

## 補強部材をボルト接合する鋼板パネルの耐震補強効果に関する研究

### STUDY ON SEISMIC STRENGTHENING EFFECTS OF STEEL PANELS WITH STIFFENERS BOLTED

応用構造工学研究室 幸田真也

#### ABSTRACT

局部座屈強度を向上させるために既設の鋼板パネルを耐震補強する場合、初期応力が作用する鋼板パネルに補強部材を追加するため、追加した補強部材がどの程度の断面力を負担するか不明であり、補強後鋼板パネルの耐力および変形能は必ずしも明確ではなく、適切な解析モデル化手法の提案に至っていない。本研究では、数値解析により、初期応力が導入された既設の鋼板パネルへ補強部材をボルト接合または溶接接合する耐震補強効果を明らかにし、補強後の適切な解析モデル化手法を提案した。

Plate buckling preventions of steel plate panels are keys to enhance seismic performance of existing steel bridges and additional stiffeners can improve their buckling strength. Then focused on in this study is a seismic retrofitting technique of steel plate panels with lack of ductility using an L-shaped member attached with high strength bolts using FEM analysis. Also focused on is the influence of an initial stress on the strengthening effects and the modeling method in consideration of the initial stress. It is concluded that the bolted additional stiffeners as well as the welded ones effectively work for buckling prevention of steel plate panels and analytical method of frame structure by reduction in the cross-section area of the additional stiffeners are proposed in consideration of the initial stress.

#### 1. はじめに

地震荷重の作用により局部座屈や全体座屈の発生とそれらに伴う急激な耐力低下が懸念されることから、薄肉な鋼板パネルからなる既設の鋼構造物の耐震補強が実施されている。鋼板パネルの局部座屈強度を向上させる手法としては、鋼板パネルに補剛材を追加する手法がある。このとき、補剛材をボルト接合して追加する場合にはボルト孔の孔明け加工による既設部材の作用応力の増加や工程増による長工期化、溶接接合する場合には入熱による影響やラメラテアの発生の有無、溶接施工性などについて検討を要するため、施工面も考慮した上で補強対象構造物に適した補強部材の接合方法が採用されている。とくに、実際の現場で溶接品質を確保することが難しい場合には、溶接接合ではなくボルト接合による補剛材の追加・設置手法がとられる。しかし、既設橋に補剛材を追加する場合、死荷重等の初期応力が作用している鋼部材に補強部材を追加するため、追加した補強部材がどの程度の断面力を負担するか不明であり、補強部材を接合した鋼部材の耐力および変形能は必ずしも明確になっていない。

本研究では、数値解析モデルの構築に向け、薄肉な鋼板パネルからなる柱部材およびそれを補強した柱部材を対象とした純圧縮力載荷実験、および実験の再現解析を行い、補強後部材の基礎データを入手する。次に、実構造物を想定した補強後鋼板パネルのパラメ

トリック解析により、初期応力が導入された既設の鋼板パネルへのボルト接合または溶接接合による補強部材の追加・設置効果を明らかにする。また、補強後の鋼構造物の性能評価に用いられる骨組構造解析において、初期応力を有する既存部材に補強部材が追加・設置された補強後部材の適切な解析モデル化手法を提案する。

#### 2. 実験供試体の純圧縮力載荷実験

##### 2.1 実験供試体の設計

既設鋼部材の耐震補強において提案されている、縦補剛材間の板パネル、補剛板全体、および縦補剛材の各幅厚比パラメータに関して、 $R_R < 0.4$ 、 $R_F < 0.4$  および  $R_S < 0.5$  の寸法制限を参考に、補剛設計を行う。実験供試体の設計には、使用鋼材の SS400 の公称値を用いる。実験供試体の一覧を表-1 に示す。

補強前を想定した実験供試体 UR は、図-1 (a) に示すとおり、 $R_R < 0.4$  を満たさない 4 枚の板パネルを溶接組立てした無補剛中空正方形断面柱である。補強後に相当する実験供試体は、板パネル中央に縦補剛材を溶接接合する RR\_SS および溶接組立てした L 字形材をボルト接合する AR\_□ である。実験供試体 AR\_□ は、L 字形材の突出板が板パネル中央に位置する AR\_R、ボルト孔が板パネル中央に位置する AR\_B があり、初期応力を導入する場合は、実験供試体名の末尾に F を付けている。代表的な実験供試体および補強部材の形状を図-2 に示

す。実験供試体の座屈パラメータを表-2 に示す。

実験供試体 RR\_SS の縦補剛材の寸法は、 $R_s < 0.5$  および補剛材の剛比と必要最小剛比の比  $\gamma_s / \gamma_s^*$  が 1.0 以上となるように設計し、48×6 mm である。縦補剛材をボルト接合する場合には、この縦補剛材に高力ボルト M20・F10T を接合するためのボルト孔を設けた平板を溶接組み立てした L 字形材を用いる。この平板の板幅は、最小縁端距離およびボルト締付作業を考慮して 75 mm とした。着目板パネルにおけるボルト孔間隔は、最大中心間隔である 72 mm とした。

## 2.2 初期応力の導入方法

実験供試体 AR\_RF および AR\_BF には、補強前の実験供試体 UR の最大荷重  $P_{u-UR}$  の 50% に相当する初期軸力を載荷した状態を保持し、ボルトを締付し補強部材を接合する。この後、一旦除荷し、他の実験供試体と同様の手順で圧縮変位を漸増させる。図-3 には、実験供試体の設置状況を示す。

## 2.3 計測

載荷中は、実験供試体の軸方向変位を、矩形断面柱の内部に設置した変位計により計測する。各板パネルの表裏には、1 軸ひずみゲージを部材軸方向に貼付する。

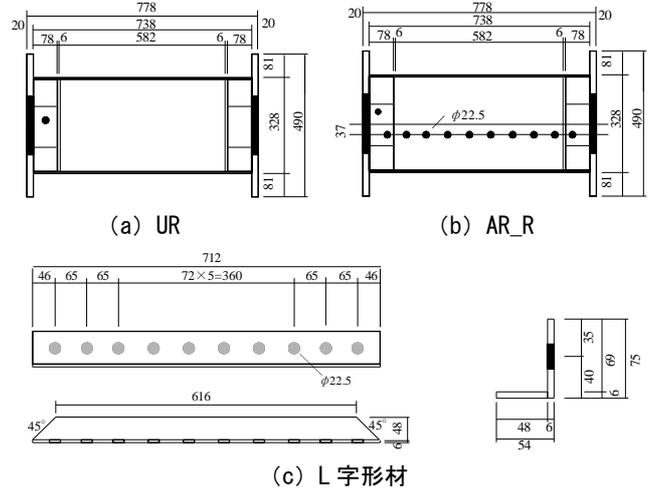


図-2 実験供試体の形状 (単位: mm)

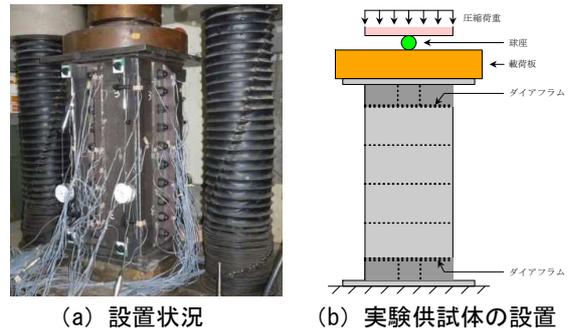


図-3 実験実施状況

表-1 実験供試体の一覧

	実験供試体	補強部材の接合方法	補強部材の接合位置	初期軸力の考慮
補強前	UR	-	-	なし
補強後	RR_SS	溶接接合	縦補剛材が断面中心	なし
	AR_R	ボルト接合	縦補剛材が断面中心	なし
	AR_RF	ボルト接合	縦補剛材が断面中心	あり
	AR_BF	ボルト接合	ボルトが断面中心	あり

表-2 実験供試体の座屈パラメータ

実験供試体	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$R_R$	$R_F$	$R_S$
公称値	UR	6.00	235.0	$2.00 \times 10^5$	0.949	-
	RR_SS	6.00	235.0	$2.00 \times 10^5$	0.475	0.415
実測値	UR	5.61	316.7	$2.02 \times 10^5$	1.176	-
	RR_SS	5.70	339.4	$2.03 \times 10^5$	0.597	0.500

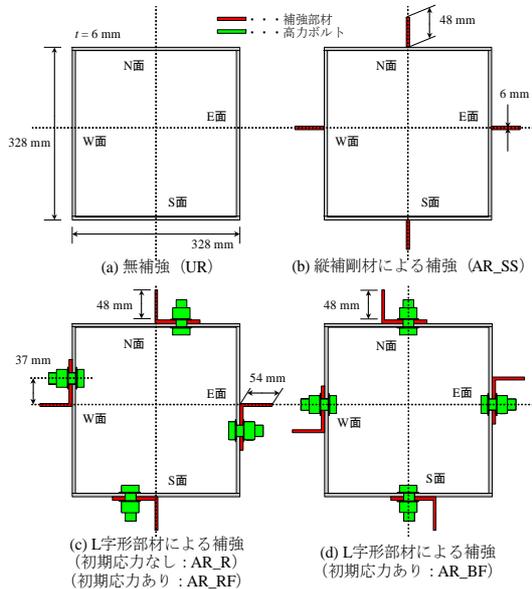


図-1 実験供試体の断面

## 2.4 実験結果

図-4 には荷重-軸方向変位関係を示し、表-3 には主な実験結果をまとめている。図-5 および表-4 には無次元化した  $P/P_y-u/u_y$  関係を示す。降伏開始時荷重  $P_{ys}$  および降伏開始時変位  $u_{ys}$  は、ひずみゲージによる計測箇所の中で、最も早くに降伏ひずみに達したときの荷重および変位である。なお、 $P-u$  関係における初期剛性  $k$  および  $P/P_y-u/u_y$  関係における初期剛性  $k'$  は、 $P = 250 \sim 500$  kN までの計測結果を用いて最小二乗法により算出する。また、 $P_y$  は補強前の矩形断面柱の降伏荷重、 $u_y$  は  $P_y$  と実験供試体 UR の  $k$  を用いて算出される降伏変位である。本実験より得られた結果を以下に示す。

### (a) 溶接接合 (RR\_SS) とボルト接合 (AR\_R) の比較

溶接接合、ボルト接合を問わず縦補剛材の追加・設置が板パネルの局部座屈の防止に有効であり、補強後は初期剛性、最大荷重、および、変形能が向上した。縦補剛材を溶接接合により追加・設置する場合には、縦補剛材の溶接により圧縮残留応力が生じるため、補強前よりも板パネルに局部座屈が早期に発生する。L 字形の補剛材をボルト接合により追加・設置する場合には、溶接接合に比べて初期剛性および最大荷重が低下したが、降伏開始荷重および変形能は向上した。

### (b) 初期応力の有無 (AR\_R と AR\_RF) の比較

初期応力が導入するしない場合に比べて、降伏開始荷重が低下したが、初期剛性、最大荷重、および変形能が向上した。ただし、初期応力の導入の有無による初期

表-3 主な実験結果

実験供試体	初期剛性 $k$ (kN/mm)	最大荷重 $P_u$ (kN)	最大荷重時の変位 $u_u$ (mm)	降伏開始荷重 $P_{ys}$ (kN)	降伏開始変位 $u_{ys}$ (mm)
UR	1,723	1,364	1.66	1,274	0.84
RR_SS	2,532	2,702	3.25	1,327	0.61
AR_R	2,114	2,599	3.62	2,176	1.31
AR_RF	2,198	2,540	4.08	1,883	1.07
AR_BF	2,067	2,661	3.93	1,948	1.08

表-4 主な実験結果（無次元化）

実験供試体	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $u_y$ (mm)	$k'$	$P_u/P_y$	$u_u/u_y$	$P_{ys}/P_y$	$u_{ys}/u_y$
UR	2,291	1.33	1.000	0.595	1.25	0.556	0.63
RR_SS	2,494	1.45	1.470	1.084	2.25	0.532	0.42
AR_R	2,589	1.50	1.227	1.004	2.41	0.840	0.87
AR_RF	2,291	1.33	1.275	1.109	3.07	0.822	0.80
AR_BF	2,440	1.42	1.200	1.091	2.78	0.798	0.76

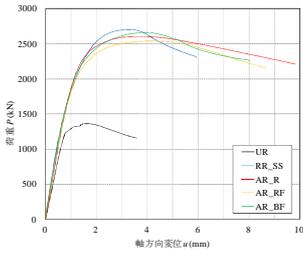


図-4  $P-u$ 関係

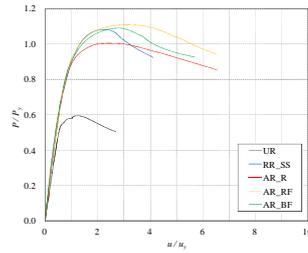


図-5  $P/P_y-u/u_y$ 関係

たわみ形状の差が実験結果に影響したと考えられる。

(c) L字形材の接合位置 (AR\_RF と AR\_BF) の比較

ボルト孔を板パネル中心に配置すると、初期剛性、降伏開始荷重、最大荷重、変形能が縦補剛材を板パネル中心に配置する場合と比較して若干ではあるが低下した。

3. 実験の再現解析

3.1 実験供試体の再現解析モデル

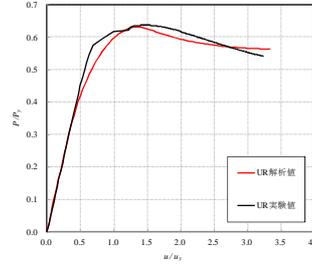
実験供試体の板パネルの、幅方向は断面角部の板厚中心間、軸方向は載荷板間の一面をモデル化した。拘束条件は、上下端は固定支持、断面角部は単純支持とした。鋼板パネル、補強部材、ボルト、座金は、ソリッド要素を用いてモデル化している。要素分割は、局部座屈変形を考慮できるように十分配慮した。載荷は載荷辺に一樣な強制変位を与え一樣軸圧縮力を導入する方法を用いる。また、実験結果を精度よく再現するため、初期不整として初期たわみおよび残留応力を、接触条件として接触、すべり、および離間を考慮した。板パネルおよび補強部材の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、ひずみ硬化パラメータを  $E/100$  とした。

3.2 再現解析結果

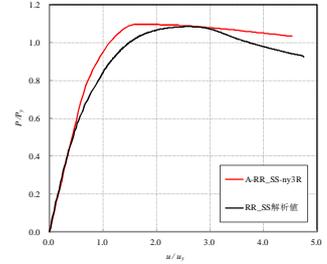
再現解析結果を表-5に示す。ここで、 $k'$  は無次元化した  $P/P_y-u/u_y$  関係における弾性範囲での初期勾配、 $P_u/P_y$  は最大荷重  $P_u$  を降伏荷重  $P_y$  で無次元化した値、 $D_k, D_p$  はそれぞれ  $k'$  あるいは  $P_u/P_y$  における実験値と解析値の差異 (= (解析値 ÷ 実験値 - 1) × 100) を表し、 $D_k, D_p$  により解析モデルの再現性を検証する。図-6には各解析モデルの代表的な  $P/P_y-u/u_y$  関係を示す。

表-5 再現解析結果

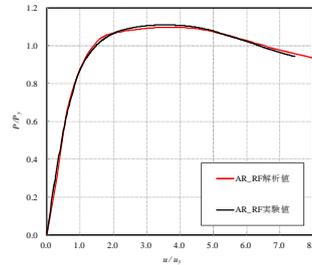
解析モデル名 (実験供試体名)	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $u_y$ (mm)	初期剛性 $k$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k'$	$D_k$ (%)	最大荷重 $P_u$ (kN)	$P_u/P_y$	$D_p$ (%)
UR実験値	573	1.33	446,392	0.913	-	340,975	0.637	-
UR解析値	536	1.10	442,085	0.913	0.0	338,390	0.632	-0.8
RR_SS実験値	624	1.45	602,959	1.197	-	675,525	1.084	-
RR_SS解析値	623	1.24	594,014	1.179	-1.5	682,848	1.095	1.1
AR_R実験値	647	1.50	558,401	1.100	-	649,350	1.003	-
AR_R解析値	647	1.28	583,840	1.150	4.5	661,457	1.022	1.9
AR_RF実験値	573	1.33	549,431	1.122	-	628,275	1.097	-
AR_RF解析値	573	1.16	573,833	1.161	3.5	628,065	1.097	0.0
AR_BF実験値	610	1.42	547,627	1.109	-	650,600	1.067	-
AR_BF解析値	610	1.22	579,559	1.156	4.2	660,713	1.083	1.6



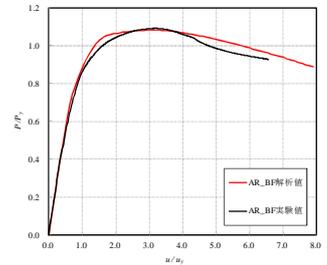
(a) 実験と解析の比較 (UR)



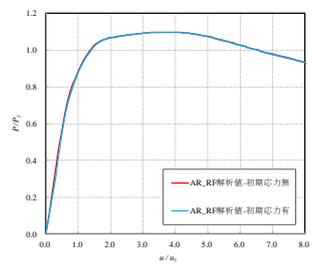
(b) 実験と解析の比較 (RR\_SS)



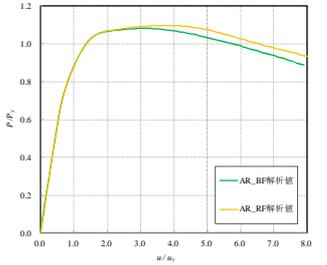
(c) 実験と解析の比較 (AR\_RF)



(d) 実験と解析の比較 (AR\_BF)

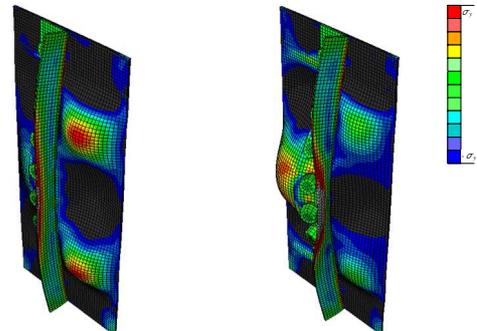


(e) 初期応力の有無での比較



(f) 補強部材の接合位置での比較

図-6  $P/P_y-u/u_y$ 関係



(a) AR\_RF' (b) AR\_BF'

図-7 載荷軸方向の応力コンター図

(AR\_BF' の最大荷重時、変形倍率：10倍)

(a) 再現性の検証

表-5に示す初期勾配  $k'$  に着目すると、無補強鋼板パネルである UR'および、縦補剛材を溶接接合した RR\_SS'では、実験との差異  $D_k$  は2%以内である。一

方、L字形材をボルト接合したARシリーズでは解析の方が実験との差異 $D_k$ が4%程度となり、解析の方が初期勾配は高くなった。この要因として、解析では板パネルと平板間の隙間はゼロであるが実験では初期たわみによる隙間が存在するため、解析での摩擦による剛性上昇であると考えられる。最大耐荷力 $P_u/P_y$ に着目すると、比較対象となった解析モデルの差異 $D_p$ は1%程度である。よって、ソリッド要素でのモデル化によって、実験を精度よく再現できている。

#### (b) 補強部材の接合位置が座屈挙動に及ぼす影響

図-7には荷重軸方向の応力コンター図を示し、AR\_RF'では板中央を境界にしてボルトの無い側の板パネルでの局部座屈が進行したが、AR\_BF'ではボルト側の板パネルで局部座屈が進行し、それに追従して縦補剛材の局部座屈も生じ、図-6(f)に示すようにAR\_BF'の方が早期に荷重低下したと考えられ、実験結果とも一致する。したがって、板中央に縦補剛材を配置した方が最大荷重、変形能が向上する。

### 4. 実構造物を想定した補強後鋼板パネルの解析検討

#### 4.1 解析対象となる鋼板パネルと補強部材の設計

設計方針は2節と同様である。表-6には使用鋼材であるSM490Yの公称値を用いた無補前の鋼板パネルおよび縦補剛材の断面諸元を、図-8には解析モデルの寸法を示す。補強前の鋼板パネルは、圧縮力を受ける補剛材の縦補剛材間の板パネルを想定し、対称性を考慮して軸方向に1/2のモデル化範囲とした。

図-8(a)に示すように、補強前の鋼板パネルURは、板幅を500mm、板長さはアスペクト比が5となる2500mmに固定し、 $R_R < 0.4$ を満たさないように板厚を設定する。幅厚比パラメータは、実構造物で補強対象となる、 $R = 1.0, 0.8$ の2パターンであり、解析モデル名にR□と添え字している。なお、 $R = 1.0$ の解析結果は $R = 0.8$ と同傾向であったため省略している。

補強後の鋼板パネルは、板パネル中央に縦補剛材を溶接接合するRIBおよび、L字形材をボルト接合し、縦補剛材が板パネル中央に位置するBOLTである。また、実施工では補強部材は板端部からわずかに離して設置されるのが一般的であり、その離間量が耐震補強効果に及ぼす影響が明確でないことを踏まえ、本解析では荷重辺となる板端部からの離間量 $d$ を設定する。離間量 $d$ は、板幅 $B (=500\text{ mm})$ の1/4, 1/8, 1/16, 0の4パターンとし、解析モデル名に添え字している。

高力ボルトはM20・F10Tを用い、最大ボルト間隔は最大中心間隔である130mm、最小ボルト間隔は同じく最小中心間隔である65mmとした。図-8(c)～(f)に示すように、ボルト間隔は対称辺から最大ボルト間隔の半分の位置に、そこから荷重辺に向けて最大ボルト中

心間隔でボルト孔を設置し、最外縁のボルト孔が32mm(=平板の最小縁端距離)+離間量の位置であり、かつ最外縁のボルト孔と1つ内側のボルト孔が最小ボルト間隔となるように他のボルト間隔を調整する。

表-6 無補強鋼板パネルおよび縦補剛材の断面諸元

無補強鋼板パネルの設計						
解析モデル名	UR-R10	UR-R08	UR-R06			
使用鋼材	SM490Y	SM490Y	SM490Y			
降伏応力 $\sigma_y$	355	355	355			
弾性係数 $E$	200000	200000	200000			
板パネルの幅厚比パラメータ $R_R$	0.5	<0.4	0.4	<0.4	0.3	<0.4
縦補剛材の設計						
縦補剛材の幅厚比パラメータ $R_S$	0.500	<0.5	0.500	<0.5	0.500	<0.5
補剛材の幅厚比パラメータ $R_F$	0.400	<0.4	0.400	<0.4	0.400	<0.4
補剛材の最小必要剛比 $\gamma_s/\gamma^*$	1.17	>1	2.09	>1	6.03	>1

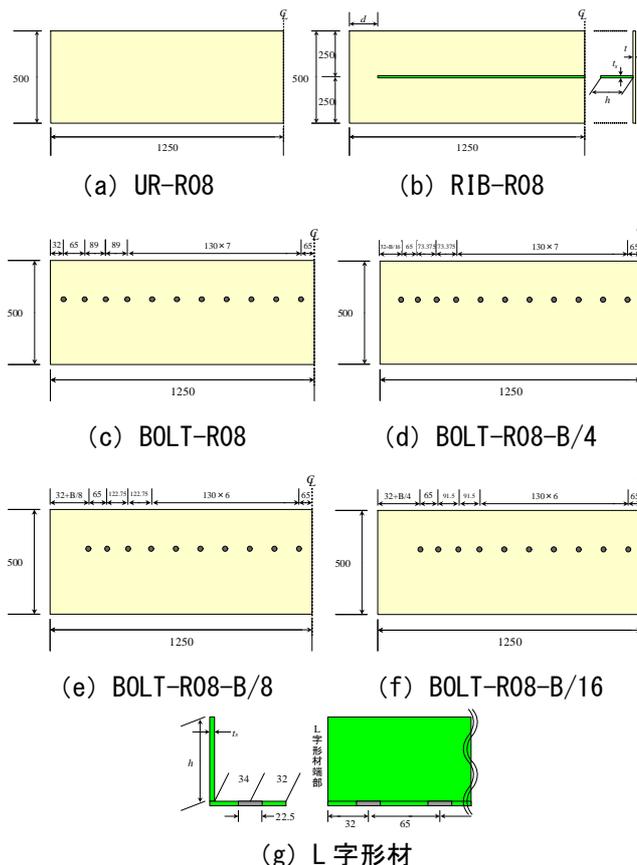


図-8 解析モデルの寸法 (単位: mm)

#### 4.2 解析手法

鋼板パネルは周辺単純支持とし、対称辺には対称条件を設定する。使用要素、要素分割、荷重方法、材料特性、接触条件、初期不整は3節と同様の手法である。

#### 4.3 解析結果

表-7には解析結果を示す。表中の $k$ は弾性範囲内の初期剛性、 $k'$ は無次元化した $P/P_y-u/u_y$ 関係における弾性範囲内の初期勾配、降伏荷重 $P_y$ は降伏応力に補強前断面積を乗じた値、 $u_y$ は降伏荷重 $P_y$ およびURの $k'$ に対応する降伏変位、 $P_u/P_y$ は最大荷重 $P_u$ を降伏荷重 $P_y$ で無次元化した値、である。 $D_{kUR}$ 、 $D_{PUR}$ はURに対するRIBあるいはBOLTとの差異を表し、 $D_{kRIB}$ 、 $D_{PRIB}$ も同様である。図-9、図-10には $P/P_y-u/u_y$ 関係を、図-11には荷重軸方向応力コンター図を示す。本解析より得られた主な結果を以下に示す。

表-7 解析結果

解析モデル	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $u_y$ (mm)	初期剛性 $k$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k'$	$D_{UR}$ (%)	$D_{RIB}$ (%)	最大荷重 $P_u$ (kN)	$P_u/P_y$	$D_{UR}$ (%)	$D_{RIB}$ (%)
UR-R08	2,458,153	4.44	528,010	0.953	-	-	1,916,580	0.780	-	-
RIB-R08			646,615	1.167	22	-	2,795,970	1.137	46	-
RIB-R08-B/4			627,239	1.132	19	-	2,096,160	0.853	9	-
RIB-R08-B/8			638,432	1.153	21	-	2,187,810	0.890	14	-
RIB-R08-B/16			642,976	1.161	22	-	2,399,650	0.976	25	-
BOLT-R08			673,463	1.216	28	4.2	2,781,400	1.131	45	-0.5
BOLT-R08-B/4			647,683	1.169	23	3.3	2,209,760	0.899	15	5.4
BOLT-R08-B/8			662,157	1.195	25	3.6	2,399,540	0.976	25	9.7
BOLT-R08-B/16			669,181	1.208	27	4.0	2,606,510	1.060	36	8.6

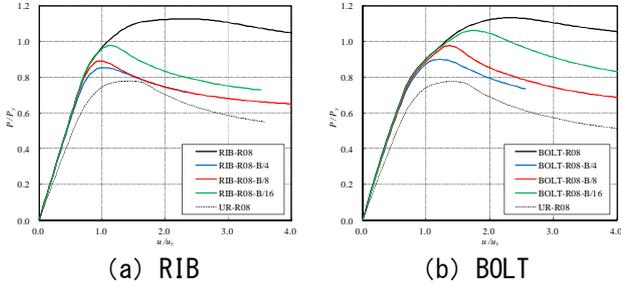


図-9  $P/P_y-u/u_y$ 関係 (離間量での比較)

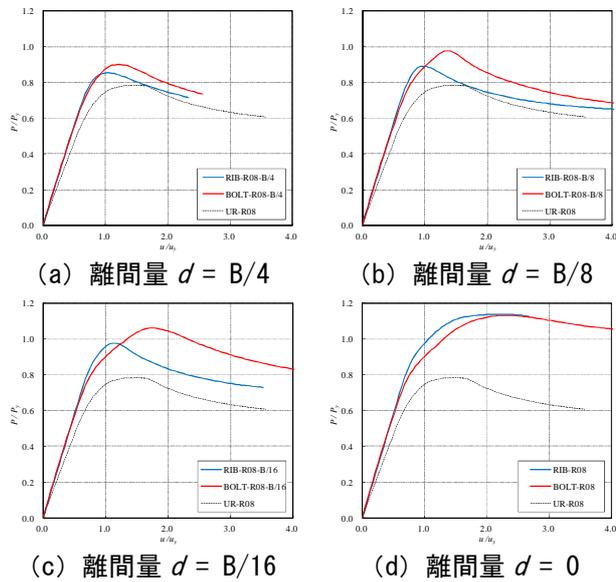


図-10  $P/P_y-u/u_y$ 関係 (補強方法での比較)

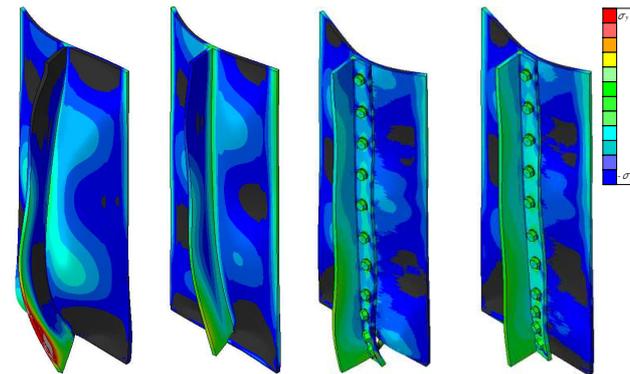


図-11 軸方向応力コンター図 (最大荷重時, 変形倍率: 20倍)

(a) 縦補剛材を溶接接合した RIB

離間量を設けて縦補剛材を溶接接合する場合、幅厚比パラメータの制限値を満たしていても離間量に関わらず、補強前の降伏耐力を上回らなかったが、補強前に比べて初期剛性および最大耐荷力は向上した。また、離間量を小さくすると、縦補剛材端部での板パネルの座屈発生が抑制され、耐震補強効果が高くなる。

(b) L字形材をボルト接合した BOLT

離間量を設けてL字形材をボルト接合する場合、離間量を小さくするほど、平板の座屈防止効果と合わせて、L字形材端部での板パネルの座屈が抑制され、補強前に比べて初期剛性および最大耐荷力が向上した。幅厚比パラメータの制限値を満たし、かつ、離間量が十分に小さい場合には、補強前の降伏耐力を上回る。

(c) RIBとBOLTの座屈挙動の比較

幅厚比パラメータあるいは離間量をパラメータとした全ケースにおいて、補強部材をボルト接合する場合は溶接接合に比べて板パネルは早期に降伏するが、初期剛性、最大耐荷力、変形能が向上する。また、溶接接合では縦補剛材端部の応力集中に起因する疲労き裂が懸念され、実施工での溶接品質を確保することが困難な点から、ボルト接合による補強方法が有効である。

4.4 ボルト接合による補強方法の適用性の検証

ボルト接合による補強方法の実構造部への適用に向けた種々の検討課題に対する結果を以下に示す。

(a) 締付ボルト軸力

ボルト締付時に所定のボルト軸力が導入されない場合や、経年のボルト軸力低下を想定し、導入するボルト軸力を小さくすると初期剛性は低下したが、最大耐荷力に顕著な差が確認できなかったため、ボルト軸力が座屈防止効果へ及ぼす影響は小さいことがわかる。

(b) 補強部材の鋼種

補剛板の補剛材の設計では縦補剛材の鋼種は補剛される板の鋼種と同等以上のものでなければならないとされている。鋼板パネルと補強部材が異種鋼材であると想定した場合、鋼板パネルと同等以上の鋼種を用いた場合と同程度の耐震補強効果が得られたことが確認されたため、補強部材の鋼種は、必ずしも鋼板パネルの鋼種と同等以上である必要はない。

(c) L字形材の平板厚

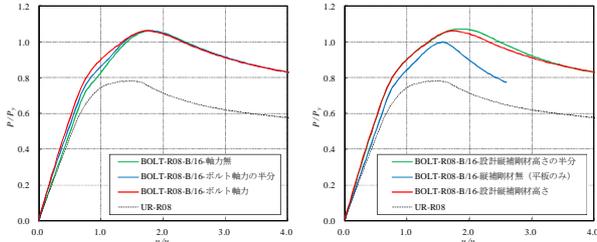
L字形材の平板は明確な設計基準がなく、実施工では縦補剛材と同じ板厚が用いられることが多い。L字形材の平板厚を薄くすると、初期剛性および最大耐荷力は低下するが、その低下量は小さいことが確認されたため、平板に薄板を使用しても座屈は防止される。

(d) L字形材の縦補剛材高さ

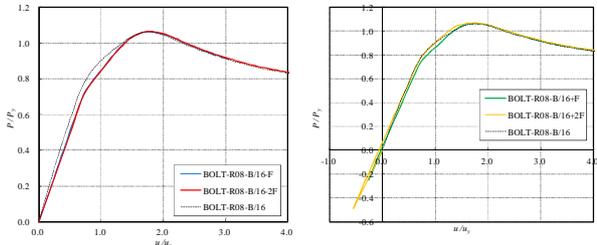
L字形材の縦補剛材高さは、幅厚比パラメータの制限値および  $\gamma_s/\gamma_s^*$  が 1.0 以上を満足するように設計される。この設計縦補剛材高さより過剰に低くすると、補剛板が全体座屈し、最大耐荷力が低下する。

(e) 板パネルの初期応力

解析ケースは、 $P/P_y = 0.25$ ,  $P/P_y = 0.5$  に相当する圧縮初期応力 (添え字 -F, -2F),  $P/P_y = -0.25$ ,  $P/P_y = -0.5$  に相当する引張初期応力 (添え字 +F, +2F) を補強前の鋼板パネルに導入した場合および、導入しない場合



(a) ボルト軸力での比較 (b) 縦補剛材高さでの比較  
 図-12 代表的な  $P/P_y-u_y/u_y$  関係 (BOLT-R08-B/16)



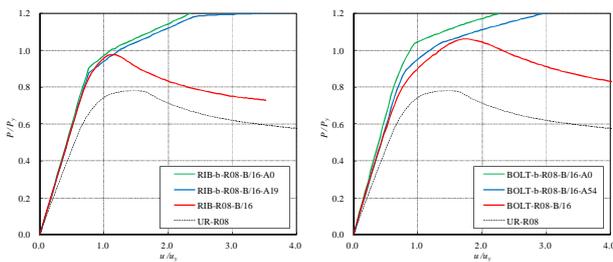
(a) 圧縮初期応力での比較 (b) 引張初期応力での比較  
 図-13  $P/P_y-u_y/u_y$  関係 (BOLT-R08-B/16)

表-8 初期応力をパラメータとした解析結果

解析モデル名	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $u_y$ (mm)	初期剛性 $k$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k'$	$D_{kf}$	最大荷重 $P_u$ (kN)	$P_u/P_y$	$D_{PF}$ (%)
BOLT-R08-B/16+2F	2,458,153	4.44	584,475	1.055	-12.7	2,623,170	1.067	0.7
BOLT-R08-B/16+F			589,732	1.065	-11.9	2,615,440	1.064	0.4
BOLT-R08-B/16			669,181	1.208	-	2,606,510	1.060	-
BOLT-R08-B/16-F			568,635	1.027	-15.0	2,614,250	1.064	0.3
BOLT-R08-B/16-2F			564,738	1.019	-15.6	2,614,960	1.064	0.4

表-9 骨組構造解析結果

解析モデル名	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $u_y$ (mm)	初期剛性 $k$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k'$	$D_{kA}$ (%)
RIB-R08-B/16	2,458,153	4.44	642,976	1.159	-
RIB-b-R08-B/16-A0			662,229	1.195	3.1
RIB-b-R08-B/16-A19			641,779	1.159	-0.1
BOLT-R08-B/16			669,181	1.167	-
BOLT-b-R08-B/16-A0			714,457	1.290	10.5
BOLT-b-R08-B/16-A54	646,472	1.167	0.0		
RIB-R10-B/16	1,966,523	4.44	513,541	1.155	-
RIB-b-R10-B/16-A0			536,563	1.211	4.5
RIB-b-R10-B/16-A26			512,418	1.156	-0.2
BOLT-R10-B/16			540,147	1.185	-
BOLT-b-R10-B/16-A0			589,203	1.330	13.9
BOLT-b-R10-B/16-A54	525,133	1.185	1.6		



(a) RIB-R08-B/16 (b) BOLT-R08-B/16

図-14 代表的な  $P/P_y-u_y/u_y$  関係 (断面積減少率による比較)

の計 5 ケースである。解析モデルには高い耐震補強効果の BOLT-R08-B/16 を用いる。解析結果を表-8 に示す。表中の  $D_{kf}$ 、 $D_{PF}$  はそれぞれ  $k'$ 、 $P_u/P_y$  における、初期応力を導入しない場合との差異を示す。 $P/P_y-u_y/u_y$  関係を図-13 に示す。補強前の板パネルに初期応力を導入することで、初期応力を導入しない場合に比べて初期剛性が低下した。そのため、補強設計では初期応力導入による初期剛性の低下を考慮する必要がある。

## 5. 骨組構造モデルの提案

モデル化範囲、境界条件、载荷条件、材料特性、残留応力は 4 節と同様である。板パネルおよび補強部材ははり-柱要素、ボルト部をばね要素によりモデル化し、そのばね定数は剛とした。初期たわみには、柱全長に初期たわみ量が  $L/1000$  となる正弦半波を導入した。

本解析では、補強後部材の初期剛性を精度良く再現することは、最大荷重および最大荷重後の耐力低下を再現するより重要であると考えられるため、補強部材の断面積を減少させることで、4 節の解析モデルと同じ初期剛性となるように調整する。補強部材の断面積を調整する際には、板厚を減少させることとする。解析モデル名の末尾には断面積  $A$  の減少率を示す。また、幅厚比パラメータによる断面積減少率の違いを確認するために、幅厚比パラメータは 2 ケースとした。

表-9 には析結果を示す。はり-柱要素でモデル化した解析モデル名には添え字-b を付けている。ここで、 $D_{kA}$  はソリッド要素での解析値  $k'$  との差異を示す。図-14 には断面積減少率により比較した  $P/P_y-u_y/u_y$  関係を示す。縦補剛材を溶接接合する RIB では断面積減少率は 19~26 % と幅厚比パラメータの変動により若干変化するが、L 字形材をボルト接合する BOLT では幅厚比パラメータに関わらず、断面積減少率は 54 % である。

## 6. 結論

本研究では、初期応力を導入した補強後部材の耐震補強効果および解析モデル化手法の提案について、補強後鋼板パネルのソリッド要素による数値解析および骨組構造解析により検討した。その結論を以下に示す。

- 1) 溶接接合、ボルト接合を問わず縦補剛材の追加・設置が板パネルの局部座屈の防止に有効であり、補強後は初期剛性、最大荷重、および、変形性能が向上した。また、縦補剛材をボルト接合する場合は溶接接合よりも耐震補強効果が向上する。
- 2) 縦補剛材をボルト接合する場合、ボルト孔を板パネル中央に配置するより、縦補剛材を板パネル中央に配置する方が、座屈抑制により耐震補強効果が高い。
- 3) 初期応力を導入することで、初期剛性を導入しない場合に比べて初期剛性が低下したため、耐震補強設計では構造全体の固有周期や地震時応答などを算出する際に初期剛性の低下を考慮する必要がある。
- 4) 補強後鋼板パネルの骨組構造解析において、補強部材の断面積減少率を考慮した本解析手法を、固有値解析や動的解析に用いるための、補強後鋼部材の骨組構造解析のモデル化手法として提案する。

## 参考文献

- 1) 土木学会：座屈設計ガイドライン、2005 年版
- 2) 阪神高速道路(株)：既設鋼製橋脚の補強設計要領、2000.3
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II 鋼橋編、2012.3

## 討議等

### ◆討議 [ 角掛 久雄 講師 ]

骨組構造モデルにおいて、ソリッド要素を用いた解析モデルの最大耐荷力を再現できなければ、骨組構造解析に適用できないのではないかと。

◆回答：ソリッド要素を用いた解析モデルの初期剛性に一致するように、補強部材の断面積を低減する骨組構造モデルを用いても最大荷重に至るまでの挙動はある程度再現できています。そのため、このモデル化の適用範囲は、補強後部材に補強前の降伏耐力以上の圧縮力が作用しない構造への適用範囲とします。最大耐荷力を再現する手法として、解析で設定する応力-ひずみ関係の降伏点を調整する方法があるが、汎用性に欠けるため今回は検討していません。

### ◆討議 [ 角掛 久雄 講師 ]

補強部材の断面積の低減方法はどうか。

◆回答：骨組構造モデルでは、板厚を減じて補強部材の断面積を低減させています。

### ◆討議 [ 山口 隆司 教授 ]

表現方法として、「耐震補強効果」ではなく補強効果でも良いのではないかと。

◆回答：補強目的が耐震補強であり、地震作用による鋼板パネルの局部座屈といった大変形による損傷を防止するため補剛材を追加・設置する効果という意味で、耐震補強効果と表現しています。

### ◆討議 [ 谷口 与史也 教授 ]

縦補剛材を接合する方向は、載荷軸方向ではなく載荷軸直角方向では座屈を防止できないのか。

◆回答：局部座屈強度を向上させる方法として、鋼板パネルに補剛材を追加して幅厚比パラメータを小さくする手法がとられ、板パネルの幅厚比パラメータを小さくするには板幅を小さくすることが必要となるため、本研究では軸方向に縦補剛材を接合しています。

### ◆討議 [ 谷口 与史也 教授 ]

縦補剛材をボルト接合する場合の補強部材の形状として、山形鋼を採用したのはなぜか。溝形鋼でも良いのではないかと。

◆回答：実橋への適用事例を参考にしたため、山形鋼の

形状を採用しました。溝形鋼の形状であると、ボルト締付の作業性が悪くなることや、帯水しやすくなるなどを踏まえると、山形鋼の形状が望ましいと考えられます。

### ◆討議 [ 山田 卓 講師 ]

初期応力はどのようにして導入したか。

◆回答：死荷重等による初期圧縮力の作用を考慮して、補強前の実験供試体の最大荷重の 50%に相当する初期軸力を載荷した状態を保持し、補強部材をボルト接合することにより初期応力を導入しています。

### ◆討議 [ 松村 政秀 准教授 ]

骨組構造モデルに関して、ソリッド要素を用いた解析モデルと初期剛性を一致させるメリットはなにか。

◆回答：動的解析を行う際には、最初の手順として与える地震波を設定するために固有値解析を行います。固有値解析では、補強後部材の初期剛性の変化は構造全体の固有周期にも影響しますので、骨組構造モデルの初期剛性を調整する必要があります。そして、その骨組構造モデルをそのまま動的解析に用いると、地震波の固有周期にあった最大応答値を算出することができます。