

各種評価指標を用いた強震記録による非線形地震応答の比較

矢部正明¹・塚本英子²

¹正会員 博士（工） 株式会社長大 耐震技術部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

²非会員 株式会社長大 耐震技術部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

1. はじめに

2011.3.11に発生した2011年東北地方太平洋沖地震によって生じた地震動は、複数の断層が動く連動型地震であったことにより地震動の継続時間が長く、主要動が連続して作用するという過去の強震記録とは異なる様相をしていた。そのため、従来の設計地震動で耐震設計された構造物が、このような連動型地震によって励起される地震動に対して所要の耐震性能を確保できるかが問われている。1995年兵庫県南部地震以後、K-NET、KiK-netに代表される全国規模の強震観測網が整備されてから、観測された強震記録の加速度応答スペクトルと耐震設計に用いられる設計地震動を比較し、強震記録の加速度応答スペクトルが設計地震動を大きく上回る周期帯（主に短周期域）があるたびに同様な議論がされてきた。

1995年兵庫県南部地震以後、わが国の道路橋の耐震設計は、橋の非線形域における変形性能とその変形性能が確実に期待できる領域に非線形地震応答を抑えるために必要な耐力を付与する地震時保有耐力法の設計体系に移行した。そのような設計体系下では、橋の弾性域における固有周期が、強震記録の加速度応答スペクトルが最大となる周期帯域内にあっても、橋が非線形化しその剛性が変化した結果橋の固有周期も移動するため、橋の非線形地震応答が共振状態に成長することがない（非定常非共振系となる）ため、耐震設計上の照査を満足しないということとはなかった。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震は広い地域に渡って地震による被害を生じさせており、短周期域における加速度応答スペクトルの大きさも、地震動の継続時間の長さも、従来の強震記録よりも大きく、中には主要動が連続して現れるという地震動特性を有している。

本報告は、1994年ノースリッジ地震から2011年東

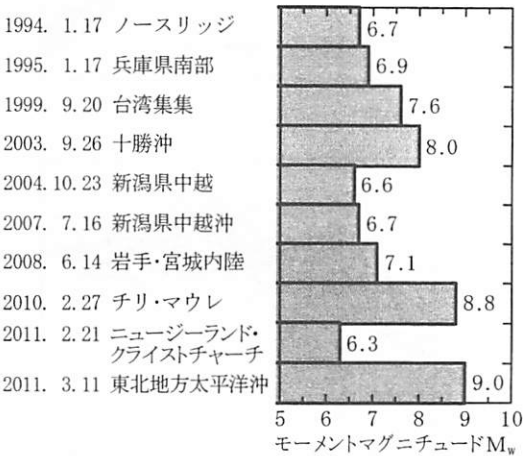


図-1 対象とした地震

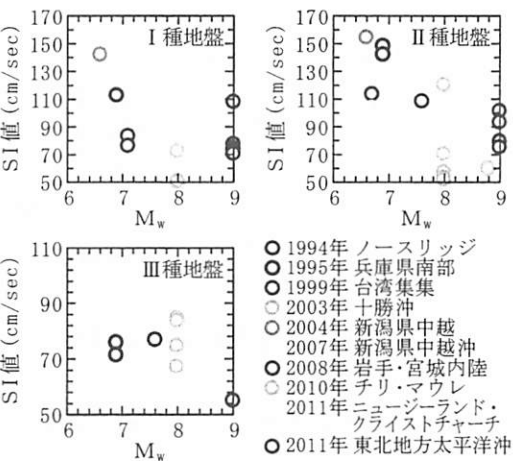


図-2 対象とした地震動のSI値

北地方太平洋沖地震で観測された強震記録の中から、様々な固有周期の構造物に影響を与える可能性がある強震記録¹⁾⁸⁾という観点から、SI値が50以上となる強震記録49波形を選出し、1自由度系を対象とした非線形動的解析を行い、非線形地震応答が強震記録によってどう変化するかを比較したものである。着目した非線形地震応答評価指標は、上述した2011年

— 1994年 ノースリッジ Sylmar (EW)
 — 1995年 兵庫県南部 寝台 (H2), 鷹取 (NS)
 — 1999年 台湾集集 TCU052 (NS)
 — 2003年 十勝沖 HKD086直別 (EW)
 — 2004年 新潟県中越 川口町 (EW), NIG019小千谷 (EW)
 — 2007年 新潟県中越沖 NIG018柏崎 (NS)
 — 2008年 岩手・宮城内陸 AKTH04東成瀬 (EW)
 — 2010年 チリ・マウレ CCSP (EW)
 — 2011年 ニュージーランド・クライストチャーチ REHS (S88E)
 — 2011年 東北地方太平洋沖 MYG004築館 (NS)

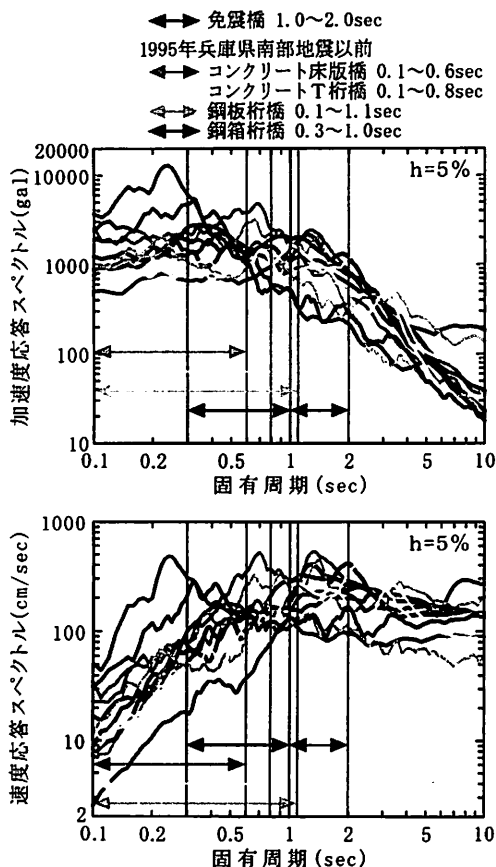


図-3 応答スペクトルと道路橋の固有周期

表-1 対象とした構造系

構 造	RC 橋脚	鋼製橋脚	
		非充填	充 填
骨 格	バイリニア		
2次剛性比	0.0	0.2	0.05
履 歴 則	剛性低下型の 最大点指向	移動硬化則	

東北地方太平洋沖地震の地震動特性も踏まえて、最大応答塑性率と累積塑性変形倍率とした。

本報告は、後述する7056ケースの解析結果全ての分析が完了しているわけではなく、あくまでも、速報であることをお断りしておく。

2. 対象とした地震と地震動および構造系

図-1は、対象とした地震とそのマグニチュード M_w を整理したものである。10地震で観測された強震記録の水平成分の中から、SI値が50以上となる強震記録を49波形選出した^{1)~8)}。図-2は、選出した強

震記録のうち、耐震設計上の地盤種別が明らかになっている44波形のSI値を整理したものである。耐震設計上の地盤種別が不明な5波形は何れも、2011年東北地方太平洋沖地震の際に気象庁の観測地点で記録されたものである。

図-3は、10地震の中から各地震においてSI値が最大となる波形の地震応答スペクトルと道路橋の固有周期帯域を比較したものである。1995年兵庫県南部地震以後は、積層ゴム系支承を用いた地震時水平力分散構造が数多く用いられてきているため、その固有周期は周期1.0~2.0秒とした。コンクリート床版橋、コンクリートT桁橋、鋼板桁橋、鋼箱桁橋は、1995年兵庫県南部地震以前の支承条件とし径間長とRC橋脚の高さを様々に変化させて求めた値であり、固有周期の頻度は無視して、その最大値と最小値の範囲を示しているが、基本的に、規模が小さい道路橋が短周期域に存在している。

対象とした構造系は、表-1に示すように、骨格曲線をバイリニアで表した1自由度の非線形せん断振動系である。履歴則は、RC橋脚が剛性低下型の最大点指向 (Takeda型)、鋼製橋脚はともに移動硬化則とした。2次剛性比は、道路橋示方書を参考に、RC橋脚が0.0、コンクリートを充填しない鋼製橋脚が0.2、コンクリートを充填した鋼製橋脚が0.05とした。初期剛性 (降伏剛性) と質量点から定まる固有周期 (降伏固有周期) は、0.25秒から2.0秒間を0.25秒ピッチとした8種類、降伏耐力 (降伏震度) は0.2から1.0間を0.2ピッチとした6種類である。これに骨格曲線と履歴則の違い3種類を考慮すると144ケースの構造系を対象としたことになる。49波形を入力地震動とした非線形動的解析のケース数は7056ケースとなる。粘性減衰は、剛性比例型とし、降伏固有周期でRC橋脚が2%、鋼製橋脚が1%とした。

3. 応答評価指標

道路橋の耐震設計では、最大応答値や最大残留変形 (要求性能) を耐震設計上の許容値 (保有性能) と比較する形で耐震設計が行われてきた。唯一、鋼材系の制震ディバイスを用いた場合に、累積値に対する照査が行われてきているだけであつた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録にみられるように、主要動が連続して作用する場合には累積値に対する照査⁹⁾が必要となる場合もある。本報告では、式(3-1)と式(3-2)に示す、最大応答塑性率 $\mu_{\max}$ と累積塑性変形倍率 η の2つの指標に着目した。

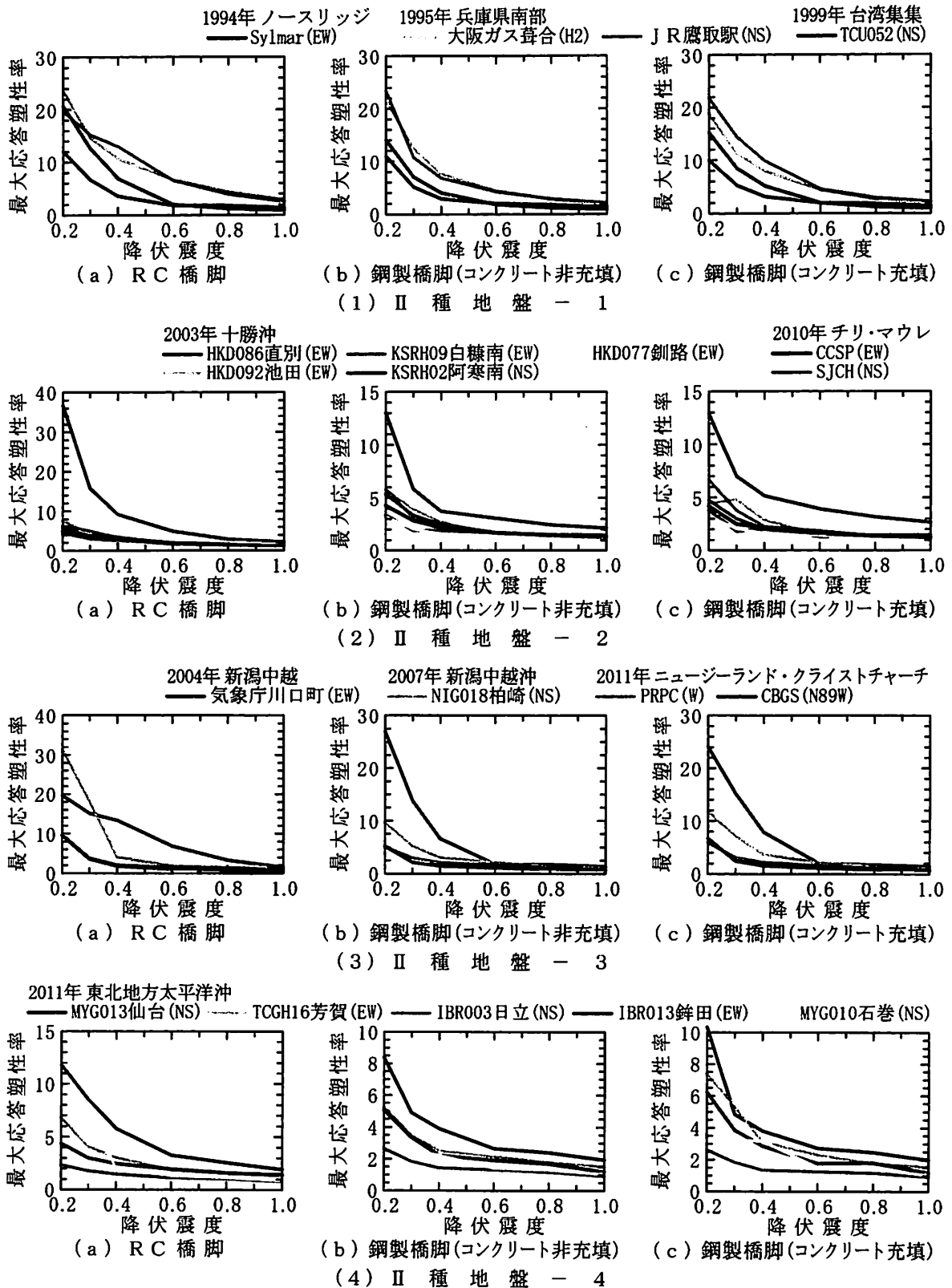


図-4 降伏固有周期 0.75 秒の構造系に II 種地盤上の強震記録を作用させた時の最大応答塑性率と降伏耐力の関係

$$\mu_{\max} = |\delta|_{\max} / \delta_y \quad (3-1)$$

ここに,

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^{n_+} |\Delta \delta_{p,i}^+| + \sum_{j=1}^{n_-} |\Delta \delta_{p,j}^-| \right) / \delta_y \quad (3-2)$$

$|\delta|_{\max}$: 絶対最大応答変位

δ_y : 降伏変位

$\Delta \delta_{p,i}^+$: i 番目の正方向の塑性変形量

$\Delta\delta_{p,j}^-$: j 番目の負方向の塑性変形量

n^+, n^- : それぞれ正方向と負方向の塑性変形が生じる振幅の総数

4. 非線形地震応答特性

(1) 降伏耐力と最大応答塑性率

図-4は、降伏固有周期0.75秒の橋脚を対象とし、II種地盤上で観測された強震記録に対する最大応答塑性率が、降伏耐力によってどう変化するかを示したものである。降伏固有周期0.75秒に着目したのは、図-3に示すように、加速度応答スペクトルの強度がほぼ最大となる周期帯に含まれ、地震応答が非線形域に達した場合には、固有周期は長くなり、加速度応答スペクトルの強度が低下し始める周期帯域に至る可能性が高い固有周期と判断したからである。II種地盤に着目したのは、ここで対象とした強震記録49波形の約半数に近い20波形が、II種地盤上で観測された地震動であることと、1995年兵庫県南部地震で激甚な被害を生じた地域の記録の1つであるJR鷹取駅の記録がやはりII種地盤だからである。図は、20波形全ての記録を表示するために、4つに分けて表示しているが、地震のタイプ（内陸地殻内、プレート境界等）が近いものを一緒に示してある。

図より何れも降伏耐力が増加するにつれて最大応答塑性率も小さくなっていることがわかる。降伏耐力に対する最大応答塑性率の変化の様子に着目すると、降伏震度0.2から0.4にかけての低下は急激な低下となっているが、降伏震度0.4から1.0にかけての低下は緩やかであり、現行の道路橋示方書V耐震設計編に規定される慣性力の下限值0.4（降伏震度）は、橋脚の耐震性能の向上に実効ある規定となっていることがわかる。

RC橋脚、充填・非充填の両鋼製橋脚とも、2003年十勝沖地震での直別と、2004年新潟県中越地震での川口町、2007年新潟県中越沖地震での柏崎で観測された強震記録を除けば、1995年兵庫県南部地震で観測されたJR鷹取駅記録や大阪ガス葺合記録によって大きな最大応答塑性率が生じていることがわかる。

2003年十勝沖地震の直別と、2007年新潟県中越沖地震の柏崎の強震記録は、降伏震度0.2と0.3のRC橋脚で1995年兵庫県南部地震の強震記録よりも大きな最大応答塑性率となっている。

2004年新潟県中越地震の川口町の記録は、RC橋脚では1995年兵庫県南部地震の強震記録と同程度の最大応答塑性率となっている。充填・非充填の鋼製橋脚に関しては、降伏震度0.2から0.4までは、

1995年兵庫県南部地震の強震記録と同程度かわずかに大きい最大応答塑性率が得られているが、降伏震度0.4から1.0では、1995年兵庫県南部地震の強震記録よりも最大応答塑性率が小さくなっている。

2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録は、全てのケースで、1995年兵庫県南部地震の強震記録よりも最大応答塑性率が小さくなっている。

(2) 降伏固有周期と最大応答塑性率

図-5は、降伏震度0.4の橋脚を対象とし、II種地盤上で観測された強震記録に対する最大応答塑性率が、降伏固有周期によってどう変化するかを示したものである。

2004年十勝沖地震の直別で観測された強震記録は、RC橋脚に対して、1995年兵庫県南部地震の大阪ガス葺合で観測された強震記録と同程度の最大応答塑性率となっている。2004年新潟県中越地震の川口町で観測された強震記録は、RC橋脚では1995年兵庫県南部地震のJR鷹取駅で観測された強震記録と同程度の最大応答塑性率を生じている。しかし、充填・非充填の鋼製橋脚は、2004年新潟県中越地震の川口町で観測された強震記録の方が、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録よりも大きな最大応答塑性率となっている。

2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震記録は、降伏固有周期0.2秒の充填・非充填の鋼製橋脚において、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録よりも大きな最大応答塑性率となっている。

(3) 気象庁で観測された2011年東北地方太平洋沖地震と1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録の比較

前述したように、気象庁で公開されている強震記録は、観測地点の地盤情報が不明なので、耐震設計上の地盤種別に分類することができなかった。ここでは、図-6に示すように、気象庁で観測された強震記録5波形と、1995年兵庫県南部地震の際に各地盤種別上で観測された強震記録を比較した。I種地盤上の強震記録は神戸海洋気象台、II種地盤上の強震記録はJR鷹取駅と大阪ガス葺合、III種地盤上の強震記録は東神戸大橋と神戸ポートアイランドで観測されたものである。

図より、気象庁の観測地点の地盤種別が不明なので、詳細な比較はしないが、1995年兵庫県南部地震で観測されたI種地盤上の強震記録とIII種地盤上の強震記録は、気象庁で観測された2011年東北地方太

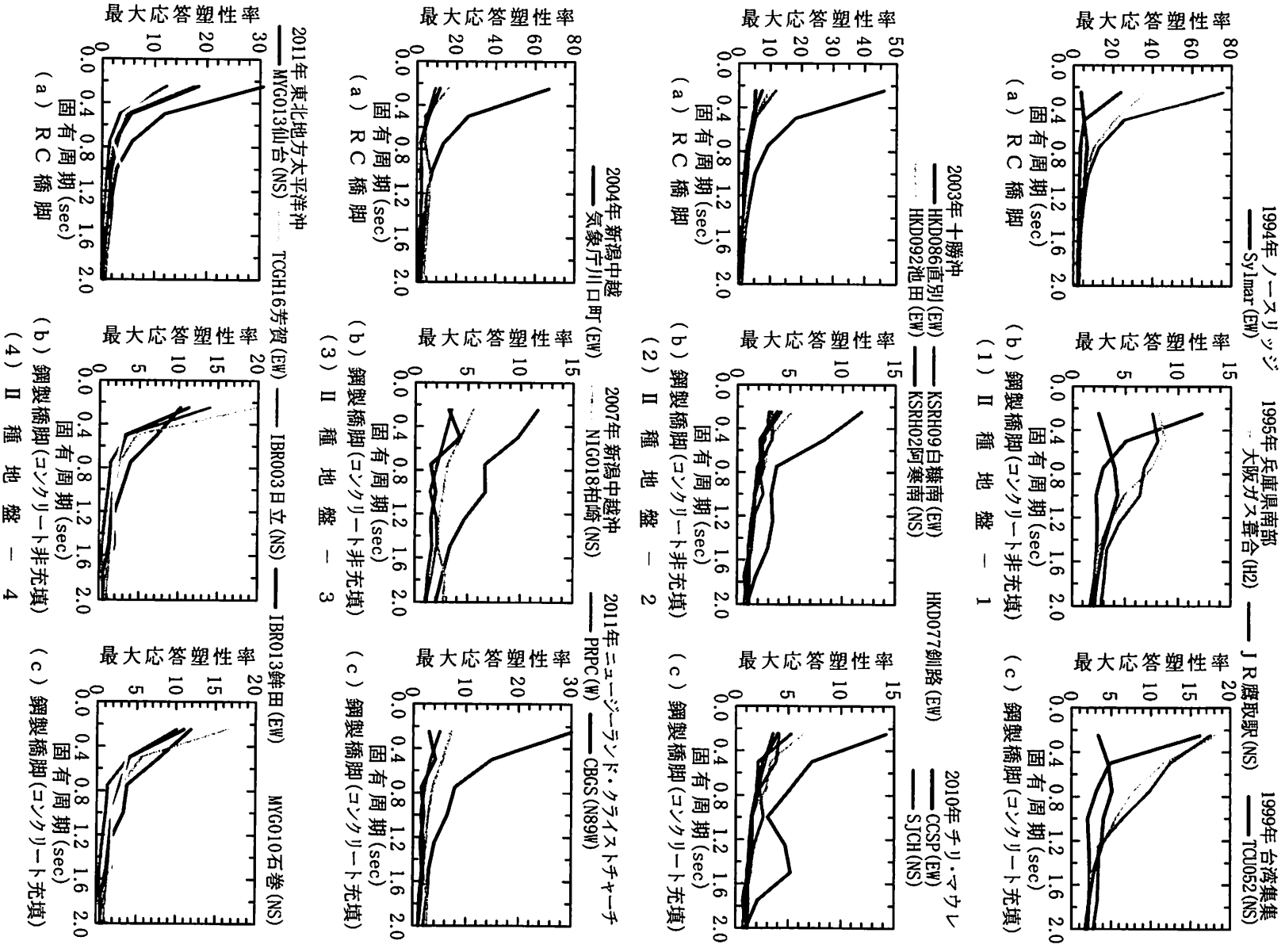


図-5 降伏震度0.4の構造系にⅡ種地盤上の強震記録を作用させた時の最大応答塑性率と降伏固有周期

平洋沖地震の強震記録よりも最大応答塑性率が小さくなる場合があることがわかる。図-6を意味あるものにするためには、今後、気象庁の観測地点の地震調査を行う必要がある。

(4) 降伏耐力と累積塑性変形倍率

図-7は、降伏固有周期0.75秒の橋脚の降伏震度と累積塑性変形倍率の関係を整理したものである。累積塑性変形倍率は、地震動の継続時間によって得ら

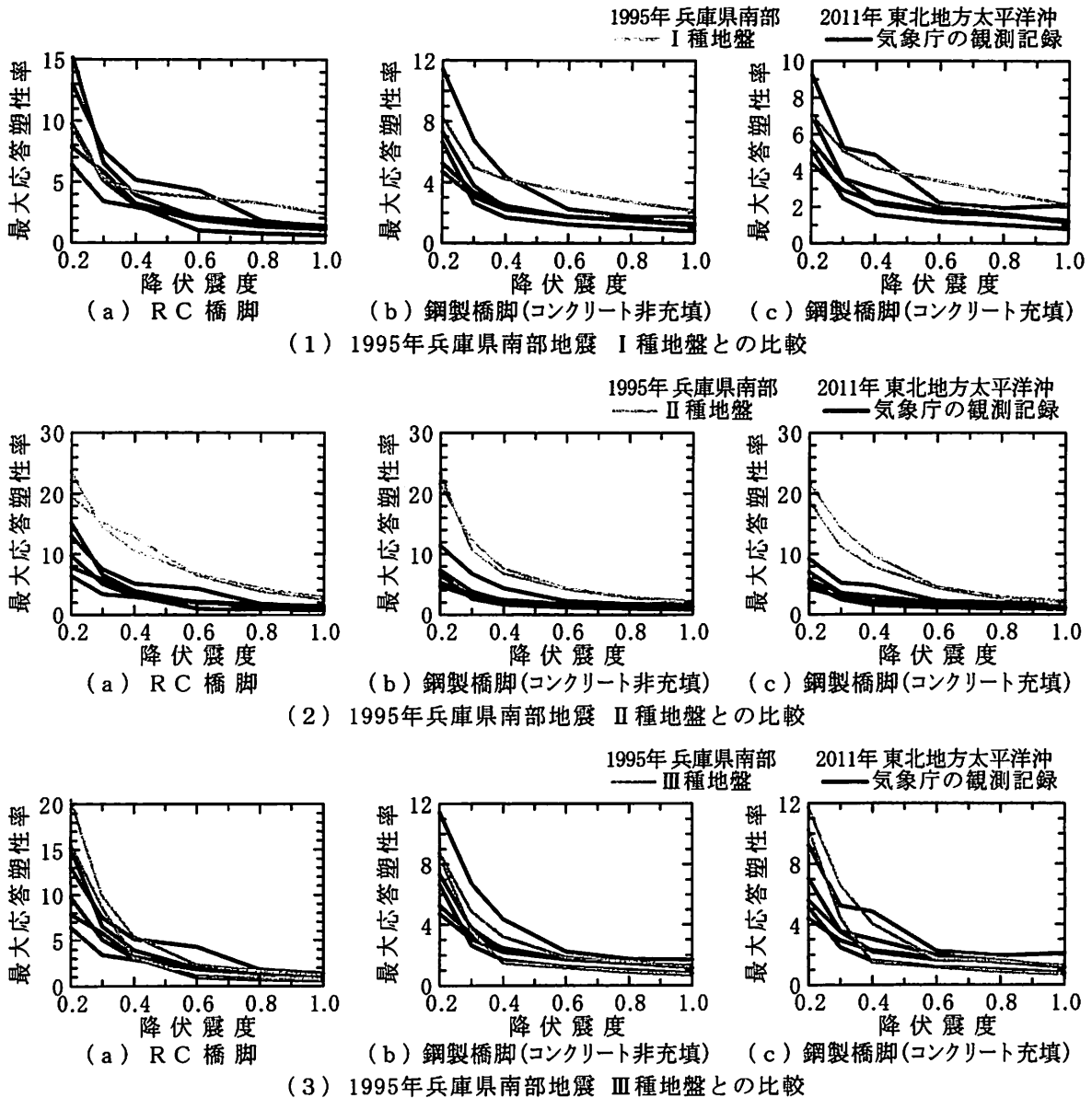


図-6 2011年東北地方太平洋沖地震の際に気象庁で観測された強震記録と1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録によって生じる最大応答塑性率の比較(降伏固有周期0.75秒)

れる値が異なってくるので、継続時間が短い内陸地殻内地震と継続時間が長いプレート境界型地震を比較した。内陸地殻内地震は1995年兵庫県南部地震、プレート境界型地震は2003年十勝沖地震、2010年チリ・マウレ地震、2011年東北地方太平洋沖地震である。

I種地盤上の強震記録に着目すると、RC橋脚は降伏震度0.2から0.6、充填・非充填鋼製橋脚は降伏震度0.2から0.5までは、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された強震記録よりも2011年東北地方太平洋沖地震の小川で観測された強震記録の方が累積塑性変形倍率が大いことがわかる。しかし、降伏震度がRC橋脚は0.6、充填・非充填鋼製橋脚では0.5より大きくなると、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された強震記録の方が累積塑

性変形倍率が2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震記録よりも大きくなっている。これは、2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震記録の橋に与える力が1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録よりも小さいため、橋の降伏耐力が大きい場合には、橋に大きな塑性変形を与えることができないからである。

II種地盤上の強震記録に着目すると、2003年十勝沖地震の直別で観測された強震記録は、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録よりも大きな累積塑性変形倍率となっている。

2010年チリ・マウレ地震の観測地点CCSPの強震記録による累積塑性変形倍率は、RC橋脚では、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録よりも小さい。しかし、充填・非充填鋼製橋脚は、降伏震

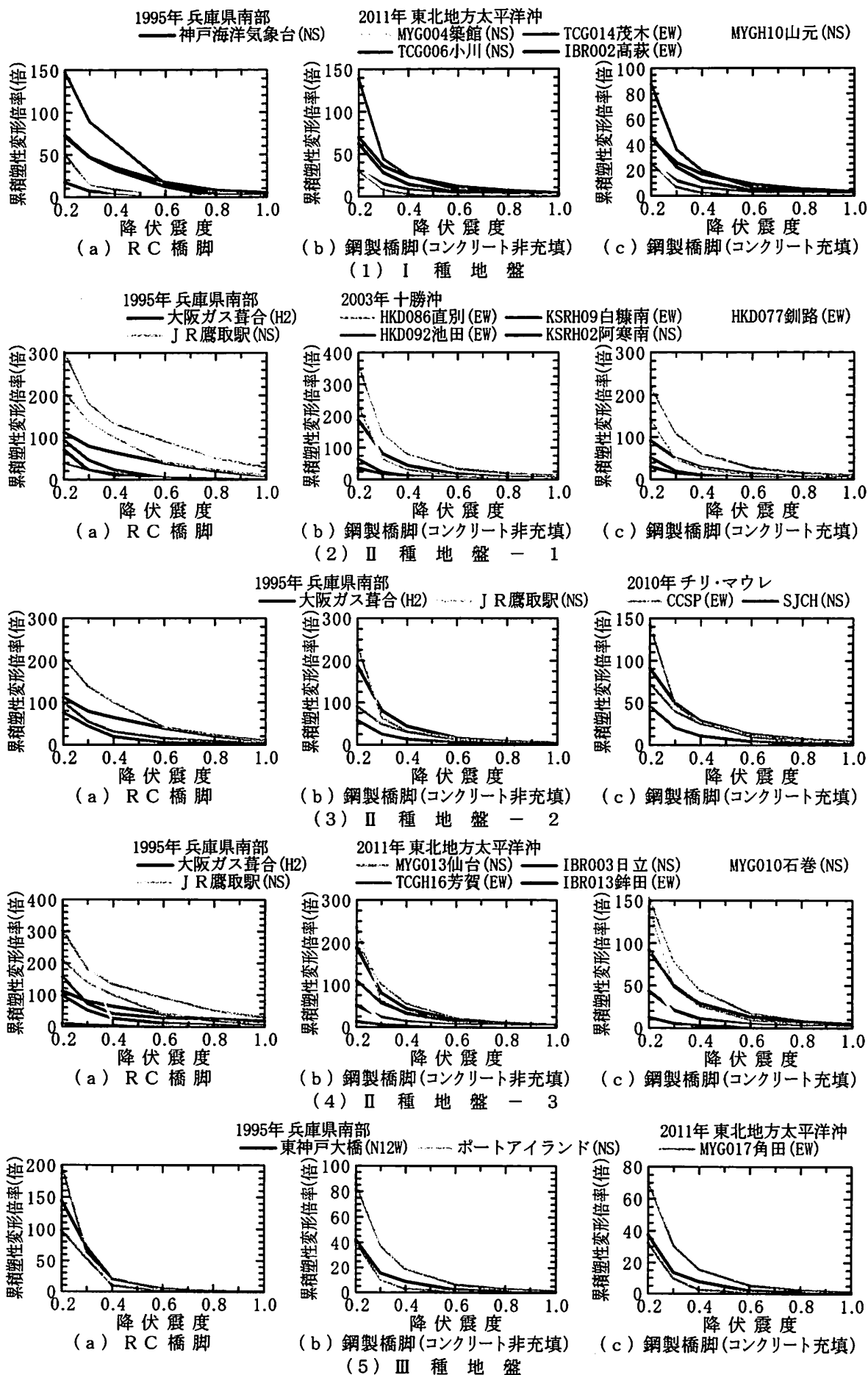


図-7 内陸地殻内地震とプレート境界型地震の強震記録の累積塑性変形倍率の比較 (降伏固有周期 0.75 秒)

度が0.6から1.0では、2010年チリ・マウレ地震の観測地点CCSPの強震記録の累積塑性変形倍率が、1995年兵庫県南部地震のそれに近づいてきている。

2011年東北地方太平洋沖地震の場合には、構造によって傾向が異なっている。RC橋脚では仙台と、降伏震度0.2と0.3において石巻、降伏震度0.8と1.0で芳賀で観測された強震記録が、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録よりも大きな累積塑性変形倍率となっている。

コンクリート非充填の鋼製橋脚は仙台と降伏震度0.6から1.0の芳賀で、コンクリート充填鋼製橋脚では仙台と降伏震度0.3から1.0の芳賀が、1995年兵庫県南部地震と同程度かもしくは大きな累積塑性変形倍率が得られている。

III種地盤では、RC橋脚において、降伏震度0.3から1.0で1995年兵庫県南部地震の東神戸大橋で観測された強震記録と2011年東北地方太平洋沖地震の角田で観測された強震記録が同程度の累積塑性変形倍率となっている。充填・非充填鋼製橋脚では、2011年東北地方太平洋沖地震の角田で観測された強震記録の方が、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録よりも大きな累積塑性変形倍率となっている。

内陸地殻内地震である1995年兵庫県南部地震とプレート境界型地震である2003年十勝沖地震、2010年チリ・マウレ地震、2011年東北地方太平洋沖地震の累積塑性変形倍率を比較したが、地震動の継続時間が長い強震記録イコール累積塑性変形倍率が大きいという傾向にはないことがわかる。これは、橋を非線形域にまで至らせるだけのパワーが強震記録に無いと、累積塑性変形倍率も大きくならないからである。

5. まとめ

1994年ノースリッジ地震から2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震記録49波形を入力地震動として、144種類の1自由度非線形せん断振動系の非線形動的解析を行い、最大応答塑性率と累積塑性変形倍率が強震記録によってどう変化するかを検討した。検討は、まだ途中であるが、本報告に示した範囲で得られた事項を以下に示す。

- 1) 降伏耐力に対する最大応答塑性率の変化の様子に着目すると、降伏震度0.2から0.4にかけての低下は急激な低下となっているが、降伏震度0.4から1.0にかけての低下は緩やかであり、現行の道路橋示方書V耐震設計編に規定される慣性力

の下限值0.4は、橋脚の耐震性能の向上に実効ある規定となっていると考えられた。

- 2) 耐震設計上の地盤種別がII種地盤に建設されるRC橋脚と充填・非充填の両鋼製橋脚とも、ほとんどのケースで、1995年兵庫県南部地震で観測されたJR鷹取駅記録や大阪ガス葺合記録によって大きな最大応答塑性率が生じていることが確認された。
- 3) 内陸地殻内地震である1995年兵庫県南部地震とプレート境界型地震である2003年十勝沖地震、2010年チリ・マウレ地震、2011年東北地方太平洋沖地震の累積塑性変形倍率を比較したが、地震動の継続時間が長い強震記録だけでなく、橋を非線形域にまで至らせるだけの地震動強度が強震記録に無いと、累積塑性変形倍率も大きくならないことが確認された。

参考文献

- 1) (財)日本気象協会：気象庁87型電磁式強震計波形データ
- 2) CSMIP; PROCESSED CSMIP STRONG-MOTION RECORDS FROM THE NORTHRIDGE, CALIFORNIA EARTHQUAKE OF JANUARY 17 1994; RELEASE No.1, Report No. OSMS94-06B, February 7, 1994.
- 3) NKAMURA, Yutaka : “Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake”, JR Earthquake Information No.23c, Feb.1995, Railway Technical Research Institute
- 4) W.h.k.Lee, T.C.Shin, K.W.Kuo, K.C.Chen and C.F.Wu : CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake: Processed Acceleration Files on CD-ROM, April 3, 2001.
- 5) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 6) <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/index.htm>
- 7) <http://ssn.dgf.uchile.cl/>
- 8) <http://www.geonet.org.nz/index.html>
- 9) 日本建築学会：建築物の耐震性能評価手法の現状と課題、一限界耐力計算・エネルギー法・時刻歴応答解析一、pp.296-305, 2009.