

# 構造物応答の非対称性と 地震動特性の関係

坂井 公俊<sup>1</sup>・室野 剛隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ksakai@rtri.or.jp

<sup>2</sup> (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

構造物の地震時損傷程度は、最大応答値や繰り返し回数よりも、正側負側最大応答値の平均を用いることで精度よく評価可能であるといった報告がされている。そこで本検討では、地震動特性の違いと構造物応答の非対称性の関係について、観測記録に基づいた検討を行った。まず、片側所要降伏震度スペクトル、両側所要降伏震度スペクトルといった構造物応答の非対称性を簡便に表す指標の定義を行い、多数の記録に対して両側震度-片側震度の比を算定した。その結果、構造物の周期が長いほど地震時に片振れの傾向が強いこと、内陸活断層、海溝型といった地震発生種別による両振れ、片振れの傾向は見られないこと、震源に近づくにつれて構造物は片振れの傾向を強く示すことが分かった。

**Key Words :** demand one-side yield seismic coefficient spectrum, demand both-sides yield seismic coefficient spectrum, characteristics of earthquake ground motion, structural response

## 1. はじめに

地震時における構造物の損傷程度は、地震動の振幅特性のみならず、経時特性にも大きな影響を受けると考えられる。例えばRC柱については、軸方向鉄筋座屈後は、荷重が繰り返し作用することによって耐力が低下する。この耐力低下の程度は、荷重の繰り返し回数に依存することが実験からも明らかになっている<sup>1)</sup>。よって、例えば最大応答値が同じような地震動であったとしても、継続時間が長く繰り返し回数が多いような地震動が作用した場合には、構造物の損傷がより進行するものと考えられる。こういった考え方にに基づき、道路橋の耐震設計には内陸活断層、海溝型といった地震発生種別に応じた構造物の限界値の使い分けが行われている<sup>2)</sup>。また、異なる位相特性を持った複数の地震動を用いたRC柱の振動実験から、構造物の崩壊は、地震時の最大応答値や応答の繰り返し回数よりも、正側と負側の最大応答値の平均値を用いることで精度よく評価できる可能性がある、といった報告もある<sup>3)</sup>。以上からも、構造物の損傷程度が地震動の経時特性と密接な関係を持っていることは明白であり、地震動の特性と構造物の応答特性との関係を把握しておくこと

は、構造物の地震時安全性を正確に評価する際には非常に重要であると考えられる。

地震動の継続時間、経時特性は主に地震規模、震源距離、サイトの地盤条件によって変化すると考えられる。つまり同じ地盤条件を持ったサイトにおいては、震源距離が大きくなるほど地震動の継続時間は長くなり、繰り返し回数が多くなる傾向がある。さらに、震源が近い場合、地震動はパルス的な傾向を示すために、構造物の応答変位が片側に偏ると考えられ、震源が遠ざかるほど、構造物は正負両側に均等になると考えられる。そのため構造物の損傷が正負両側最大応答の平均値に支配されていると考えられる場合には、たとえ最大応答値が等しい場合にも、遠方の地震を受けた場合の方が構造物の損傷程度がより大きくなる可能性があると考えられる。また、内陸活断層、海溝型といった地震発生種別の違いによっても、構造物の応答特性が変化する可能性が考えられる。

しかしながら地震動特性の違いによる構造物応答の非対称性について検討された例はこれまでほとんどない。そこで本検討では地震動特性（地震発生種別、震源距離、地震規模）の違いによって構造物の応答値（主に片側最大応答値と両側平均応答値）が

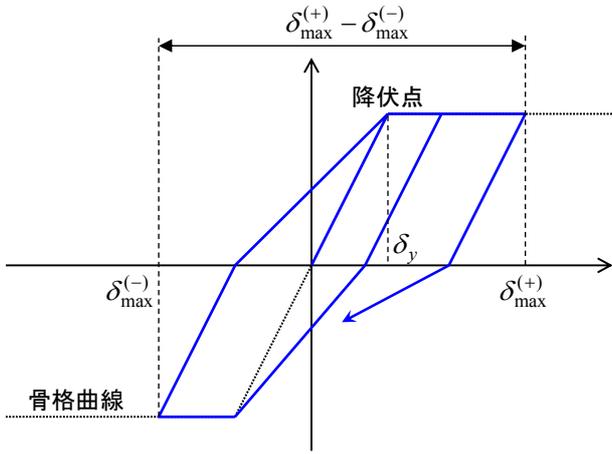


図-1 塑性率の定義

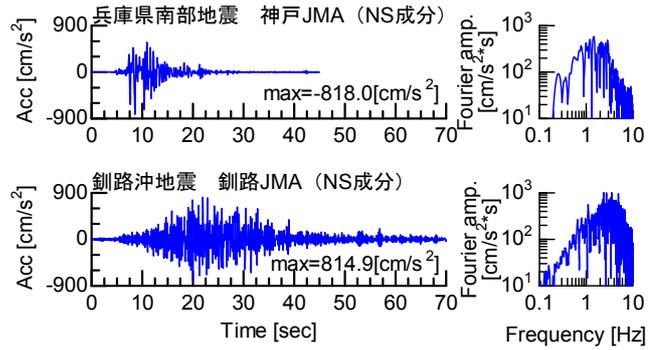
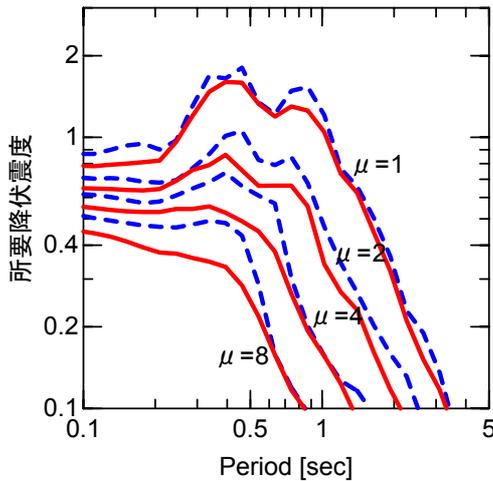
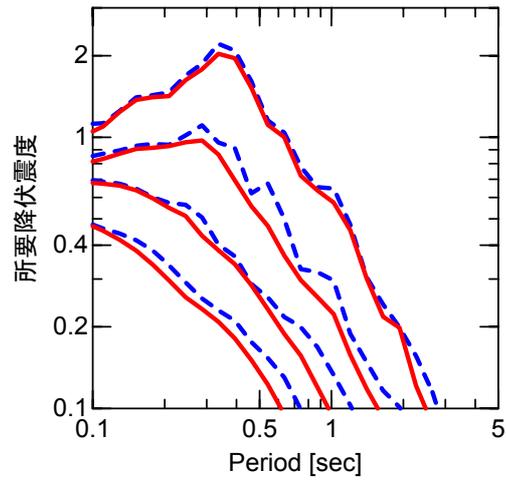


図-2 検討に用いる観測記録



(a) 兵庫県南部地震 神戸 JMA



(b) 釧路沖地震 釧路 JMA

図-3 片側所要降伏震度スペクトルと両側所要降伏震度スペクトル

どのように変化するかについて観測記録に基づいた検討を行う。

## 2. 両側所要降伏震度スペクトル

### (1) 定義

鉄道構造物の耐震設計<sup>4)</sup>において、地震時の構造物応答値を算定する手法の一つとして所要降伏震度スペクトルが用いられることがある。これは非線形応答スペクトル<sup>5)</sup>の一種であり、構造物の応答塑性率ごとに固有周期と降伏震度との関係を図化したものである<sup>6)</sup>。この所要降伏震度スペクトルを用いることで、ある周期、降伏震度を有する構造物の応答塑性率を簡便に求めることが可能である。ここで言う塑性率は最大応答変位を降伏変位で除すことにより求められ、式(1)で定義される。本検討ではこれを「片側塑性率」と呼ぶ。この片側塑性率を用いて得られた所要降伏震度スペクトルを「片側所要降

伏震度スペクトル」と呼ぶこととする。

$$\mu^{\max} = \frac{\max(|\delta_{\max}^{(+)}|, |\delta_{\max}^{(-)}|)}{\delta_y} \quad (1)$$

ここで  $\mu^{\max}$  は片側塑性率、 $\delta_{\max}^{(+)}$ 、 $\delta_{\max}^{(-)}$  はそれぞれ図-1に示す地震時の正側、負側応答最大値、 $\delta_y$  は降伏変位である。

これに対し、構造物の損傷程度と関係があるとされている正側負側最大応答の平均値を式(2)のように定義し、「両側塑性率」と呼ぶ。

$$\mu^{ave} = \frac{|\delta_{\max}^{(+)}| + |\delta_{\max}^{(-)}|}{2 \times \delta_y} \quad (2)$$

この両側塑性率  $\mu^{ave}$  を用いて得られる所要降伏震度スペクトルを「両側所要降伏震度スペクトル」と呼ぶこととする。

つまり、片側所要降伏震度スペクトルは、ある周期を持った構造物が、ある地震時にある応答塑性率

を示すために必要な降伏震度をスペクトル表示したものであり、両側所要降伏震度スペクトルは、ある地震時に構造物が正側負側の応答塑性率の平均値を示すために必要な降伏震度をスペクトル表示したものと云える。現在の構造物の設計には主に片側所要降伏震度スペクトルが用いられているが、構造物の損傷を地震時の正側負側応答の平均値で制御するような設計体系を用いた場合には、両側所要降伏震度スペクトルを適用することにより、従来とほぼ同様の手続きに従って、両側振幅を考慮した設計を行うことが可能となる。

## (2) 試計算

ここではサンプル地震動を用いて前節で定義した所要降伏震度スペクトルの試計算を実施する。入力地震動としては、1995年兵庫県南部地震における神戸JMA観測記録（NS成分）と2004年釧路沖地震における釧路JMA観測記録（NS成分）を用いる（図-2）。これらの地震波はいずれも $800\text{cm/s}^2$ 以上と比較的大きな加速度が観測された記録であるが、その経時特性は大きく異なっている。兵庫県南部地震における観測記録は主要動が10秒程度で終了しているが、釧路沖地震では30秒以上も継続している。構造物は1自由度系で表現し、骨格はバイリニアモデル、履歴はクラフモデル<sup>7)</sup>とする。第1勾配に対する第2勾配の比は0.05、除荷時の剛性低下指数は0.2とし、基本的には鉄道構造物の設計に用いる所要降伏震度スペクトル作成条件と同じものを用いている<sup>4)</sup>。ただし減衰定数は周期に依存させず一定の0.05を用いた。以上の解析条件を用いて得られる片側、両側所要降伏震度スペクトルを図-3に示す。

図中の点線が片側所要降伏震度スペクトル、つまり現在の設計において一般的に用いられているスペクトル、実線が両側所要降伏震度スペクトルである。もし仮に構造物が正負均等に応答した場合、片側所要震度と両側所要震度は一致する。ところが図-3の結果を見ると、両側所要降伏震度スペクトルはほぼ全ての周期において片側所要降伏震度スペクトルを下回っている。これは地震時に構造物は正負均等に振動するのではなく、どちらか一方に大きく振動していることを意味している。よって構造物の損傷を地震時の正負両側応答で規定出来るとした場合<sup>3)</sup>には、これまでの構造物と比較して、同一周期、靱性率を持った構造物に付与すべき降伏震度が小さくなることを示している。

図-4には、構造物の周期、塑性率を固定した場合の両側所要震度と片側所要震度の比（ $\mu = 4$ の場合）を示してある。震度の比が1.0である場合には、正側と負側の最大応答値が一致していることを意味しており、1.0から小さくなるにつれ、どちらか一方に大きく振動していることを意味している。この結果より、震度比は0.6~1.0程度の値を示すこと、周期によって大きくばらつくことが分かる。本節に

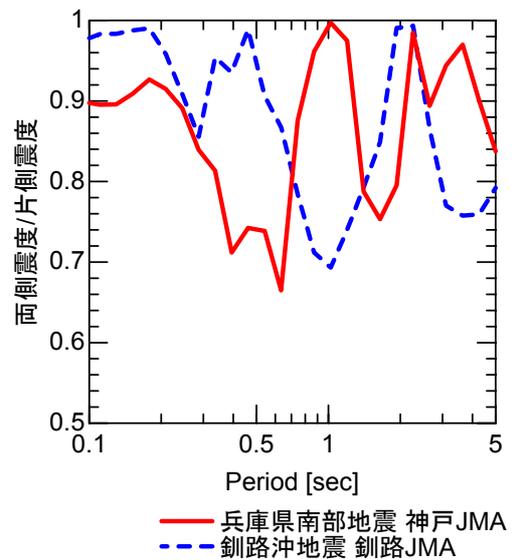


図-4 両側所要震度-片側所要震度の比  
( $\mu = 4$ の場合)

おいては、釧路沖地震と兵庫県南部地震といった経時特性の異なる代表的な2記録において検討を行っている。一般的に継続時間の長い地震動時に、構造物は正負均等に振動する、つまり震度比が1.0に近くなることが予想されるが、ここで検討した2記録の結果からは、周期によるばらつきが大きく、経時特性と震度比の関係を見出すことは困難である。ただしここでは限られた2記録のみの検討であるため、次節以降では、多数の記録を用いて両側所要震度と片側所要震度の比を算出し、地震発生種別や震源距離に対して震度比がどのように変化するかについて検討を行う。

## 3. 両側所要降伏震度-片側所要降伏震度の比

### (1) 比較的大きな加速度レベルにおける検討

本節では、これまで観測された地震記録のうち比較的大きな加速度レベルの記録に対して図-4のような両側所要降伏震度と片側所要降伏震度の比を算出する。ここで用いる記録としては、筆者らが近年の観測記録をもとにレベル2地震動の見直しを行った際に使用したものであり、比較的大きな加速度が観測された記録を抽出した結果である（表1、表2）<sup>8)</sup>。また、内陸活断層による地震、海溝型地震といった地震発生種別による片振れ（一方のみに変形が進行）、両振れ（正負均等に変形）の違いについても確認するため、地震発生種別ごとに検討を行い、結果の比較を行う。

抽出された全記録に対して両側所要震度と片側所要震度の比を算出し、それらを地震発生種別ごと分類した結果を図-5に示す（ $\mu = 4$ の場合）。この結

表-1 本検討で用いた地震の一覧（内陸活断層による地震）

No.	地震名	発震日	Mj	Mw	記録数 (3.(1)で使用)	記録数 (3.(2)で使用)
1	兵庫県南部地震	1995. 01. 17	7.3	6.9	10	-
2	鳥取県西部地震	2000. 10. 06	7.3	6.8	34	880
3	新潟県中越地震	2004. 10. 23	6.8	6.7	22	1144
4	新潟県中越地震(余震)	2004. 10. 23	6.5	6.4	24	1056
5	福岡県西方沖地震	2005. 03. 20	7.0	6.7	30	1060
6	能登半島地震	2007. 03. 25	6.9	6.7	10	1336
7	新潟県中越沖地震	2007. 07. 16	6.8	6.6	22	1220
計					152	6696

表-2 本検討で用いた地震の一覧（海溝型地震）

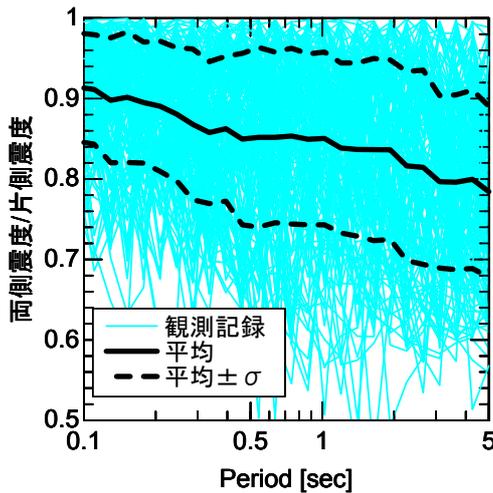
No.	地震名	発震日	Mj	Mw	記録数 (3.(1)で使用)	記録数 (3.(2)で使用)
1	宮城県沖地震（1978年）	1978. 06. 12	7.4	7.6	2	-
2	北海道南西沖地震	1993. 07. 12	7.8	7.6	2	-
3	北海道東方沖地震	1994. 10. 04	8.2	8.2	2	-
4	芸予地震	2001. 03. 24	6.7	6.8	20	-
5	三陸南地震	2003. 05. 26	7.1	7.0	22	1528
6	十勝沖地震（本震）	2003. 09. 26	8.0	8.0	22	1196
7	十勝沖地震（余震）	2003. 09. 26	7.0	7.3	12	1064
8	紀伊半島南東沖地震（前震）	2004. 09. 05	7.1	7.3	8	1348
9	紀伊半島南東沖地震（本震）	2004. 09. 05	7.4	7.5	10	1444
10	釧路沖地震（本震）	2004. 11. 29	7.1	7.0	16	876
11	釧路沖地震（余震）	2004. 12. 06	6.9	6.8	14	-
12	宮城県沖地震（2005年）	2005. 08. 16	7.2	7.1	20	1564
13	茨城県東方沖地震	2005. 10. 19	6.3	6.3	4	-
計					154	9020

果を見ると、震度比はほぼ0.5～1.0の範囲にあるが、記録ごとのばらつきが非常に大きく、全体としての傾向は見て取れない。そこで各周期ごとに全記録の平均と標準偏差を算出し、その結果を図-5中に太線で示す。これより、両側一片側震度比は、周期が長くなるほど小さくなること、各周期におけるバラツキは周期帯によらずほぼ一定であることが分かる。これより、短周期構造物は地震時には正負ほぼ均等に振動するのに対し、周期の長い構造物ほどある一方向にのみ振動する傾向があると言える。また、内陸活断層による地震、海溝型地震といった地震種別による応答特性の差異を比較するために、図-6に各種別ごとの平均とばらつきを重ねて描く。両者の結果はほぼ一致しており、内陸活断層、海溝といった地震種別によって構造物の振動方向に傾向は見られないことが分かる。

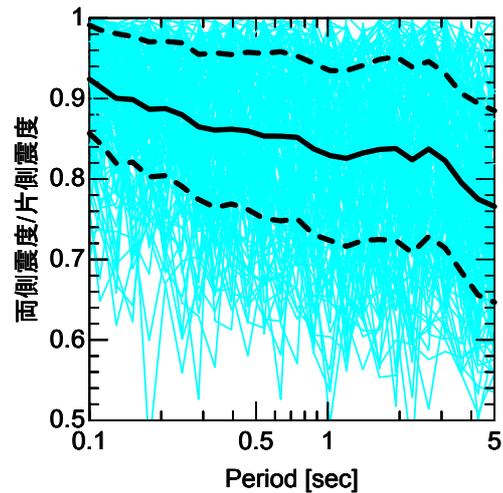
以上の検討はいずれも構造物の応答塑性率が4の場合に限っているが、塑性率が変化することにより、構造物の振動特性が変化するかについても検討を行う。内陸活断層による地震記録において、塑性率を変化させた場合の両側所要震度一片側所要震度比を算定し、各塑性率ごとの震度比の平均を図-7に示

す。これより、構造物が弾性応答をする場合（ $\mu=1$ ）には、周期帯によらず正負ほぼ均等に振動するが、構造物が塑性化する（ $\mu>1$ ）と、どちらか一方に振動が偏る傾向がある。これは構造物の履歴特性によっても変化すると考えられ、今回設定した履歴モデルとは異なるような履歴を持った構造物については、別途検討を行う必要がある。また前述した内容であるが、周期が長い構造物ほど片振れ傾向が強いことが分かる。さらに塑性率2, 4, 8の結果はほぼ一致しており、構造物の塑性率によらず、構造物が塑性化した場合には構造物の片振れ（一方向のみに振動）、両振れ（正負両方向に均等に振動）といった傾向は一律に評価可能であることが分かる。

ここで図-6にあるように、内陸活断層、海溝といった地震発生種別による構造物の片振れ、両振れといった傾向が見られないことに対してももう少し考察を加える。兵庫県南部地震の構造物被害の主な要因は、周期1秒付近のパルス的な波であると考えられている<sup>9)</sup>。また、1944年の東南海地震において、東京周辺では10分以上も震動が継続した結果が報告されており<sup>10)</sup>、東海地震等の大規模な地震が発生した場合、距離の大きく離れた地域においては数分間に



(a) 内陸活断層による地震



(b) 海溝型地震

図-5 全記録を用いた両側-片側所要震度比 ( $\mu = 4$  の場合)

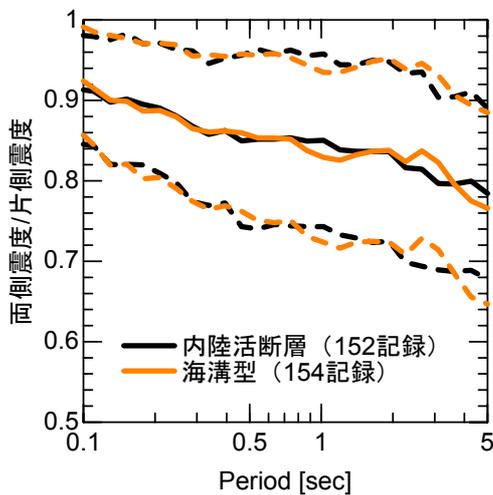


図-6 地震発生種別による比較  
( $\mu = 4$  の場合)

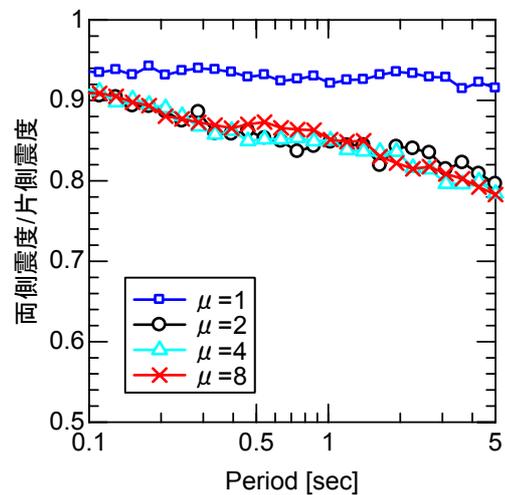


図-7 塑性率ごとの比較  
(内陸活断層による地震)

わたって震動が継続する可能性がある。また、表-1、表-2の地震動は、鉄道構造物におけるレベル2地震動を設定する際に用いた地震記録であり、ある想定地震（内陸活断層による地震：Mw=7.0，断層直上，海溝型地震：Mw=8.0，断層最短距離60km）に比較的近い規模の地震記録を収集したものである。しかしながらこのような大規模な地震が近傍で得られた例はほとんどなく，選択された地震記録はこれよりも規模が小さかったり，距離が離れている記録ばかりである。そのため，内陸活断層，海溝型といった分類を行っているものの，実際は両者ともに似たような地震規模，震源距離の地震記録において比較している可能性がある。そこで次節では，震源距離によって両側所要降伏震度と片側所要降伏震度の比がどのように変化するのか，という点について検討を行うこととする。

## (2) 震源距離の違いにおける比較

震源近傍から遠方までの多数の記録を用いて両側所要降伏震度-片側所要降伏震度の比を算出し比較することにより，震源距離の違いによって片振れ，両振れの関係がどのように変化するののかについて確認する。用いた記録数は表-1，表-2に示してある。これは前節で用いた地震と同様であるが，より震源から遠方の記録までを用いることとした。前節までの検討より，構造物が塑性応答する際には塑性率の違いによる両側-片側震度比に差はないことが分かっている。そこで，本節では塑性率4の場合に限った検討を行うこととした。また周期によって震度比が大きく変化することも分かっているため，ある周期ごとで区切って検討を行うこととした。今回は周期0.05-5.0秒の区間を対数軸上で4分割し，それぞれ

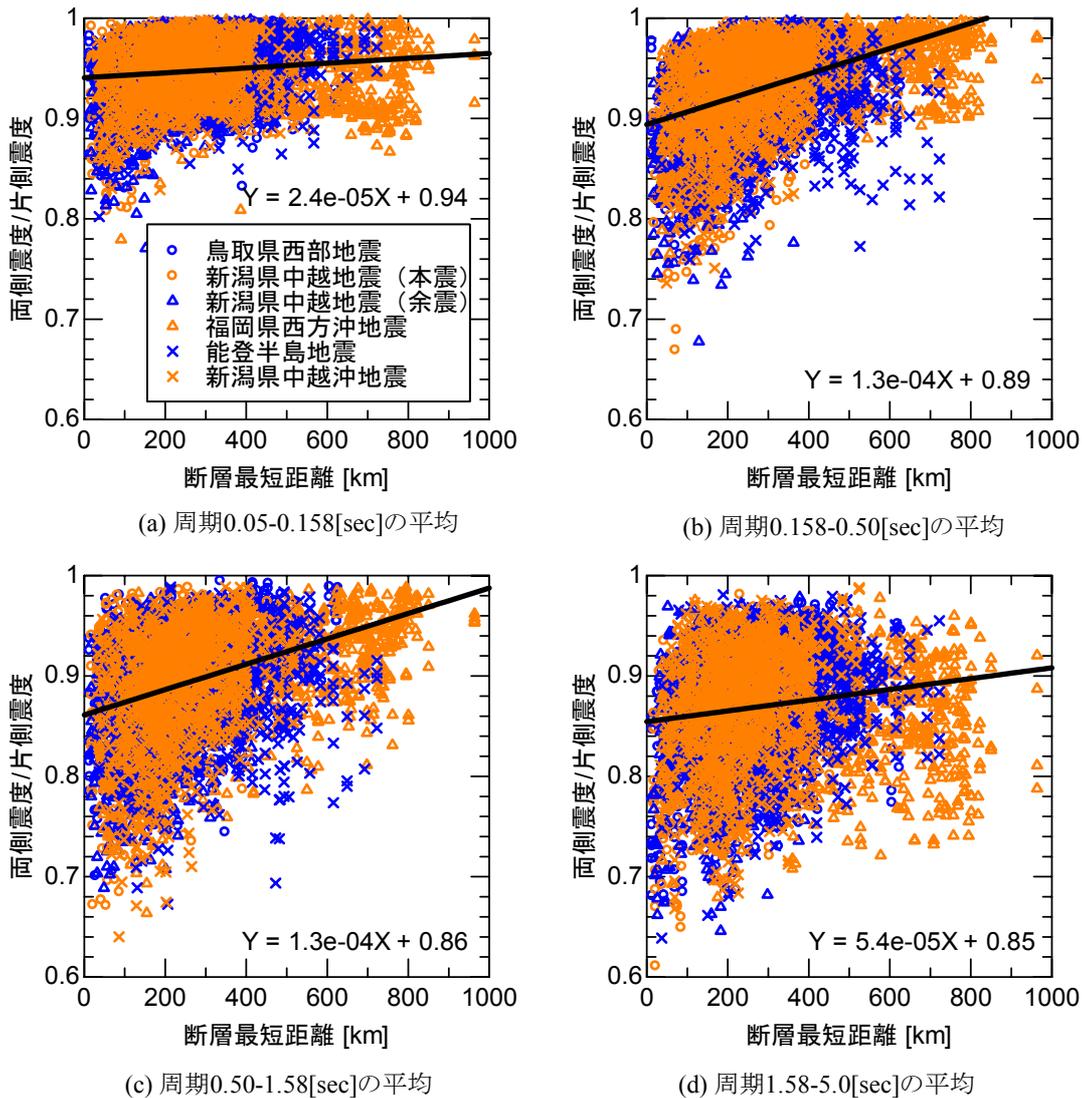


図-8 距離ごとの震度比 (内陸活断層による地震)

の区間での両側一片側震度比の平均値を用いて検討を行うこととした。内陸活断層による結果を図-8に、海溝型地震による結果を図-9にまとめて示す。

これらの図より、周期が長くなるほど ((a)~(d)に進むほど)、震度比が小さくなることが分かる。つまり長周期側ほど片振れの傾向が強くなるという前節と同様の結果が確認された。また断層最短距離が大きくなるほど、震度比が大きくなっていることが分かる。それぞれの図には全点を線形近似した結果も実線と一次式で示しているが、全ての結果は正の勾配を持っている。特に周期0.1~1.5秒程度では、距離に依存して震度比が大きく変化していることが分かる。これは一般的な構造物が保有する周期帯であり、断層近傍における構造物はどちらか一方に大きな応答を示す傾向があることが分かる。図-9の点線は内陸活断層による地震における近似直線を示しているが、この結果と実線で示した海溝型地震における近似直線を比較すると、その勾配や震源近傍

での震度比 (Y切片) に大きな差がないことが分かる。さらに各図には地震動ごとに異なるポイントで表示しているが、地震毎の震度比に違いは見られない。つまり、地震動の片振れ、両振れといった傾向は地震発生種別や地震規模に依存せず、断層からの距離に対して相関を持っていると言える。

#### 4. まとめ

地震動特性の違いによる、構造物応答の非対称性に変化があるのかということを検討するため、構造物の正側-負側塑性率の平均値を用いた両側所要降伏震度スペクトルの提案を行った。また多数の地震観測記録を用いた動的解析を実施し、両側所要降伏震度と片側所要降伏震度の比率を算出することにより、地震動特性と構造物の片振れ、両振れといった応答特性との関係性について考察を行った。その結

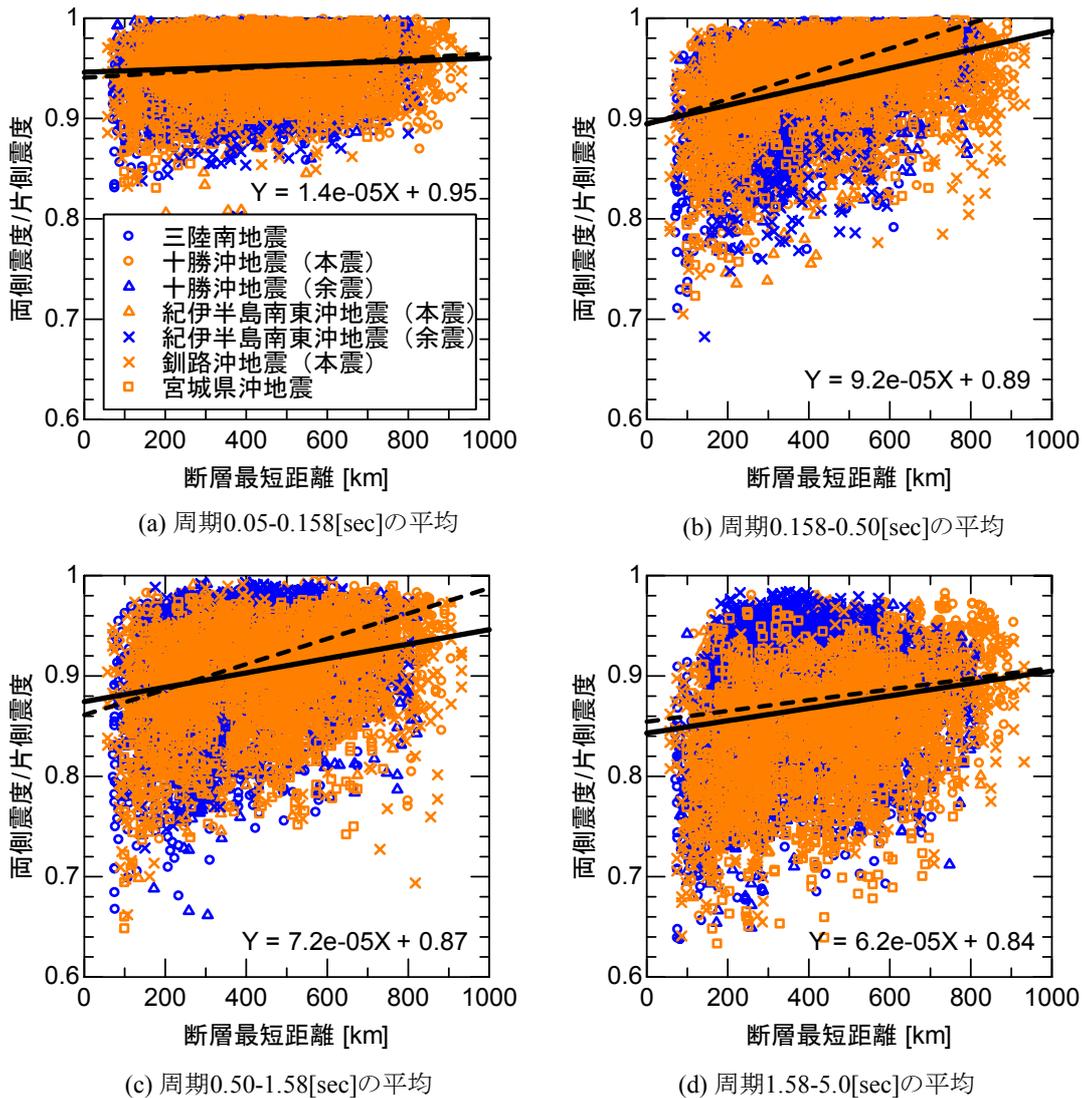


図-9 距離ごとの震度比（海溝型地震）

果、以下の知見が得られた。

- ・ 建造物の周期が長いほど、地震時の応答はどちらか一方のみに偏る傾向が強い。つまり片振れの傾向を示す。逆に周期の短い建造物は、正負均等に振動する両振れの傾向がある。
- ・ 内陸活断層、海溝型といった地震発生種別による両振れ、片振れといった傾向は見られないが、震源距離による傾向は見られる。具体的には、震源近傍では片振れの傾向があり、震源から遠く離れるに従って両振れの傾向が強くなる。

以上の結果は地震動の位相特性と建造物の応答特性の関係を解明する上での基礎的な資料となり得ると考えられる。また、建造物の損傷を正負両側の応答値で制御可能であるという既往の成果<sup>3)</sup>に基づき建造物の性能確認を行う際には、これらの検討は必須である。現在の土木建造物の設計用地震動には建造物の正側負側応答といった配慮はされていないが、本検討結果は新たな設計体系に基づく設計用地震動の位相特性設定に有益な資料になると考えている。

また今回の結果は、正側負側応答値を用いた設計を行うことにより、ある周期、靱性率を持った建造物を設計する際の降伏震度として15%程度小さくなる可能性を示唆している。今後は観測記録に基づいたより詳細な検討、数値計算に基づく確認を行うとともに、建造物の損傷と両側応答の関係の妥当性についても検討する必要がある。

謝辞：本検討では、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの観測記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 渡邊忠利, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No. 683/V-52, pp. 31-45, 2001.
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 2002.
- 3) 田所敏弥, 田中浩一, 谷村幸裕, 黒川浩嗣, 服部尚道,

- 室野剛隆：鉄筋コンクリート柱の崩壊に関する限界の評価法，土木学会論文集 E，Vol. 64, No. 2, pp. 298-313, 2008.
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999.
  - 5) Veletsos, A. S., N. M. Newmark and C. V. Chelapati : Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motions, *Proc. of 3th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, Vol. II, pp. 663-680.
  - 6) 西村昭彦，室野剛隆，齋藤正人：所要降伏震度スペクトルの作成と耐震設計への適用，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，Vol. 3, pp. 43-48, 1999.
  - 7) Clough, R. W. and S. B. Johnston : Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements, 第2回日本地震工学シンポジウム梗概集, pp.227-232, 1966.
  - 8) 坂井公俊，室野剛隆，澤田純男：地震基盤深度を考慮したレベル2地震動の簡易評価，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，Vol. 12, pp. 317-322, 2009.
  - 9) 川瀬博，林康裕：兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No. 480, pp. 67-76, 1996.
  - 10) 古村孝志，中村操：1944年東南海地震記録の復元と関東の長周期地震動，物理探査，Vol. 59, pp. 337-351, 2006.

## RELATIONSHIP BETWEEN CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE GROUND MOTION AND ASYMMETRY OF STRUCTURAL RESPONSE

Kimitoshi SAKAI and Yoshitaka MURONO

In this study, relationship between characteristics of earthquake ground motions and asymmetry of structural response are discussed. First, the demand one-side yield seismic coefficient spectrum and the both sides spectrum are newly defined. Second, the ratios of both-sides spectrum to one-side spectrum are calculated by using many observed records. The asymmetry in displacements can be evaluated quantitatively by using spectrum ratio. Consequently, it is clarified that deformation of structures tend to become asymmetrical as natural periods become longer, or distance to the hypocenter is smaller. It is also found that dynamic behaviors of structures are independent from the types of the fault, such as inland active fault or inter plate.