

橋梁における耐震補強技術

幸左 賢二*

1. まえがき

橋梁においては、近年技術革新が目覚ましく、その設計基準も改訂を重ねている。たとえば、道路橋示方書においては、ほぼ5年ごとに改訂が実施されている。その結果、とくに1980年以前の既設橋梁は現在の耐震基準に照らしてみると、耐震性能の低いものが大半である。多くの既設橋梁において耐震補強が必要となるが、予算や時間の制約もあり、兵庫県南部地震において大きな損傷が生じた橋脚、支承、桁の落下に対応した部材の耐震補強が、現在重点的に実施されている。

ここでは、まず現在までの、わが国の橋梁耐震補強手法の概要について説明する。ついで、わが国の耐震補強の特徴を明らかにするために、同様に橋梁の耐震補強が数多く実施されている米国における特徴的耐震補強法について説明する。

2. 耐震補強法

耐震補強と要求性能の関係を図-1に示す。構造物の設計地震力は一般に固有周期によって図中の曲線のように表される。曲線の内側では構造物の保有耐力が設計地震力を下回るため、補強が必要となる。図-1のAである従来型補強法では、弱点部材である下部構造、基礎構造などの強度やじん性を増して耐震性能を向上させることによって、要求性能を満たす曲線の外側の領域まで耐震性能を引き上げる。

これに対してB、Cは地震応答そのものを減らす手法である。Bは免震機能を設けることにより、保有耐力を変えずに、要求性能を満たす長周期の領域に固有周期をシフトさせる手法である。この場合、固有周期を延ばすだけでなく、一般に減衰性能も付与されるため、応答はさらに小さくなる。とくに、短周期の構造物に適用すると免震の効果が大きい。また、Cに示すように制震機構を設けることによってエネルギー吸収を図れば、減衰性能が増し

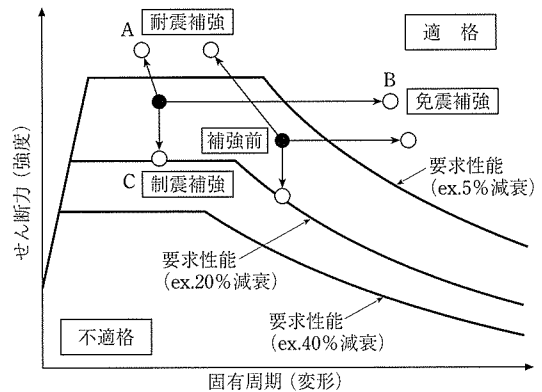


図-1 耐震補強の概念

て地震応答を減らすことができる。とくに、固有周期の長い構造物や剛性の低い構造物に適した方法である^{1),2)}。

3. 耐震補強工法

部材別に分類した耐震補強工法を表-1に示す³⁾。このうち、わが国においてはとくに兵庫県南部地震において多くの損傷が認められた橋脚、支承構造およびフェイルセーフ機能に重点が置かれて耐震補強が実施されている。以下にその概要を説明する。

表-1 耐震補強工法

補強の目的	力学的な要求耐震性能	耐震補強法
下部構造・躯体の耐震性の向上	・躯体の曲げ耐力、せん断耐力の向上 ・変形性能の向上 ・剛性の向上(変形の拘束)	・鉄筋コンクリート巻立て ・鋼板巻立て ・新素材等の巻立て ・耐震壁増設(ラーメン構造ほか) ・補剛材の増設
基礎構造の耐震性の向上	・地盤の液状化抵抗の向上 ・支持力(鉛直, 水平)の向上 ・基礎本体の耐力・変形性能の向上 ・洗掘による支持力不足対策	・地盤改良 ・増し杭 ・フーチング拡大 ・地中壁の設置 ・根固め
支承構造の耐震性の向上	・水平耐力の向上 ・変形性能の向上	・支承の交換(ゴム支承との交換) ・変位制限構造の設置
橋全体系の耐震性の向上	・地震時慣性力の低減 ・全体系の変位の制限	・免震構造, 制震構造 ・全体系の中で慣性力分担の調整 ・全体系の中で変位の制限
フェイルセーフ機構	・落橋防止システムの設置	・桁かかり長 ・落橋防止構造 ・変位制限構造 ・段差防止構造



* Kenji KOSA

九州工業大学 建設社会工学科

3.1 RC 橋脚耐震補強

1980年頃以前の旧基準で設計された橋脚は、現在の設計

基準に基づいて比較すると、せん断耐力が小さく、また段落とし部の必要定着長や塑性ヒンジ発生を考慮した帯鉄筋フックなどの構造細目においても不十分なものが多い。

たとえば、図 - 2 は土木学会標準示方書における許容せん断応力度の推移を示している。図 - 2 より 1980 年以前の基準では、コンクリート断面で受けもつことができるせん断

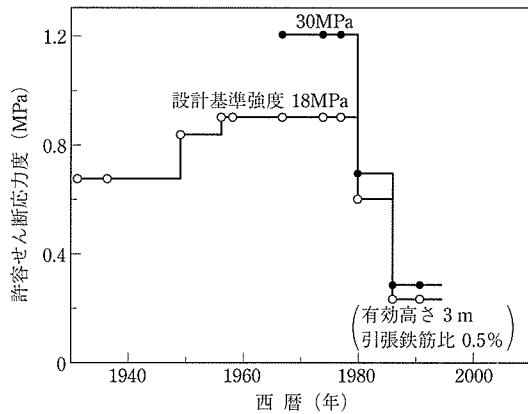


図 - 2 許容せん断応力度の変遷

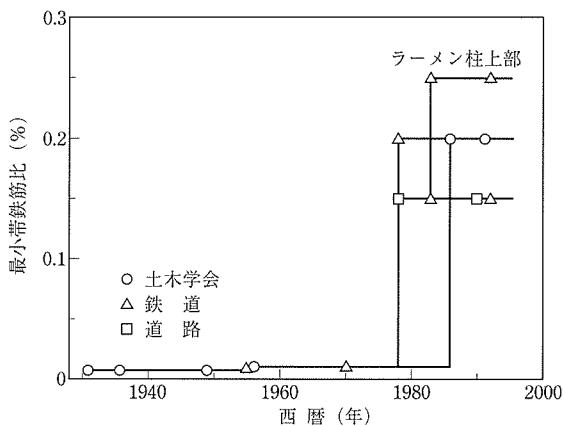


図 - 3 最小帯鉄筋比の変遷

断応力が、大きく規定されていたことが分かる^{4), 5)}。

また、最小鉄筋量については、帯鉄筋比ではなく、帯鉄筋径で規定されていたため、部材寸法が相対的に大きな橋脚では帯鉄筋比が非常に小さいものが多い。図 - 3 は一辺 1 m の正方形断面で、軸方向鉄筋が 32 mm の橋脚における最小帯鉄筋比の推移を示したものである。1980 年以前の構造物においては、断面積が大きくなると、最小帯鉄筋比が著しく小さくなるのがわかる⁴⁾。

以上のようなことから、橋脚の補強にあたっては、脆性的なせん断破壊を防止して、塑性ヒンジが形成され、ねばり強い構造にするよう補強する考え方が一般的である。橋脚などの柱部材を対象とした代表的な補強工法を図 - 4 に示すが、RC 巻立て工法、鋼板巻立て工法、連続繊維巻立て工法が多く用いられている。RC 巻立て工法は既設部材に主鉄筋および帯鉄筋を配置し、断面を増加させる方法であり、一般にはもともと経済性に優れている²⁾。

鋼板補強の場合には、鋼板と既設コンクリートとの間にエポキシ樹脂あるいは無収縮モルタルを充填して鋼板の拘束力を既設コンクリートに伝達させる。鋼板巻立て工法は、補強厚さが薄いため、交差点などの側方余裕が小さい場合に有効であり、都市内の高架橋で多く採用されている。現場での作業も短期間で行うことができるが、防錆対策を十分行う必要がある。

連続繊維巻立て工法は、軽量な材料を使用するため施工が容易であり、人力などにより狭小な箇所での作業が可能である。しかしながら、連続繊維巻立て工法は、下地処理やシート塗布作業の良否により補強効果が大きく影響するため、入念な施工が必要である。また、樹脂材料の機能が補強効果を左右するので、施工時の気温や湿度に十分配慮する必要がある。

新しい工法として、たとえば JR では RB 工法を開発している。この工法は、図 - 5 に示すように、せん断補強鉄筋を柱表面に、柱を包囲するように配置して、耐震性能を向上させる工法で、柱の隅角部の支持材により、せん断補強

工 法	RC巻立て工法	鋼板巻立て工法	連続繊維巻立て工法
概略図			
補強厚	25cm	4cm前後	1~2cm
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> ・経済性に優れる ・維持管理が容易 ・重量増による基部負担増 ・補強厚さが厚い 	<ul style="list-style-type: none"> ・補強厚さが薄い ・補強効果が高い ・重機作業が必要 ・塗装の塗り替えが必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・軽量で施工性に優れる ・補強厚さが薄い ・品質管理に留意を要する ・曲げ耐力の向上に不向き

図 - 4 耐震補強工法の特徴

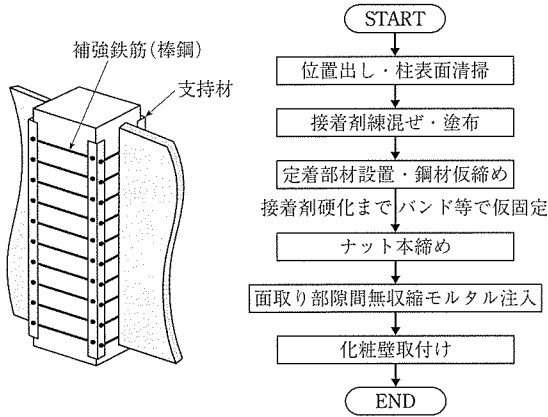


図-5 RB補強工法

鉄筋を定着するものである。柱間に間仕切り壁がある場合には、これを削孔して補強鉄筋を通すことにより、せん断補強が行える工法である⁵⁾。

3.2 支承補強

震度法によって設計された既設橋の支承を、レベル2地震に対しても十分機能を果たす支承補強が実施されている。とくに線支承、ピン支承などは耐震性が低いために優先的に補強する必要が生じている。

図-6に道路橋において用いられている支承タイプ選定の考え方を示す。ここで、タイプBとは単独で、タイプAとは落橋防止システムと補完しあってレベル2地震に抵抗する支承である。既設橋の支承の耐震補強に関しては、タイプBの支承を採用する場合、支承部の交換を行うことが必要となる。しかし、既設橋の支承部の交換においては、支承座部が狭小であったり、既存のものが大反力の支承であるなどの多くの制約条件により、取替えが困難な場合も多い。そのため、既存の支承が震度法で想定する地震力に対して耐震性を有している場合においては、既存のものを活かし、落橋防止システムを設置し、これと補完しあって抵抗するタイプAの支承とすることにより、耐震性を確保する手法も採用されている⁶⁾。

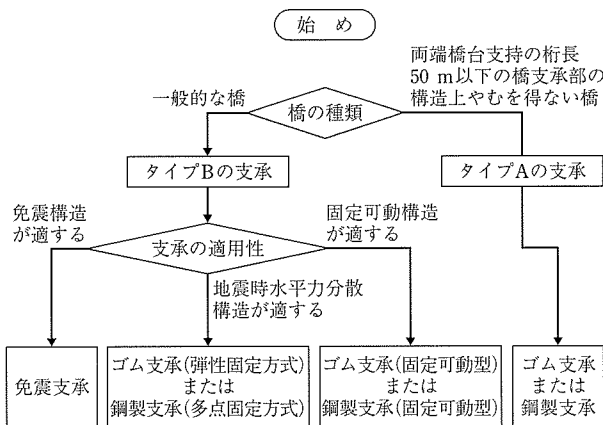


図-6 支承選定の基本的考え方

4. 米国における耐震補強

4.1 免震補強

米国における特徴的な耐震補強法として免震補強および長大橋の耐震補強を取り上げ以下に説明する。AASHTO 免震マニュアルが1990年10月に制定された。その結果、2つの免震設計が可能となった。一つは、免震設計において通常の場合と同じ応答修正係数 (R-Factors) を用いることによって、地震動が支配的な場合には、10%程度建設コストを低減することが可能である。他の一つは、下部構造を弾性設計することによって、橋脚損傷を低減する手法であり、この場合には応答修正係数は1.0から1.5の範囲で用いられる⁷⁾。

免震設計における、AASHTOと道路橋示方書における応答スペクトルを図-7に示す。日本の道路橋示方書では固有周期の変化に伴う応答スペクトルの低下が小さいことが分かる。図-8に式(1)に示される固有周期の変化 (R_p) と応答値の変化 (R_r) の関係を示す。

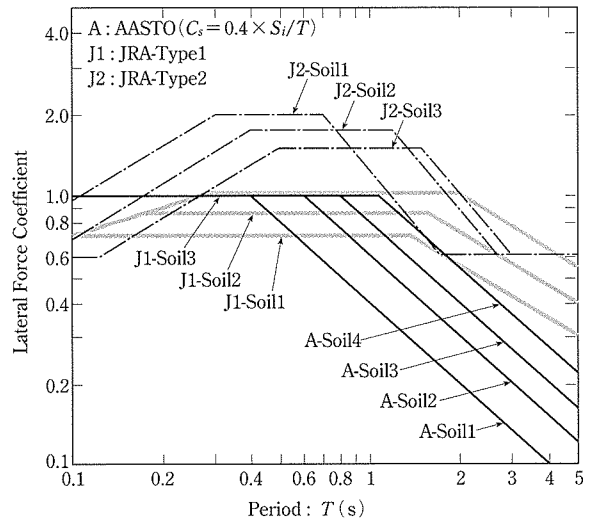


図-7 応答スペクトル

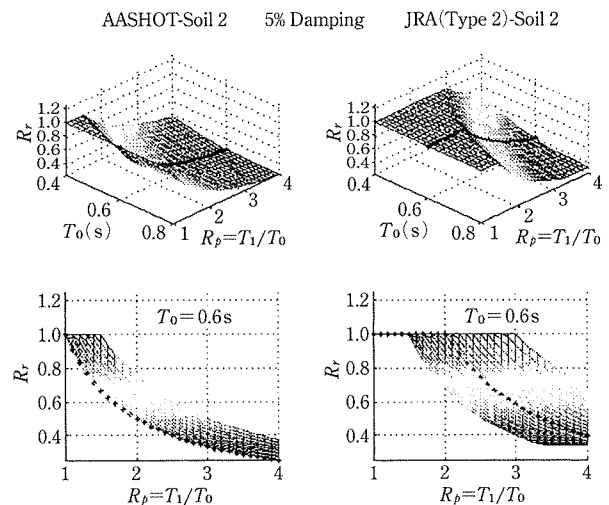


図-8 固有周期と応答値の変化

$$R_p = T_i / T_o, R_r = LFC(T_i) / LFC(T_o) \quad (1)$$

ここで、 T_i ：免震橋梁の固有周期、 T_o ：非免震橋梁の固有周期、LFC：水平震度係数

図 - 8 より T_o が 0.6 秒程度の場合、道路橋示方書では 2 倍程度の固有周期までは応答値が低下しないことがわかる。これに対して、AASHTO では固有周期が 2 倍になることによって、応答値を 50 % 低減することが可能である。このように、AASHTO 基準では、固有周期をシフトさせることが耐震対策上非常に有効となる特徴を有している。

免震マニュアルが制定されて以来、米国においては実橋梁において効率的な免震設計を行うことが可能となった。現在、アメリカにおいては 100 橋あまりの免震橋梁が存在するが、免震橋梁は中程度の設計地震動のエリアの耐震補強に多く用いられる。これは、これらの橋梁においては、設計入力が高減できることから、耐震上弱点となる下部構造を弾性状態のレベルに留めることにより、下部構造の補強をなくすことが可能であることに加えて、支承損傷や桁かかり長の問題を解決できるためである。

4.2 長大橋梁の耐震補強

米国、とくに地震多発地域のカリフォルニア州においては多数の長大橋が存在している。カリフォルニアではロムプリエータ地震以降、段階的な耐震補強が実施されており、現在長大橋の補強が重点的に進められている⁸⁾。一般に、長大橋はトラス部材など多数の構成部材からなり、その部材補強は施工性、コスト、信頼性から問題が多く、免震・制震によって全体の応答を低減する手法が採用されている。表 - 2 に長大橋一覧と耐震補強方法を示し、以下に代表的耐震補強例を示す。

(1) Benicia Martinez 橋

主橋梁は 10 径間からなり、幅員 24 m、橋長 1 488 m (7 @ 161 m, 2 @ 131 m, 1 @ 100 m) となっている。上部構造は、軽量コンクリート床版を有するトラス形式であり、トラスを支持する金属支承をすべて FPS (摩擦型振子式免震支承) に取り替えられている。図 - 9 に示す FPS は各橋脚 2 個、合計 22 個が設置され、この免震効果によってトラスへの地震入力を制限し、トラス各部材の断面力を抑制

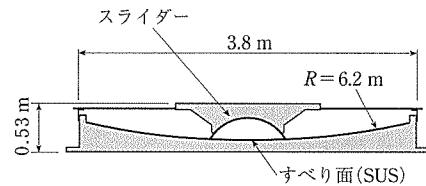


図 - 9 Benicia-Martinez 橋の FPS

している。通常の免震ゴム支承では規模が大きくなるため対応が困難であるが、FPS では曲率半径により周期を比較的容易に設定でき、大変形にも安定した挙動を示す。

(2) Richmond-San Rafael 橋

1956 年に供用を開始した二つのカンチレバー橋を含んでいる。上部構造は、7.6 m から 43.5 m と異なる高さの橋脚塔に支持されており、一般部の橋脚塔は、ダイヤフラムで一部結合されたコンクリート柱とその上に建つ鋼製塔によって構成されている (図 - 10)。基礎は、長さ 4 m から 48.8 m を超える多数の H 鋼杭で構成されており、コンクリート柱下端がベル型となったフーチングによって、橋脚と結合されている。なお、43 橋脚塔のうち、9 つが、橋軸方向地震時に上部構造慣性力を支持するために 4 本柱構造となっており、他の橋脚は 2 本柱である。耐震補強においては、これらの既設 V 型ブレスが、図 - 11 に示される EBF と呼ばれる偏心ブレスフレームと SMRF と呼ばれる特別な



図 - 10 Richmond-San Rafael 橋

表 - 2 長大橋一覧と耐震補強手法

分類	橋梁名	形式	全長 m	完成年	補強	主たる耐震補強方法・装置
既設	Antioch	鋼桁橋	2 877	1978	不要	N/A
〃	Benicia-Martinez	トラス橋	1 895	1962	要	FPS, LRB
〃	Carquinez Strait	カンチレバートラス橋	1 620	1927	撤去	N/A
〃	Second Carquinez Strait	カンチレバートラス橋	1 588	1958	要	トラス部材補強, ロックアップ装置
〃	Richmond-San Rafael	カンチレバートラス橋	8 851	1956	要	EBF, LRB, オイルダンパー
〃	San Francisco-Oakland West	吊橋+トラス橋	7 010	1936	要	一方向 FPS, 基礎補強, HTB 取替え
〃	San Francisco-Oakland East	トラス橋		1937	撤去	N/A
〃	San Mateo-Hayward	鋼床版箱桁橋	10 943	1967	要	増杭
〃	Dumbarton	鋼箱桁	2 600	1981	不要	N/A
〃	Vincent Thomas	吊橋	1 849	1964	要	タワー補強, オイルダンパー, 橋脚 RC 巻立て
〃	Coronado	鋼床版箱桁橋	3 440	1969	要	LRB, 橋脚 RC 巻立て
架替	Therd Carquinez Strait	吊橋	1 028	N/A	N/A	
〃	New Sun Francisco-Oakland East Bay	自旋式吊橋	3 100	N/A	N/A	主塔せん断パネル
新設	Second Benicia-Martinez	コンクリート橋	1 653	N/A	N/A	じん性設計

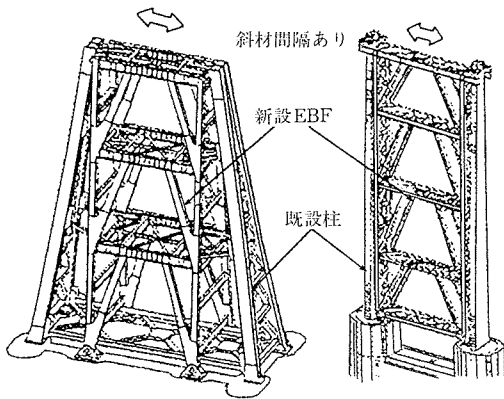


図 - 11 Richmond-San Rafael 橋の EBF

モーメント抵抗塔によって取り替えられる。大地震時には、これらのフレームが先行降伏することで、既設柱、トラス上部構造、あるいは杭基礎への地震荷重の伝達を制限する。

(3) Vincent Thomas 橋

Vincent Thomas 橋は、主径間 457 m、側径間 154 m × 2 の計 765 m のトラス補剛桁を有する吊橋である (図 - 12)。耐震補強としては、主塔の座屈防止のためにプレートをダブリングしているほか、橋軸、橋軸直角方向変位制限のために補剛トラスと主塔間にすべり支承とオイルダンパーが

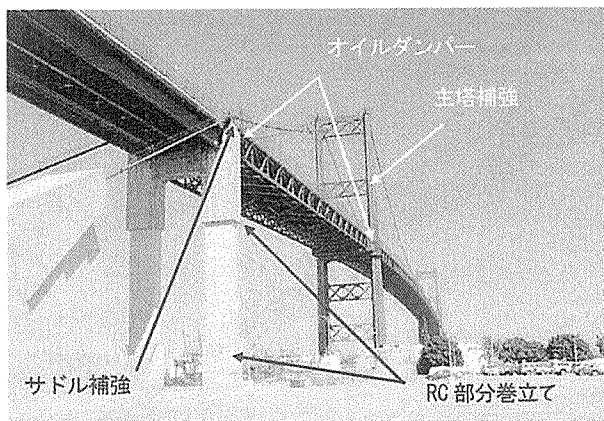


図 - 12 Vincent Thomas 橋

設置されている。ケーブル定着橋脚については、ケーブルサドルのせん断補強のほか、橋軸方向の応答制御のために、橋脚と補剛トラスの間にオイルダンパー、また大伸縮装置が設置されている。

4.3 日本の耐震補強との対比

わが国における橋梁の耐震補強の特徴を米国と対比して述べる。表 - 3 は文献を参考に橋梁の規模や地理的条件が類似しているカリフォルニア州における研究との対比を示

表 - 3 日本とカリフォルニア州の対比

研究項目	カリフォルニア州の研究	日本の研究
RC 単柱式橋脚	○	○
RC ラーメン	○	△
フーチング	○	△
杭	△	△
鋼構造	×	○
免震設計	△	○
長大橋	○	△
断層変位設計	○	△

○：研究が多い △：研究が限られている ×：研究が少ない

す。なお、表 - 3 は個人的見解であることに注意していただきたい。研究項目は総じて類似しているが、カリフォルニア州の方が積極的に取り組んでいる項目には、長大橋、基礎関係、断層変位設計などがある。

両国の耐震補強重点度の違いは、両国の旧設計基準の脆弱さの相違や地震による構造物損傷度の相違などが考えられる。たとえば、米国においては、ロマプリエータ地震による Cypress 高架橋や China Basin 高架橋の損傷などから RC ラーメン橋脚の横梁部や隅角部の耐震補強が精力的に実施されている。しかしながら、わが国においては、このタイプでの大規模な損傷がないこともあり、これらの部材の耐震補強必要性について十分検討されているとは言い難いことから、今後諸外国で発生したタイプの損傷がわが国で発生する可能性を十分に検討する必要がある。

参考文献

- 菅野俊介：コンクリート系建築物の耐震補強技術，コンクリート工学，pp.11-18, Vol.37, No.3, 1999. 3
- 日本コンクリート工学協会：耐震補強の評価に関する研究委員会報告書・論文集，2000. 6
- 運上茂樹：道路橋の耐震診断・耐震補強，基礎工，pp.7 - 12, Vol.27, No. 4, 平成 11 年 4 月
- 土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書（耐震設計編）改訂資料，コンクリートライブラリー 87，pp.11-19, 平成 8 年 7 月
- 町田篤彦，鉄筋コンクリート構造物の耐震補強，セメント・コンクリート，No.606, 1997. 8
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.187-198, 平成 8 年 12 月
- Hidesada KANAJI, Hamid GHASEMI, Phillip YEN, and Sunwoo PARK, A Comparative Study on US-Japan Seismic Isolation Design of Highway Bridges, Proceedings of the 17th U.S-Japan Bridge Engineering Workshop, pp.251-264, 2001. 10
- 金治英貞：米国の長大橋耐震補強と地震応答修正装置 (SFRD) 試験，第 5 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.105-112, 2002.1
- 川島監訳，橋梁の耐震設計と耐震補強，技報堂出版

【2002 年 9 月 17 日受付】