

構造物の耐震設計に用いる減衰に関する調査

矢部 正明¹・塚本 英子²

¹正会員 博（工）（株）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）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

構造物の耐震設計において、入力地震動の次に不確定性が高いものに、減衰がある。減衰に関しては、構造物の減衰特性の問題と、耐震設計に用いる減衰定数の大きさの問題、さらに、非線形動的解析に用いる減衰力のモデル化の問題がある。当然、構造物の減衰特性が解明されれば、2番目と3番目の問題もあるべき方向に向かうはずである。藤野は、設計で用いる減衰は、過去の経験的データから適当に仮定してという域を出ていないことを指摘し、減衰という厄介なものを計算工学の力で何とかしようではないかと提案している¹⁾。田村は、地震応答の大きさを直接左右する重要な量であるにもかかわらず、減衰について議論できる適切な資料がほとんどないことを指摘し、耐震設計の精度を高めるためには、設計時にきめ細かく減衰定数を設定できる評価式が必要であると提案している²⁾。

構造物の耐震設計では、小さな（厳密には安全側の値だろうと思われる）減衰定数を規定し、上述した問題が耐震設計に悪影響を与えないようにしているのが実状である。しかし、地盤中に基礎構造を建設し、それに支持される土木・建築構造物は、基礎構造と周辺地盤間の動的相互作用による様々な効果を、入力損失効果や基礎構造―地盤間の減衰定数として考慮しており、道路橋では10%～20%³⁾、鉄道橋

では15%～30%⁴⁾という値が基礎構造―地盤間の減衰定数として耐震設計基準に提示されている。鉄道橋の方が値が大きいのは、鉄道は軌道変位を許容変位内に収める必要があり、同じ橋長・幅員であっても道路橋よりも剛な構造（短周期の構造）となるため相互作用効果が相対的に高い周期帯域に橋梁の固有周期が存在するからと考えられる。10%～30%という減衰定数は、構造物の減衰としては大きな値である。この値は、上述した3番目の非線形動的解析に用いる減衰力のモデル化の問題を耐震設計上無視できないものとしている。減衰定数1～2%程度の小さい減衰定数であれば、非線形動的解析に用いる減衰力のモデル化が異なっても得られる非線形地震応答には有意な差は生じないことが確認⁵⁾⁶⁾されている。しかし、大きな減衰定数を用いた場合、非線形動的解析に用いる粘性減衰マトリックスを初期剛性に比例させた場合と瞬間剛性に比例させた場合では、RC構造の破壊モードが異なることが報告されている⁷⁾。

免・制震構造では、早期に降伏する免・制震部材の初期剛性を含んだ剛性マトリックスを用いて減衰マトリックスを作成すると、免・制震部材のエネルギー吸収を二重に評価してしまう。そこに、基礎構造―地盤間の減衰定数も寄与すると、そのことは耐震設計上無視できなくなる。建築分野では、減衰マトリックスを作成する際に、免・制震部材の初期剛

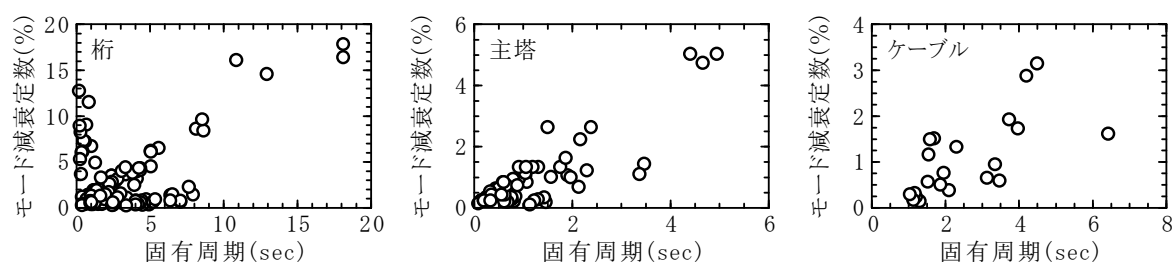


図-1 常時微動観測によって推定された橋のモード減衰定数

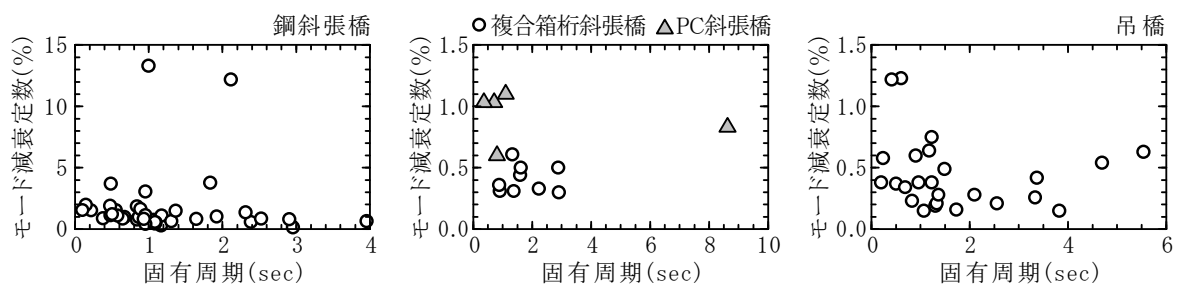


図-2(1) 自由減衰振動試験によって推定された橋のモード減衰定数：吊構造系橋梁

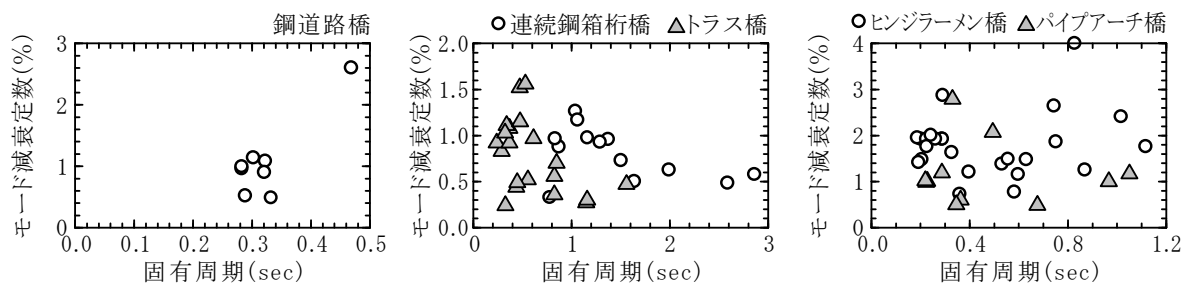


図-2(2) 自由減衰振動試験によって推定された橋のモード減衰定数：各種橋梁

性の寄与は無視するという工夫が行われている⁸⁾。橋梁分野の耐震設計基準に、同様な考え方が反映されたのは2012年から^{3),4)}であり、それ以前の免・制震ディバイスを用いた橋の耐震設計ではそのような配慮は行われていないため、配慮が行われた場合に比較して非線形動的解析によって得られる橋の地震応答を小さく評価してきている。

減衰の扱いは構造物の耐震設計に大きな影響を与える。本報告は、橋梁の耐震設計に用いる減衰の見積もりを耐震設計の場で議論できるようにすることを目指し、その第1段階として、国内外の文献から橋梁の減衰に関する実証的なデータを収集・整理したものである。

2. 対象とした橋梁の減衰定数に関する情報

国内外で実施された橋梁を対象とした常時微動観測、自由減衰振動試験、強制振動試験、地震観測から得られた橋梁のモード減衰^{13)~54)}を整理した。橋梁の減衰の実測資料を収集解析した既往の研究としては、伊藤らの研究^{9),10)}がある。伊藤らは、橋梁上部構造を対象に、支間長および固有周期と減衰性状の関係、橋梁形式と減衰性状、主桁構成材料と減衰定数の関係、接合法と減衰性の関係について貴重な情報を提示^{9),10)}しており、そこに示された内容は、現在でも実務設計上も有用な情報として通用するものである。ここでは、橋の減衰定数の大きさは固有振動モード（固有周期）によって異なるという観点と、同じ固有振動モード（固有周期）における減衰定数でも、実験や観測時の振幅の大きさによって得られる減衰定数の大きさは異なるという観点から文

献¹³⁾から文献⁵⁴⁾で公開されている橋のモード減衰定数を整理した。なお、2番目の観点の振幅の大きさによって減衰定数の大きさが異なるという減衰の振幅依存性は、大地震時における橋の減衰定数を外挿することを目的としたものである。なお、減衰は、試験方法や観測（風観測・地震観測）対象およびその計測方法によっても大きくばらつく¹¹⁾、さらに、同じ測定値を用いても、データの分析方法によってもばらつく¹¹⁾が、本報告では、そのような観点での分類はしていないため、その点を知りたい場合は参考文献に示した原論文を参照されたい。

橋の耐震設計という観点では、川島らの研究¹²⁾のように、対象とする橋の動的解析モデルを作成し、それに周辺地盤上で観測された地震動を作用させて観測された橋の地震応答をベストフィットする減衰定数を求める¹²⁾という方法もあるが、ここでは、そのようなアプローチのものは、調査対象としていない。なお、本報告は、既往の実証的なデータの整理結果のみを示しており、詳細な検討は行っていない。

3. 橋梁のモード減衰定数の調査：常時微動と自由減衰振動試験および強制振動試験^{13)~19), 21)~44)}

図-1は、吊橋（第2ボスボラス橋、ゴールデンゲート橋、白鳥大橋、関門橋架設系）と鋼斜張橋（天保山大橋）、ニールセンローゼ橋（新浜寺大橋）を対象に行われた常時微動観測より求めた橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。桁の中に、固有周期が長くモード減衰定数の値が大きいものがある。

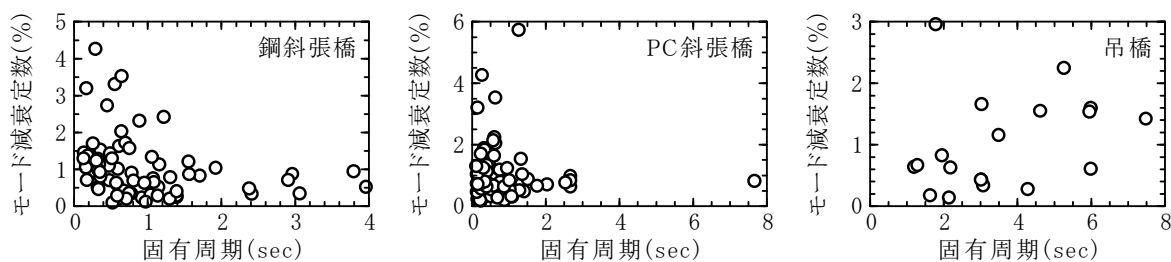


図-3(1) 強制振動試験によって推定された橋のモード減衰定数：吊構造系橋梁

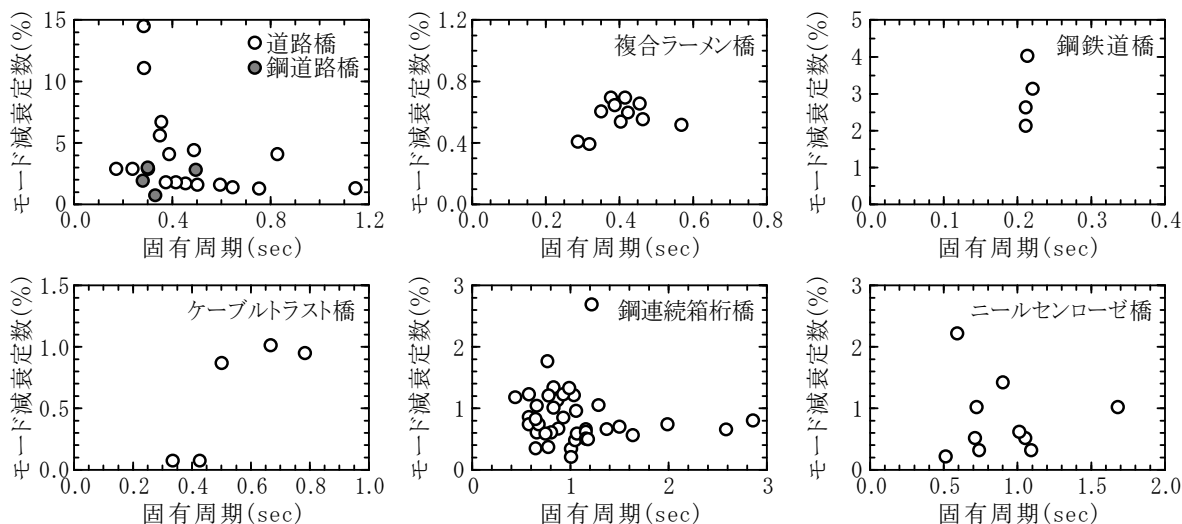


図-3(2) 強制振動試験によって推定された橋のモード減衰定数：各種橋梁

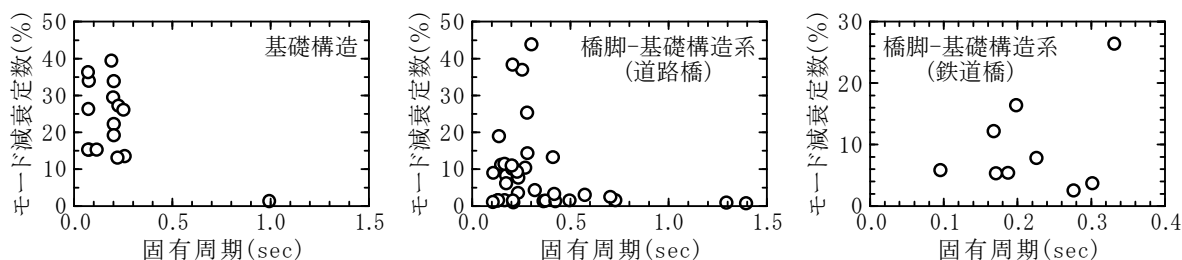


図-3(3) 強制振動試験によって推定された橋のモード減衰定数：基礎構造・橋脚-基礎構造系

これは、ゴールデンゲート橋での値^{14)~16)}である。桁の減衰としては大きいこと、ゴールデンゲート橋の固有周期としては長すぎることから、データの真偽を確認する必要がある。

図-2(1)は、鋼斜張橋（Shipshaw橋，大和川橋梁，菅原城北大橋，天保山大橋，東神戸大橋，樫石島橋，その他複数¹⁹⁾）とPC斜張橋¹⁸⁾および複合箱桁斜張橋（生口橋）の自由減衰振動試験より求めた橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。図-2(2)は、鋼道路橋²⁶⁾と連続鋼箱桁橋（正蓮寺川橋，東京湾横断道路）およびトラス橋（天草1号橋，天草2号橋）³¹⁾とPC有ヒンジラーメン橋（天草3号橋，天草4号橋）³¹⁾，パイプアーチ橋（天草5号橋）³¹⁾の自由減衰振動試験より求めた橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。

図-3(1)から図-3(3)は，強制振動試験によって得られた橋のモード減衰定数である。図-3(1)は，吊

構造系橋梁を対象としたもので，PC斜張橋¹⁸⁾と鋼斜張橋（尾道大橋，末広大橋，水郷大橋，六甲大橋，名港西大橋，豊後橋，松ヶ山橋，小本川橋，合掌大橋，大和川橋，石狩河口橋，天保山大橋，東神戸大橋）および吊橋（大鳴門橋，大島橋，南備讃瀬戸大橋，マタディ橋）のモード減衰定数と固有周期の関係である。

図-3(2)は，道路橋²¹⁾，鋼道路橋²⁶⁾，複合ラーメン橋²³⁾，鋼鉄道橋²⁷⁾，ケーブルトラス橋²⁹⁾，鋼連続箱桁橋（正蓮寺川橋，東京湾横断道路，関西国際空港連絡橋架設系・完成系）とニールセンローゼ橋（新浜寺大橋）のモード減衰定数と固有周期の関係である。

図-3(3)は，基礎構造^{21),22)}や橋脚-基礎構造系^{21),24)}を対象とした減衰定数と固有周期の関係である。

図-1の常時微動観測と図-2(1)と図-2(2)の自由減衰振動試験より得られた橋のモード減衰定数は，一

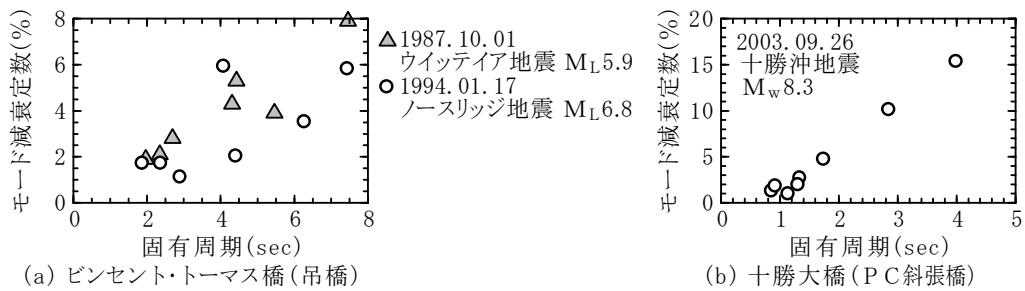


図-4 (1) 地震観測記録によって推定された橋のモード減衰定数

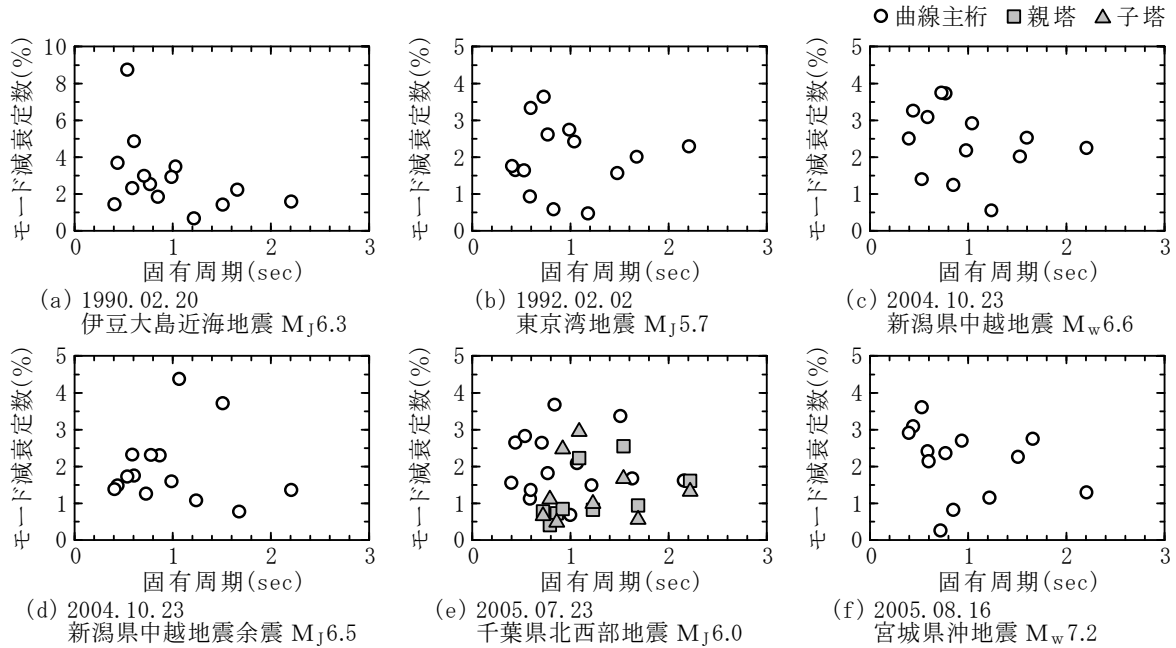


図-4 (2) 地震観測記録によって推定された橋のモード減衰定数：かつしかハープ橋(曲線鋼斜張橋)

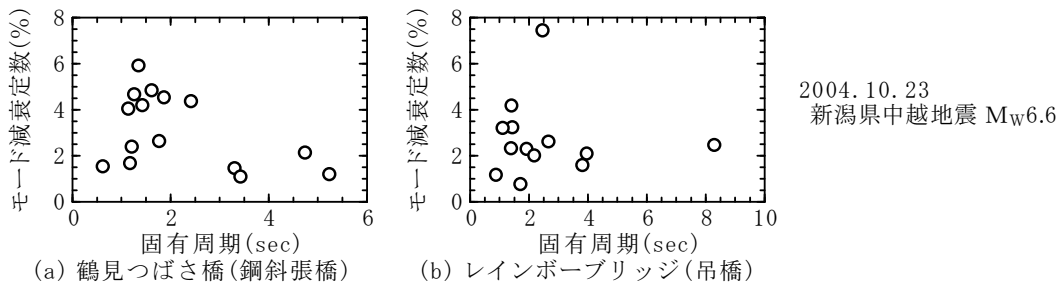


図-4 (3) 地震観測記録によって推定された橋のモード減衰定数

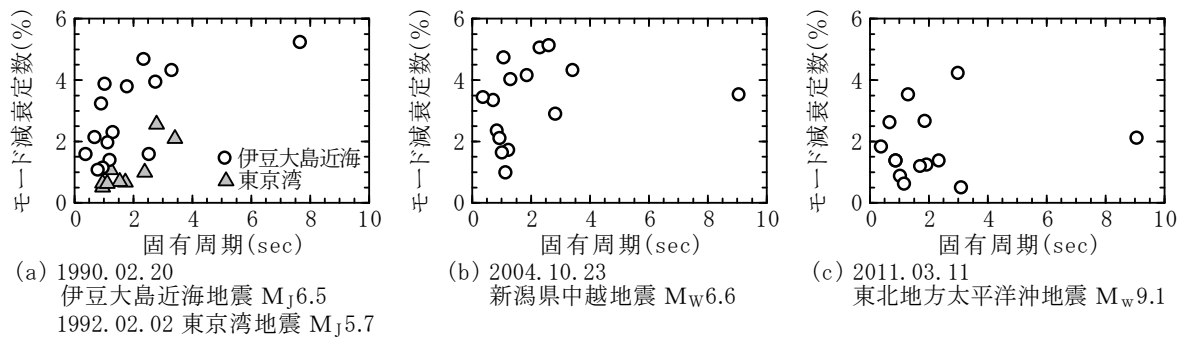


図-4 (4) 地震観測記録によって推定された橋のモード減衰定数：横浜ベイブリッジ(鋼斜張橋)

部の大きな値を除けば、概ね0.1%から2.0%程度の値にあることがわかる。図-3(1)と図-3(2)の強制振動試験より得られた橋のモード減衰定数は、常時微動観測や自由減衰振動試験での値から大きく変化して

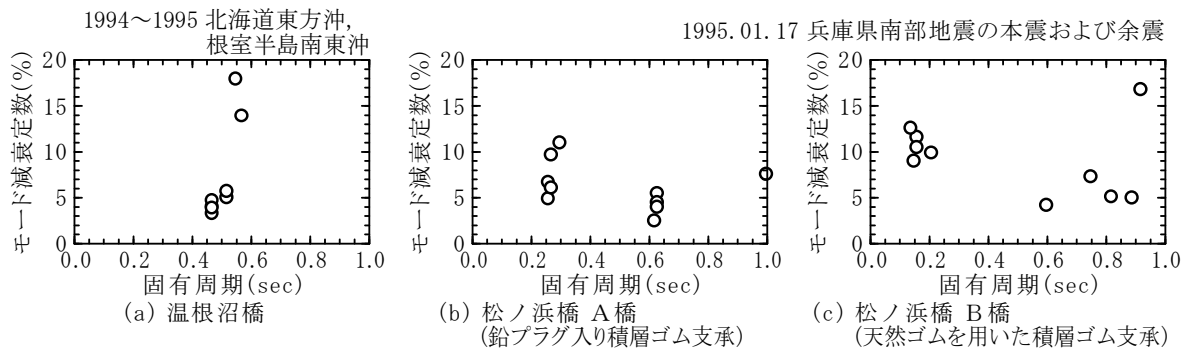


図-4(5) 地震観測記録によって推定された橋のモード減衰定数：免震橋梁

はいないが、2.0%よりも大きな減衰定数の値もかなりの率で存在していることがわかる。図-3(3)の基礎構造がかかわる強制振動試験結果は、前述した相互作用効果のため10%より大きな減衰定数の値が得られている。

4. 橋梁のモード減衰定数の調査：地震観測^{20), 45)~54)}

図-4(1)から図-4(4)は、文献20)と文献45)から54)で公開されている橋の地震応答の観測記録から求めた橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。

図-4(1)は、ビンセント・トーマス橋で観測された1987.10.01ウィッティア地震ML5.9と1994.01.17ノースリッジ地震ML6.8および、十勝大橋で観測された2003.09.26十勝沖地震Mw8.3の地震応答から推定した橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。両橋ともに、固有周期が長いほど（低次の固有振動モードほど）、橋のモード減衰定数が大きい傾向にある。

図-4(2)は、かつしかハープ橋で観測された6地震（1990.02.20伊豆大島近海地震MJ6.3, 1992.02.02東京湾地震MJ5.7, 2004.10.23新潟県中越地震Mw6.6, 2004.10.23新潟県中越地震余震MJ6.5, 2005.07.23千葉県北西部地震MJ6.0, 2005.08.16宮城県沖地震Mw7.2）による地震応答から推定した橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。地震の規模が異なる地震で励起された地震応答から求めた橋のモード減衰定数であるが、地震の規模だけでなく距離や地震動の伝播経路も異なるため地震間の差は少なく、概ね1.0%から4.0%の値が得られている。固有周期に対する変化は、図-4(1)と逆で、固有周期が短いほど（高次の固有振動モードほど）、橋のモード減衰定数が大きい傾向にある。

図-4(3)は、鶴見つばさ橋とレインボーブリッジで観測された2004.10.23新潟県中越地震Mw6.6による地震応答から推定した橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。橋のモード減衰定数は、2.0%から4.0%の値を示しており、固有周期に対する変化は、固有周期が短いほど大きい傾向にある。

図-4(4)は、横浜ベイブリッジで観測された4地震（1990.02.20伊豆大島近海地震MJ6.5, 1992.02.02東京湾地震MJ5.7, 2004.10.23新潟県中越地震Mw6.6, 2011.3.11東北地方太平洋沖地震Mw9.1）による地震応答から推定した橋のモード減衰定数と固有周期の関係である。橋のモード減衰定数は、1.0%から5.0%の値を示しており、固有周期に対する変化は明確に現れていない。

図-4(5)は、積層ゴム支承を用いた松ノ浜橋B橋と積層ゴム系免震支承を用いた温根沼橋および松ノ浜橋A橋の橋の地震応答から推定した等価減衰定数と固有周期の関係である。温根沼橋と松ノ浜橋A橋の減衰定数には、積層ゴム系免震支承のエネルギー吸収による減衰効果も含まれており、温根沼橋は5.0%から20%に、松ノ浜橋A橋は3.0%から10%の範囲に

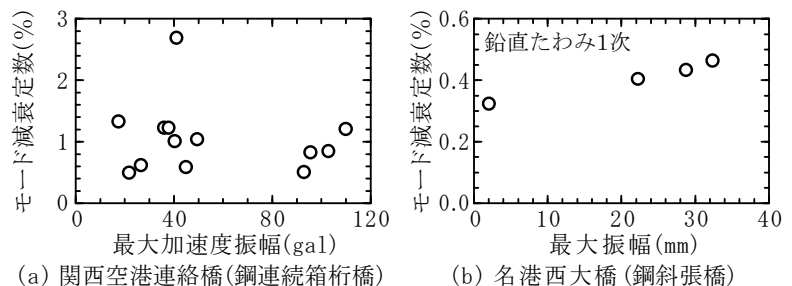


図-5(1) 橋のモード減衰定数の振幅依存性

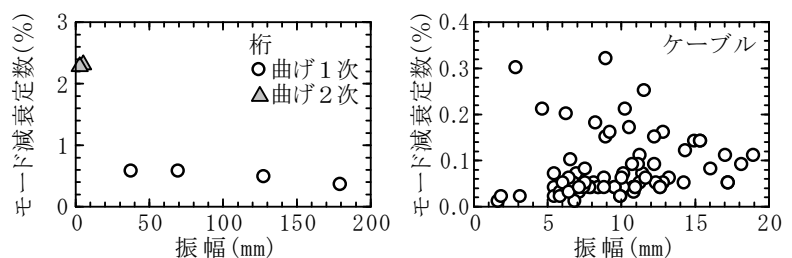


図-5(2) 橋のモード減衰定数の振幅依存性：東神戸大橋（鋼斜張橋）

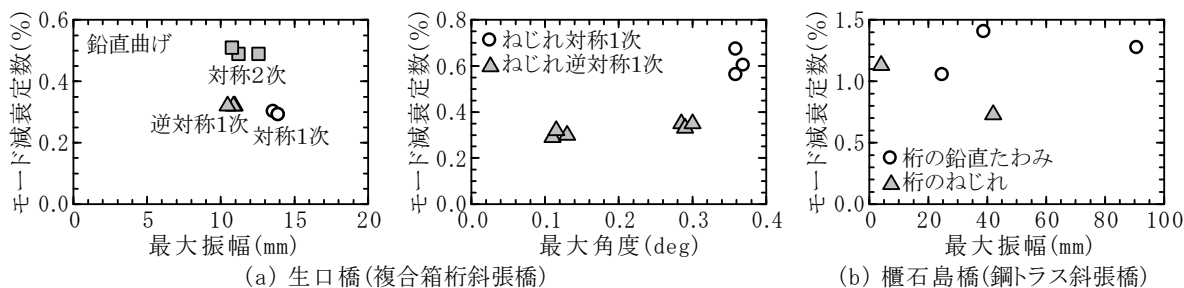


図-5(3) 橋のモード減衰定数の振幅依存性

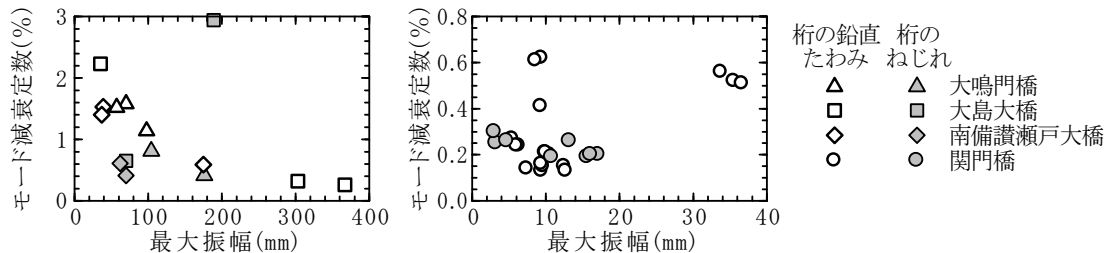


図-5(4) 橋のモード減衰定数の振幅依存性：吊橋

分布している。エネルギー吸収が小さい天然ゴムによる積層ゴムを用いた松ノ浜橋B橋の減衰定数が、松ノ浜橋A橋よりも大きいのは、支承の水平方向剛性がA橋より硬いB橋の方が、基礎構造―地盤間ばね-橋脚-支承構造の水平方向剛性からなる直列システムの中で、基礎構造―地盤間ばねの影響が強く現れるため、基礎構造―地盤間の相互作用効果による減衰効果が大きく寄与したからと考えられる。

ビンセント・トーマス橋と横浜ベイブリッジで観測された2地震（1990.02.20伊豆大島近海地震M_J6.5, 1992.02.02東京湾地震M_J5.7）は、ハーフパワー法によって減衰定数を求めており、その他の橋は、藤野ら（東京大学橋梁研究室）によってシステム同定手法によって減衰定数を求められている。

図-1に示した常時微動や図-2と図-3に示した人工的な加振に比べて、地震観測（橋の地震応答）から推定したモード減衰定数の方が、全般的に値が大きい傾向にある。

5. 橋梁のモード減衰定数の振幅依存性

文献13)から54)の中で、加振振幅と減衰定数の関係を整理したものを選び出して図に整理したのが、図-5(1)から図-5(6)である。

加振々幅やねじれ角および地震応答変位や加震強度（入力加速度）が増加するに伴い、減衰定数の値が増加する傾向が現れているのは、図-5(1)の関西空港連絡橋と名港西大橋、図-5(3)の生口橋のねじれモード、図-5(4)に示す吊橋の変位振幅100mm以下の領域、図-5(5)のビンセント・トーマス橋、図-5(6)の横浜ベイブリッジである。

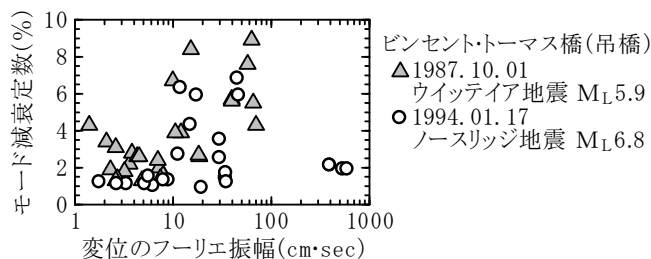


図-5(5) 橋のモード減衰定数の振幅依存性

図-1から図-5に示した橋の減衰定数は、何れも橋の応答振幅が耐震設計で対象としている大きな応答振幅ではないため、大地震時における橋の減衰定数を外挿するという目的のためには、今後のデータの蓄積が必要である。橋の減衰定数の変位振幅依存性を意図した研究には、岡内らの研究⁵⁵⁾があるが、人工的な加振のため、橋の耐震設計で想定している応答変位振幅にはほど遠いものである。

建築分野では、事情が大きく異なる、地震観測記録や風観測記録を用いて構造物の振動特性（固有周期や減衰定数）の振幅依存性を検討した研究^{例えば56),57),58)}が行われている。原子力分野も、部材毎に、その応力レベルに応じた減衰定数の値が耐震設計に用いられている^{59),60),61),62)}。特に、文献61)は、減衰の振幅依存性に関する既往の研究成果がまとめられており、一読の価値がある。

6. まとめ

橋梁の耐震設計に用いる減衰の見積もりを耐震設計の場で議論できるようにすることを目標に、国内外の文献から橋梁の減衰に関する実証的なデータを収集・整理した。ここでは、あくまでも整理結果を

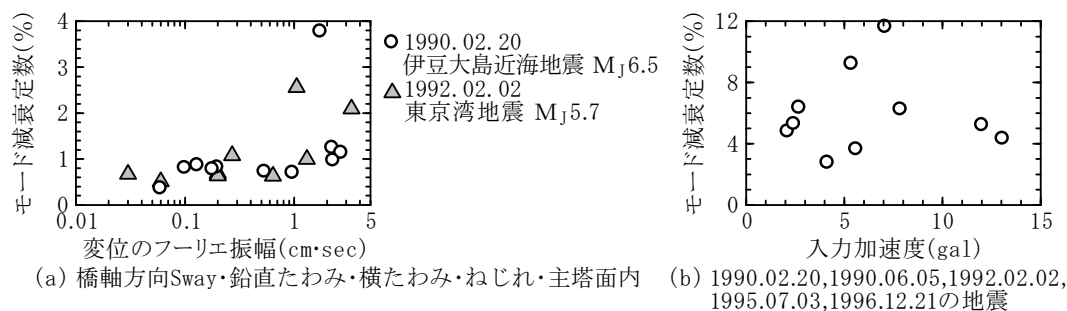


図-5(6) 橋のモード減衰定数の振幅依存性：横浜ベイブリッジ(鋼斜張橋)

示しただけで、橋の耐震設計に用いることができるだけの情報は抽出できていない。

減衰は実験によって評価することが可能な機械分野⁶³⁾と異なり、構造物の減衰特性を解明するためには、質の良い地震観測データが必要である。しかし、現在の橋梁の地震応答観測状況を考えると期待が薄くなってしまふ。建築分野では、RC構造の耐震設計に用いる粘性減衰マトリックスを初期剛性比例型とした場合と瞬間剛性比例型とした場合でどちらが、実際の地震応答に近いかを強震観測記録によって検討し瞬間剛性比例型に近いという研究⁶⁴⁾や、基礎構造―地盤間の相互作用による減衰係数を強震観測記録から評価する研究⁶⁵⁾が出てきている。橋の耐震設計が減衰によって大きく変化するという実状を考えると、橋梁分野も、地震観測記録に基づいて減衰特性を明らかにするという研究が行われないと、検証なき耐震設計といわれても誰も反論できないのではないかと思う。

参考文献

- 1) 藤野陽三：巻頭言・この40年に変わったこと、変わらなかったこと，計算工学，Vol.17，No.3，pp.2，2012.
- 2) 田村幸雄：減衰定数の設定，建築雑誌，Vol.110，No.1372，pp.42-43，1995.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編(平成24年3月)，2012.
- 4) 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，2012.
- 5) 矢部正明：粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答に与える影響，第4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.101-108，2000.
- 6) 矢部正明：粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答に与える影響(その2)，第6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.421-432，2003.
- 7) 滝澤春男，関弘義：塑性履歴域で異なる粘性減衰性が梁崩壊型靱性架構の激震応答挙動に及ぼす影響，構造工学論文集Vol.33B，pp.103-110，1987.
- 8) 和田章：Structures and Mechanics Seminar構造工学の科学―塑性変形と鋼構造建築の耐震設計，東京大学工学部一号館14番教室で2008.10.31に行われた講義資料，2008.
- 9) 伊藤学，片山恒雄：橋梁構造の振動減衰，土木学会論文集，第117号，pp.12-22，1965.
- 10) 伊藤学：橋梁上部構造の振動減衰，土木構造・材料論文集，第1号，pp.3-8，1986.
- 11) (社)日本建築学会：建築物の減衰，2000.
- 12) 川島一彦，荻本英典，渡邊学歩，西弘明：強震記録に基づくPC斜張橋の減衰特性，土木学会論文集A，Vol.65，No.2，pp.426-439，2009.
- 13) J.M.W.Brownjohn, A.A.Dumanoglu and R.T.Severn : AMBIENT VIBRATION SURVEY OF THE FATIH SLUTAN MEHMET (SECOND BOSPUS) SUSPENSION BRIDGE, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.21, 907-924 (1992).
- 14) J.M.W.Brownjohn : Estimation of damping in suspension bridges, *Proc. Instu Civ. Engrs Structs & Bldgs*, 1994, 104, Nov., 401-415.
- 15) Ahmed M.Abdel-Ghaffar and Robert H.Scanlan : AMBIENT VIBRATION STUDIES OF GOLDEN GATE BRIDGE: I. SUSPENDED STRUCTURE, *J. eng. mech. ASCE* 111, 463-482 (1985).
- 16) Ahmed M.Abdel-Ghaffar and Robert H.Scanlan : AMBIENT VIBRATION STUDIES OF GOLDEN GATE BRIDGE: II. PIER-TOWER STRUCTURE', *J. eng. mech. ASCE* 111, 483-499 (1985).
- 17) 阿部雅人，藤野陽三，長山智則，池田憲二：常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例，土木学会論文集 No.689/I -57, 261-274, 2001.10.
- 18) 武田哲夫：PC斜張橋の耐震設計における減衰特性の評価に関する研究，東京工業大学学位論文，平成12年2月.
- 19) 川島一彦，運上茂樹，吾田洋一：斜張橋の耐震性に関する研究-(その1)振動実験から見た斜張橋の振動特性-，土木研究所資料，第2388号，昭和61年6月.
- 20) 運上茂樹，足立幸郎：強震記録に基づく長大吊橋の地震時減衰特性，土木研究所資料，第3561号，平成11年9月.
- 21) 建設省土木研究所：橋梁の耐震設計に関する研究(III)-橋梁の振動減衰に関する実測結果-，土木研究所報告第139号，pp.63-166，昭和46年2月.
- 22) 建設省土木研究所地震防災部・振動研究室：三郷インターチェンジ下部工(PT-24U)加振振動実験，土木研究所資料，第2145号，昭和59年10月.
- 23) 社団法人日本橋梁建設協会・財団法人土木研究センター：複合ラーメン橋の振動特性に関する検討委員会平成20・21年度報告書，平成22年3月.
- 24) 久保慶三郎：橋脚振動の減衰性と振動性状，地震工学会国内シンポジウム講演集，pp.135-136，1962.11，東京.
- 25) 岡本舜三，久保慶三郎：吊橋の減衰係数の実測結果，生産研究，第9巻，第12号，pp.516-520.
- 26) 小西一郎，山田善一：既設鋼道路橋の振動減衰について，土木学会誌，38-10，昭和28年10月.

- 27) 橋本香一：起震機による鋼橋の振動特性の研究(その一, 径間 200tf Schwedler 型ピン結トラスの場合), 土木学会誌, 40-10, 昭和 30 年 10 月.
- 28) 石原重信, 古川満男, 恒川昌宏, 高枝新伍, 酒井洋典, 玉木利裕：大型橋梁の塔および桁における振動減衰特性－現場振動試験と評価－, 川崎重工技法, pp.86-96, 115 号, 1992 年 10 月.
- 29) 望月秀次, 森山佳樹, 濱崎義弘, 本田裕嗣, 岡田徹：ケーブルトラス橋の振動特性, 土木学会第 55 回年次学術講演会, I-B99, 平成 12 年 9 月.
- 30) Filiatrault A., Tinawi R., and Massicotte B. : Damage to Cable-Stayed bridge during 1988 Saguenay earthquake. 2:Dynamic analysis, *J.struct.eng.*ASCE 119, 1450-1463.
- 31) 日本道路公団福岡支社・社団法人土木学会：工事報告書 天草五橋, 昭和 42 年 5 月.
- 32) 東京湾横断道路株式会社：東京湾横断道路プロジェクト, 平成 10 年 3 月.
- 33) 関西国際空港株式会社 工務二部：関西国際空港連絡橋工事誌, 平成 6 年 6 月.
- 34) 阪神高速道路公団：大和川橋梁工事誌, 昭和 59 年 3 月.
- 35) 日本道路公団名古屋建設局・名港西大橋編集委員会：名港西大橋工事誌, 昭和 61 年 3 月.
- 36) 高橋朋代, 池田憲二, 三田村浩, 岸徳光, 巽治：常時微動観測波形を用いた石狩河口橋の減衰特性評価, 土木学会第 56 回年次学術講演会, I-A160, pp.320-321, 平成 13 年 10 月.
- 37) 大阪市建設局 街路部立体交差課：菅原城北大橋工事誌, 平成 2 年 3 月.
- 38) 阪神高速道路公団 大阪第三建設部・天保山大橋工事誌編集委員会：天保山大橋工事誌(5 号湾岸線), 平成 4 年 3 月.
- 39) 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター「東神戸大橋工事誌編集委員会」：東神戸大橋工事誌(5 号湾岸線), 平成 6 年 5 月.
- 40) 本州四国連絡橋公団：生口橋工事誌, 平成 5 年 7 月.
- 41) 本州四国連絡橋公団：瀬戸大橋技術誌, 平成元年 3 月.
- 42) 阪神高速道路公団大阪第一建設部・(財)阪神高速道路管理技術センター「新浜寺大橋工事誌編集委員会」：新浜寺大橋工事誌(4 号湾岸線), 平成 5 年 12 月.
- 43) 日本道路公団・社団法人土木学会：関門橋工事報告書, 昭和 52 年 3 月.
- 44) 社団法人土木学会 マタディ橋工事誌編集委員会：マタディ橋工事誌, 昭和 61 年 6 月.
- 45) Muhammad Tariq Amin Chaudhary, Masato Abe, Yozo Fujino : Investigation of atypical seismic response of a base-isolated bridge, *Engineering Structures* 24 (2002), 945-953.
- 46) Muhammad Tariq Amin Chaudhary, Masato Abe, Yozo Fujino, Junji Yoshida : System Identification of Two Base-Isolated Bridges Using Seismic Records, *Journal of Structural Engineering*, October 2000, 1187-1195.
- 47) Dionysius M Siringoringo : Preliminary Analysis on the Seismic Response of Tokachi Cable-Stayed Bridge Subjected to the 2003 Great-Tokachi Earthquake.
- 48) Dionysius M Siringoringo, Yozo Fujino : Dynamic characteristics of a curved cable-stayed bridge identified from strong motion records, *Engineering Structures* 29 (2007), 2001-2017.
- 49) Dionysius M Siringoringo, Yozo Fujino : System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (2007), DOI:10.1002/eqe.758.
- 50) 若林登, 高野晴夫, 七井英子, 矢部正明：地震観測記録による横浜ベイブリッジの固有振動特性, 土木学会第 48 回年次学術講演会(平成 7 年 9 月), I -93, pp.334-335.
- 51) 矢部正明, 七井英子, 若林登, 高野晴夫：地震観測記録による横浜ベイブリッジのモード減衰定数の推定, 土木学会第 48 回年次学術講演会(平成 7 年 9 月), I -94, pp.336-337.
- 52) Dionysius M Siringoringo, Yozo Fujino : Observed dynamic performance of the Yokohama-Bay Bridge from system identification using seismic records, *Struct.Control Health Monit.*, 2006, 13:226-224, DOI:10.1002/stc.135.
- 53) Dionysius M Siringoringo, Yozo Fujino : System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (2007), DOI:10.1002/eqe.758.
- 54) 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 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 A 1 (構造・地震工学), Vol.69, No.2, 372-391, 2013.
- 55) 岡内功, 宮田利雄, 辰巳正明, 佐々木伸幸：大振幅加振による長大斜張橋の実橋振動実験, 土木学会論文集, No.455, I-21, pp.75-84, 1992.
- 56) 中田信治, 福和伸夫, 西畑尚：実大振動実験と強震観測に基づく低層鉄骨住宅の振動特性の振幅依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 574 号, pp.85-92, 2003.
- 57) 福和伸夫, 山崎靖典, 小島宏章, 飛田潤：観測記録に基づく微動時・強風時・地震時の建築物の応答性状の違いの分析, 日本建築学会構造系論文集, 第 598 号, pp.61-68, 2005.
- 58) 中村尚弘, 鹿嶋俊英, 木下拓也, 伊藤真二, 宮本泰志, 曾根孝行, 荏本孝久, 犬伏徹志：振幅依存性を考慮した中低層 RC, SRC 造建物の水平 1 次振動特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.721, pp.471-481, 2016.
- 59) U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION : REGULATORY GUIDE 1.61 DAMPING VALUES FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS, DIRECTORATE OF REGULATORY STANDARDS, 1973.
- 60) Nathan M., HON. M., John A. and Kanwar K. : SEISMIC DESIGN SPECTRA FOR NUCLEAR POWER PLANTS, *JOURNAL OF THE POWER DIVISION*, pp.287-303, 1973.
- 61) J.D. STEVENSON : STRUCTURAL DAMPING VALUES AS A FUNCTION OF DYNAMIC RESPONSE STRESS AND DEFORMATION LEVELS, *Nuclear Engineering and Design*, 60, pp.211-237, 1980.
- 62) N.M.Newmark and W.J.Hall : EARTHQUAKE SPECTRA AND DESIGN, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., pp.53-57, 1982.
- 63) 白木万博, 藤田勝久, 梶村元彦, 田中守, 猿山一郎, 広瀬次郎, 小久保映治, 半沢克巳, 押沢健治：原子力施設の耐震設計のための減衰特性, 三菱重工技報, Vol.23, No.5, pp.70-77, 1986.
- 64) 森田高市, 鹿嶋俊英：強震観測データに基づく RC・SRC 造超高層建物の減衰定数の傾向について, 日本建築学会技術報告集, Vol.23, No.53, pp.49-52, 2017.
- 65) 森田高市, 鹿嶋俊英：強震観測に基づく建物・地盤相互作用の影響を考慮した減衰定数の評価, 日本地震工学会論文集第 16 巻, 第 9 号, pp.1-12, 2016.