

応答継続時間スペクトルを用いた応答継続時間が橋梁構造物等を与える影響に対する考察

矢部正明¹・塚本英子²

¹正会員 株式会社長大 構造事業本部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

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

1. はじめに

2011.3.11に発生した東北地方太平洋沖地震によって生じた地震動は、震源から遠く離れた首都圏の構造物を長い時間に渡って揺らした。特に、周期が長い低減衰の長大吊構造系橋梁では、約600秒に渡る地震応答が観測されている¹⁾。建築の免・制震構造物でも、300秒から600秒に渡る構造物の地震応答の観測記録が数多く報告されている²⁾。長周期・長時間地震動の生成と長周期構造物の地震応答に対する対応が2011.3.11東北地方太平洋沖地震以前から進められてきている建築分野^{3),4)}と異なり、橋梁分野では構造物の地震応答の継続時間に対する検討は少ない⁵⁾。橋梁分野で構造物の地震応答の継続時間に対する検討が少ない理由として、一般的な橋梁の固有周期が周期2.0秒よりも短周期側にあることや、道路橋では、設計地震動に対して地震応答が構造要素が保有する最大耐力以下の応答に留まるように耐震設計することを規定しているため、応答の繰返し回

数の影響が顕著とならない領域を耐震設計の対象としていることが考えられる⁶⁾。なお、鉄道橋は、最大耐力を超えたポストピーク域も耐震設計の対象としているため、最大耐力を超えた領域の剛性低下を考慮したモデルの開発が行われている⁷⁾。

橋梁を構成する主要な部材である上部構造（桁）と橋脚構造および基礎構造に地震応答の継続時間が与える影響が無視できなくなるのは、主要動によって大きな非線形地震応答（変位）が生じた場合であり⁸⁾、地震応答の継続時間よりもやはり最大応答（変位）に対して耐えられる（追従できる）ように耐震設計することが重要となる。しかし、可動支承やすべり系の支承のように、地震時に支承の可動部に摩擦が生じる支承構造や、変形が小さい時から非線形挙動をする地盤では、地震応答の最大値だけでなくその継続時間によっても地震応答が変化すると予想される⁹⁾。橋梁分野では研究は少ないが、積層ゴム系支承も、応答継続時間が長いとゴムや鉛の物性が変化する可能性がある¹⁰⁾。

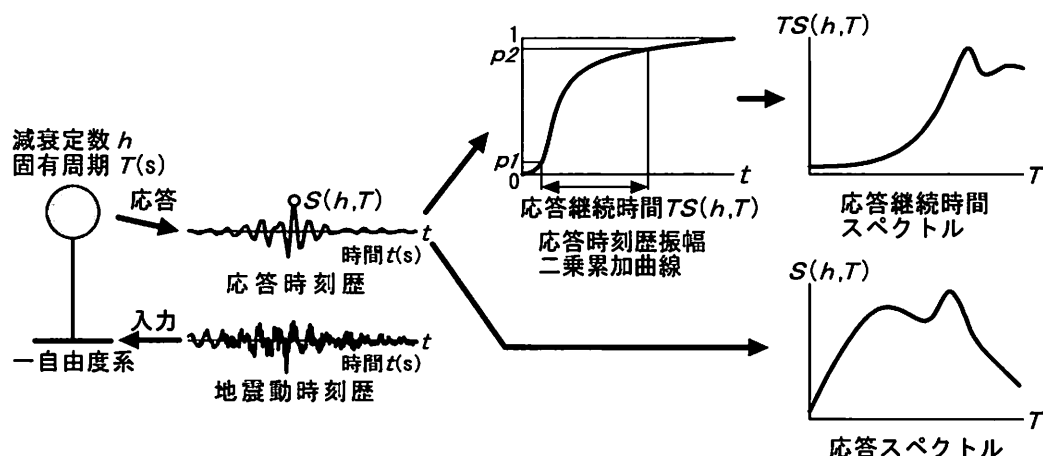


図-1 応答スペクトルと応答継続時間スペクトルの算出方法¹⁶⁾

橋梁の地震応答の継続時間の長さは、橋梁に付属する標識柱・照明柱・裏面吸音板等の地震応答にも影響を与える¹¹⁾と考えられる。橋梁と付属物の固有周期の接近度によって、付属物に生じる地震応答の大きさも異なるが、橋梁の地震応答の継続時間が長ければ、付属物の地震応答が成長する可能性も大きくなる。また、標識柱や照明柱の橋梁への固定化や裏面吸音板の上部構造下面への緊結に、ねじが採用されていることを考慮すると、2011.3.11東北地方太平洋沖地震による天井被害¹²⁾や電気通信施設の被害¹³⁾から応答継続時間が長い場合には、ねじのゆるみの発生^{14),15)}が懸念される。

本報告では、石井が提案する地震動の応答継続時間スペクトル¹⁶⁾を用いて、橋梁構造物等に地震応答の継続時間が与える影響について考察した。

2. 応答継続時間スペクトルの定義と検討対象とした地震動

図-1は、石井によって提案された応答継続時間スペクトルの算出方法¹⁶⁾を示したものである。固有周期 T 、減衰定数 h の1自由度系に地震動を作用させて弾性域の地震応答解析を行い、解析より得られた地震応答波形の振幅を2乗してその累加値を時々刻々と求め、地震応答波形の全継続時間での応答波形振幅の2乗累加値で基準化してその値が p_1 から p_2 に達する時間を応答継続時間スペクトル $TS(h, T)$ と定義¹⁶⁾している。石井は、2011.3.11東北地方太平洋沖地震の際に東京で観測された地震動を用いて、地震動の初動の立ち上がり部から後続動の減退部による地震応答の継続時間を求めるために、試行錯誤的に検討した結果、 $p_1=0.03$ 、 $p_2=0.95$ としている¹⁶⁾。 p_1 と p_2 の値は、検討目的に応じて応答波形のどの部分を取り出して応答継続時間を定義するかによっても異なるが、ここでは、文献¹⁶⁾と同様に、 $p_1=0.03$ 、 $p_2=0.95$ とした。応答継続時間は、絶対加速度応答波形、相対速度応答波形、相対変位応答波形毎に求めることができるが、ここでは、相対変位応答継続時間（変位応答継続時間）に着目した。

変位応答継続時間を求めた地震動は、図-2に示す地震によって被害が起きたことが確認されている10地震において観測された強震記録の中から、構造物に生じた被害との相関が高いとされているSI値が50cm/secより大きいものの44波形を対象とした。さらに、2011.3.11東北地方太平洋沖地震の際に、図-3に示す首都圏の139観測地点で観測され公開されている地表面上の水平2方向の加速度波形278波形を対象とした。首都圏の139観測地点は、防災科学技術研究所強震観測網K-NET、KiK-netの45地点、気象庁の5地点、東京都港湾局の3地点、横浜市消防局高密度強震ネットワークの86地点からなり、各観測地点の地盤種別を判定できるだけの情報公開されている地点が少ないので、ここでは、278波形に対しては地盤種別の分類は行っていない。

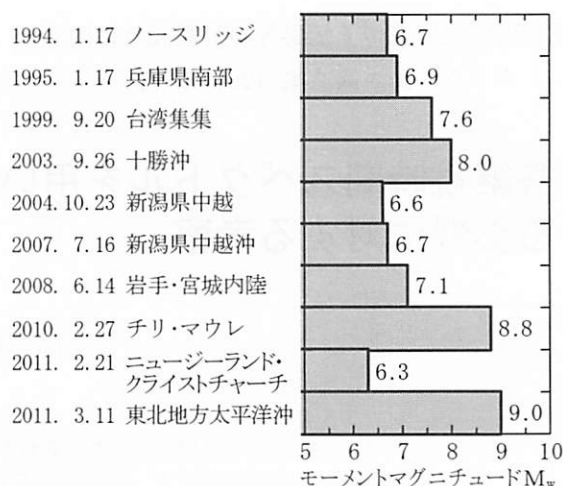


図-2 対象とした強震記録を発生させた地震



図-3 2011. 3. 11 東北地方太平洋沖地震で観測された加速度波形を参照した首都圏の地震観測地点

3. 被害地震において観測されたSI値が大きい強震記録の応答継続時間

図-4と図-5は、図-1に示す流れに従って求めた固有周期1.0秒、減衰定数5%の変位応答波形と応答振幅の2乗の累積比、応答継続時間中の応答変位振幅のゼロクロス間のピーク振幅の繰り返し回数を示したものである。図の上方には、入力地震動とした強震記録とその振幅の2乗値（地震動パワー）の累積値¹⁷⁾を示し、応答継続時間と比較するために、累積パワーが3%から95%に達する時間を入力地震動の継続時間として示してある。図-4は、内陸直下型（内陸地殻内）地震である1995.1.17兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅周辺地盤上で観測されたNS成分、

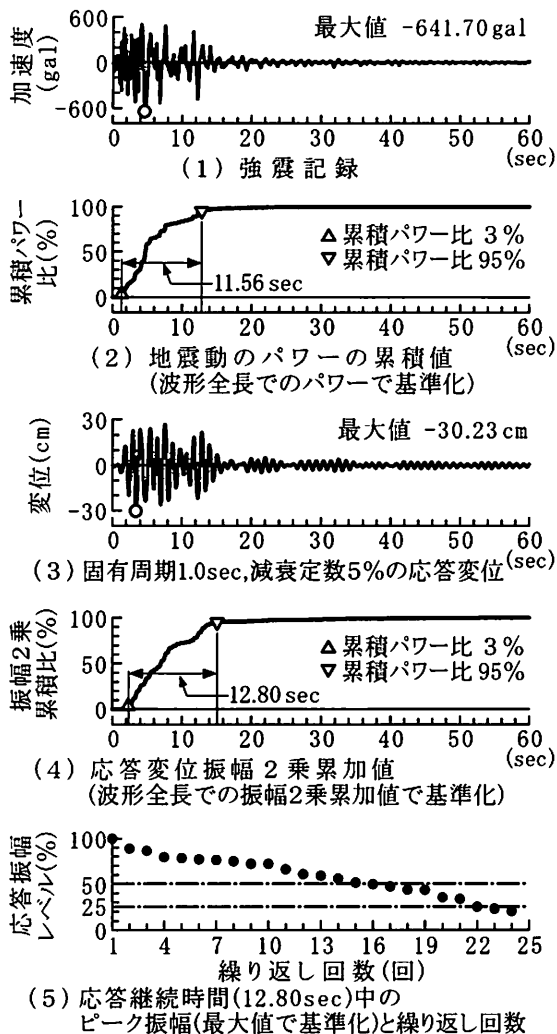


図-4 1995.1.17 兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅周辺地盤上で観測された NS 成分の地震応答

図-5は、プレート境界（海溝）型地震である2003.9.26十勝沖地震の際にHKD086直別で観測されたEW成分を入力地震動とした場合である。

JR鷹取駅記録NS成分の応答変位の応答継続時間は12.80秒で、入力地震動の継続時間11.56秒よりも長いことがわかる。変位応答継続時間内には、最大応答変位約30cmの約50%以上の応答変位が16回繰り返している。HKD086直別EW成分は、入力地震動の継続時間28.07秒に対して応答変位の応答継続時間は26.86秒と僅かに短く、変位応答継続時間内には、最大応答変位約40cmの約50%以上の応答変位が28回繰り返している。

図-6は、SI値が50cm/secより大きい44波形の変位応答スペクトル（減衰定数5%）と変位応答継続時間スペクトルである。対象とした地震や観測地点の数も少ないので、一般的な傾向とは言い難く、あくまでも今回の検討結果であるが、次のような傾向を確認することができる。

一部の周期を除けば、海溝型地震による強震記録の方が、内陸地震による強震記録よりも変位応答の継続時間が確実に長くなっている。海溝型地震の変位応答継続時間は、周期2.0秒付近から急激に長く

なっており、変位応答継続時間が100秒を超えるものが幾つもある。また、周期1.0秒よりも短周期域では、I種地盤やII種地盤で観測された強震記録の方が、III種地盤で観測された強震記録よりも長いものが数波形ある。

4. 2011年東北地方太平洋沖地震において首都圏で観測された加速度波形の応答継続時間

図-7は、2011.3.11東北地方太平洋沖地震の際に図-3に示した首都圏139箇所で見測された加速度波形（水平2成分）の変位応答スペクトルと変位応答継続時間スペクトルである。変位応答、変位応答継続時間ともに、非常に大きなばらつきを有していることがわかる。図-6と同様に、変位応答継続時間は、周期1.0秒より短周期域では大きく変化していないが、周期2.0秒付近から急激に長くなっていることがわかる。変位応答の大きさを無視すれば、400秒を超える応答継続時間を示しているものも複数ある。

図-8は、固有周期0.5秒、0.75秒、1.0秒、1.5秒の応答変位継続時間を減衰定数2%、5%、10%毎に示したものである。図より、固有周期が長くなるとともに、変位応答継続時間も長くなることがわかる。また、減衰定数が小さいほど、応答継続時間が長くなることがわかる。これらは、従来から言われているように、長周期・低減衰構造物では、地震応答の継続時間が長くなるということを裏付けている。

前述した橋梁に付属する標識柱・照明柱・裏面吸音板等の減衰定数は、直接地盤中に基礎構造を介して設置されている橋梁本体よりも小さいので、減衰定数2%とした場合の変位応答継続時間に着目する。

図-9は、減衰定数2%、固有周期0.5秒、0.75秒、1.0秒、1.5秒の応答変位継続時間の分布を示したものである。固有周期0.5秒は70秒から90秒、固有周期0.75秒は80秒から90秒、固有周期1.0秒は80秒から100秒、固有周期1.5秒は80秒から130秒に分布のピークが現れていることがわかる。

地震応答が構造物に与える影響は、応答継続時間だけでなく、応答値の大きさも同時に考慮する必要がある。図-10は、減衰定数2%、固有周期0.5秒、0.75秒、1.0秒、1.5秒の応答変位が最大となる応答波形と変位応答継続時間が最長となる応答波形を示したものである。応答変位継続時間が長くとも、応答変位の大きさは、最大となる応答変位を生じる地震動の1/6.5から1/2.5と小さいことがわかる。

図-11は、固有周期0.5秒、0.75秒、1.0秒、1.5秒において応答変位が最大・最小、変位応答継続時間が最長・最短となる変位応答波形から、変位応答継続時間中のゼロクロス間のピーク数（繰り返し回数、図-4と図-5の(5)参照）、ゼロクロス間のピーク値の平均値（最大応答値に対する比で表示）、ゼロクロス間のピーク値の最小値（最大応答値に対する比で表示）を整理したものである。ゼロクロス間のピーク数は、変位応答継続時間が最短の場合であって

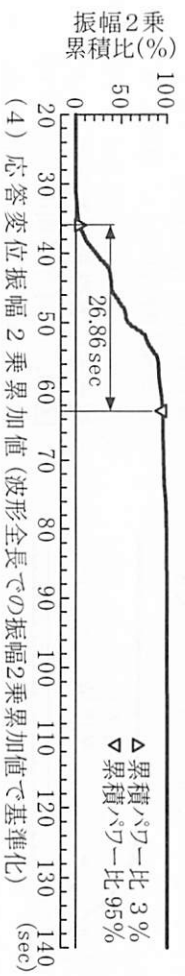
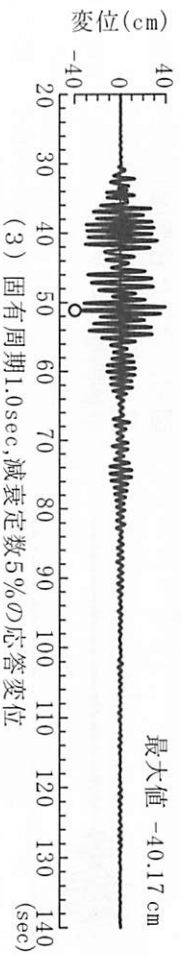
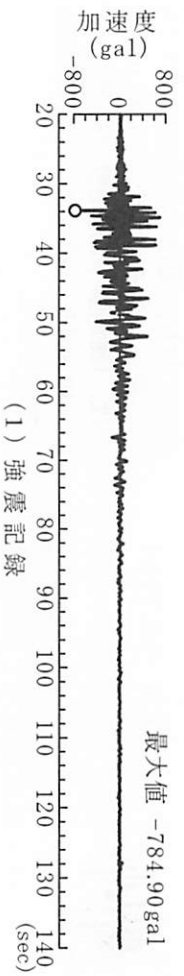


図-5 2003.9.26十勝沖地震の際に HKD086 直別で観測された EW 成分の地震応答

—— 海溝型地震 —— 内陸地震

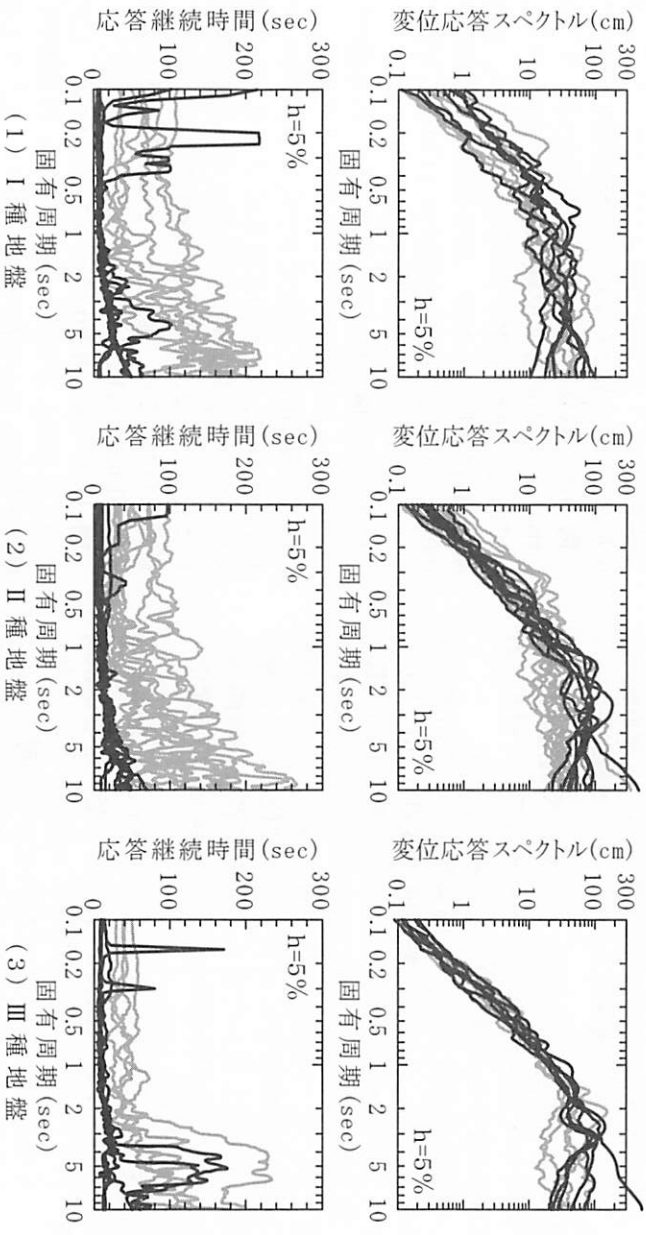


図-6 S1 値が 50 以上の強震記録 44 波形の変位応答継続時間スペクトル

も, 減衰定数, 固有周期によらずに100回以上あり, 繰り返しが生じている. 変位応答継続時間中のゼロクロス変位応答が最大となる場合は, 100回から300回の繰返し間平均値は, ばらつきはあるもの

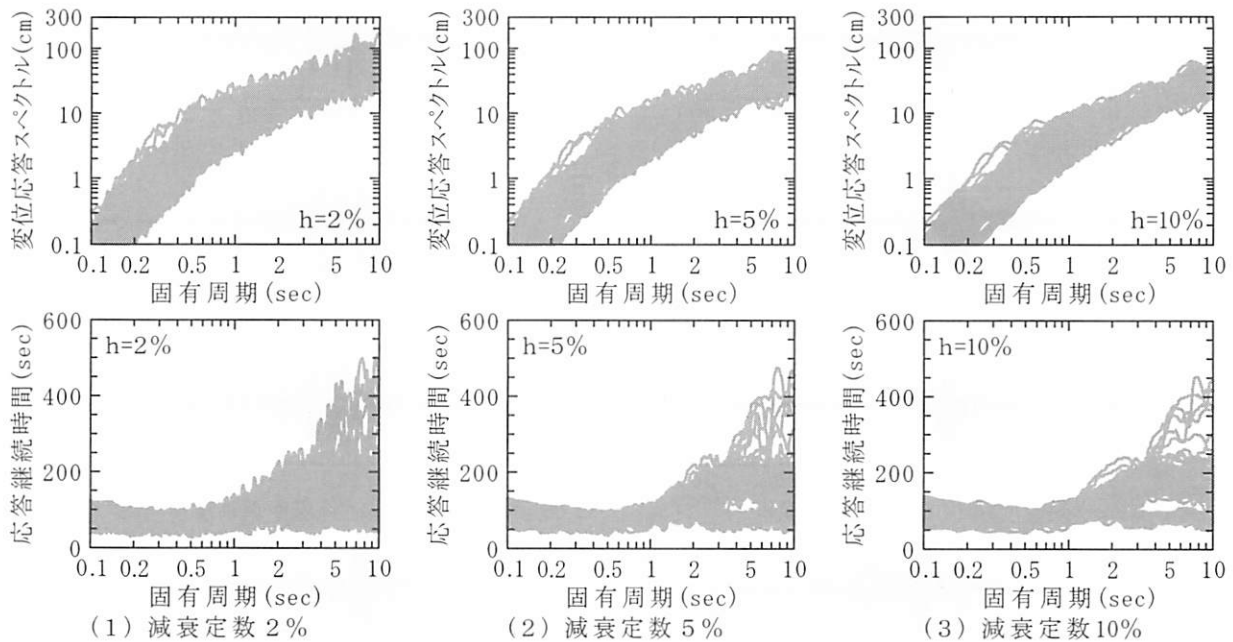


図-7 2011.3.11 東北地方太平洋沖地震において首都圏の 139 箇所で観測された加速度波形の地震応答

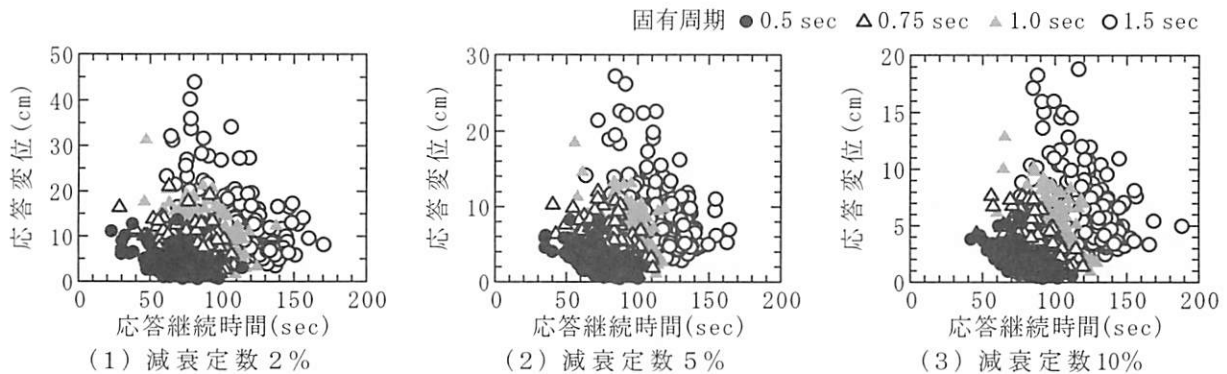


図-8 首都圏 139 箇所で観測された加速度波形による固有周期 0.5-0.75-1.0-1.5 秒の変位応答継続時間

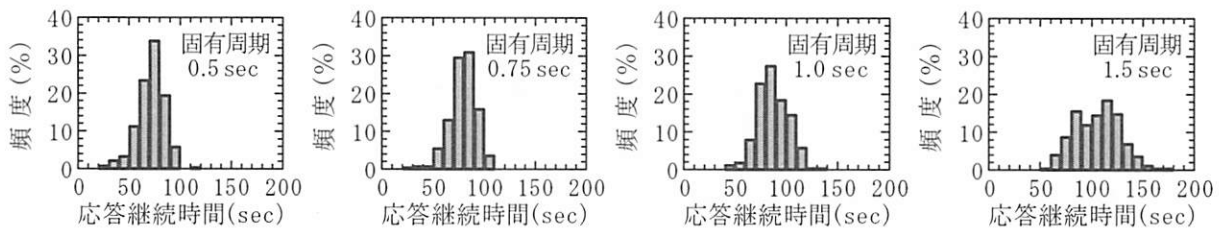


図-9 首都圏 139 箇所で観測された加速度波形による減衰定数 2%・固有周期 0.5-0.75-1.0-1.5 秒の変位応答継続時間の頻度分布

の約30%ほどである。ゼロクロス間のピーク値の最小値は、概ね5%以下と小さいことがわかる。応答変位の大きさと変位応答継続時間両方の影響を同時に考慮するために、図には、最大応答変位SDと応答変位継続時間TSDの積を示してある。固有周期1.0秒よりも短周期域では最大応答変位の影響が大きく、固有周期1.0秒から長周期域では、最大応答変位の影響が一番卓越しているが、変位応答継続時間の影響も大きくなっていることがわかる。

図-12は、図-4と図-5の(2)に示した累積パワーから求めた入力地震動の継続時間と減衰定数2%の変位応答継続時間を比較したものである。図より、固

有周期0.5秒では、全般的に変位応答継続時間よりも入力地震動の継続時間の方が長いことがわかる。しかし、固有周期が0.75, 1.0秒, 1.5秒と長くなるとともに、変位応答継続時間の方が長くなる加速度波形が増加し、固有周期1.5秒では、ここで対象とした278波形の半分以上の地震動で変位応答継続時間の方が、入力地震動の継続時間よりも長いことがわかる。

5. まとめ

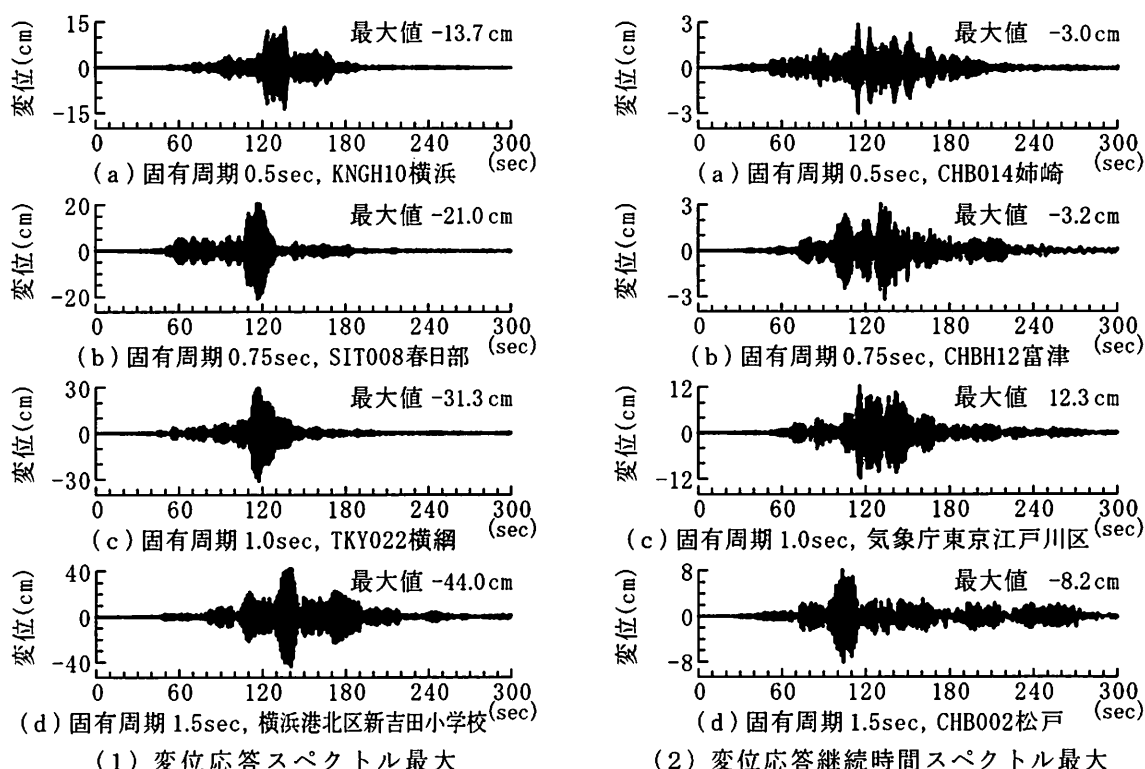


図-10 首都圏 139 箇所で観測された加速度波形の減衰定数 2%に対する応答変位波形

SI値が50cm/sec以上となる既往の強震記録44波形と、2011.3.11東北地方太平洋沖地震において首都圏の139箇所で観測された加速度波形278波形に対して、石井が提案した応答継続時間スペクトルを求めた。地震応答が構造物に与える影響は、最大応答値と応答継続時間の両方に着目する必要があるという観点から検討を行った結果を、橋梁構造物等を与える影響に関連づかながら以下に列举する。

- 1) 地震によって構造物に生じた被害との相関が高い地震動指標とされるSI値が50cm/secより大きい強震記録の変位応答継続時間は、海溝型地震の場合には、固有周期2.0秒から長周期域で急激に長くなっており、変位応答継続時間が100秒を超えるものが複数波あった。
- 2) 2011.3.11東北地方太平洋沖地震の際に首都圏の139箇所で観測された加速度波形による変位応答継続時間も、固有周期2.0秒から長周期域で急激に長くなっており、変位応答値の大きさを無視すれば、変位応答継続時間が400秒を超えるものもあった。
- 3) 2011.3.11東北地方太平洋沖地震の際に首都圏の139箇所で観測された加速度波形による変位応答波形の変位応答継続時間中のゼロクロス間のピーク値の平均値は、最大応答変位の約30%と小さいが、変位応答継続時間中のゼロクロス間のピーク数（繰り返し回数）は、100回以上と多いことがわかる。

以上の結果から、低減衰で長周期構造となる長大吊構造系橋梁を除けば、一般的な橋梁を構成する主構造（上部構造（桁）・橋脚構造・基礎構造）は、

最大応答に耐えられるもしくは追従できるように、耐震設計されていれば応答継続時間の長短が大きな影響を与えることはないと考えられる。

固有周期が周期1.0秒から1.5秒付近に分布する積層ゴム系支承を用いた橋梁では、最大応答変位の約30%に相当する変位が多数回作用する（生じる）可能性があるため、それによってゴムや鉛の物性がどの程度変化するかを検討し、積層ゴム系支承の地震時の性能に有意な影響を与えるかどうかを確認することが望まれる。

ねじ軸直角方向に繰り返し外力や振動が作用すると接触部が滑ることや、ねじ軸方向に繰り返し外力や振動が作用するとねじは引張と圧縮を繰り返し受けることがねじの回転ゆるみの原因¹⁵⁾とされている。応答変位の継続時間が長いことは、橋梁に付属されている標識柱や照明柱の固定部（ねじ部）および裏面吸音板の緊結部（ねじ部）では、標識柱や照明柱の倒壊および裏面吸音板の落下の起点となる可能性があるため、無視できない事象となる。

謝辞

本論文では、防災科学技術研究所強震観測網K-NET, KiK-net, 気象庁, 東京都港湾局, 横浜市消防局高密度強震ネットワークに於いて観測された強震記録を使用させて頂きました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) 藤野陽三, シリゴリンゴ ディオンシウス, 並川賢治, 矢部正明: 2011年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジの応答, 土木学会論文集A1 (構造・地震

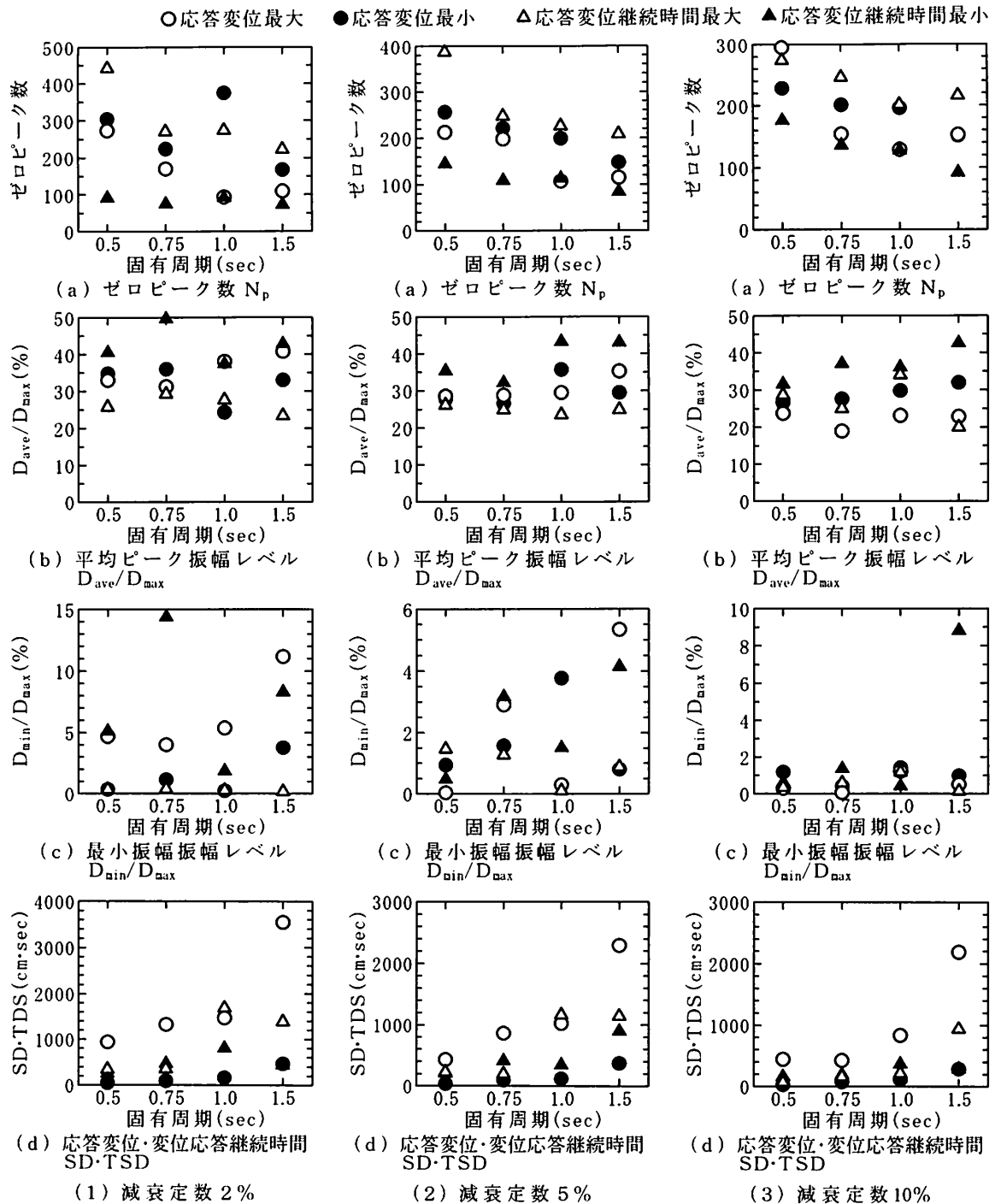


図-11 首都圏 139 箇所で観測された加速度波形による応答変位特性：応答変位最大・最小および変位応答継続時間最長・最短のピーク振幅の繰り返し回数と平均振幅レベルおよび最小振幅レベル

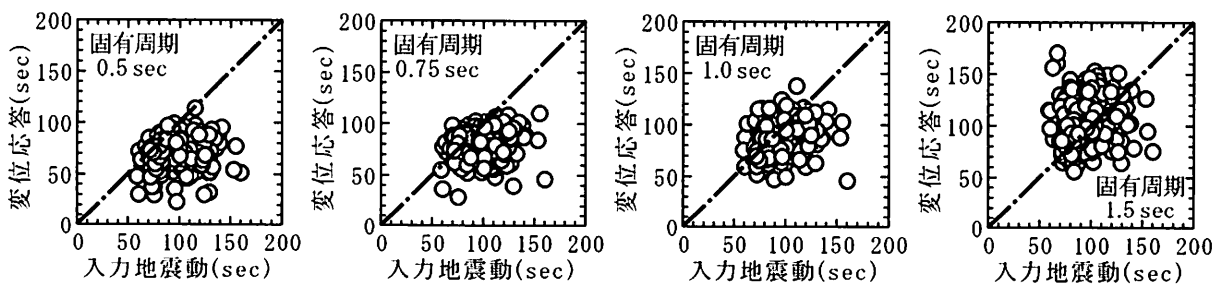


図-12 首都圏 139 箇所で観測された加速度波形の入力地震動継続時間と減衰定数 2%時の変位応答継続時間の比較

- 工学), Vol.69, No.2, pp.372-391, 2013.
- 2) 一般社団法人日本免震構造協会・応答制御建築物調査委員会:東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査報告書(CD), 2012.
- 3) 社団法人日本鋼構造協会:【特集】長周期・長時間継続地震動とその対応, JSSC, No.11, pp.3-22, 2012.
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課:超高層建築物における長周期地震動への対策試案について, 2010., <http://www.mlit.go.jp/common/000132046.pdf>
- 5) 北原武嗣, 田中賢太郎, 山口隆司, 岸祐介, 濱野剛:数十回オーダー繰り返し載荷を受ける既設鋼製橋脚の耐力低下に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4 (地震工学論文集第31-b巻), I_499-I_508, 2012.
- 6) 矢部正明:長周期・長時間地震動—道路橋の応答と対策, 日本鋼構造協会, JSSC, No.11, pp.13-17, 2012.
- 7) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編:平成24年9月鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, pp.85-90, 288-291, 2012.
- 8) 矢部正明, 塚本英子: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, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.251-258, 2011.
- 9) 矢部正明, 塚本英子, 鍋島信幸, 佐藤崇:周辺状況から推定した2011年東北地方太平洋沖地震による道路橋の挙動, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.161-168, 2011.
- 10) 竹中康雄, 近藤明洋, 高岡栄治, 引田真規子, 北村春幸, 中村崇仁:積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第646号, pp.2245-2253, 2009.
- 11) 西口綾佳:道路橋付属物の地震被害調査と耐震安全性の検討, http://www.civil.tu-tokyo.ac.jp/overview/pdf/2012/1303BThesis_Nishiguchi.pdf
- 12) 清家剛:東日本大震災における天井被害の状況と天井脱落対策の解説, http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2013/06/28/1336817_4.pdf
- 13) (社)建設電気技術協会:建設電気技術協会東日本大震災被害調査団, 電気通信施設被害調査報告書(第一次報告), 2011. http://www.kendenkvo.or.jp/pdf/topics/higashinihon_report.pdf
- 14) 矢沢信八, 北郷薫:ボルト・ナット結合体に軸直角方向の往復荷重が作用したときのボルトのゆるみ, 日本機械学会論文誌(C編), 53巻496号, pp.2645-2654, 1987.
- 15) 門田和雄, 暮らしを支える「ねじ」のひみつ, メガネ・飛行機・超高層ビルまで世界を支える「ねじ」の基礎知識, ソフトバンククリエイティブ, サイエンス・アイ新書, pp.103-109, 2009.
- 16) 石井透:地震動の応答継続時間スペクトル-評価手法の提案と2011年東北地方太平洋沖地震およびその前震・余震・誘発地震による東京の地震動への適用例-, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第676号, pp.843-850, 2012.
- 17) 日本建築学会:地震動と地盤—地盤震動シンポジウム10年の歩み—, pp.79-71, 1983., 和泉正哲編著代表:地震動—その合成と波形処理—, 鹿島出版会, pp.11-112, 1994.