

低減衰・長周期構造物への地震応答スペクトル減衰定数別 補正係数の適用性

矢部正明¹・塚本英子²

¹正会員（株）長大 構造事業本部（〒305-0821 茨城県つくば市東平塚730）

²非会員（株）長大 構造防災技術部（〒305-0821 茨城県つくば市東平塚730）

1. はじめに

減衰定数が小さく、固有周期が長い振動系の振動応答が成長し定常振動状態に達するためには長い時間が必要なことは、1自由度系の周期的外力による強制振動の一般解（＝自由振動解＋定常振動解）から容易に理解することができる。土木構造物を対象とした耐震設計は、一般にその固有周期が2.0秒よりも短いことが多いことや、減衰定数が相応に大きいため、定常振動状態には短時間で達することから、地震動の継続時間が地震応答に与える影響は、ほとんど考慮されてこなかった。これに対して建築

分野では、高層・超高層建物が低減衰・長周期構造物²⁾となることから、長周期構造物の耐震設計において地震動の継続時間に対する検討³⁾が行われてきている。高層・超高層建物は、建築分野では主戦場であるのに対して、土木構造物で低減衰・長周期構造物といえば、吊構造系長大橋梁¹⁾か石油タンクの液面揺動（スロッシング）くらいで、ともに、土木構造分野では主戦場ではない。低減衰・長周期構造物が主戦場となる建築分野と、主戦場とならない土木分野では長周期・長時間地震動に対する動きが異なることは、2006年11月20日土木学会と日本建築学会の共同提言「海溝型巨大地震による長周期地震動

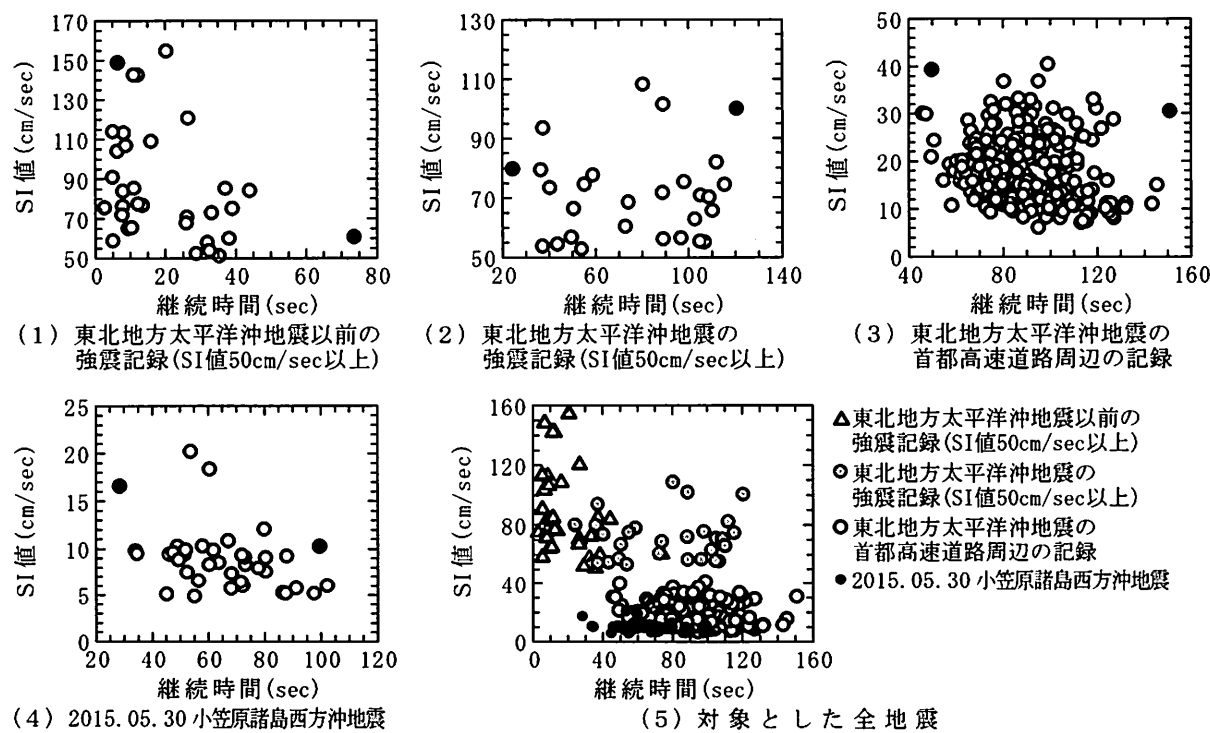
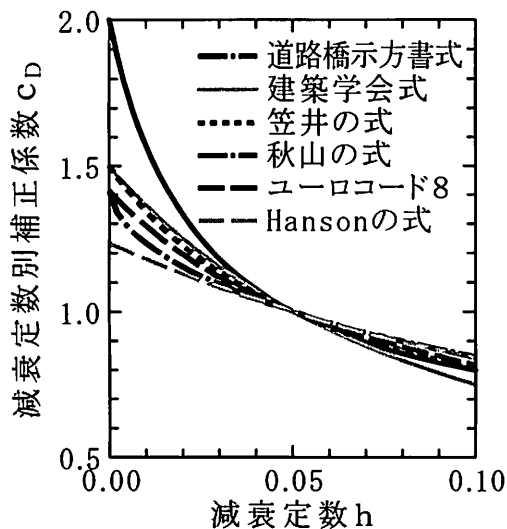
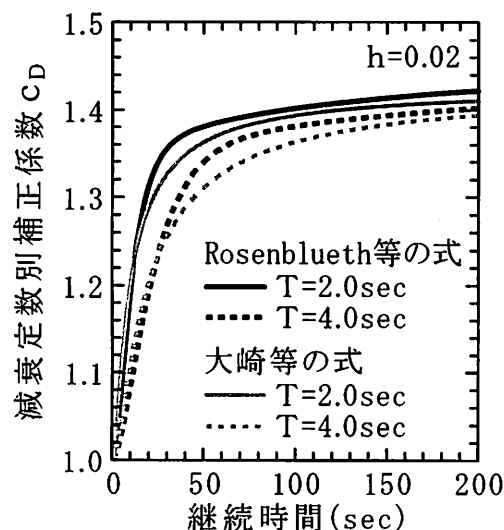


図-1 検討対象とした強震記録のSI値と継続時間



(1) 減衰定数 h のみをパラメータとした式



(2) 継続時間と固有周期もパラメータとした式

図-2 既往の減衰定数別補正係数

と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言」⁴⁾後の両分野での動向からもわかる。

本報告は、土木分野の低減衰・長周期構造物の耐震設計でも、長周期・長時間地震動の影響を考慮する必要があるという観点からの検討で、前報⁵⁾に続いて、耐震設計で慣用的に用いられてきている減衰定数別補正係数の適用性についての検討結果を報告する。

橋梁分野の耐震設計では、設計地震動は減衰定数5%の加速度応答スペクトル $SA(T, 0.05)$ の標準値が与えられ、減衰定数5%以外の減衰定数 h の加速度応答スペクトル $SA(T, h)$ の値は、減衰定数別補正係数 $c_D (= 1.5 / [40h + 1] + 0.5)$ を減衰定数5%の加速度応答

スペクトルに乗じて求めている⁶⁾。この減衰定数別補正係数は、吊構造系長大橋梁の耐震設計でも用いられることがある。しかし、減衰定数別補正係数を提案した川島らの文献^{7,8)}には、その適用範囲外として、減衰定数が約0.01以下と固有周期が約2秒以上と示されており、低減衰・長周期構造物は明らかに適用範囲外にあることがわかる。

2. 検討対象とする地震動と減衰定数別補正係数

図-1は、検討対象とした地震動のSI値と継続時間を整理したものである。対象とした地震動は、既往の強震記録で被害を生じた地震の地震動でSI値が50cm/s以上の地震動、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の際に宮城県・福島県・茨城県・栃木県で観測されたSI値が50cm/s以上の地震動、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の際に首都圏（東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県）で観測された地震動、2015年5月30日小笠原諸島西方沖地震で観測された地震動である。2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の際に首都圏で観測された地震動は、強震記録が公開されている観測地点の中から、道路橋としてはその固有周期が長い高架橋が多数ある首都高速道路の近くにある観測地点で観測された地震動を抽出した。以後、首都高速道路周辺の記録と表記しているが、首都高速道路株式会社によって観測された強震記録は含まれていない。2015年5月30日小笠原諸島西方沖地震（ $M_j 8.1$ 、震源深さ682km）は、周期が長く、継続時間が長い揺れを体感したので、2015年6月初旬時点で公開されていた地震動を検討対象とした。

検討対象とした減衰定数別補正係数は、前述した道路橋示方書の式⁶⁾、建築学会の荷重指針の式⁹⁾、Eurocode8の式¹⁰⁾、笠井の式¹¹⁾、秋山の式¹²⁾、Hansonの式¹³⁾の6種類と、地震動の継続時間 t_{end} と系の固有周期 T の比 $\tau = t_{end}/T$ をパラメータとしているRosenbluethらの式¹⁴⁾と大崎らの式¹⁴⁾の計8種類である。本報告では、いずれの式も、減衰定数5%の地震応答スペクトルに乗じて、減衰定数 h の地震応答スペクトルの値を求める補正係数として整理している。図-2に各式の減衰定数補正係数の値が減衰定数の値によってどう変化するかを示してある。図-2の(1)と(2)より、道路橋示方書の式は、全ての減衰定数に対して安全側の評価となっていることがわかる。図-2の(3)より、Rosenbluethらの式と大崎らの式は、系の固有周期として2.0秒と4.0秒を仮定して継続時間

による減衰定数別補正係数の変化を表しているが、継続時間が長いほど、係数の値が大きくなっていることがわかる。本報告では、継続時間として加速度振幅の2乗値（地震動パワー）を累積して累積値が総累積値の5%～95%に達する時間を継続時間¹⁵⁾とした。

3. 低減衰・長周期構造物への減衰定数別補正係数の適用性

図-3は被害が生じた地震で観測された強震記録（SI値が50cm/s以上の記録）33波形と、2011年東北地方太平洋沖地震Mw9.0で観測された強震記録（SI

値が50m/s以上の記録）28波形から求めた減衰定数1%と2%および5%の加速度応答スペクトル比の平均値を、道路橋示方書V耐震設計編に規定される減衰定数別補正係数と比較したものである。被害を生じた地震の強震記録は、1994年ノースリッジ地震Mw6.7、1995年兵庫県南部地震Mw6.9、1999年台湾集集地震Mw7.6、2003年十勝沖地震Mw8.0、2004年新潟県中越地震Mw6.6、2007年新潟県中越沖地震Mw6.7、2008年岩手・宮城内陸地震Mw7.1、2010年チリ・マウレ地震、2011年ニュージーランド・クライストチャーチ地震Mw6.3で観測されたものである。被害を生じた地震による強震記録、2011年東北地方太平洋沖地震による強震記録ともに、周期2.0秒よ

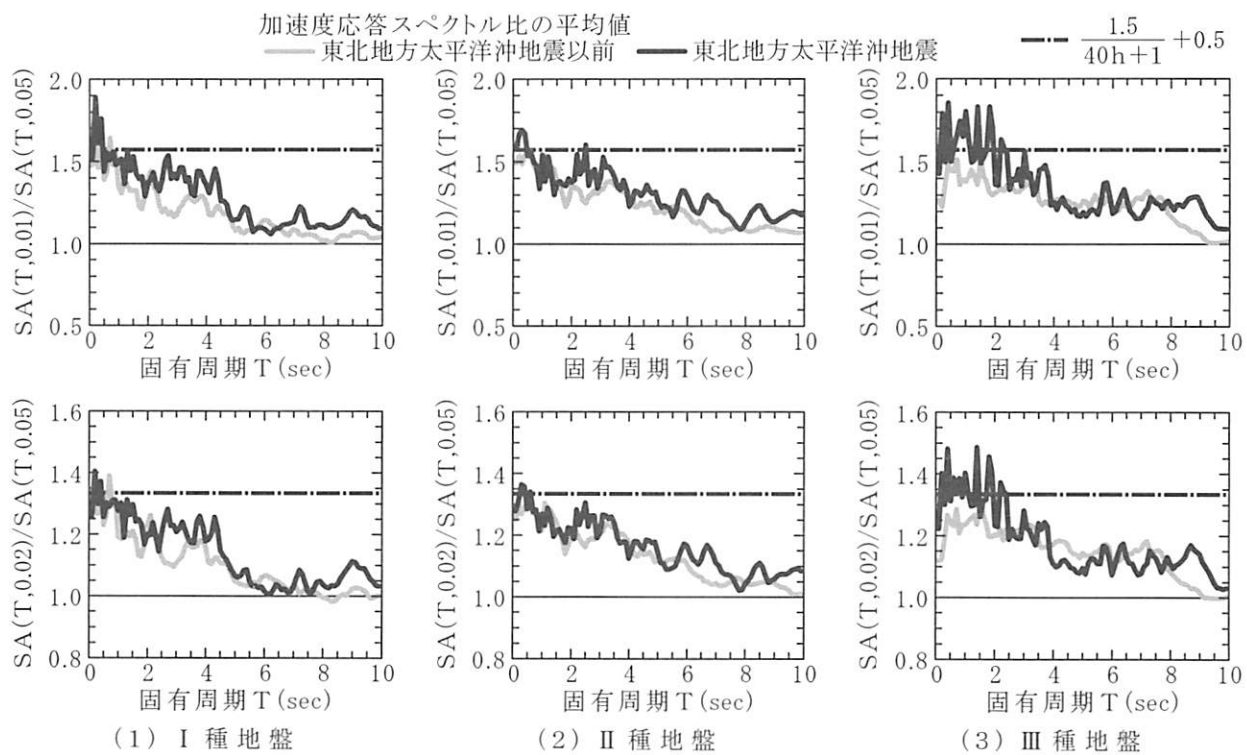


図-3 SI値が50cm/sとなる強震記録から求めた減衰定数別補正係数の平均値

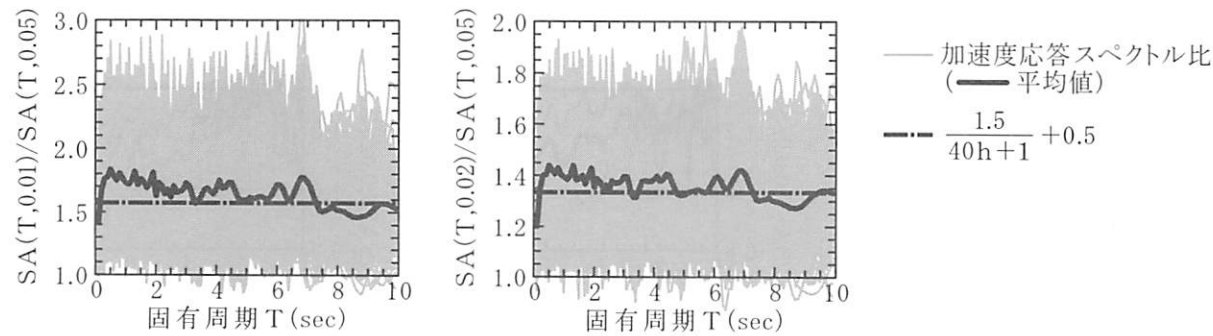


図-4 2011年東北地方太平洋沖地震の際に首都高速道路周辺で観測された強震記録の減衰定数別補正係数

りも長周期域では、道路橋示方書V耐震設計編に規定されている減衰定数別補正係数は、安全側の値となっていることがわかる。

図-4は、2011年東北地方太平洋沖地震の際に首都高速道路周辺で観測された強震記録139波形の減衰定数1%と2%および5%の加速度応答スペクトル比を、道路橋示方書V耐震設計編の減衰定数別補正係数と比較したものである。数多くの地震動が、周期2.0秒よりも長周期域で、道路橋示方書V耐震設計編の減衰定数別補正係数を上回っていることがわかる。139波形の平均値も、周期2.0秒から7.0秒の間で、道路橋示方書V耐震設計編の減衰定数別補正係数を上回っている。

図-5は、データ処理時点（2015年6月初旬）にK-NetとKik-Netで公開されていた2015年小笠原諸島西

方沖地震の強震記録19波形の減衰定数1%と2%および5%の加速度応答スペクトル比を、道路橋示方書V耐震設計編の減衰定数別補正係数と比較したものである。図-3と同様な傾向にあることがわかる。

図には示さないが、検討対象とした地震動の減衰定数5%の加速度応答スペクトルより、図-3と図-5を作成するために用いた地震動は、周期2.0秒よりも長周期域の地震応答を励起する周期成分が弱いことが確認されている。図-4を作成するために地震動は、周期2.0秒よりも長周期域の地震応答を励起する周期成分が強いことがやはり確認されている。

図-6は、図-3に示した2011年東北地方太平洋沖地震で観測されたSI値が50cm/s以上の強震記録28波形から求めた減衰定数1%と2%および5%の加速度応答スペクトル比の平均値を整理したものである。図に

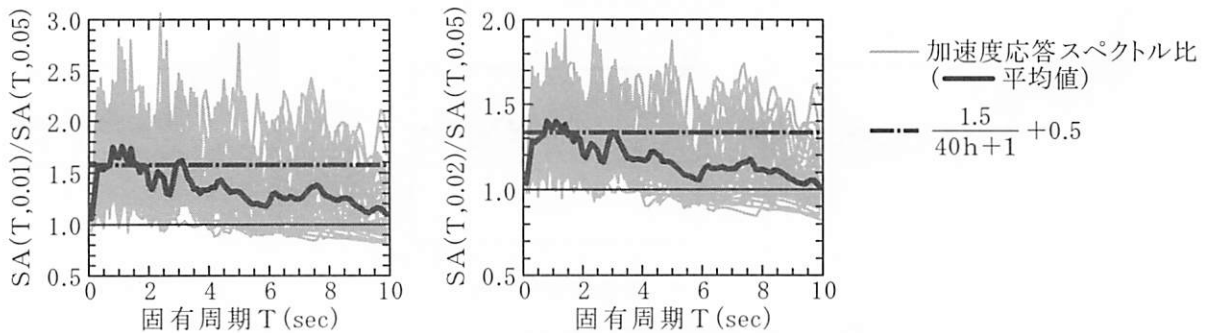


図-5 2015年5月30日小笠原諸島西方沖地震で観測された強震記録の減衰定数別補正係数

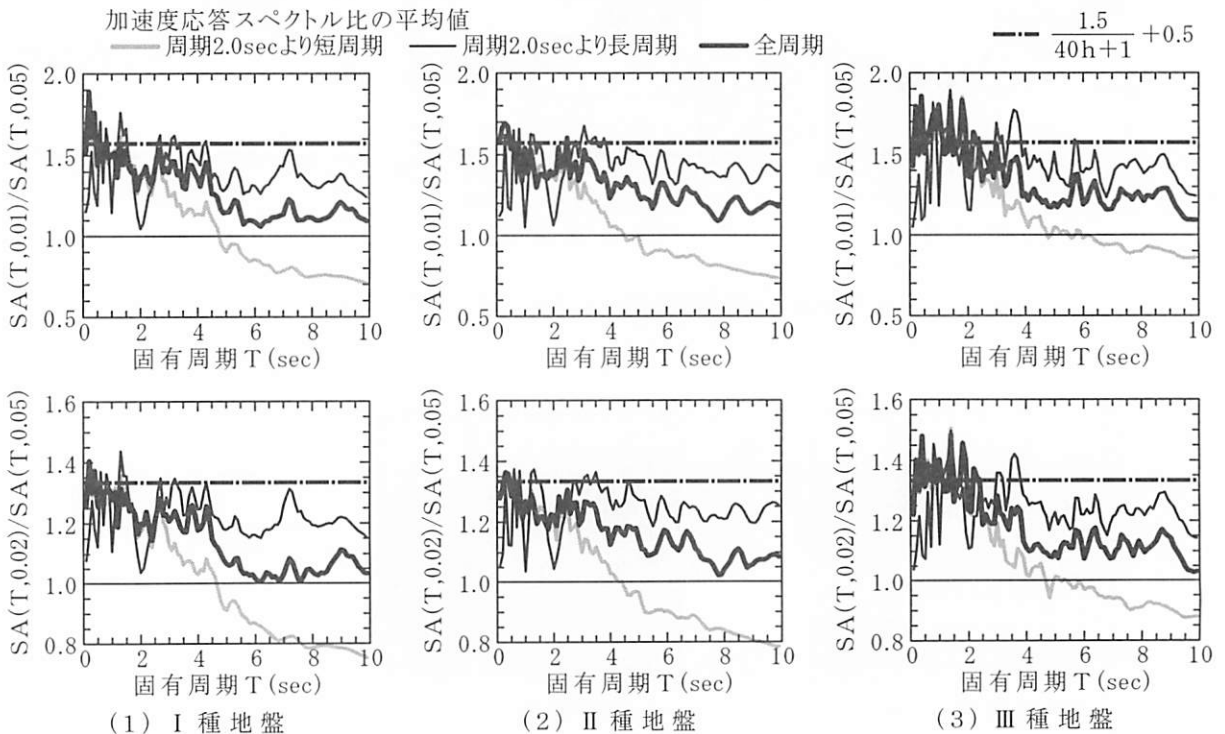


図-6 SI値50cm/s以上の強震記録の周期成分が2.0秒以下と2.0秒よりも長い加速度波形から求めた減衰定数別補正係数

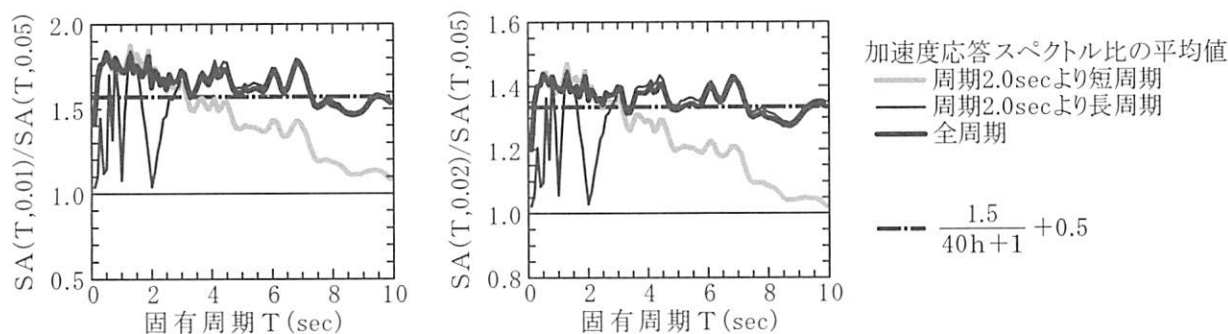


図-7 2011年東北地方太平洋沖地震において首都高速道路周辺で観測された強震記録の周期成分が2.0秒以下と2.0秒よりも長い加速度波形から求めた減衰定数別補正係数

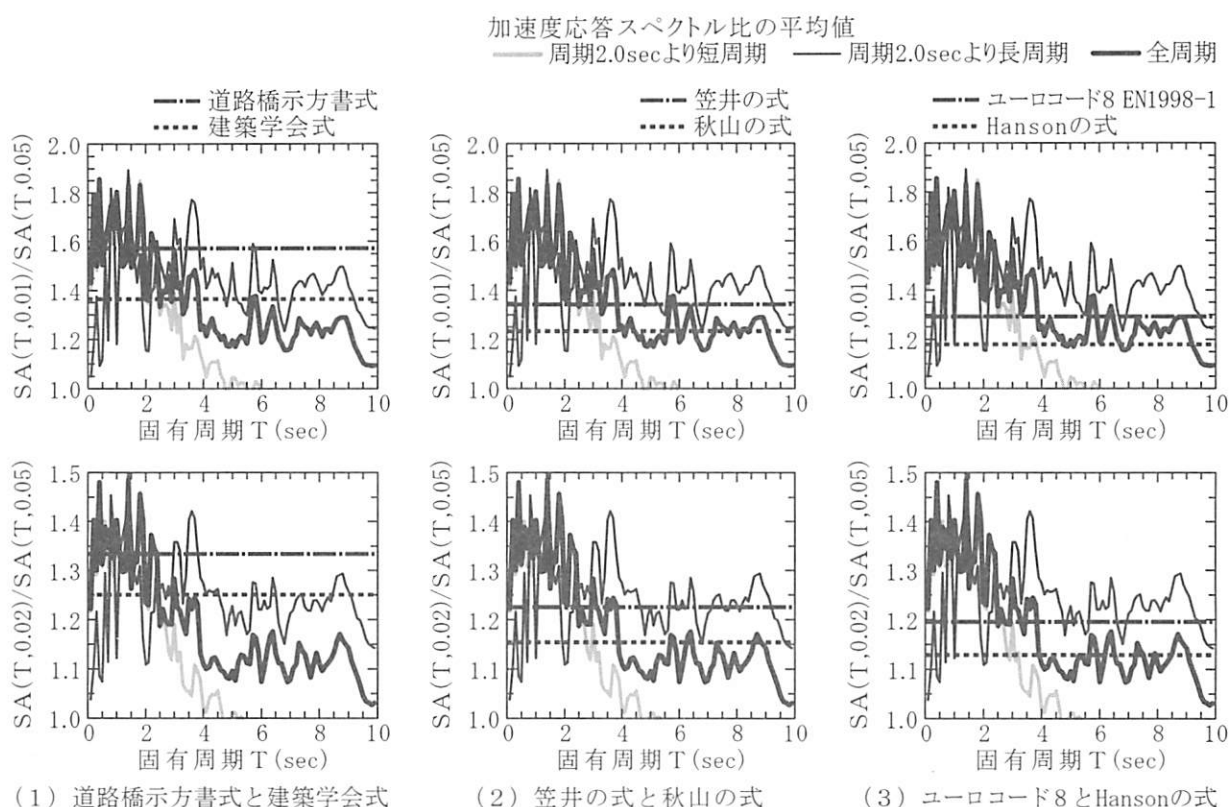


図-8 2011年東北地方太平洋沖地震においてIII種地盤上で観測されたSI値50cm/s以上の強震記録の減衰定数別補正係数と既往の式の比較

は、強震記録に含まれる全周期成分を考慮した平均値（図-3と同じもの）と、周期2.0秒とそれよりも短周期の成分だけとした加速度波形から求めた加速度応答スペクトル比の平均値と、周期2.0秒よりも長周期の成分だけを残した加速度波形から求めた加速度応答スペクトル比の平均値を示している。図より、周期2.0秒よりも長周期の成分だけを残した加速度波形から求めた加速度応答スペクトル比が他の2つの値に比較して極端に小さくなっていることがわかる。上述したように、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の際に宮城県・福島県・茨城県・栃木

県で観測されたSI値が50cm/s以上の地震動には、長周期の構造物の地震応答を励起するだけの長周期成分が含まれていなかったことがわかる。

図-7は、図-4に示した2011年東北地方太平洋沖地震の際に首都高速道路周辺で観測された強震記録139波形の減衰定数から求めた減衰定数1%と2%および5%の加速度応答スペクトル比の平均値を整理したものである。図には、図-6と同様に、強震記録に含まれる全周期成分を考慮した平均値（図-4と同じもの）と、周期2.0秒とそれよりも短周期の成分だけとした加速度波形から求めた加速度応答スペクトル

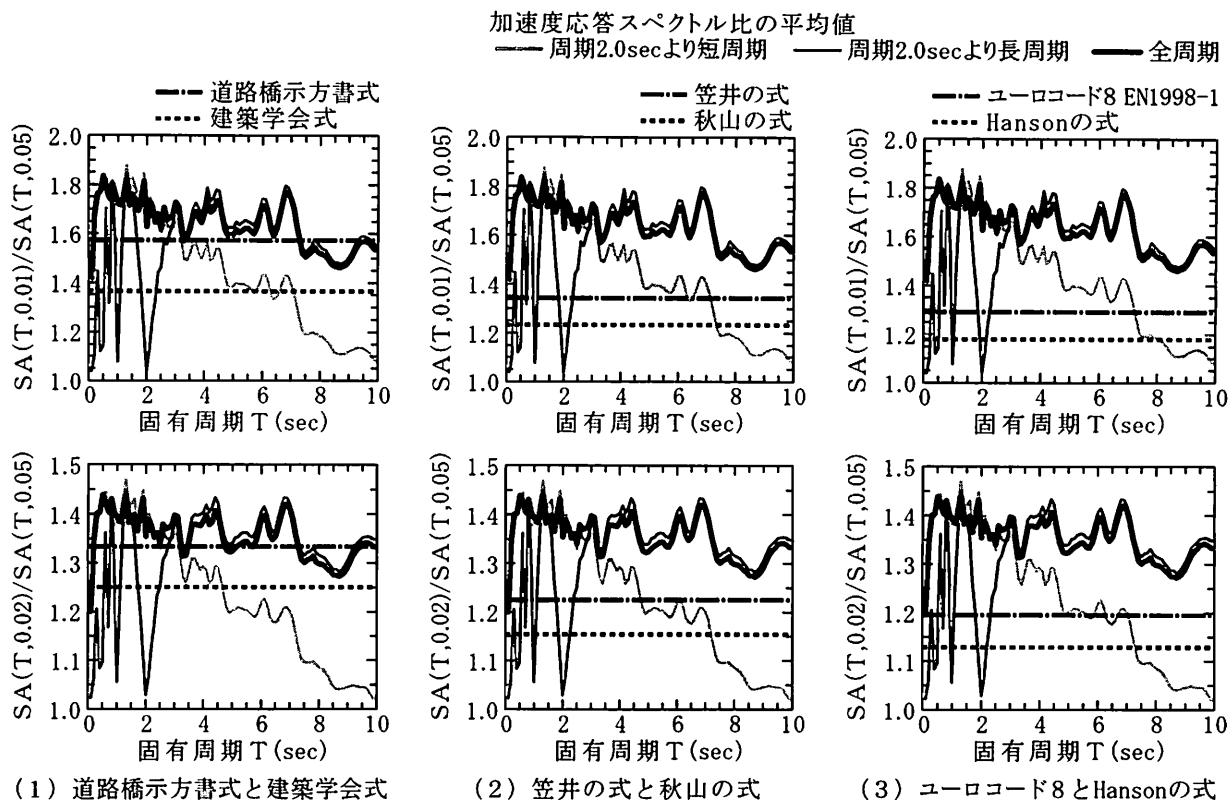


図-9 2011年東北地方太平洋沖地震において首都高速道路周辺地盤上で観測された強震記録の減衰定数別補正係数と既往の式の比較

比の平均値と、周期2.0秒よりも長周期の成分だけを残した加速度波形から求めた加速度応答スペクトル比の平均値を示している。明らかに、2011年東北地方太平洋沖地震の際に首都高速道路周辺で観測された地震動139波形には、周期2.0秒よりも長周期域の構造物の地震応答を励起する成分が含まれていることがわかる。

4. 既往の減衰定数別補正係数との比較

図-8は、2011年東北地方太平洋沖地震で観測されたSI値が50m/s以上の強震記録のうち耐震設計上の地盤種別がIII種となる地盤上で観測された6波形から求めた減衰定数1%と2%および5%の加速度応答スペクトル比の平均値を整理したものである。図には、道路橋示方書の式、建築学会の荷重指針の式、Eurocode8の式、笠井の式、秋山の式、Hansonの式の6種類を併記してある。サンプル数が6波形と少ないことも関係しているが、何れの補正式ともに、周期2.0秒よりも短周期域では、実際に観測された地震動から求めた加速度応答スペクトル比よりも小さい値となっていることがわかる。周期2.0秒よりも長周期域で、耐震設計に用いる減衰定数別補正係数

として安全側の値となっているのは、道路橋示方書の式だけである。

図-9は、2011年東北地方太平洋沖地震の際に首都高速道路周辺で観測された強震記録139波形の減衰定数から求めた減衰定数1%と2%および5%の加速度応答スペクトル比の平均値を整理したものである。図には、道路橋示方書の式、建築学会の荷重指針の式、Eurocode8の式、笠井の式、秋山の式、Hansonの式の6種類を併記してあるが、何れの補正式の値とともに、周期1.0秒から周期8.0秒の領域において、実際に観測された地震動から求めた加速度応答スペクトル比よりも小さい値となっていることがわかる。

図-10と図-11は、地震動の継続時間 t_{end} と系の固有周期 T の比 $\tau = t_{end}/T$ をパラメータとしているRosenbluethらの式と大崎らの式から求められる減衰定数別補正係数を実際の地震動から求めた加速度応答スペクトル比と比較したものである。図-10は、被害を生じた地震での強震記録と比較したものである。Rosenbluethらの式と大崎らの式の間に大きな差はなく、両式ともに、地震動から求めた加速度応答スペクトル比を包含していることがわかる。図-11は、2011年東北地方太平洋沖地震の際に首都高速道路周辺で観測された地震動から求めた加速度応答ス

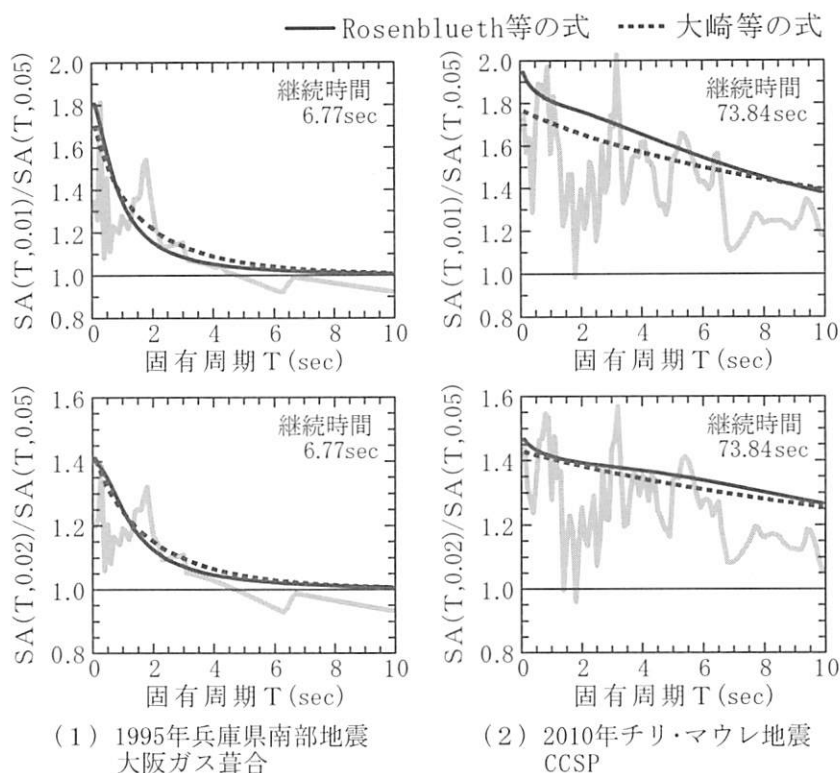


図-10 被害地震の際に観測された強震記録 (SI 値 50cm/s 以上) の減衰定数別補正係数と継続時間を考慮した式の比較

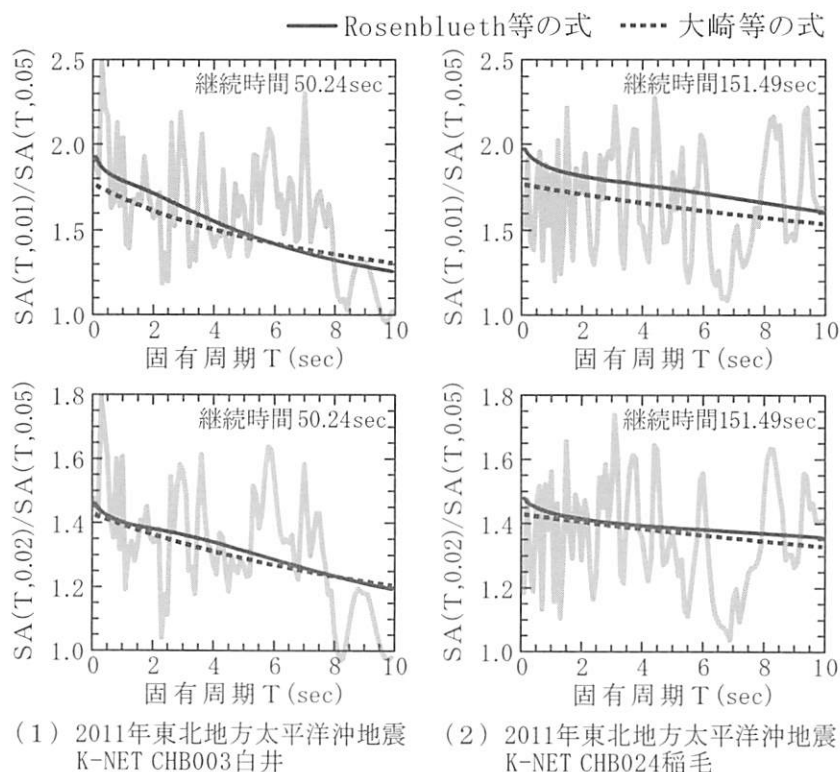


図-11 2011 年東北地方太平洋沖地震で首都高速道路周辺で観測された強震記録の減衰定数別補正係数と継続時間を考慮した式の比較

ペクトル比と比較したものである。Rosenbluethらの式と大崎らの式は、実際の地震動より得られた加速

度応答スペクトル比の周期による変化の凹凸の中心を通過していることがわかる。しかし、周期による

変動幅が大きい、Rosenbluethらの式と大崎らの式が平均的な値を示しているわけではない。図-10と図-11における、実際の観測地震動と、Rosenbluethらの式と大崎らの式の近似度合いと、昔の強震計の記録精度を考えると、Rosenbluethらの式と大崎らの式を検討した時の地震動には、長周期成分が含まれている地震動や、継続時間が長い地震動が少なかったのではないかと推察される。

5. まとめ

前章までの検討結果から、既往の減衰定数5%の加速度応答スペクトルから減衰定数 h の加速度応答スペクトルを求めるための減衰定数別補正係数は、補正式を作成する上で対象とした地震動の中に、長周期構造物の地震応答を励起するだけの長周期成分を含んだ地震動や、低減衰・長周期構造物の地震応答を成長させるだけの長い継続時間を有する地震動が含まれていなかったのではないかと予想された。2011.3.11東北地方太平洋沖地震の際に首都圏で観測された地震動のように、長周期成分を含み継続時間が長い地震動に対しては、既往の減衰定数別補正係数は、何れも、危険側の評価をする傾向にあることがわかった。

耐震設計で用いられている地震動に関連する式は、設計地震動と同様に、大きな地震が起きる度に、従来の考え方で不足がないかをその都度確認する必要がある。

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) 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.
- 2) 福和伸夫：長周期・長時間地震動の生成と長周期建築構造物の応答，日本鋼構造協会，JSSC，No.11，pp.6-10，2012.
- 3) 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.

- 4) (社)土木学会・(社)日本建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言，2006.
- 5) 矢部正明，塚本英子：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に与える影響に対する考察，土木学会第17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.183-190，2014.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp.16-22，2012.
- 7) 川島一彦，相沢興，高橋和之：地震応答スペクトルに及ぼす減衰定数の影響，土木学会論文報告集，第335号，pp.25-29，1983.
- 8) 川島一彦，相沢興：減衰定数に対する地震応答スペクトルの補正法，土木学会論文報告集，第344号，pp.351-355，1984.
- 9) (社)日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)，pp.448，2004.
- 10) Eurocode8：Design of structures for earthquake resistance-Part1:General rules, seismic actions and rules for buildings, pp.23-26，2003.
- 11) 和田章，岩田衛，清水敬三，安部重孝，川合廣樹著：建築物の損傷制御設計，丸善出版，pp.84-85，1998.
- 12) 秋山宏著：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，pp.80-84，1999.
- 13) 安井雅明，西影武知，見上知広，亀井功，鈴木恭平，林康裕：パルス地震動に対する1自由度系最大応答理論解とその応答特性，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第650号，pp.731-739，2010.
- 14) (社)日本建築学会：建築物の減衰，pp.51-53，2000.
- 15) 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.69-71，1983.