

長大ゲルバートラス橋の損傷制御耐震補強策と 応答低減効果

金治英貞¹・高田佳彦²・鈴木直人³・美濃智広⁴・東谷修⁵・大濱浩二⁶

¹正会員 工修 阪神高速道路公団 大阪建設局設計課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

E-mail: hidesada-kanaji@hepc.go.jp

²正会員 阪神高速道路公団 大阪建設局設計課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

³正会員 工修 建設技術研究所 大阪支社道路交通部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

⁴正会員 建設技術研究所 大阪支社道路交通部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

⁵正会員 港大橋耐震補強工事共同企業体 (日立造船) (〒550-0002 大阪市西区江戸堀2-6-33)

⁶正会員 工修 港大橋耐震補強工事共同企業体 (横河ブリッジ) (〒592-8331 大阪府堺市築港新町2-3)

対象橋梁は、橋長 980m の長大ゲルバートラス橋であり、レベル 地震動に相当する内陸型地震の上町断層系地震および海溝型地震の南海、東南海地震を考慮した解析を実施した場合、数多くの主構トラス部材に座屈あるいは降伏発生の危険性が認められた。そこで、本橋の耐震補強に際しては、常時系において重力を負担する主体構造と地震による横力を負担する非主体構造とを差別化する損傷制御設計概念に基づき、できるだけ主構トラス部材を弾性範囲に抑制するとともに、非主体構造については弾性挙動を期待しない構造系を検討した。つまり、床組免震挙動や座屈拘束ブレース塑性変形による非主部材の免震効果や制震効果を期待し、橋梁全体系の応答低減を試みた。本稿では、それらの設計概念、補強構造、および応答低減効果について述べる。

Key words: seismic retrofit, long span bridge, damage control, floor deck isolation, damper brace, and dynamic analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、全国において橋梁の耐震補強が鋭意実施されてきている。特に、都市の高速道路はリスクマネジメントの見地から補強投資効果の高いインフラであることは疑いの余地がなく、優先的な予算配分がなされている。しかし、都市高速道路と言えども、湾岸地域に位置する長大橋の場合、その投資額、技術的難易度から一般高架橋の耐震補強に遅れをとっているのが現状である。長大橋の場合、補強投資額は大きなものとなるが、同時に損傷時コストである復旧コストと復旧までの経済損失コストも計り知れないことから、長大橋の特性を考慮した、効果的な耐震補強をできるだけ早急に必要な実施する必要がある。

対象橋梁は、全長 980m (中央径間 510m)、また中間支承上の主構高約 70m のゲルバートラス橋である (図-1 参照)。本橋は、最大応答加速度が当初設計の約 4 倍となる近傍断層の地震動を考慮した解析を実施した場合、主構トラス部材に座屈あるいは降伏発生の危険性があることが認められた。また、阪神高速道路

の長大橋の中でも最も建設年次が古く、損傷時コストが大きいことから最も高い耐震補強の優先度が設定されている¹⁾。

このような背景のもと、長大橋の復旧性の難しさを念頭におき、構造要素に要求性能差別化を図る合理的な損傷制御設計概念を用いて、有効な方策を検討した。つまり、常時において重力を負担する主構トラス部材には弾性挙動を期待し、非主体構造部材である床組支承、横力を受ける横構斜材や主塔対傾構などにはその塑性変形を許容する考え方を検討した²⁾。

2. 設計基本方針

(1) 損傷制御構造

損傷制御構造は、巨大地震時においても主体部材に弾性挙動を期待し、非主体部材において制御された損傷を許容する考え方であり、高架橋の橋脚基部に塑性ヒンジを認めるキャパシティデザインを長大橋に進化させた設計思想である。さらに、損傷を許容する部材においては、安定した履歴減衰を確保できる部材ある

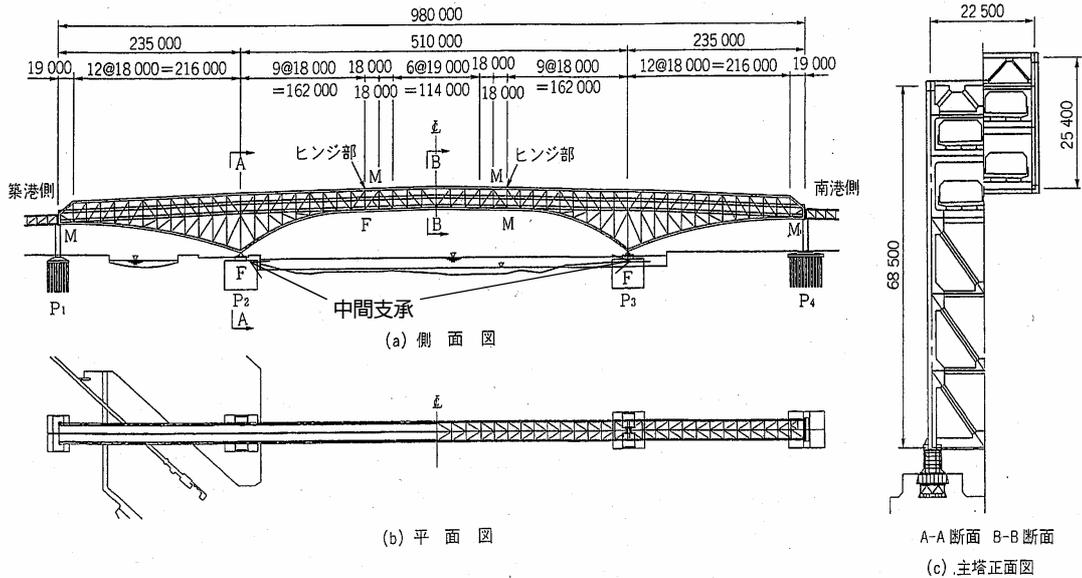


図-1 対象橋梁の一般図(単位:mm)

いは装置設計を行い、エネルギー吸収による応答低減も同時に図る設計である。

具体的には、一般橋の橋脚の場合、柱は主部材であるので、応答塑性率の大きな損傷が生じると、交通開放を可能とする復旧までに長い時間と高い費用を要するが、長大橋のような複雑構造システムの場合、損傷を非主体部材に集中させ、主体部材を弾性設計すれば、基本的に地震直後の交通開放も可能であるとともに、主構弦材に損傷を許す場合に想定される莫大な復旧費を削減することが可能である。

建築分野において和田ら³⁾は、損傷制御設計に関して、レベル1を超えレベル2の地震に対しても再来地震に対して架構の継続使用を考慮すること、最大級の地震に対して残留変形が大きくなると補修継続使用の費用上問題が大きくなること、の2点の問題意識から、塑性化部材を集中させ、持続性をもつ構造部は弾性設計とし、一定以上の変形を惹起する地震に遭遇した損傷部の塑性化部品をサクリファイス部材として交換する、の2点を変更することによりそれまでの超高層ビルの構造設計のあり方に修正を加えるものとしている。さらには、米国カリフォルニア州における橋梁耐震補強プロジェクトにおいてもこのサクリファイス部材の適用がなされている⁴⁾。

本検討に際しては、上記の設計思想に基づき、耐震補強策を考案し、地震応答解析によりその効果を定量的に把握することにした。なお、長大ゲルバートラス橋の場合、主体部材として、主構である上下弦材、斜材、横桁、非主体部材として、横力を受ける上下横構等に区分できると考えた。さらに、トラス横桁に支持

されている鋼床版桁は支承板支承 (BP・A 支承) で接続されているが、この部分も弾塑性挙動を期待できる部分と考えた。

(2) 想定地震と耐震性能

a) 想定する地震外力

レベル 地震は、地域性を考慮した強震動予測に基づくものとし、内陸型地震として上町断層系を震源とする地震、海溝型として南海、東南海地震を想定した対象橋梁地点の地震動を予測した。

b) 許容する損傷状態

許容する損傷状態として、部材の重要度を勘案し、特定部材の降伏は許容し、必要に応じて補修・補強により即座に再使用可能な損傷とする。ここでは、不安定状態となる座屈は認めない。また、支承の破損等により段差が生じても、地震直後にも応急復旧により緊急車両が通行できる状態を目標とした。

(3) 部材性能

a) トラス主構

トラス主構部材について弾性範囲に留めることを原則とし、発生引張りひずみが許容引張りひずみ以内となること、部材圧縮力が座屈耐力以下となることを確認する。ただし、超過がわずかと認められる場合には、適切な検討を行い、これを許容することもある。

b) 2次部材

部材の降伏は許容し、応答塑性率が許容塑性率以内となることを確認する。軸力レベルが大きな圧縮材は座屈しないことを基本とするが、適切な検討を行い、

これを許容することもある。

c) トラス主構支承

支承各部に発生する応力度が、降伏応力度以内となることを確認する。

d) 基礎構造

基礎の応答塑性率が許容塑性率以内となることを確認する。

3. 現橋構造の動的特性

合理的な耐震補強検討に際しては現況の振動モードと固有周期を把握することが不可欠であることから振動形解析を実施した。また、現地特性を考慮した入力地震動の応答スペクトルによりその動的特性の把握を行なった。

(1) 現橋振動形解析

長周期構造系である対象橋の現橋振動特性を把握するために、3次元骨組モデルを用いた。振動モードの代表的なモードを図-2に示す。橋軸（鉛直）1次モードは中間支承を中心とした回転モードであり、特に側径間部の曲げモーメントに大きな影響を与えることから弦材断面力に支配的となる。一方、橋軸直角方向に関しては4.4秒となる1次モードは吊桁が横たわみするモードであり中間支承から吊桁ヒンジ部間のトラス部材変形に大きな影響を与えており、中央径間部の応答に影響を及ぼす。また、2次モードは基礎のロッキングによる振動が支配的であるとともに、側径間部のトラス部材面外曲げ変形に大きな影響を与える。

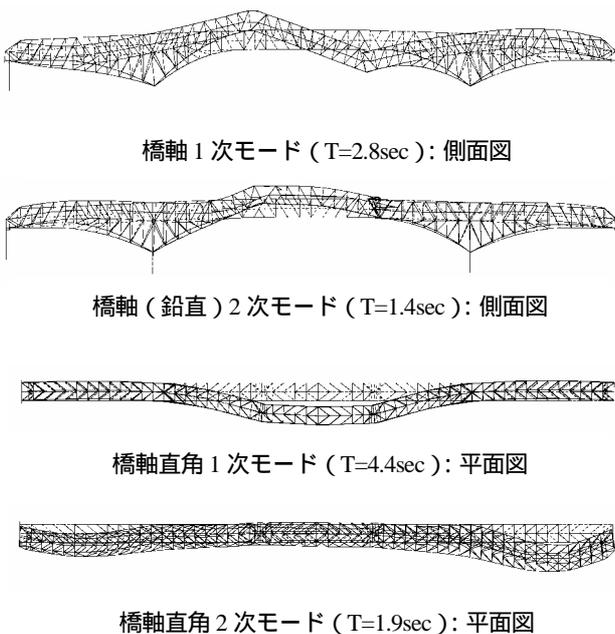


図-2 主要な現橋固有振動形と固有周期

(2) 応答スペクトル考察

図-3は、設計上クリティカルとなる内陸型震源断層によるシナリオ地震の港大橋基礎への有効入力動による加速度応答スペクトルであり、図中には、各種の断層破壊パターン、開始点を想定した予備検討の結果に基づき選択された断層破壊パターンごとの最大波とそれらを概ね包絡する設計スペクトルを記載している。

このスペクトルより、橋軸方向の支配的なモードである1次モードはスペクトル頂部にあたることから長周期化の効果は大きく、免震構造が有効であることが伺える。一方、橋軸直角方向の場合、長周期化効果は見込めず、特に、2次モードに着目すると応答の増大につながる危険性がある。このため、高減衰化を期待する設計が好ましいと判断される。なお、大阪湾岸の場合、堆積層の厚さにより2~3秒前後と6~8秒前後にスペクトルの山があるとされている。

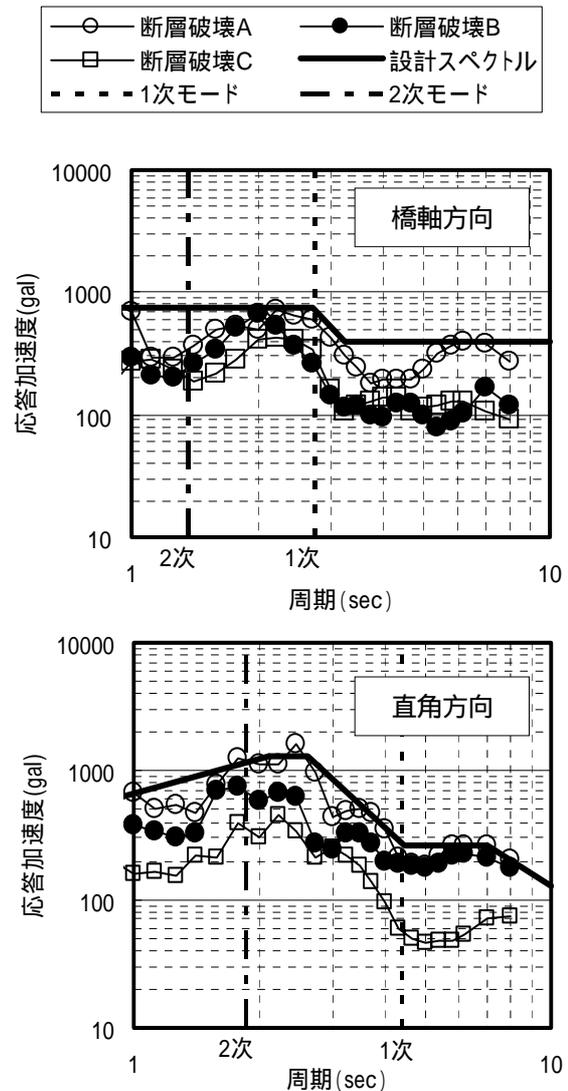


図-3 加速度応答スペクトル

4. 現橋応力評価と耐震補強全体計画

(1) 現橋応力評価と耐震上弱点部材

各モードの部材断面力への影響度を把握するために、設計スペクトルを用いた応答スペクトル法による動的解析を実施した。表-1 に示すように、橋軸方向においては、上下弦材ともに橋軸1次モードが卓越しており、定着桁中央径間側の下弦材および同斜材において橋軸

2次モードの影響がみられる。中間支承への影響は、橋軸1次モードの影響が大きい。橋軸直角においては上下弦材ともに、中央径間側（吊桁支間部）で1次モード、定着桁側径間部で2次モードの影響が大きい。中間支承への影響は2次の影響が大きいが1次の影響も無視できない状況である。

(2) 耐震補強策

表-2 に応答低減と部材耐力増加に大別した耐震補強

表-1 耐震補強の必要な部位、支配モードおよび補強方針

部材	位置	応力超過比(発生/許容)	支配モード	補強方針
下弦材	定着桁端部	1.0~2.4 (圧縮)	橋軸1次, 直角2次	応答低減
	吊桁支間部	0.8~1.0 (圧縮)	橋軸1次	応答低減
上斜材	定着桁中央径間	1.2~2.0 (圧縮)	橋軸1次, 直角1,2次	部材補強(ストラット)
横構	定着桁主塔付近	1.5	直角2次	座屈, 降伏許容(二次部材)
支承	中間支承	ボスせん断 1.3, ヌット 1.2	直角1次, 直角2次	応答低減
	吊桁支承	2.0 (変位 3.5)	橋軸1次	応答低減(遊間対策)
	端支承	ボス支圧 2.1, ヌット 2.2	直角2次	応答低減

表-2 耐震補強戦略, 基本構造系および効果対象部材 (表中凡例 : 効果大、 : 効果小、 - : 効果なし)

具体的耐震補強策 (効果が効果的耐震補強策)	下弦材		斜材	中間支承	吊桁支承	端部支承
	側径間	中央				
床組免震 (橋軸方向全体)				-		
床組免震 (直角方向全体)					-	
床組免震 (直角方向吊桁部)	-				-	-
中間支承免震						
端部支承免震		-			-	
吊桁部ダンパー	軸			-		-
	直	-			-	-
座屈拘束ブレース (主塔対傾構, 下横構)					-	
TMD		-			-	
吊桁連続化 (剛結合 or 軸力降伏)	軸			-		-
	直	-			-	-
横組剛性増加		-			-	
ケーブルステイ		-			-	
上弦材プレストレス		-	-	-	-	-
座屈拘束ストラット	-	-		-	-	-
鋼板当て板				-	-	-
鋼部材コンクリート充填	-	-	-	-	-	-

部材応答の低減	長周期化 高減衰化	橋軸方向床組免震	直角方向床組免震	中央径間部床組免震	中間支承免震	端部支承免震
	高減衰化	オイルダンパー	座屈拘束ブレース			
	TMD	部分床組免震				
	その他	吊桁連続化	横構の剛性UP	ケーブルステイ	上弦材プレストレス	
部材耐力の増加	座屈長の短縮	座屈防止ストラット				
	断面増加	鋼板当て板	コンクリート充填			

戦略と基本構造系を示す。小箱断面であるトラス部材補強はその信頼性、施工性に課題が少ないことから、できるだけ長周期化、高減衰化、TMD 効果、応力バランス効果による耐震補強方針を選択することが望ましい。ただし、応答超過が著しい上斜材については、ストラットにより耐力増加をはかるものとした。また、2次部材は部材の降伏を許容するものとし、座屈拘束ブレースに取り替えるものとした。

橋軸方向の有力な案は床組の免震化であり、加速度応答スペクトルからもわかるとおり全体系の長周期化と減衰付与により、下弦材、斜材、吊桁支承の応答低減が見込める。

一方、直角方向については、2次モードの長周期化は応答増加につながることから免震化は好ましくなく、2次モードの側径間横たわみモードに対して高減衰を付与する座屈拘束ブレースによる制震構造が有効であると判断される。

5. 耐震補強策と応答低減効果

(1) 床組免震システム

総重量 20,000tf を占める鋼床版床組は、トラス内に設置されており、固定・可動の支承板支承でトラス横桁上に支持されている。床組支承は兵庫県南部地震時にも多くの損傷がみられ、今回の設計地震波に対しても応力超過する。このためこれらの支承を取り替える際に免震化し、応答の低減をはかることとした。本橋の特徴として、3秒前後の長周期化が必要なことに伴い通常の減衰機構を有するゴム支承では、支承高の高いものが要求され設計条件を満たすことはできなかった。そこで、摩擦減衰機構を期待するすべり支承と復元力を期待するゴム支承による免震システムを採用するに至った(図-4 参照)。

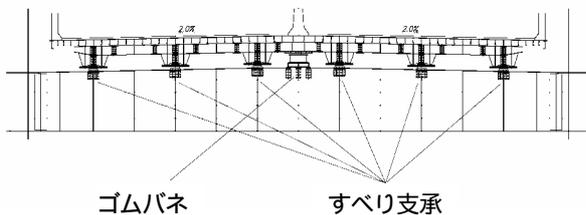


図-4 すべり支承を用いた床組免震構造

橋軸1次モードの固有周期より短い周期($T=2.7\text{sec}$ 程度以下)のゴム支承を採用した場合、床組が先行し、主構が追従するような応答を示し、加速度応答もほぼ同位相で振動する。このような場合、より大きな摩擦係数を採用した場合の方が主構応答は小さくなる。一

方、本体の固有周期より長い周期($T=3.0\text{sec}$ 程度以上)の場合、床組の応答は遅れ、加速度の位相がずれる。このために、主構の応答が低減されているが、摩擦係数を大きくするとその効果が減少し、応答低減効果が小さくなる。ところで、橋軸方向に対する床組と主構の許容相対変位は、物理的な制限は特にないが、隣接橋床組との遊間や免震装置の形状等を考慮すると50cm~65cm程度が妥当であり、ゴム支承周期 $T=3.0\text{sec}$ 、 $\mu=0.05$ 程度を目安とすればよいことがわかる(図-5 参照)。

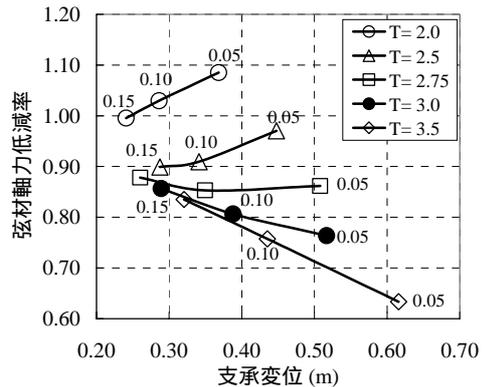


図-5 弦材軸力低減率と支承変位
(図中数字は摩擦係数、凡例はゴムの設定周期)

(2) 座屈拘束ブレース

橋軸直角方向、特に直角2次モードに対して高減衰を与えるために、現況で降伏あるいは座屈する横構を座屈拘束ブレース(履歴型ダンパー)に取り替える。これにより大きな減衰を期待できるとともに、鋭敏な応答スペクトルに対して鈍感な構造系とすることが出来る。履歴型ダンパーを用いた制震構造は、骨組内に組み込まれたダンパーで地震時の応答を抑え、主部材の損傷を防ぐことを目的としている。今回は直角方向の変形に対応できるように、下横構と下横支材、および主塔対傾構と横支材との間、つまりガセット部に軸降伏型ダンパーを設置することを想定した(図-6 参照)。

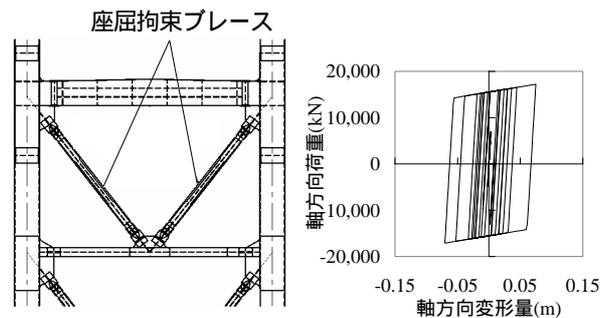


図-6 主塔対傾構の座屈拘束ブレースと履歴特性

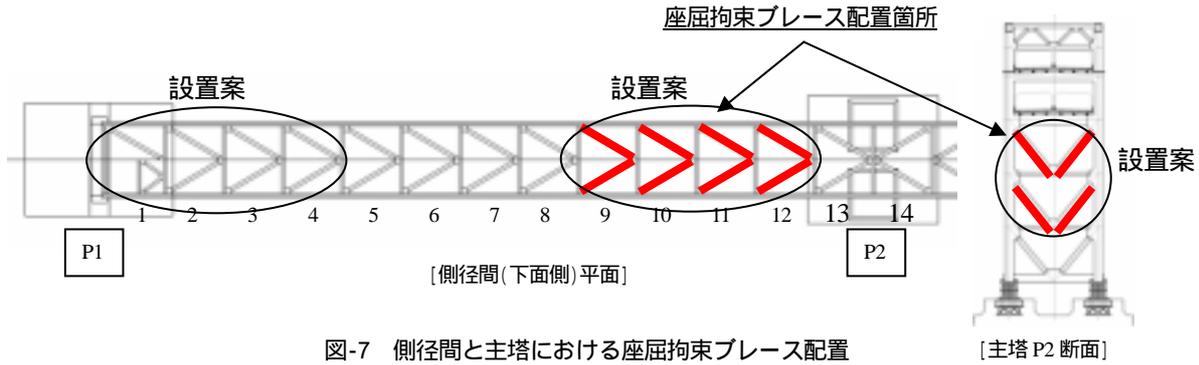


図-7 側径間と主塔における座屈拘束ブレース配置

設置箇所は振動形解析におけるひずみエネルギー比率から判断して、下横構の端部(設置案), 主塔付近(設置案)および主塔対傾構(設置案)の箇所を候補とした(図-7 参照)。しかし、設置案については効果が少ないことが解ったため、施工対象から除外した⁵⁾。

図-8 および図-9 は各々 図-7 に示すように下横構および主塔に座屈拘束ブレースを配置した場合の弦材部材毎のひずみエネルギー変化である。なお、横軸は図-7 に示す径間位置を示している。下横構にダンパーを

配置した場合、上弦材においてはほとんど変化が見られないが、下弦材においては主塔部付近で大きく減少していることがわかる。一方、主塔に配置した場合、上弦材の側径間部において大きくひずみエネルギーが減少している。

上記の結果に基づき、下横構と主塔にダンパーを配置した場合の弦材軸力低減効果を、許容値の関係から注目すべき側径間を対象として図-10 に示す。この図より、下弦材における低減効果が大きく、特に側径間位置 No13 (主塔近傍下弦材) の低減効果が非常に大きいことがわかる。なお、この部材は常時系でも大きな圧縮軸力が作用する部材であり、地震時の座屈が即座に橋梁崩壊をもたらす注意すべき部材である。一方、上弦材での低減効果は下弦材に比較して小さいが、応答値は許容値以下となった。

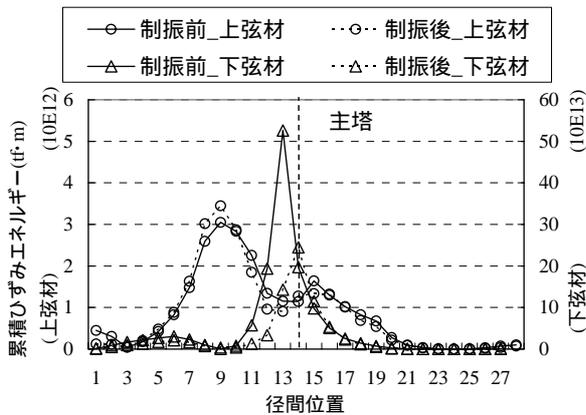


図-8 下横構ダンパーによる弦材ひずみエネルギー

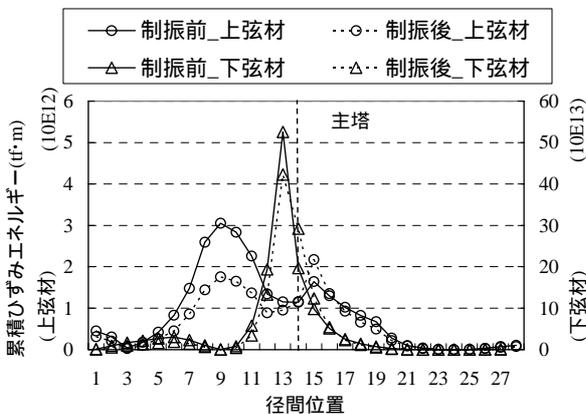


図-9 主塔ダンパーによる弦材ひずみエネルギー

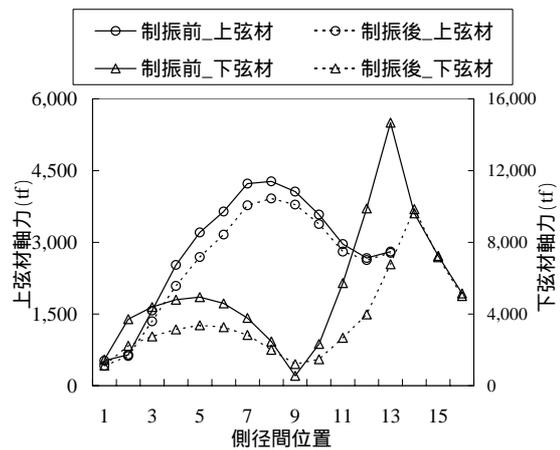
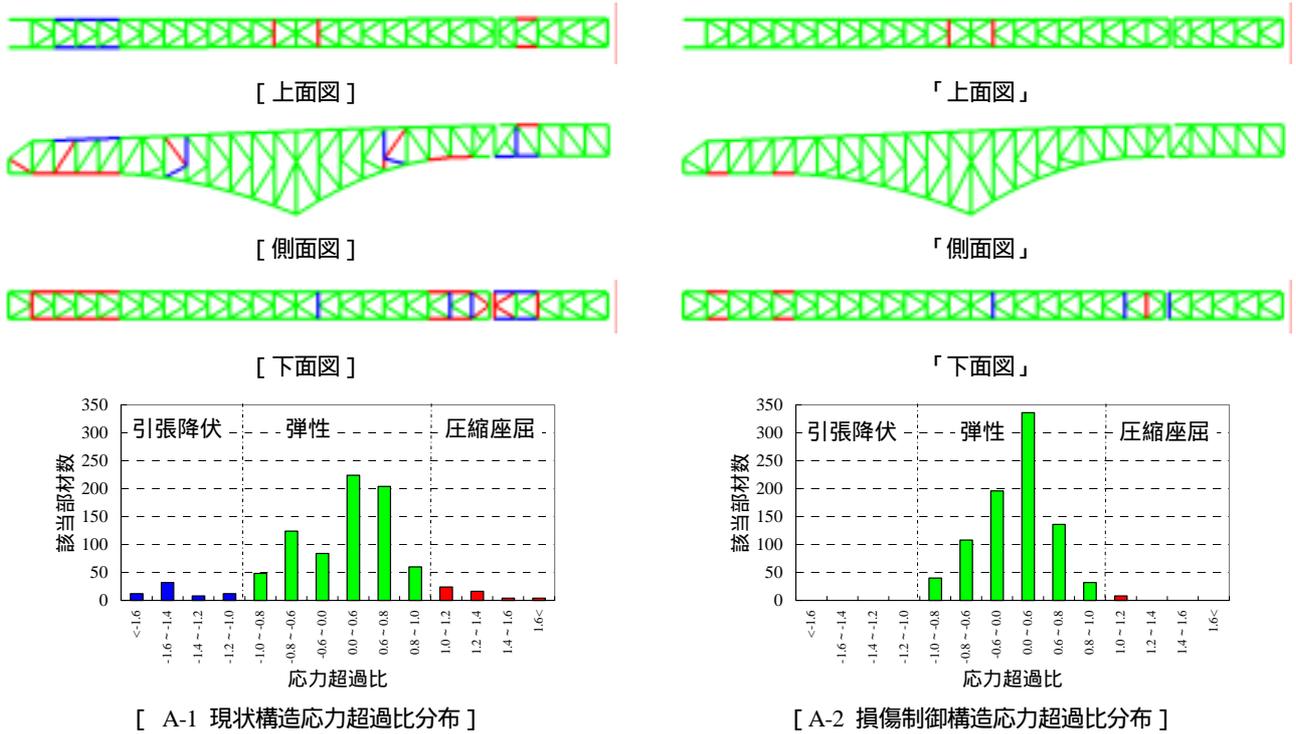


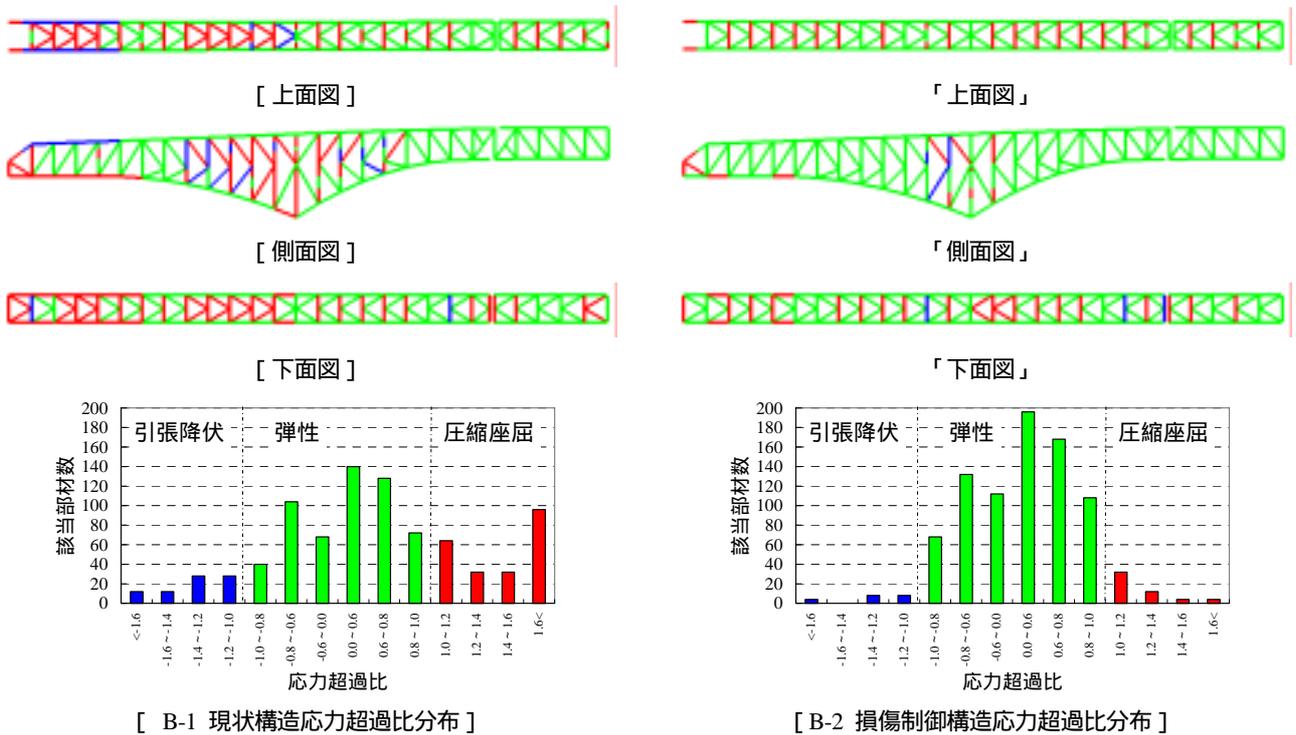
図-10 主構弦材軸力変化

(3) 応答低減効果

橋軸方向には床組免震システムを、橋軸直角方向には座屈拘束ブレースを補強対策として採用した場合の、現橋と補強後の座屈および降伏応力度比を指標とした、部材応力度比分布図および部材数ヒストグラムを、図-11 に示す。応力度比は発生応力を引張降伏応力ある



A. 橋軸方向応答の応力超過比分布比較



B. 橋軸直角方向応答の応力超過比分布比較

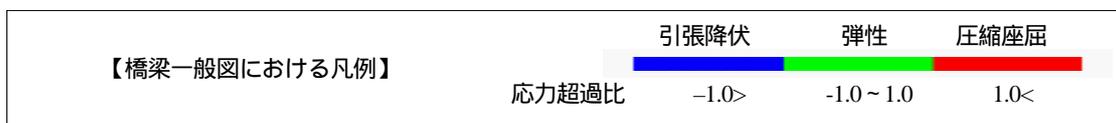


図-11 損傷制御構造の応答低減効果（左図：現状構造、右図：損傷制御構造）

いは座屈降伏応力で除した値であり、 $-1.0 \sim 1.0$ の範囲は弾性を、 -1.0 以下は引張降伏を、 1.0 以上は座屈降伏を意味している。現橋における分布図およびヒストグラムと座屈拘束ブレースを主体とした補強方法を用いた分布図およびヒストグラムを比較することで、本補強対策の有効性が確認できる。

なお、本解析において現状構造の応力比は上部構造を弾性解析により求めた結果であり、損傷制御構造はすべり支承の履歴減衰および座屈拘束ブレースの履歴減衰を考慮したものである。ダンパー用鋼材としては低降伏点鋼 (LY225) を想定し、バイリニアの移動硬化則を用いている⁶⁾。鋼材の許容応力度については軸方向引張応力度、曲げ引張応力度、軸方向圧縮応力度、曲げ圧縮応力度とも道路橋示方書・同解説⁷⁾に準じている。

6. まとめ

長大ゲルバートラス橋を対象に耐震補強検討を行なった。下記に得られた結論をまとめる。

- 設計概念として、常時系において重力を負担する主体部材を弾性設計、地震時横力を負担する非主体部材を弾塑性設計する損傷制御設計を用いた場合、リスクマネジメントの観点から巨大地震後の交通開放、復旧性を考慮した合理的な構造系の成立が可能である。
- 震源断層からのシナリオ地震と長大橋の長周期域の地震動を考慮した設計地震動を得ることで、現地の橋梁特性に応じた適切な耐震補強戦略を立てることが可能である。
- 対象橋梁の場合、損傷制御構造として、橋軸方向には床組免震機構が有効であり、橋軸直角方向には下横構と主塔対傾構の座屈拘束ブレース化が有

効である。また、このことを主体構造のひずみエネルギー、軸力などの低減効果により明らかとした。

謝辞：本検討については、阪神高速道路公団技術審議会（会長：土岐憲三立命館大学教授）、同鋼構造分科会（主査：渡邊英一京都大学教授）同耐震設計分科会（前主査：亀田弘行地震防災フロンティア研究センター長）および阪神高速道路耐震問題検討委員会（委員長：佐藤忠信京都大学教授）の委員をはじめとする各位に貴重なご意見を頂いた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団, 防災研究協会: 長大橋耐震補強の優先度設定に関する研究業務報告書, 2003.3
- 2) 金治英貞, 北沢正彦, 鈴木直人: 長大ゲルバートラス橋の耐震補強に関する地震応答解析と損傷制御設計, 土木学会既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム, 2002.11
- 3) 和田章ほか: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998
- 4) 金治英貞: 米国の長大橋耐震補強と地震応答修正装置 (SRMD) 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, 2002.1
- 5) 金治英貞・鈴木直人・美濃智広, 長大トラス橋の損傷制御構造における履歴型ダンパー最適構造と配置に関する基本検討, 第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2003.1
- 6) 金治英貞・鈴木直人・美濃智広, 長大ゲルバートラス橋の耐震補強における履歴型ダンパー最適配置検討とその効果, 土木学会第58回年次学術講演会, 2003.9
- 7) 日本道路協会: 道路道路橋示方書・同解説, H14.3

(2003.7.1受付)

Seismic Retrofit Strategy using Damage Control Design Concept and the Response Reduction Effect for a Long-span Gerber Truss Bridge

Hidesada KANAJI, Yoshihiko TAKADA, Naoto SUZUKI, Tomohiro MINO,
Osamu AZUMAYA, Kouji OHAMA

A long-span Gerber bridge with 980m long, is located in the Hanshin Expressway near Osaka port and has seismic risk which cause failure to not a few main members due to scenario level earthquakes. In this project, a damage control design concept is employed to achieve rational retrofit from a view of risk management. The concept differentiates main members that support vertical load from sub-members for lateral force such as seismic force. According to this design, main members should be elastic and sub-members are allowed to perform inelastic and provide damping. In this paper, floor seismic isolation system and damper brace system are introduced based on the design concept and their response reduction effects are also described.