第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

鋼上路トラス橋のブレース材の耐震補強に関する考察

山田　忠信[1]・馬越　一也[2]・野中　哲也[3]

[1]正会員　博（工）　株式会社IHIインフラシステム（〒135-8710 東京都江東区豊洲3丁目1番1号）
[2]正会員　博（工）　株式会社地震工学研究開発センター（〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通4-6-20）
[3]正会員　博（工） 名古屋工業大学大学院教授 社会工学専攻（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）.

1. はじめに

既設鋼トラス橋の支点上のブレース材は，橋軸直角方向にレベル2地震動を入力した際には大きく損傷する場合が多い．道路橋示方書[1)]の耐震設計に従って，このブレース材を弾性範囲に留めるためには，免振支承や制振ダンパーなどの免振・制振ディバイスの設置他，当て板補強や部材取替えを行うことになる．しかし，当て板補強や部材取り換えの場合，一般的に補強後の剛性が高くなるために応答値も大きくなり，ブレース材だけでなく，その接合部や周囲の部材および支承まで補強範囲が広がり，結果的に大規模な補強が必要になってしまう可能性がある．

近年，2050年に向けてのカーボンニュートラルの実現が課題となっている中，合理的な耐震検討ができれば，施工コストの削減のみならず，建設プロセスにおける材料の生産・輸送・施工などの工程でのガス排出量を減すことが可能になると考える．

著者らは，これまで鋼トラス橋や鋼アーチ橋において約 1/2 供試体のブレース材を含む構面（以下，ブレース材パネルと称す）を対象に，**写真-1**，**写真-2**に示す繰り返し載荷実験を実施して繰り返し荷重下における終局挙動を明らかにしてきた[2) 3)]．嶋口ら[2)] は**図-1**に示すように実験結果を精度よく解析で再現できることを示している．更に，繰り返し載荷実験により鋼製橋脚に見られるような紡錘形の履歴ループを描いていることから，ブレース材パネル全体として一定のエネルギー吸収を期待できると考えた．山田ら[3)]は，ガセットプレートの所要板厚が不足している場合の実験も行い，ガセットプレートの破壊状態を検証した（**写真-3**）．このような破壊が先行すると地震時の終局挙動を地震応答解析で評価できなくなり，部材と接合部の双方の耐力のバランスが重要であることを指摘した．また，馬越ら[4)]は，従来から用いられているファイバー要素を用いた弾塑性有限変位解析により，塑性化を許容した合理的な耐震補強設計法を提案している．

本論文では，対象とした既設橋の補強前と当て板

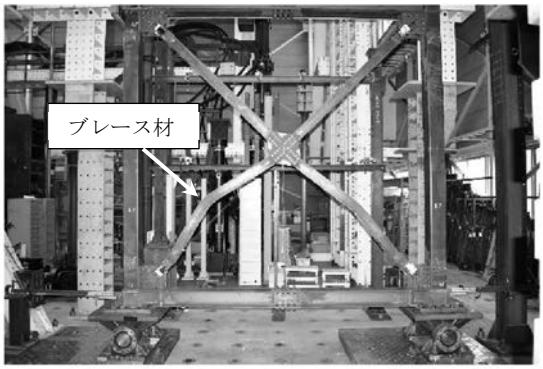


写真-1 鋼トラス橋のブレース材の終局強度に関する実験 [2)]

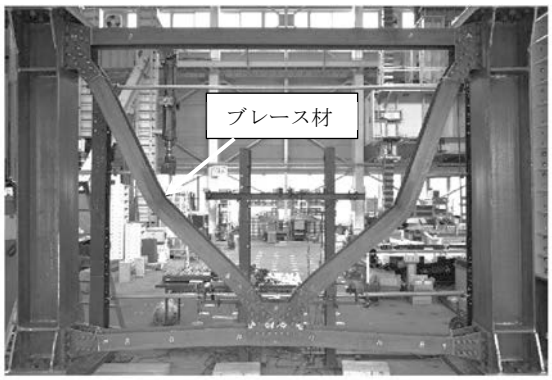


写真-2 鋼アーチ橋のブレース材の終局強度に関する実験 [3)]

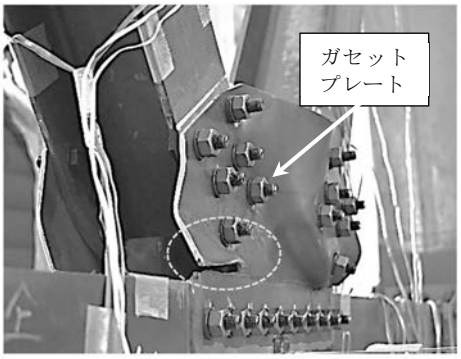


写真-3　ガセットプレートの破断 [3)]

により補強した場合について地震応答解析行い，補強前後の応答値と部材および接合部の耐力照査から弾性設計による当て板補強の課題を考察した．

2. 対象橋梁の地震応答解析

(1) 橋梁概要

対象とした橋梁を**図-2**[4]に示す 3 径間連続上路式鋼トラス橋で，昭和 55 年道示で設計された耐震補強が必要とされる一般的な山間部に架かる既設橋梁を想定している．

(2) 解析モデル

対象橋梁の鋼部材にファイバー要素を採用して全体系の解析モデルを構築した．文献2)で 実験結果により確証が得られたブレース材の提案モデルを適用している．具体的にはブレース材の座屈モードを表現するためにブレース材を 8 分割として，端部は剛結合，ガセット端部から垂直材軸心までは剛体要素で繋いだ．また，パネルの支点位置までは実際の構造と位置関係を合わせるために剛部材でオフセットを考慮した．実際の耐震補強設計では，免震支承への変更と合わせて部材の損傷を検討することが多いが，ここでは部材の当て板補強のみとする．上下弦材，斜材，垂直材の主構についても同様に格点間を 8 分割とし，格点部は一般的な全体系解析モデルと同様に一般部断面を延長して剛結合とした．今回は橋脚に着目しておらず，RC橋脚の弾性はり要素でモデル化した．基礎－地盤系は固定支持として，支承は線形ばね要素で境界条件を与えた．弾塑性解析における材料構成則については降伏点以降E/100（ここに，E：弾性係数）のバイリニア型の移動硬化則を用いた．文献4)で中間支点部のブレース材，鉛直材および下支材が大きく損傷していたので，材質と板厚をアップした断面を既設断面とした．

(3) 解析条件

地震応答解析に用いる入力地震動は，道路橋示方書[1]に示されるタイプIIの標準波で，入力方向は橋軸直角方向とした．減衰モデルにはレーリー型減衰モデルを用いている．固有値解析で得られた刺激係数と固有モードから橋軸直角方向卓越モードを2つ選定し，地震応答解析に用いるレーリー型減衰の係数を設定した．解析プログラムには SeanFEM[5]を用いた．ブレース材の部材座屈を精度良く表現するために優位性のあるUpdated Lagrange 法を幾何学的非線形性の解法に採用している．この方法で文献[2]において繰り返し載荷実験の再現解析によって確証が得られている．

既設橋の解析では弾塑性有限変位解析の他，制振ディバイスを適用した解析に用いられる弾塑性微小変位解析および当て板で補強した場合に用いられる弾性微小変位解析の3つの解法について行い，応答値の比較を行う．

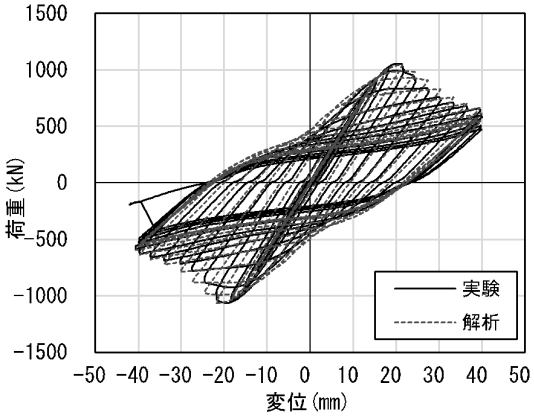


図-1 繰り返し載荷実験と再現解析[2]

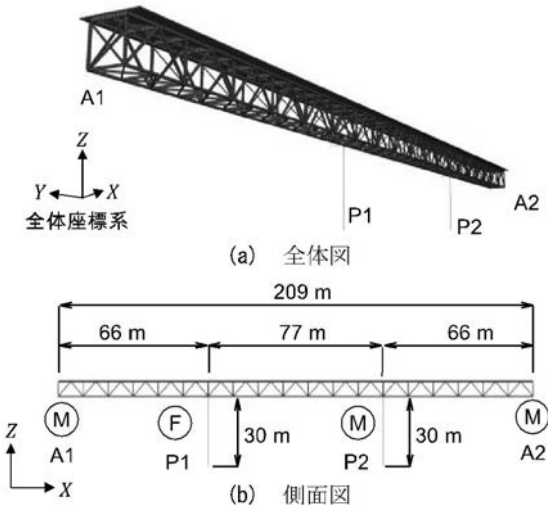


図-2 鋼トラス橋[4]

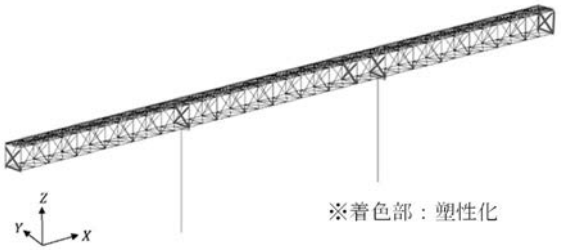


図-3 地震応答解析による降伏箇所

表-1 各部材の降伏比

		A1	A1-P1	P1	P1-P2	P2	P2-A2	A2
		支点上	径間	支点上	径間	支点上	径間	支点上
主部材	上弦材	-	0.56	0.69	0.85	0.64	0.69	-
	下弦材	-	0.61	0.81	0.87	0.65	0.73	-
	斜材	-	0.59	-	0.82	-	0.68	-
	垂直材	0.92	0.32	0.92	0.48	0.73	0.42	1.27
二次部材	ブレース材	33.9	0.64	10.5	1.12	13.9	1.03	52.6
	下支材	1.61	0.46	1.09	0.88	1.49	0.51	3.9

※ 部材毎の局所最大ひずみ を降伏ひずみ で除した降伏比を示している．

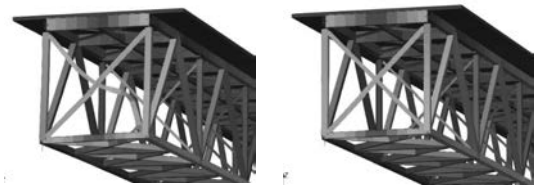
※ 網掛けは降伏比が 1 を超過している（降伏している部位）を示している．

(4) 既設橋の地震応答解析結果

タイプII地震動を橋軸直角方向に入力した弾塑性有限変位解析における降伏した要素を**図-3** に示す．部材の降伏比 ε/εy（ここに，ε：局所最大ひずみ，

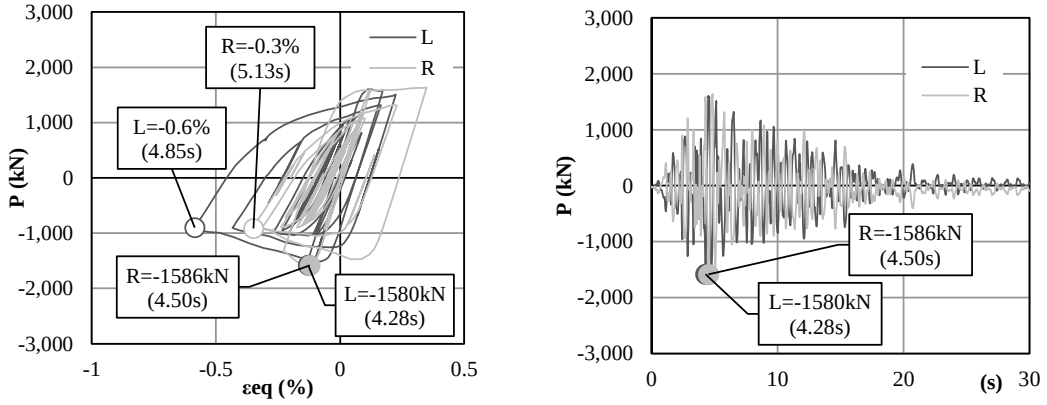
εy： 降伏ひずみ）を**表-1** に示す．端支点，中間支点付近に損傷が集中しており，ブレース材の降伏比が大きい結果であった．

次に，A1 側端支点のブレース材に着目して考察する．**図-4**に変形図を示し，**図-5**に軸力(P)-等価軸ひずみ(ε eq)関係と軸力(P)の時刻歴応答を示す．**図-4**から幾何学的非線形を考慮しない場合は部材に座屈が生じないことが確認でき，**図-5**の軸力等価軸ひずみ関係において，**図-5(a)**では交番載荷で左右のブレース材がそれぞれ抵抗するものの，圧縮側で座屈の発生により荷重減少が見られる．また，荷重と等価ひずみの関係は左右のブレース材で等しくなっていない．**図-5(b)**では部材座屈を表現できていないため，**図5(a)**のように荷重は低下せず，ブレース材の等価軸ひずみは半分程度に小さくなっている．このように解析方法とモデル化によりブレース材の座屈評価に影響が生じるため，座屈現象を正しく評価する必要がある場合はブレース材のモデル化と幾何学的非線形性の精度が要求される．**図-5(c)**の弾性微小変位解析の結果についてみると，塑性化を許容した場合と比較してブレース材軸力の応答値が

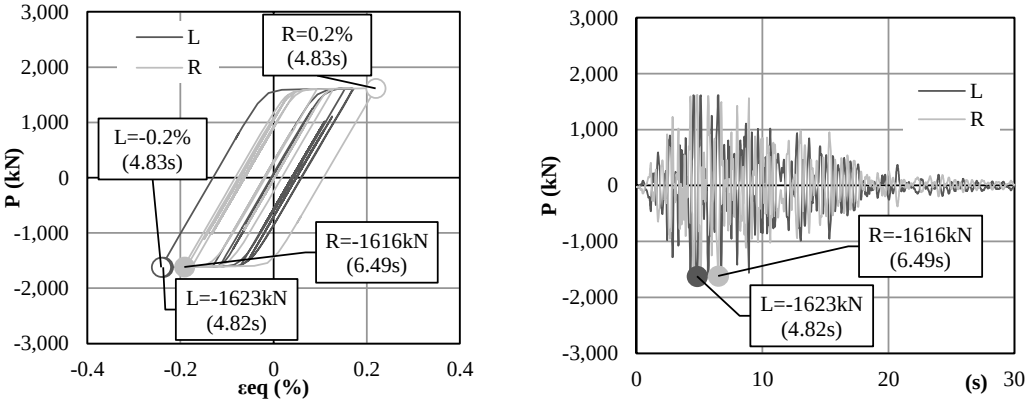


(a)有限変位解析　　(b)微小変位解析

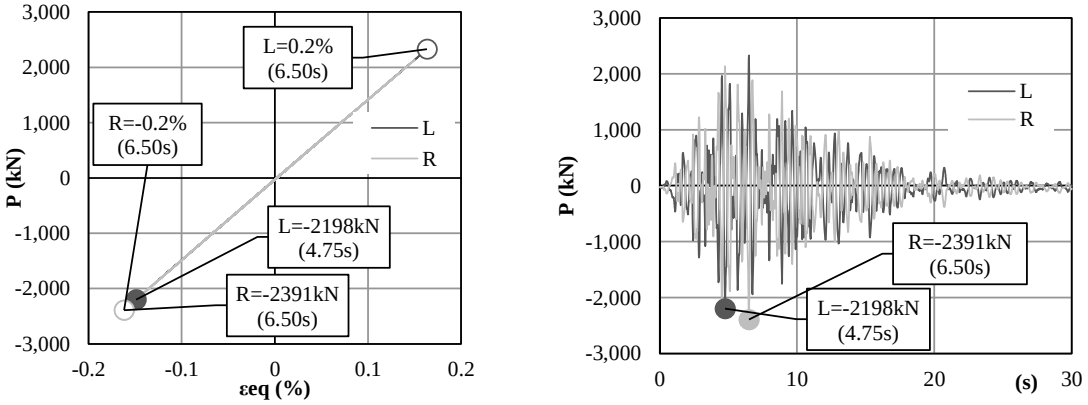
図-4　端支点ブレース材変形図



(a)弾塑性有限変位解析



(b)弾塑性微小変位解析



(c)弾性微小変位解析

図-5　ブレース材の時刻歴応答

2391/1583=1.51と約50%程度大きくなった．したがって，すべての部材を座屈耐力または降伏耐力以下に補強するためには，大掛かりな補強が必要になることが予想できる．

3. 当て板によるブレース材の補強

(1) 当て板補強

図-6に示すようにブレース材の当て板補強はブレース材のフランジに高力ボルト摩擦接合で鋼板を取り付ける工法である．既設部材の接合面はケレンにより塗膜を除去して，所要の摩擦係数を確保するようにする．ケレン作業は除去した塗膜が飛散しないようにする必要があり，防護が必要になる．

本検討では部材の座屈耐力を向上させることを目的にするため，当て板範囲は連結間のみとする．通常の設計では当て板の板厚は最適となるように解析により収束させるが，本検討では，当て板補強する板厚を母材の板厚の1.5倍として15mmの板を当てて補強することにした．部材方向のボルトピッチは道示の規定に示される12tとして12×10=120mm以下にした．部材直角方向の本数は連結部と同じ2本として，孔引き本数が接合部の設計と同じになるようにした．

(2) 補強後耐力

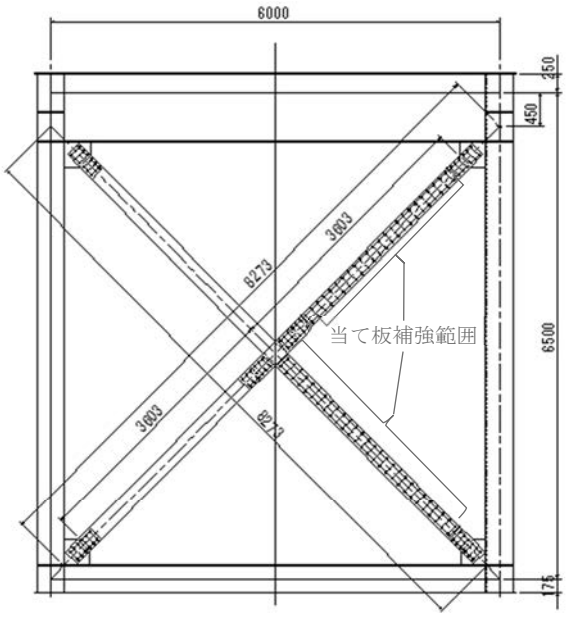
表-2にブレース材の耐力の項目と内容を示す．**図-7**に補強前と当て板補強(2.で説明)後のブレース材および接合部の耐力を示す．計算の根拠を**付表-1**に示す．部材座屈については，著者らの実験で両端固定の座屈モードになること，最大荷重もその耐力になることが確認できたことから，両端ピンと両端固定の座屈耐力も示している．当て板補強後の部材の降伏耐力は純断面:Anにより算出する．

図-5 (c)に示した弾性微小変位解析におけるブレース材の最大軸力は2,391kNであり，補強前の両端ピンの座屈耐力:1,062kN，接合部の降伏耐力:1,375kN，すべり耐力:1,963kNおよびガセットプレート耐力:1,100kNを上回っており，補強が必要になる．次章で当て板補強後の断面で動的解析を行い，再度考察することにする．接合部の降伏耐力，すべり耐力およびガセットプレートの耐力は補強後も同じ値となるので，当て板補強の他，接合部の補強が必要になる．

4. 当て板補強後地震時応答解析に対する考察

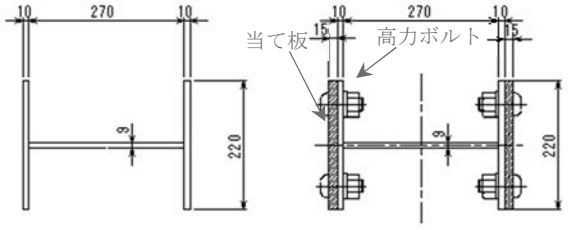
(1)解析条件

当て板補強後の地震時応答解析は補強前と同じ条件で行い，弾性設計とするため解析方法は弾性微小変位解析とする．断面については，端支点および中間支点上のブレース材のみ当て板を考慮した断面に置き換え，他の部材は同じとする．



a)補強前　　b) 当て板補強

(a) パネル



a)補強前　　b)当て板補強

(b) ブレース材断面

図-6 当て板補強

表-2 ブレース材の部材および接合部耐力

項目		内容
部材	座屈	$P_{crg}=\sigma_{crg}\times A_g$ σ_{crg}：座屈応力度 A_g：部材の総断面積
	降伏	$P_{gn}=\sigma_y\times A_g$ σ_y：降伏応力度 A_g：部材の総断面積
接合部	すべり	$P_s=n\times\rho_a$ n：ボルト本数 ρ_a：１本のすべり耐力
	降伏	$P_n=\sigma_y\times A_n$ σ_y：降伏応力度 A_n：部材の純断面積
	ガセットプレート	$P_{sg}=bt/1.8$ b：ブレース材幅 t：ガセットプレート厚

(2)解析結果

図-8に補強後の軸力-等価ひずみ関係と軸力の時刻歴応答を示す．補強前の最大軸力2,391kN(**図-5(c)**)に対して，補強後は2,317kNとなりほぼ同じ大きさであった．両端固定としての座屈耐力:2874kN，部材降伏耐力:2580kN以下であり，補強により応答

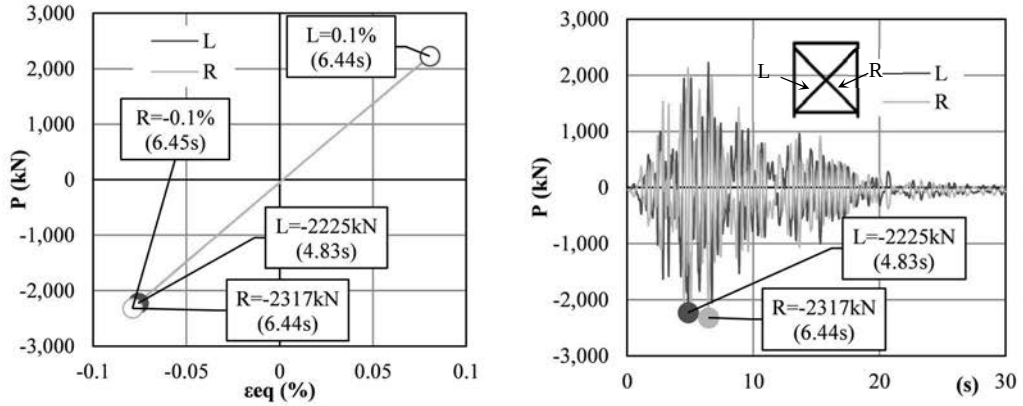


図-8　補強後のブレース材の時刻歴応答

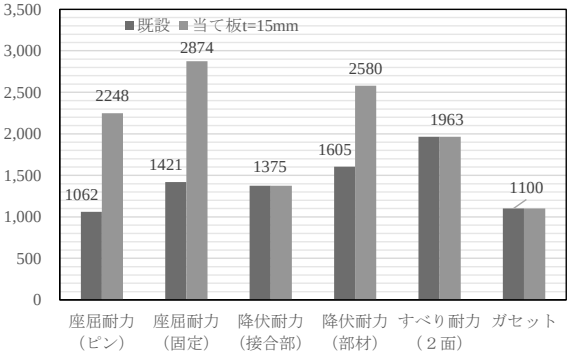


図-7　ブレース材耐力

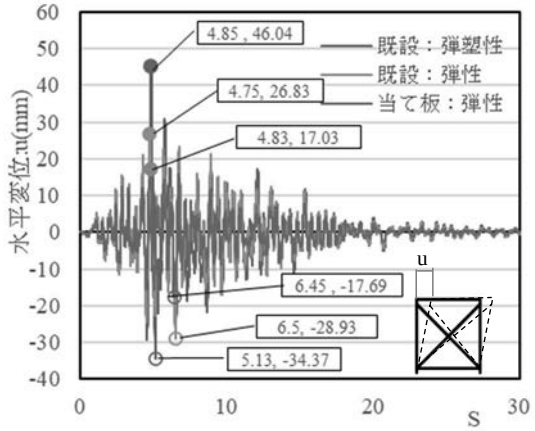
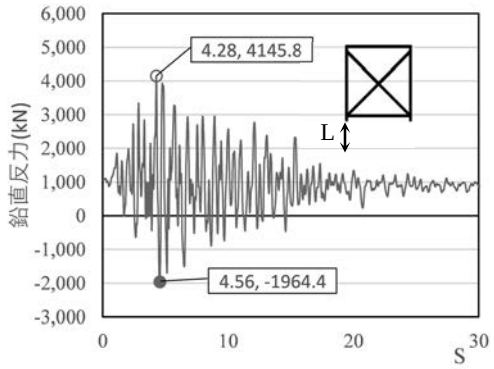
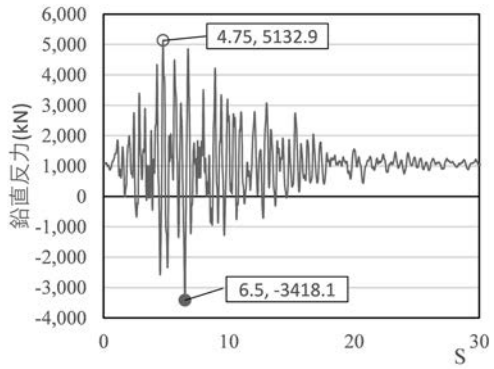


図-9　水平変位時刻歴

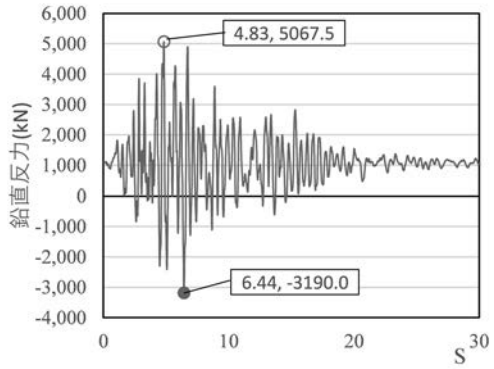
値を部材耐力以下にすることができた．ただし，前述したように接合部に関しては補強が必要になる．**図-9**にパネル上部の水平変位の時刻歴応答を示す．補強前後の弾性微小変位解析の結果と既設の弾塑性有限変位解析の結果を重ねて示す．補強後の水平変位は，当て板によりブレース材の断面積が大きくなったことによりブレース材パネルの剛性がアップして，補強前の28.93mmから17.69mmに減少した．一方，塑性化を許容した場合は，最大変位は46.04mmと大きな変位が生じているが残留変位は生じていなかった．**図-10**に支点のL側の鉛直反力を示す．弾性微小変位解析における補強前後の鉛直反力は，ブレース材の軸力と同様にほぼ同じであった．補強マエの弾塑性有限変位解析に対して補強後の弾性微小



(a)　既設：弾塑性有限変位解析



(b)　既設：弾性解析



(c)　当て板補強：弾性解析

図-10　鉛直反力の時刻歴

変位解析の値は，正反力側で5067.5/4145.8=1.22倍，負反力側で-3190.0/-1964.4=1.62倍大きい結果であった．免震支承に交換した場合の検討を行っていない

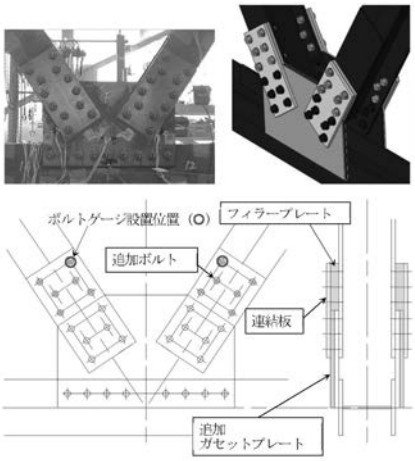


図-11　ガセットプレート接合部の補強 [3)]

が，支承を免震化することで本検討での比率ほど大きくなることはないと思われるが，当て板補強により支承部にも影響を及ぼすことになる．

一方，**図-5(a)**に示すように補強をせずに塑性化を許容した場合のブレース材の最大軸力は1586kNであった．この値は接合部降伏耐力:1,375kN，ガセットプレート耐力:1,100kNを超過するが，ブレース材についてはこの程度の超過であれば補強せずに，**写真-3**の損傷が生じないようにガセットプレートのみ**図-11**の補強をすれば，補強施工量を少なくすることができると考える．

5. おわりに

本論文では，橋軸直角方向にレベル2地震動で損傷したブレース材を当て板により補強した場合について地震応答解析を実施して，弾性設計での補強設計の課題を考察した．当て板補強の場合，補強部の応力を弾性範囲にする必要がある．弾性微小変位解析で応答値は塑性化を許容した場合の応答値に比較して大きくなる．そのため，当て板の補強範囲が，ブレース材以外の支承等，広範囲影響すると考えられる．実際の実務においても，ブレース材のみでなく鉛直材，横構等も当て板を施すこともある．また，接合部については，塑性化を許容したとしても，接合部分の降伏耐力，すべり耐力およびガセットプレートの耐力が不足した結果であった．著者らは**図-11**[3)]に示すガセットプレートの補強とその接合部のすべり耐力を向上させる方法を提案し，ブレース材パネルの繰り返し実験を行い，その有効性を確認した．接合部の降伏耐力を向上させるためには，母材断面を増厚させるか孔引き本数を減らす必要があるが，その施工は難しいと考える．実験においては孔部分が塑性変形するが最大荷重前後で破断するような現象は見られなかった．この点を踏まえて接合部の降伏耐力を向上させることが課題であると考える．

海老澤ら[6)]は，これまで実施してきた実験結果により確証が得られたブレース材のモデル化，解析手法によってブレース材の塑性化を許容した合理的な耐震補強設計について検討しており，繰り返し履歴の影響と，部材座屈後の大きなひずみ領域まで精確に評価することができるブレース材の材料構成則の開発を行っている．高精度な構成則の開発により，塑性化を許容した設計が図られると考える．

付表-1　耐力算出根拠

				既設		当て板補強(+15mm)	
ボルト			サイズ	M22		M22	
ボルト孔径			mm	24.5		24.5	
フランジ	母材	幅	mm	220		220	
		板厚	mm	10		25	
ウェブ	母材	高さ	mm	270		270	
		板厚	mm	9		9	
断面積	母材断面	Ag	mm^2	6830		13430	
	母材純断面	An(Flg+Web)	mm^2	5850		10980	
座屈耐力	有効座屈長	部材端条件		ピン	固定	ピン	固定
		L	mm	3834	1917	3834	1917
	断面二次半径	r		51	51	57	57
	細長比	λ=L/r		75.2	37.6	66.7	33.4
	細長比パラメータ			0.821	0.410	0.728	0.364
		𝛈		0.6617	0.8854	0.7123	0.9107
	座屈耐力	Pcr	kN	1062	1421	2248	2874
降伏耐力	許容応力度	σa	N/mm^2	140		140	
	降伏応力度	σyk	N/mm^2	235		235	
	接合部	Pn=An×σtud	kN	1375		1375	
	一般部	Pg=Ag×σtud	kN	1605		2580	
すべり耐力	ボルト本数	n	-	12			
	降伏点比率	α	-	0.75			
	降伏応力度	σy	N/mm^2	900			
	有効断面積	Ae	mm^2	303.0			
	設計軸力	N	kN	204.5			
	すべり係数	μ	-	0.40			
	耐力/1本	Vyk	kN	81.8			
	1面	Ps=n×Vstyd	kN	982			
	2面	Ps=n×Vstyd	kN	1963			
ガセット	ブレース材幅	b	mm	220			
	ガセット板厚	t	mm	9			
		P=bt/1.8	kN	1100			

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.
2) 嶋口儀之，山田忠信，野中哲也，馬越一也，鈴木森 晶：繰り返し荷重を受ける鋼トラス橋のブレース材の終局挙動に関する実験および再現解析，構造工学 論文集，土木学会構造工学委員会，Vol. 68A， pp.59-68，2022.
3) 山田忠信，野中哲也，馬越一也，吉山純平，鈴木森晶，嶋口儀之：既設上路式鋼アーチ橋のブレース材の終局強度およびガセットプレート補強方法に関する検 討，構造工学論文集，土木学会構造工学委員会， Vol. 68A，pp.69-81，2022.
4) 馬越一也，山田忠信，嶋口儀之，鈴木森晶，野中哲也：ブレース材の塑性化を許容した鋼トラス橋の耐震性能照査：橋梁等の耐震設計シンポジュウム，第 25 回，2022.
5) 株式会社耐震解析研究所（現：地震工学研究開発セ ンター）：SeanFEM ver.1.22，理論マニュアルと検 証，2007.
6) 海老澤健正，野中哲也，吉野廣一，馬越一也，山田忠信：繰り返し塑性履歴を受けるH形鋼の構成則およびその適用，構造工学論文集，土木学会構造工学委員会， Vol. 69A，pp.373-385，2022.