴特性を考慮した1自由度系でモデル化し、強震動が作用した場合の地震時応答履歴を例に示すと図-1のようになる。強震動の作用に伴う構造系の変形が非線形域に達し（点P）、ここから除荷が始まると、荷重が0（点Q）となっても構造物には塑性変形が残る。この点での変位は、最大変位からの除荷履歴パスPQ上の残留変位であることから可能最大残留変位 $u_{r\max}$ と呼び、Bilinear型の履歴モデルでは次式で定義される。

$$u_{r\max} = \begin{cases} (\mu-1) \cdot (1-r) \cdot u_y & r \cdot (\mu-1) < 1 \\ \{(1-r)/r\} \cdot u_y & r \cdot (\mu-1) \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 u_y ：降伏変位、 $\mu = |u_{\max}/u_y|$ ：応答じん性率、 $r = k_1/k_2$ は2次剛性比である。 k_1 、 k_2 はそれぞれ弾塑性型Bilinearモデルの1次および2次剛性である。

以後本文中ではこの式(1)による $u_{r\max}$ を可能最大残留変位と呼ぶこととする。ちなみに、橋梁構造物の耐震設計で問題となる非線形性の範囲では $r \cdot (\mu-1) < 1$ である。

ただし、この可能最大残留変位は履歴特性により異なるため注意が必要であり。例えばTakeda型モデルの場合には、除荷剛性 k_{unload} がじん性率に応じて次式の通り低下するとするため、

$$k_{\text{unload}} = k_y \cdot \mu^{-\alpha} \quad (2)$$

ここで、 k_y は降伏剛性である、本論文では $k_y = k_1$ である。このとき、可能最大残留変位 $u_{r\max}$ は次式のとおり定義される。

$$u_{r\max} = \{\mu - (1+r \cdot (\mu-1)) \cdot \mu^\alpha\} \cdot u_y \quad (3)$$

残留変位は強震動による構造物の塑性化によって発生するために、地震時最大応答変位に大きく依存すると考えられるが、後述するように、主要動以降中小の地震力の作用によっても残留変位が変化する。このため、本検討では、残留変位が地震時にどのように変化していくかを調べることにし、図-1に示した任意の履歴上の点Rから、除荷が生じた場合の除荷点Tの変位を $u_{r,inst}(t)$ と定義する。これは、任意の時刻における残留変位と見なすことができ、これを瞬間残留変位と呼ぶことし次式により求める。

$$u_{r,inst}(t) = u(t) - \int F(s)/k(s) ds \quad (4)$$

ここで、 F は復元力を、 k は任意の変位 s における剛性を表している。なお、積分区間は任意の時刻における変位 $u(t)$ から、この点を通る除荷パス上で復元力が0となる変位である。なお、可能最大残留変位 $u_{r\max}$ は瞬間残留変位の最大値であり、残留変位 u_r は次式の通り振動応答が収束する時刻での瞬間残留変位の値に等しい。

$$u_{r\max} = \max(|u_{r,inst}(t)|) \quad (5)$$

$$u_r = |u_{r,inst}(t = \infty)| \quad (6)$$

1995年の兵庫県南部地震の際に観測された神戸海洋気象台記録のNS成分を構造物に作用させた場合に得られる非線形地震応答 $u(t)$ を例に、可能最大残留変位 $u_{r\max}$ 、瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ および残留変位 u_r を示したのが図-2である。なお、同図は、固有周期 T が0.5秒～2秒の構造物をBilinear型1自由度系でモデル化し、構造物の最大応答変位じん性率が4となる場合の結果を示したものである。固有周期 T が0.5秒の場合には、時間の経過とともに瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ は正側に階段状に増加し、10秒以降では概ね一定となる。

一方、固有周期 T が1.5秒の場合には、入力地震動が大きくなる5秒付近から徐々に応答変位は大きくなり、8.4秒で応答変位は負側でピークとなり、最大応答変位および瞬間残留変位はそれぞれ、 $u_{\max} = -0.32\text{m}$ および $u_{r,inst}(t) = -0.24\text{m}$ となるが、その後応答が小さくなるとともに、瞬間残留変位 $u_{r,inst}(t)$ は小さくなり、残留変位は可能最大残留変位 $u_{r\max}$ の20%程度となる。この可能最大残留変位 $u_{r\max}$ に対する残留変位 u_r の割合を示したものが、

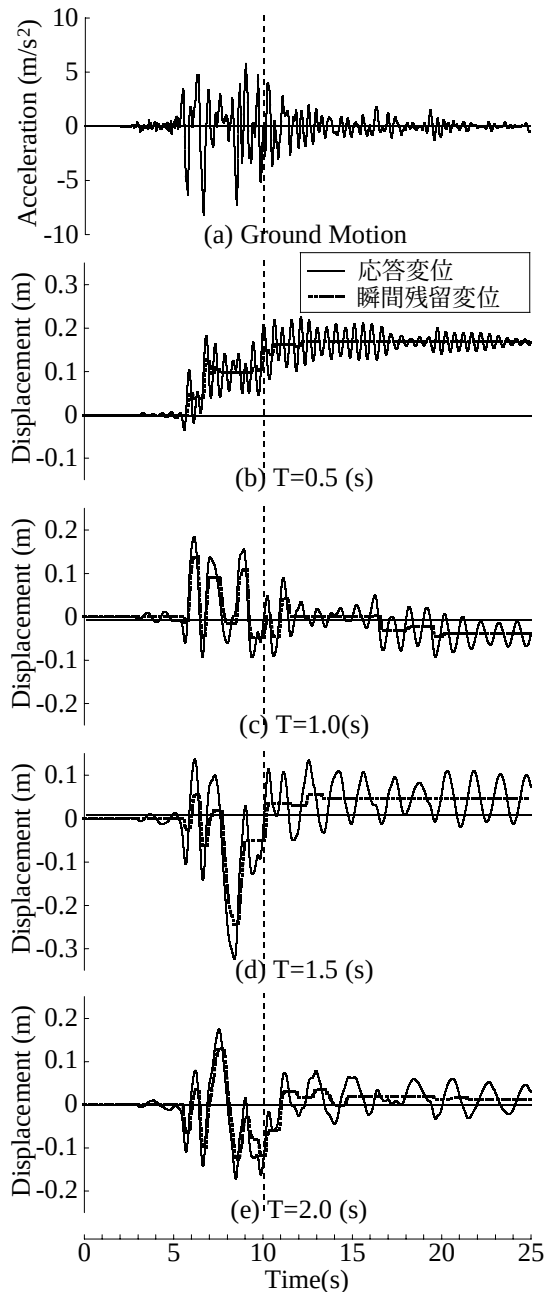


図-2 JMA 神戸記録に対する地震時応答変位と残留変位の時刻歴 ($\mu_T = 4$)

次式で定義される残留変位比 r_r である。

$$r_r = \left| \frac{u_r}{u_{r \max}} \right| \quad (7)$$

同様に、固有周期 T が0.5秒、1秒および2秒の場合には、残留変位比 r_r はそれぞれ1.0、0.28および0.095となり、残留変位比 r_r は同一入力地震動、目標じん性率の場合であっても固有周期によって変化する。このように、実際に生じる残留変位 u_r が可能最大残留変位 $u_{r \max}$ よりも小さくなるのは、主要動以降地震動によって、構造系が最大応答変位を経験した後も振動し、その除荷・再載荷の過程において瞬間残留変位が増加・減少を繰り返すためである。

3. 履歴特性の違いが残留変位に及ぼす影響

構造物の上部構造質量が1000t、固有周期1.0秒、降伏変位が0.005mの非線形1自由度系の構造物に、図-3に示すような単一のパルス成分が卓越する入力地震動が作用した場合の非線形減衰振動応答を図-4に示す。非線形履歴特性には、完全弾塑性Bilinearモデルとバイリニア型Takeda剛性劣化型モデルを対象としている。両構造系には、図-4(1)(a) (b)に示すように、最大応答変位 $u_{\max} = 0.036\text{m}$ (図-4(1)(a)の点(b))が生じ、応答じん性率は $\mu = 7.2$ となる。その後、Bilinear型の履歴を有する構造系の応答では、復元力応答が降伏耐力 $-F_y$ に達しないため、新たな応答の非線形化は生じない。このため、復元力応答履歴は点(e)を通過する直線上を振動し、残留変位 $u_r = 0.031\text{m}$ は可能最大残留変位 $u_{r \max}$ と等しくなり、残留変位比は $\gamma_r = 1$ となる。

一方、Takeda型履歴を有する構造系では除荷剛性が劣化するため、可能最大残留変位 $u_{r \max} = 0.025\text{m}$ は、Bilinear型の可能最大残留変位 $u_{r \max} = 0.031\text{m}$ に比べて小さくなる。また、点(c)を通過後の再載荷履歴は負側の降伏点を目指すように履歴を描くために、再載荷剛性は直前の剛性よりも劣化し、原点に近い履歴をたどり残留変位が低減する。これ以降、徐々に応答は減衰しながら点(e)と収束していくことから、残留変位は $u_r = 0.015\text{m}$ となる。このとき、式(7)で求められる残留変位比は $\gamma_r = 0.6$ であり、前述したBilinear型の場合に比べて小さくなる。

図-5には、Takeda型履歴を有する構造系に神戸海洋気象台記録のNS成分が作用した場合の非線形地震応答を示す。固有周期が0.5秒の場合に着目すると、図-2に示したBilinear型履歴を有する場合と比べて、Takeda型履歴を有する構造系では最大応答変位は同程度であっても、残留変位は1/3程度に低減している。ただし、周期1.0秒や1.5秒の場合のように、構造物の周期によってはTakeda型履歴の場合に必ず残留変位が低減するとは限らない。

各時刻での残留変位（瞬間残留変位）と最終的に生じる残留変位は必ずしも相関がないこと、主要動以降の中小の地震力の作用によっても残留変位の値が変化する可能性があることは、図-2および図-5に示した瞬間残留変位が示すとおりである。図-4に示したような単一のパルス波の場合とは異なり、最大変位と残留変位の間に明確な相関があると云えず、可能最大残留変位に対する残留変位の分布は確率的となる。

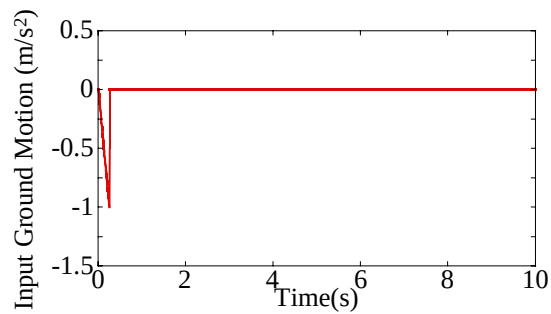
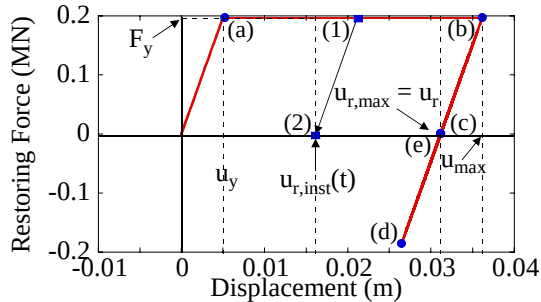
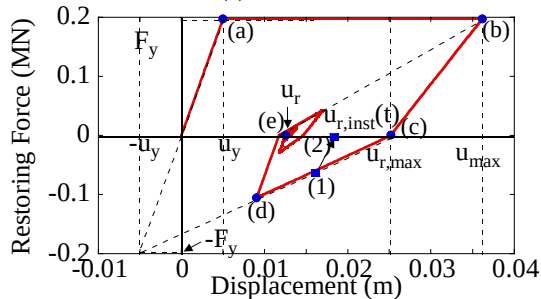


図-3 入力に用いたパルス地震動

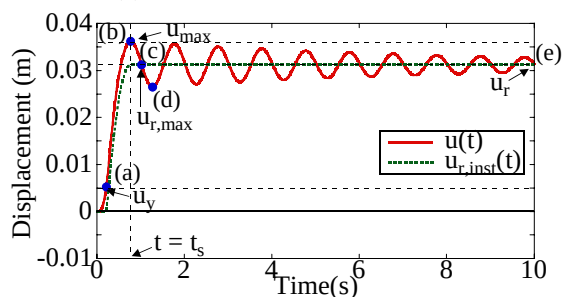


(a) Bilinear 型

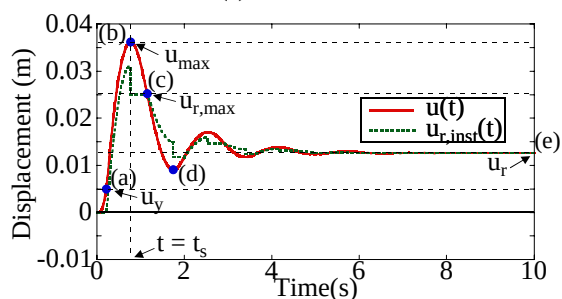


(b) Takeda 型

(1) 復元力～水平変位の履歴



(a) Bilinear 型



(b) Takeda 型

(2) 応答変位

図-4 非線形減衰振動をする場合の非線形応答

4. 断層近傍地震動に対する残留変位の推定

強震動の作用により発生する残留変位を推定する

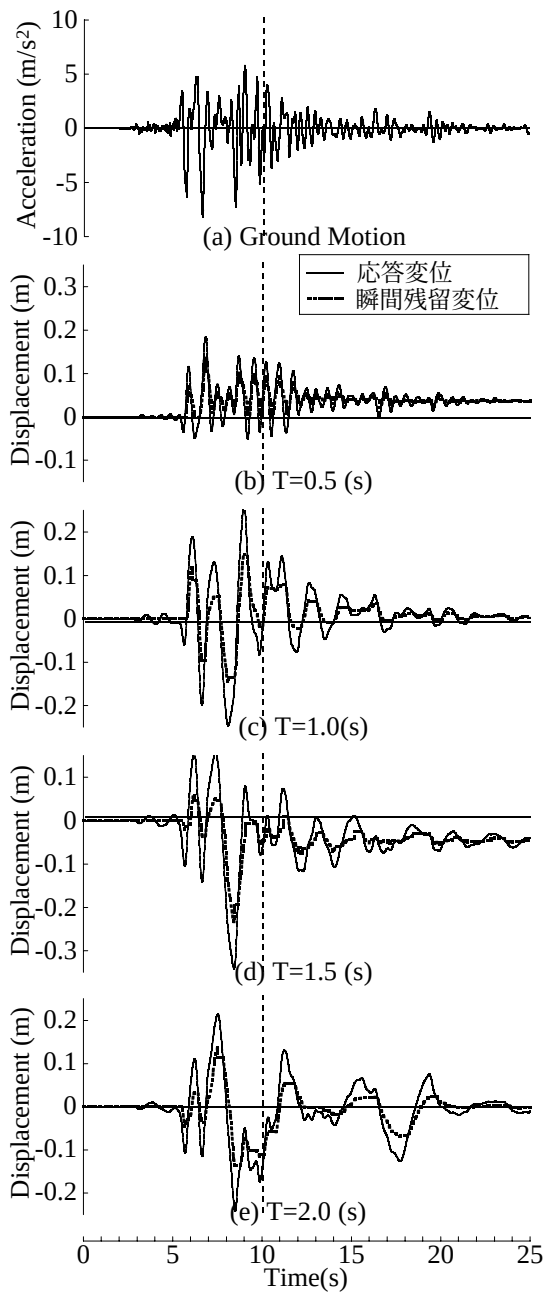


図-5 JMA 神戸記録に対する地震時応答変位と残留変位の時刻歴 ($\mu_T = 4$) (Takeda 型履歴の場合)

ために、式 (7) で定義した残留変位比 r_r を実際に観測された多数の強震記録に対して検討する。残留変位比 r_r は、降伏変位 u_y を変えながら繰り返し計算を行い、応答じん性率が所定のじん性率（以後目標じん性率： μ_T ）となる場合の残留変位 u_r から求めている。

解析では、弾塑性系を仮定し、弾塑性型BilinearモデルとTakeda剛性劣化型モデル¹¹⁾の2種類を用いる。また、入力地震動としては表-1に示す150成分の断層近傍地震動を用いることとし、断層直近距離 D_{CF} に応じて、10km未満 ($D_{CF} < 10\text{km}$: 60成分) と10km以上40km未満 ($10\text{km} \leq D_{CF} < 40\text{ km}$: 90成分) の2種類に分類する。

表-1 解析に用いた地震記録

地震	日付	発生国	M _w	深さ	記録数
Tabas	1978/09/16	イラン	7.4	5.8	1
Michoacan	1985/09/19	メキシコ	8.1	27.0	1
Witter Narrows	1987/10/01	米国	6.1	14.6	2
Loma Prieta	1989/10/18	米国	7.0	17.5	3
Erzincan	1992/3/13	イラン	6.7	?	1
Cape Mendocino	1992/04/25	米国	7.0	9.6	2
Landers	1992/06/28	米国	7.3	7.0	2
Northridge	1994/01/17	米国	7.3	7.0	2
兵庫県南部	1995/01/17	日本	6.9	17.5	2
鹿児島北西部	1997/03/26	日本	6.3	17.9	5
トルコ Kocaeli	1999/08/17	トルコ	7.4	17.0	1
台湾集集	1999/11/12	台湾	7.6	6.8	3
トルコ Duzce	1999/08/17	トルコ	7.4	10.0	3
鳥取県西部	2000/10/06	日本	7.1	10.0	17
Park Field	2004/09/28	米国	6.0	7.9	18
新潟県中越	2004/10/23	日本	6.8	13.4	11

(1) 弾塑性型Bilinearモデルの場合

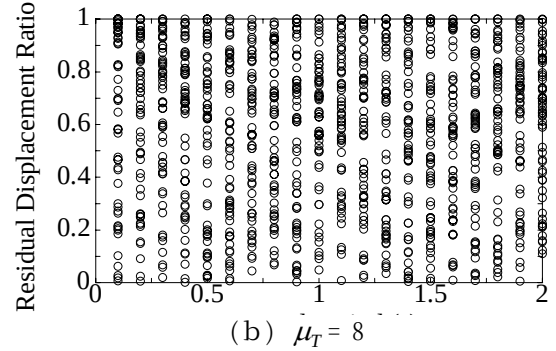
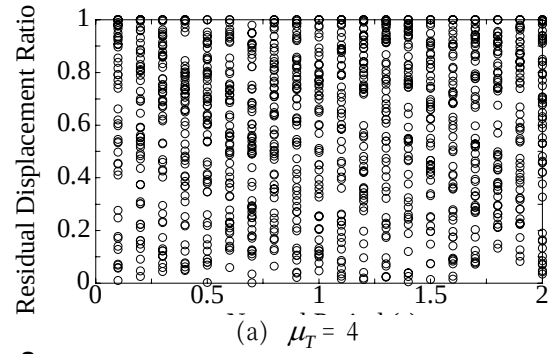
断層直近距離10km未満の場合と、10km以上40km未満の場合に分けて、目標じん性率 μ_T が4および8、の場合を対象に残留変位比 r_r を求めると、図-6のようになる。上述したように、どの応答変位から除荷し、残留変位が生じるかには地震動や固有周期に応じていろいろな場合があるため、残留変位比 r_r は地震動ごとに非常に大きく変化する。

固有周期0.5秒と1秒の場合を例に、残留変位比 r_r が a から b の間にある確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ を次式により定義する。

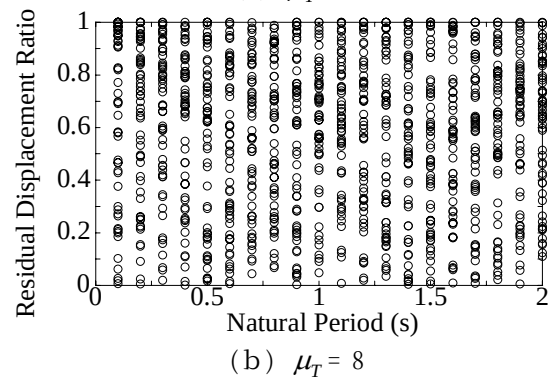
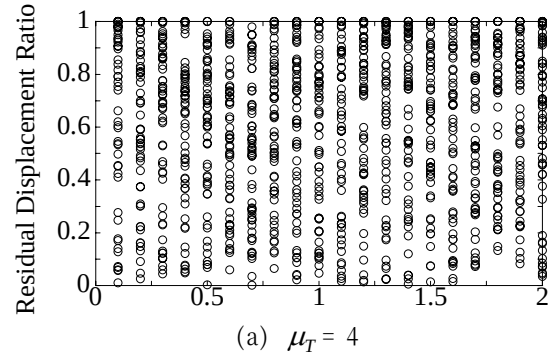
$$P_r(a \leq r_r < b) = \frac{n(a \leq r_r < b)}{\tilde{n}} \quad (8)$$

ここで、 $n(a \leq r_r < b)$ はある固有周期 T 、目標じん性率の場合に、残留変位比 r_r が a から b の間となる地震動の数、 $\tilde{n}$ は全地震動の数である。なお、以下の解析では、残留変位比の区間幅を0.1とし、 $b = a + 0.1$ とする。

式(8)により残留変位比 r_r が a から b の間にある確率 $P_r(a \leq r_r < b)$ を図-6に示した結果から求めると、図-7のようになる。なお、ここには、後述する断層直近距離 D_{CF} が10km以上40km未満の場合についても併せて示す。確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ は残留変位比 r_r によってかなり一様に変化するが、全体としてみると、残留変位比 r_r が大きくなるにつれて増加する傾向がある。ここには示していないが、周期0.5秒、1秒以外の場合においても同様な傾向がある。このため、図-7に示した確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ を全周期に対して平均すると、図-8のようになる。図-7と同様、断層直近距離が10km以上40km未満の場合についても



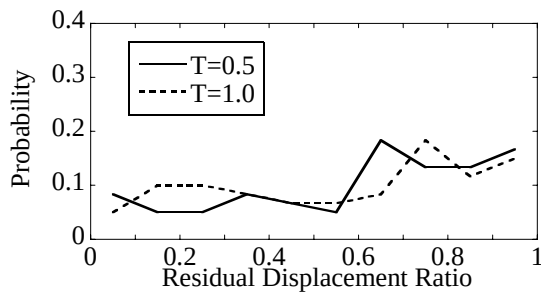
(1) 断層直近距離が10km 未満の場合



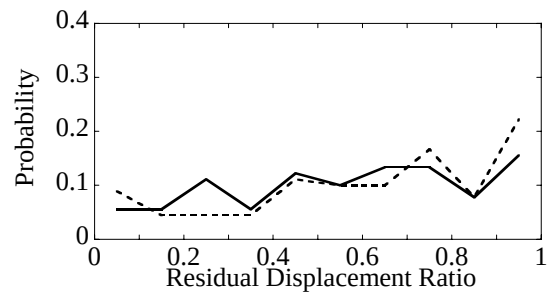
(2) 断層直近距離が10km 以上 40 km 未満の場合

図-6 Bilinear 型履歴を用いた場合の残留変位比

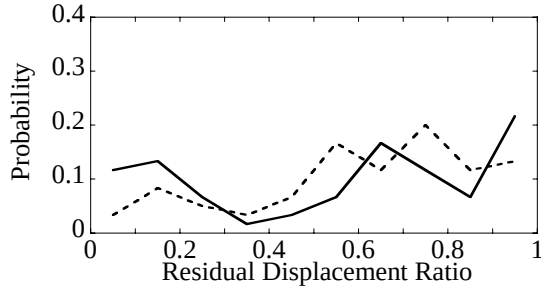
併せて示す。確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ は残留変位比 r_r が大きくなるほど漸増し、 $0.9 \leq r_r < 1$ の場合に最大となる。これは、後述するTakeda剛性劣化型モデルの場合と顕著に異なる点で、Bilinear型モデルの場合には、最大応答 $u_{\max}$ に達した直後の除荷過程で残留変位 u_r が生じる確率がその他の変位からの除荷過程で残留変位を生じる確率よりも高いことを示している。



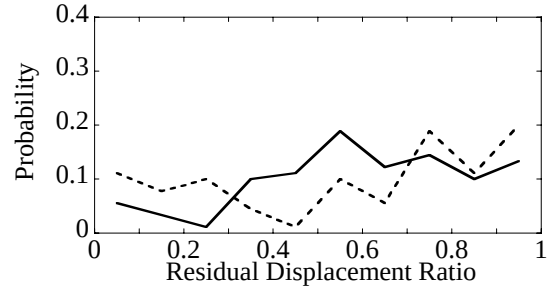
(a) $\mu_T = 4$



(a) $\mu_T = 4$



(b) $\mu_T = 8$

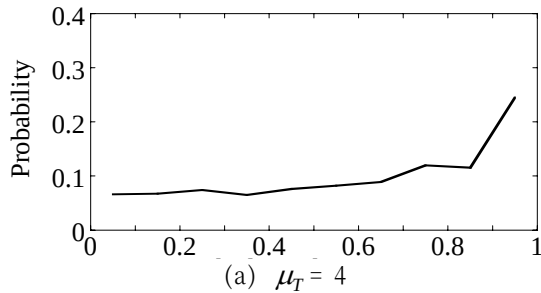


(b) $\mu_T = 8$

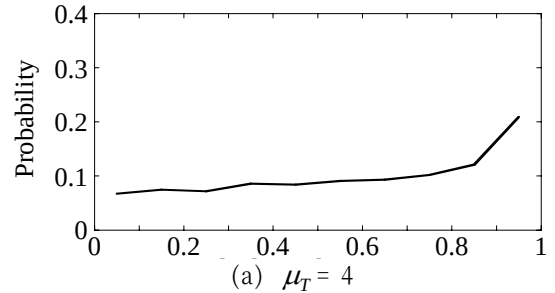
(1) 断層直近距離が 10km 未満の場合

(2) 断層直近距離が 10km 以上 40 km 未満の場合

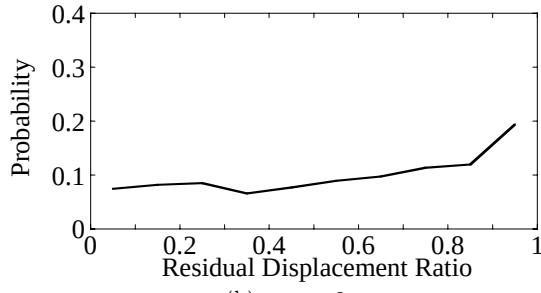
図-7 固有周期 0.5 秒および 1 秒の場合の残留変位の確率密度 (弾塑性型 Bilinear モデル)



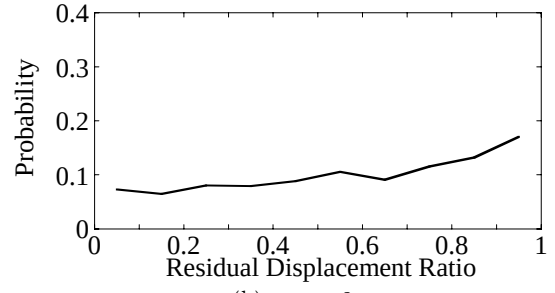
(a) $\mu_T = 4$



(a) $\mu_T = 4$



(b) $\mu_T = 8$



(b) $\mu_T = 8$

(1) 断層直近距離が 10km 未満

(2) 断層直近距離が 10km 以上 40km 未満

図-8 全周期について平均した残留変位比の確率密度 (弾塑性型 Bilinear モデル)

式 (8) から残留変位比 r_r が b を越さない確率 (非超過確率) p_r を

$$p_r = 1 - \Pr(b \leq r_r < \infty) \quad (9)$$

と定義すると、非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比を求めると図-9 ようになる。0.5 秒以下の固有周期においては、固有周期が短くなるにつれて残留変位比 r_r は 1 に近づくが、0.5 秒以上の固有周期の領域では概ね一定値となり、非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合にそれぞれ、0.6~0.7, 0.8, 0.95 程度の値となる。

図-10 には残留変位比 r_r の周期毎の平均値を示すが、 r_r の平均値は周期や目標じん性率によらず約 0.6 となり、川島ら⁷⁾の結果と一致する。

以上は、断層直近距離が 10km 未満の場合であるが、同じ解析を断層直近距離が 10km 以上 40km 未満の場合についても行った。図-7(b) には固有周期 T が 0.5 秒および 1 秒の場合の式 (8) による残留変位比 r_r の確率密度 $p_r(a \leq r_r < b)$ を示したが、結果から、断層直近距離が 10km 未満の場合とそれほど大きな差はない。

図-7 および 図-8 に示したように、残留変位比 r_r は正規分布や対数正規分布をなしていないことが明ら

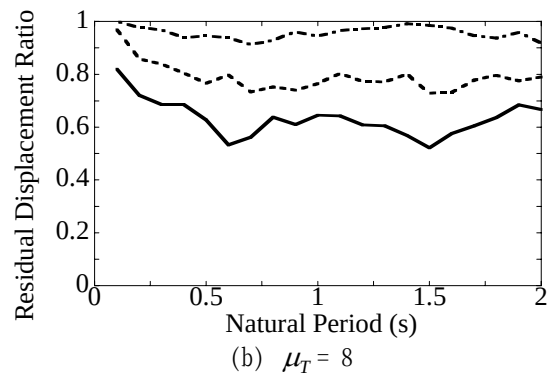
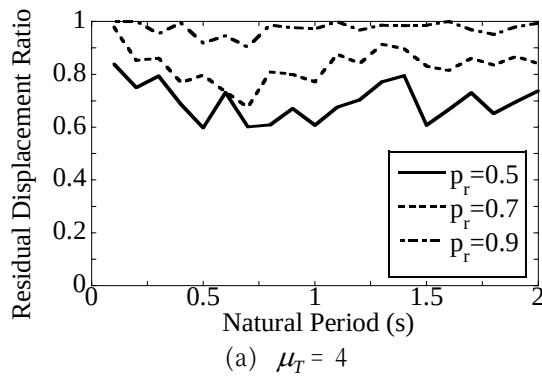


図-9 非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比（断層直近距離が 10km 未満，弾塑性型 Bilinear モデル）

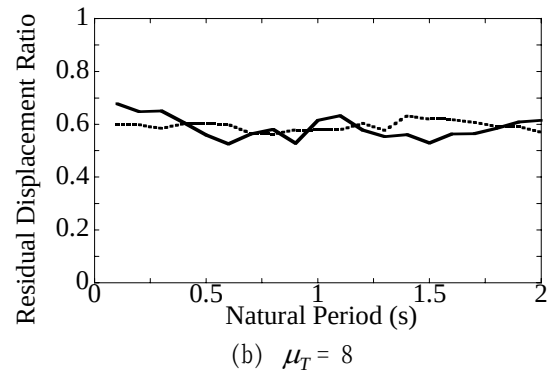
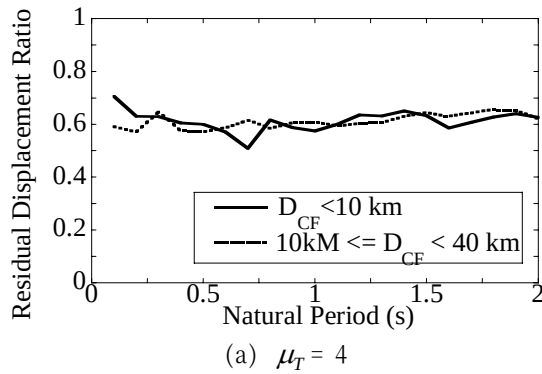


図-10 断層直近距離の違いによる残留変位比の平均値の比較（弾塑性型 Bilinear モデル）

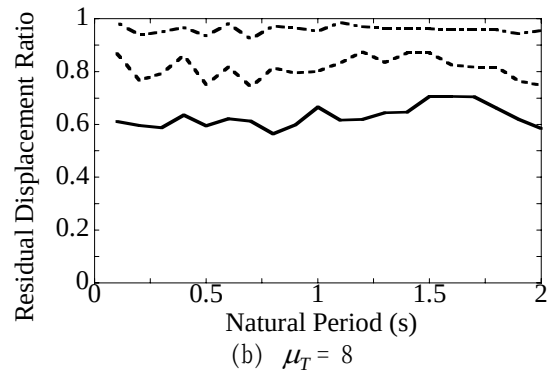
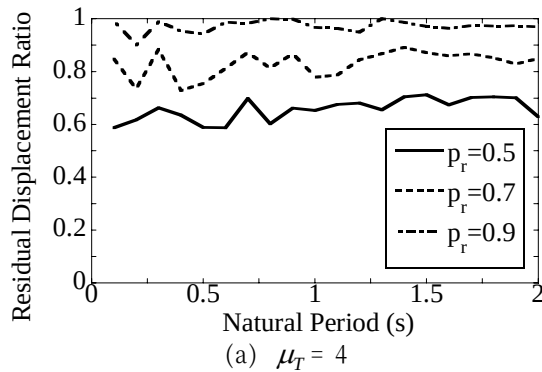


図-11 非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比（断層直近距離が 10km 以上 40km 未満，弾塑性型 Bilinear モデル）

かであることから，残留変位比の平均値は最も生起確率の高い残留変位比に対応していない．荷重ベース静的耐震設計法において，適切に残留変位比を設定するためには，非超過確率 p_r に応じて残留変位比を決定するべきである．このため，非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比を求めると図-11のようになる．これを図-9に示した，断層直近距離が 10km 未満の場合と比較すると，断層直近距離が 10km 以上 40km 未満の場合には固有周期が 0.5 秒以下で概ね一定の値を示すことや，目標じん性率 μ_T が 4 および 8 の場合には，断層直近距離 10km 未満の場合に残留変位比 r_r は若干小さくなるが大きな違いは見られない．

(2) Takeda 剛性劣化型モデルの場合

次に Takeda 型剛性劣化モデルを用いた場合の残留

変位比 r_r を検討する．残留変位比 r_r を断層直近距離 10km 未満の場合と，10km 以上 40km 未満の場合に分けて目標じん性率 μ_T が 4 および 8 の場合の残留変位比 r_r を求めると，図-12のようになる．これを，図-6に示した Bilinear 型モデルを用いた場合の結果と比較すると，Takeda 型剛性劣化モデルを用いた場合の残留変位比 r_r は概ね 0.5 程度以下となっており，明らかに小さくなっている．図-13は式(8)による確率 $P_r(a \leq r_r < b)$ である．この場合には，確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ は固有周期 0.5 秒と 1.0 秒とで多少異なるが，残留変位比 r_r が 0.2～0.4 程度の場合に確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ は大きくなる．これは，図-7に示した弾塑性型 Bilinear モデルの場合と大きく異なっている．なお，図-13に示した確率 $P_r(a \leq r_r < b)$ を全周期について平均すると，図-14のようになる．確率密

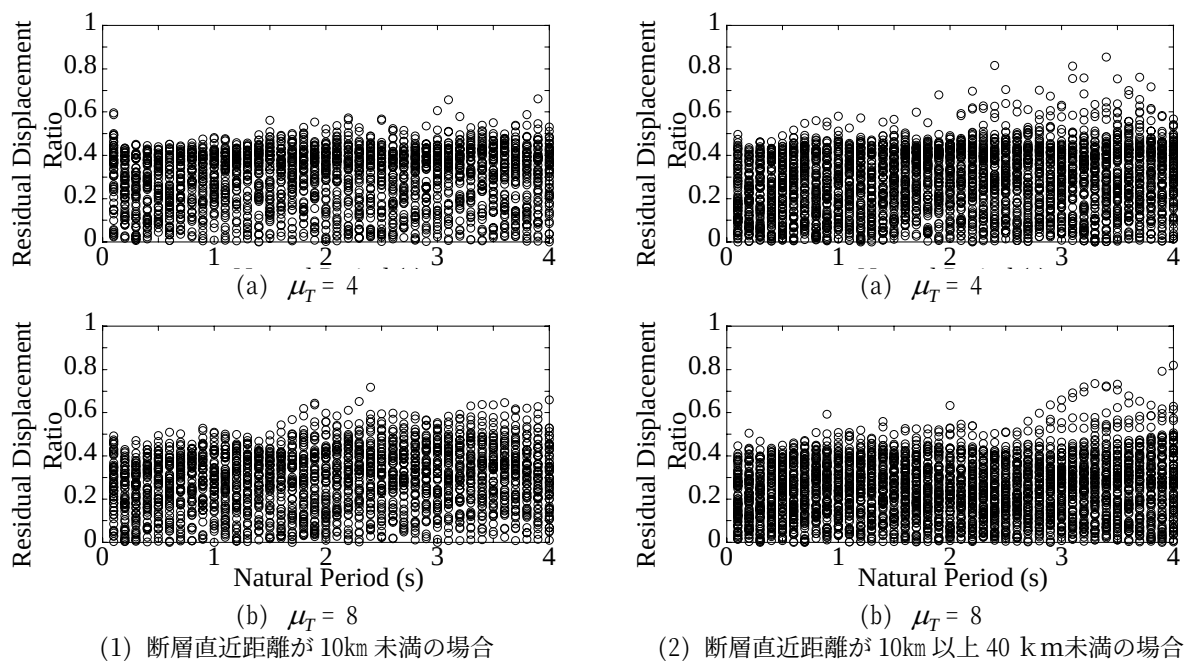


図-12 Takeda 剛性劣化型モデルを用いた場合の残留変位比

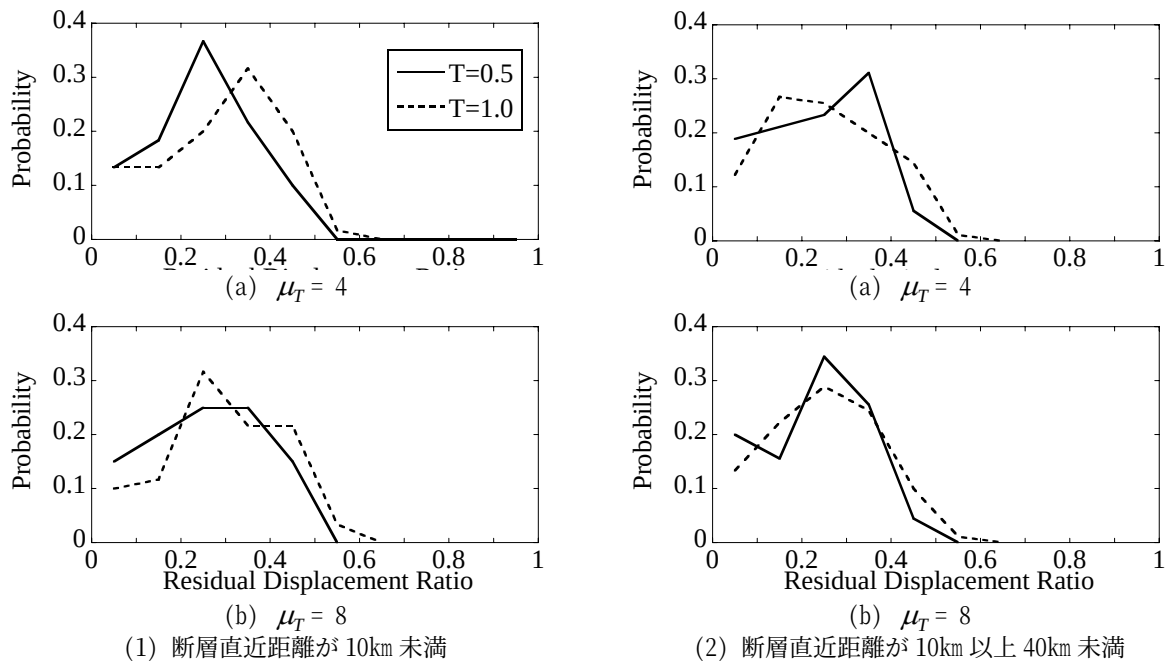


図-13 固有周期 0.5 秒および 1 秒の場合の残留変位の確率密度 (Takeda 剛性劣化型モデル)

度 $P_r(a \leq r_r < b)$ は残留変位比 r_r が 0.4 より大きくなると減少し、残留変位比 r_r は 0.6 以上の値には殆どならないことを示している。

また、図-8 に示したように、弾塑性型 Bilinear モデルの場合には、残留変位比 r_r の確率密度 $P_r(a \leq r_r < b)$ 分布は概ね一様であったが、Takeda 型剛性劣化モデルの場合には、残留変位比 r_r が 0.2 ~ 0.4 程度の場合に確率 $P_r(a \leq r_r < b)$ が大きくなっている。Takeda 剛性劣化型モデルが原点指向型の除荷剛性を有しているためである。

図-15 には残留変位比 r_r の周期毎の平均値を示すが、 r_r の平均値は周期や目標じん性率によらず約

0.2 と一定の値を示している。この結果は星隈ら¹⁰⁾ が、63 成分の地震動記録に基づいて求めた残留変位比の平均値と一致しており、断層近傍地震動と遠距離地震動の違いが残留変位に及ぼす影響は少ない。

図-14 から、式 (9) により非超過確率 p_r が 0.5、0.7 および 0.9 の場合の残留変位比を求めると、断層直近距離が 10 km 未満の場合には図-16、断層直近距離が 10 km 以上 40 km 未満の場合には図-17 のようになる。非超過確率 p_r が 0.9 の場合でも、断層直近距離の 10 km 未満および 10 km 以上 40 km 未満のいずれの場合においても残留変位比は 0.4 程度の値を示している。

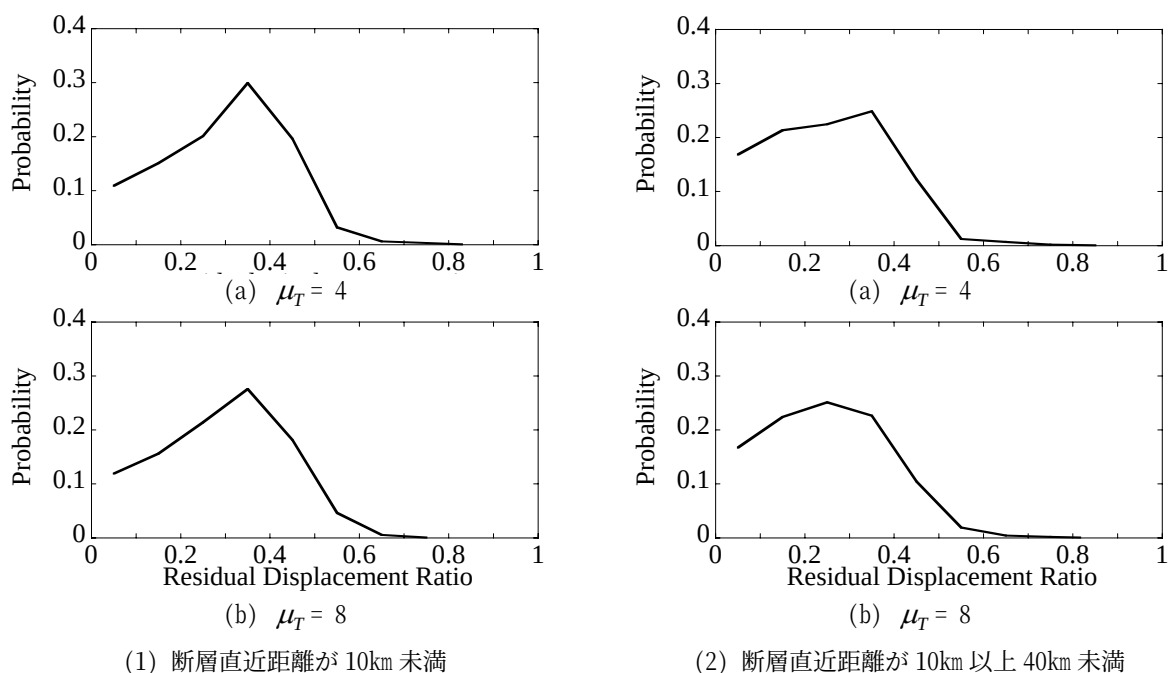


図-14 全周期について平均した残留変位比の確率密度 (Takeda 剛性劣化型モデル)

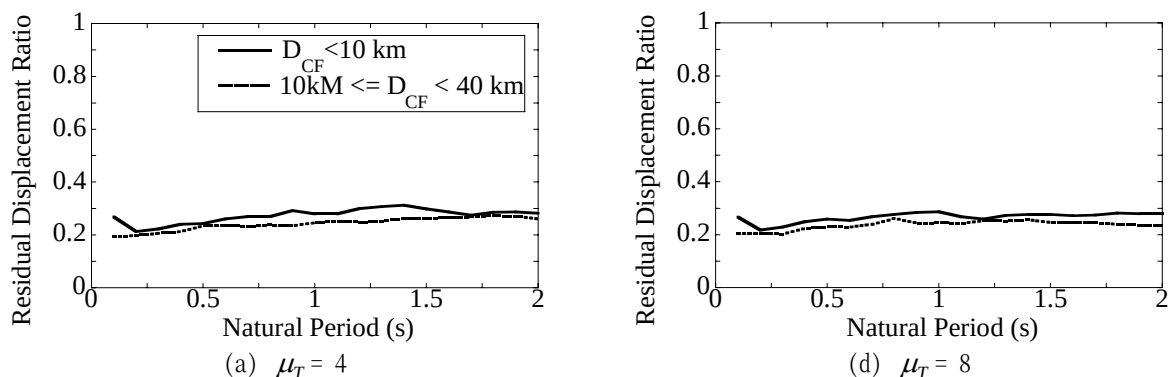


図-15 断層直近距離の違いによる残留変位比の平均値の比較 (Takeda 剛性劣化型モデル)

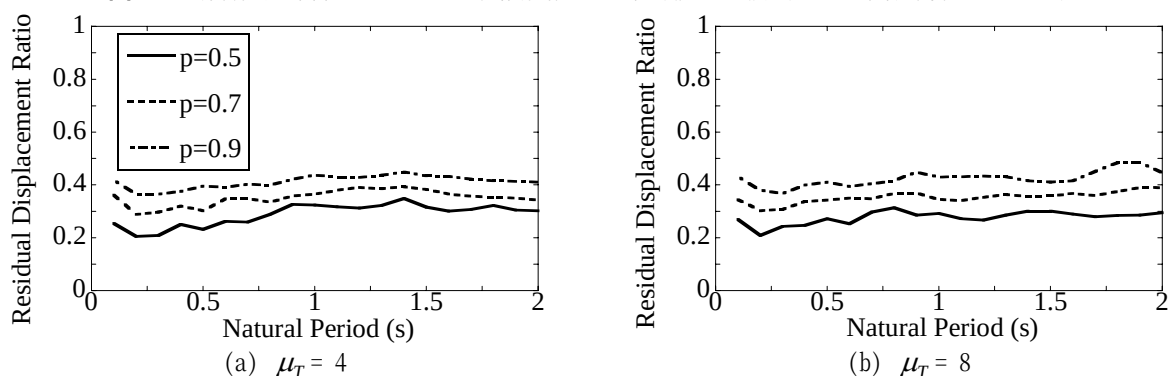
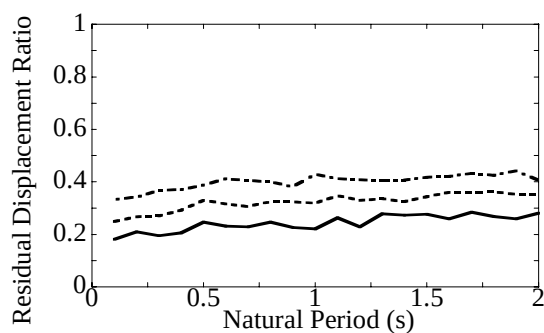


図-16 非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比 (断層直近距離が 10km 未満, Takeda 剛性劣化型モデル)

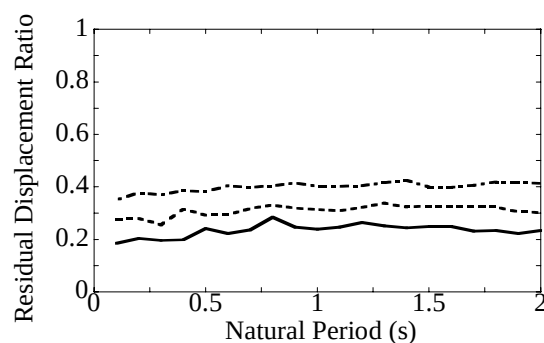
結論

本研究では、残留変位は性能規定型耐震設計において、復旧可能性を表す重要な指標となっており、断層近傍地震動に対する関心が高まっていることから、断層近傍地震動が、残留変位に及ぼす影響を18地震による150成分の断層近傍地震動に基づき解析した。本解析結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 残留変位および残留変位は同一地震動でも大きく変動し、明確な周期依存性は認められない。
- 2) 多数の地震動記録に対する解析結果から、残留変位比の確率密度分布、平均値および非超過確率が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比を検討した結果、断層直近距離の違いが残留変位比に及ぼす影響はない。
- 3) 履歴特性の違いが残留変位比に及ぼす影響は大きく、弾塑性Bilinear型モデルを用いた場合の残留変



(a) $\mu_T = 4$



(b) $\mu_T = 8$

図-17 非超過確率 p_r が 0.5, 0.7 および 0.9 の場合の残留変位比 (断層直近距離が 10km 以上~40km 未満, Takeda 剛性劣化型モデル)

位比の確率密度分布は概ね一様であるのに対して、Takeda剛性劣化型モデルを用いた場合の残留変位比は0.6以下に集中している。またこれらの平均値はそれぞれ、0.6および0.2程度となり既往の研究結果と一致する。

4) 残留変位比は正規分布をなさず、残留変位比の平均値は必ずしも最も高い生起確率に応じた残留変位比を表していない。荷重ベース静的耐震設計法においては、残留変位比をその分布特性を考慮して適切に設定するべきである。このため、図-9、図-11、図-16および図-17に示したように非超過確率 p_r にもとづいた残留変位比を提案した。

5) 残留変位を推定するために、非超過確率 p_r をどのように設定すればよいかについては、この論文の範囲を超えている。ただし、非超過確率 p_r が0.5の場合が残留変位比の平均値と概ね一致すること、Takeda剛性劣化型モデルを構造物の履歴則に仮定した場合には、残留変位比の分布は0.6以下に限定されるという点が重要である。

謝辞： 本論文で用いた強震記録はPEER (Pacific Earthquake Research Center), K-net, COSMOS, 台湾中央気象台のWebサイトの強震記録データベースのデータを使用致しました。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.406，2002.
- 2) California Department of Transportation Seismic design criteria Ver. 1.2 California, 2001.
- 3) CEN: European Committee for Standardization:

Eurocode8 - Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures – part 1.1: General rules – Seismic actions and general requirements for structures, ENV 1998-2, 1994.

- 4) 阿部哲子，藤野陽三，阿部雅人：1995年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と2，3の分析，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.181-199，1999.
- 5) 幸左賢二，小野紘一，藤井康男，田中克典：被災RC橋脚の残留変位に関する研究，No.627/V-44，pp.193-203，1999.
- 6) 後藤尚男，家村浩和：強震時における1自由度系の塑性変形に関する考察，pp.57-67，土木学会論文報告集，第184号，1970.
- 7) 川島一彦，Gregory A. MacRae，星隈順一，長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.183-192，1994.
- 8) Kazuhiko Kawashima, Gregory A. MacRae, Jyun-ichi Hoshikuma and Kazuhiro Nagaya: Residual Displacement Response Spectrum, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No.5, pp.523-530, ASCE, 1998.
- 9) Gregory A. MacRae and Kazuhiko Kawashima: Post-Earthquake Residual Displacement of Bilinear Oscillators, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp.701-716, 1997.
- 10) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏：耐震設計における鉄筋コンクリート橋脚に生じる残留変位の評価，第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 399-404，2002.
- 11) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.96, No.ST12, Paper 7759, pp.2557 -2573, 1970.

(2007. 4. 6 受付)

EFFECT OF NEAR-FAULT GROUND MOTION ON RESIDUAL DISPLACEMENT

Gakuho Watanabe

Near-fault ground motion with prominent acceleration pulses resulted in the severe damage to the bridge structures. Such ground motions often exhibit special pulse-like characteristics and results in the permanent displacement to the structures after the earthquakes. This paper focuses on the effect of the near-fault ground motions with impulsive pulse on the residual displacement.