

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06308

研究課題名(和文) 震災鉄骨ブレース構造物の修復性に関わる補修工法と性能回復性評価法の開発

研究課題名(英文) A Study on Recovery Technique and Estimation Method for Damaged Steel Braced Structures

研究代表者

伊藤 拓海 (Ito, Takumi)

東京理科大学・工学部建築学科・准教授

研究者番号：50376498

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：震災鉄骨ブレース構造について、補修工法を提案し、その適用性や有効性について検討した。

はじめに、過去の地震被害事例を調査し、崩壊モードを分類・整理した。これにより、補修対象とすべきモードと部位を明らかにし、補修工法を提案した。低層～中層鉄骨ブレース構造を対象とし、構造実験手法により、ブレース構造試験体の損傷を再現し、補修して構造性能の回復性を検討した。実験結果より、補修工法の有効性を示した。また、補修したブレース構造が骨組に与える影響を検討した。さらに、3D技術により損傷した試験体の3Dモデルを作成し、復元力特性の評価法を提案した。実験結果との比較により、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：The terrible seismic disaster on steel building structures have been reported. This study proposed the repair technique and estimation method on damaged steel braced structures are proposed.

First, the experimental study is performed on test specimen to reproduce the damaged state of steel braced structures. And the damaged test specimen is restored using proposed repair technique. Furthermore, the experimental loading test is done to clarify the restoring force characteristics related to recovery. From the test results, the proposed repair technique is confirmed, and the relation of repair technique and restoring force characteristics is discussed. And also, to visualize the figure of damaged state, 3D modeling method is adopted. Using the 3D model, the ultimate states of damaged braced structures can be investigated in detail. Furthermore, the limit state analysis method is proposed by consideration of 3D model.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造 鉄骨ブレース 修復性 補修工法 構造実験 3次元技術 塑性解析 復元力特性

1. 研究開始当初の背景

近年の巨大地震で被災した鉄骨建物は、阪神淡路大震災で約 1,000 棟が損傷し、うち約 420 棟が倒壊・大破に至った。東日本大震災では調査対象 9 万 5 千棟のうち、1 万 2 千棟が危険、2 万 3 千棟が要注意の判定となった。本研究で対象とする鉄骨ブレース構造では、被災事例のうち約 41%でブレース材と接合部の座屈、破断による被害が報告されている。

震災鉄骨ブレース構造は、図 1 のような被害状況を呈する。甚大な被害を受けた建物は、被害程度に応じて 1) 取り壊して新築、2) 補修して再利用、といった対応が求められる。避難所生活や災害復旧拠点となる体育館や、サプライチェーンの工場は鉄骨ブレース構造であることが多く、迅速な復旧等対策が望まれる。また近年、スクラップ・アンド・ビルドの時代から、ストック型社会へ移行してきており、補修して再使用するための設計法や技術体系の確立が待望されており、修復性設計法確立の機運が高まっている。

鉄骨構造の補強や補修、修復性に関する既往研究はわずかである。その大半は既存建物に対する震災前補強を対象としており、震災後補修の研究は限られている。また、震災後補修の研究成果に基づき、「震災建築物の被災度区分判定と復旧技術指針」(2001 年)(以下、復旧指針と呼ぶ)が刊行され、鉄骨ブレース構造については表 1 に示すように、補修方法と補修後性能の目安が示されている。ただし、建物の規模や損傷部位とその状況などにより、補修方法や工事計画、補修効果は様々である。また補修効果に関わる施工実績や検証のデータは少なく、同指針の有効性や信頼性に関わるため、実験的研究によって解決していく必要がある。



図 1 ブレース構造の被害事例

表 1 ブレース構造の補修工法と性能回復性

損傷状況	補修工法 ^{※1)}	工事の 難易度	補修後性能 ^{※2)}	妥当性
1. ブレース材の座屈	交換	容易	新規に同じ	妥当
2. ボルトの損傷	交換	容易	新規に同じ	妥当
3. ブレース材の降伏	交換	容易	新規に同じ	妥当
4. G.PLの損傷	交換・取換え	困難	新規に同じ	不明
5. 溶接の亀裂	再溶接	やや難	被災前に同じ	概ね妥当

2. 研究の目的

震災鉄骨ブレース構造の主たる損傷に関して、補修工法と工事の難易度、補修後性能とその妥当性を表 1 に整理する。このうち 4.ガブレース接合部の損傷に対して、工事の難易度や補修後性能の評価に疑問がある。

そこで本研究では、1) 補修工法を提案し、耐震性能の回復性を実験的に検討する。さらに、2) 補修後のブレース構造と骨組の力学特性や復元力特性を明らかにし、3) 性能評価に供する解析手法を確立し、4) 性能回復に関わる設計目標やクライテリアの提案、を試みる。特に、1)のブレース接合部の補修工法については、復旧指針で示された方法(取り換え・交換)が実施できない状況を勘案して、プレートやスチフナなどの補修材を用いた補修方法を提案する。これにより、表 1 に示す被災したブレース構造を修復するための総合的な技術と評価法が完成すると考えられる。

3. 研究の方法

本研究課題は、構造実験手法と数値解析シミュレーションによる研究を行う。さらに、損傷した部材の塑性変形状態を解析するため、3次元技術による計測とモデル化を行う。

対象とするブレース構造は、

- 1) 低層鉄骨造で使用される山形鋼ブレース、
- 2) 中層鉄骨造で使用される H 形鋼ブレース、とする。

構造実験では、1) 部材レベル、2) 部分骨組レベルを対象とする。以上について、実験セットアップ図を図 3~5、各実験の変数を表 2, 3 にそれぞれ示す。

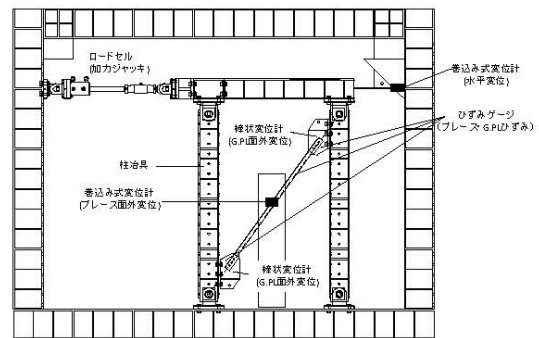


図 3 山形鋼ブレースの水平載荷実験

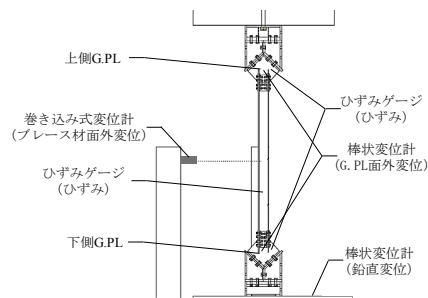


図 4 H 形鋼ブレースの圧縮載荷試験

表2 山形鋼ブレースの水平載荷試験の変数

試験体名	GPL板厚 [mm]	食い込み長さ [mm]	載荷パターン	補修の有無
L-6-0-NM	6	0	単調	無
L-6-0-NC	6	0	繰返し	
L-16-0-NM	16	40	単調	
L-16-0-NC	16	40	繰返し	
L-6-0-RM	6	0	単調	有
L-6-0-RC	6	0	繰返し	
L-6-40-RM	6	40	単調	
L-6-40-RC	6	40	繰返し	
L-16-0-RM	16	0	単調	
L-16-0-RC	16	0	繰返し	
L-16-40-RM	16	40	単調	
L-16-40-RC	16	40	繰返し	

表3 H形鋼ブレースの圧縮載荷試験の変数

ID	試験体名	板厚 [mm]	フィンチ フナ長[mm]	サイドチ フナ	ボルトレイアウト(M12F10)		
					配列	間隔	ピッチ
1	H-695-N	6	95	無	2行2列	20	35
2	H-695-S		120			22	45
3	H-6120-N		130			20	35
4	H-6130-N	9	130	無	1行3列	22	50
5	BH-9130-N					22	50

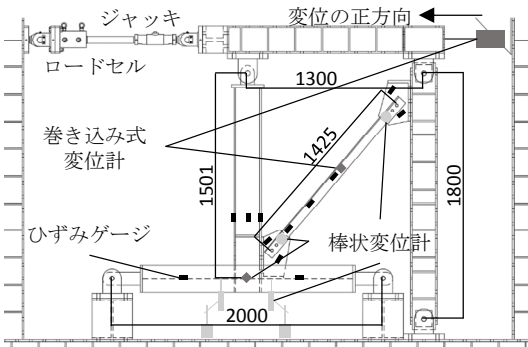


図5 山形鋼ブレース付鉄骨骨組架構の水平載荷試験

構造実験により損傷した試験体に対し、補修方法として、

- 1) ブレース材の曲げ座屈に対しては取替え、
- 2) 接合部の損傷に対しては、図6に示す補修方法を提案する。

試験体を補修した後、再度載荷実験を行い、力学特性や復元力特性を求め、元の状態の実験結果と比較・検討を行う。

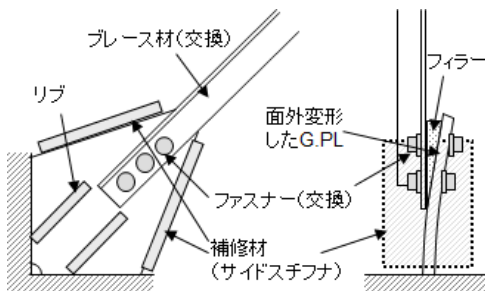


図6 損傷したブレース接合部の補修工法の提案

4. 研究成果

4-1. 山形鋼ブレースの水平載荷実験

図3、表2の実験結果について、元の状態と、補修後の試験体の荷重変形関係を図7、塑性率と軸ひずみの関係を図8、崩壊モードを図9、ブレース接合部の幾何学的関係を図10、ブレース材の座屈軸の関係を図11、偏心距離と面がい方向変形の関係を図12、基準化細長比と座屈モードの関係を図13にそれぞれ示す。また、実験結果より元の状態と補修後の試験体の復元力特性を求め、表4にそれぞれ示す。

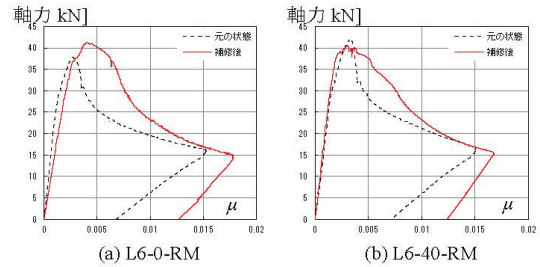


図7 山形鋼ブレースの水平載荷実験結果

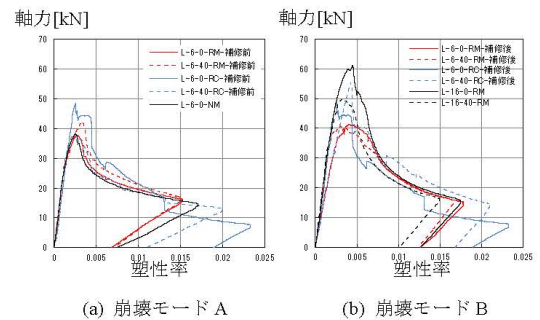


図8 山形鋼ブレースの塑性率と軸力の関係

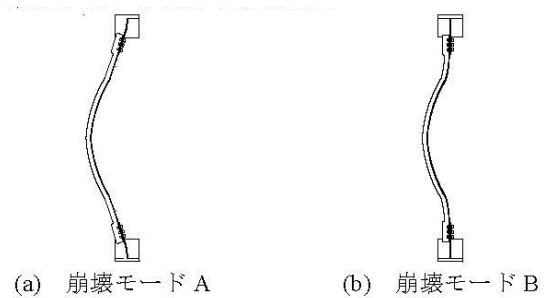


図9 山形鋼ブレースの崩壊モード

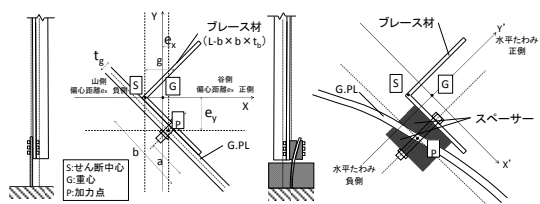


図10 山形鋼ブレースの幾何学的関係

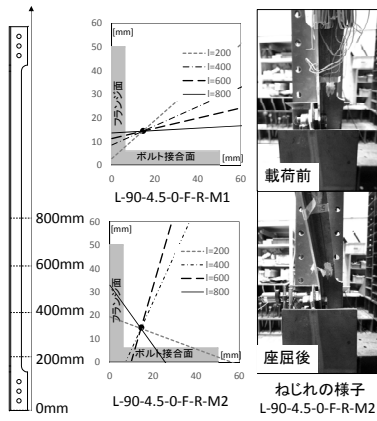


図 11 ブレース材の座屈軸の関係

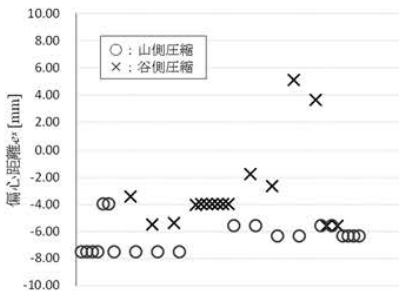


図 12 偏心距離と面外変形方向の関係

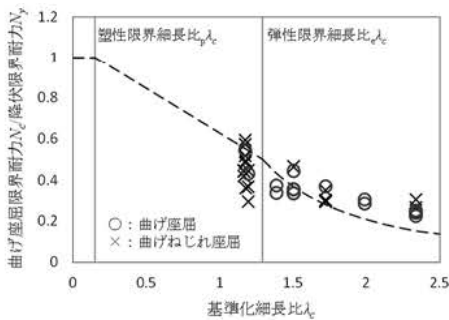


図 13 基準化細長比と座屈モードの関係

表 4 山形鋼ブレースの実験結果一覧

試験体名	軸荷重 [kN]	座屈荷重 [kN]	耐力 増率	座屈長さ [mm]	座屈後安定耐力 [kN]	崩壊モード	偏心距離 [mm]	
L-6-0-NM	初期載重	15.17	38.1	1.25	1150	18.6	A	14.7
	2次載重	13.18	47.5			18.9	A	14.7
L-6-0-NC	初期載重	11.07	35.9	1.39		22.6	A	14.7
	2次載重	10.52	49.7		880	28.2	A+B	14.7
L-16-0-NM	初期載重	15.46	63.4			19.8	B	19.7
	2次載重	18.15	61.2		950	23.2	B	9.9
L-6-0-RM	初期載重	15.43	37.8	1.10	1340	21.2	A	14.7
	2次載重	21.5	41.4			25.2	B	9.9
L-6-0-RC	初期載重	11.98	39.8	1.22		25.9	A	14.7
	2次載重	11.54	48.5		1320	30.9	B	8.31
L-6-40-RM	初期載重	12.39	42.1	0.97	1320	19.5	A	14.7
	2次載重	13.32	40.7		1050	23.2	B	9.05
L-6-40-RC	初期載重	15.49	37.9	1.45		24.8	A	14.7
	2次載重	9.44	55.2		800	39.3	B	7.7
L-16-0-RM	初期載重	14.55	61.0			23.9	B	19.7
	2次載重	14.49	57.9			33.2	B	19.7
L-16-40-RM	初期載重	14.55	49.7			21.4	B	19.7
	2次載重	12.89	49.7			24.3	B	19.7

試験体名称「A-B-C-D-E」: A: 部材 (L-山形鋼), B: GPL の厚み(mm), C: ボルトのねみ込み長さ(mm), D: 端部 (N=無, R=有), E: 載荷 (M=横荷, C=縦荷)

以上の結果に関して、以下の結論を得た。

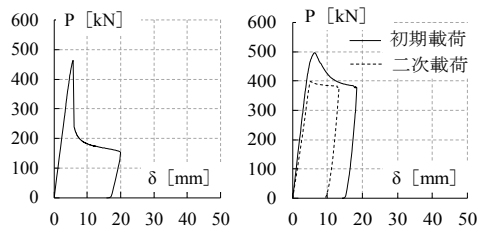
- ブレース端部の固定度、ブレース材の細長比に関わらず、本補修法により座屈荷重は元の状態を下回ることにはないことから、その適用性・有用性を示した。
- 補修後の試験体の座屈荷重と座屈モードについて、座屈長さが短くなると曲げねじれ座屈となる傾向がみられた。
- 補修後のブレース構造の状態として、細

長比（材端拘束度）、偏心距離が主たる変数であることを確認した。

4-2. H 形鋼ブレースの圧縮荷重試験

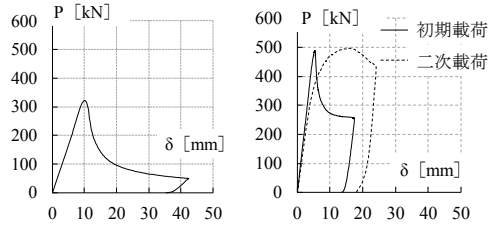
図 4, 表 3 の実験結果について、元の状態と補修後の状態の荷重変形関係を図 14, 終局状態における GPL の降伏線を図 15, 実験で観察された各種崩壊モードを図 16 にそれぞれ示す。また、実験結果より復元力特性を求め、結果を表 5 に示す。

さらに、耐力評価のための力学モデルの作成、ならびに複雑な崩壊性状を示した GPL の把握のため、3次元技術により 3D モデルを作成し、結果を 17 に示す。このモデルに基づき、塑性解析モデルを作成し、実験結果との比較を図 18 に示す。



(a) H-6-95-N

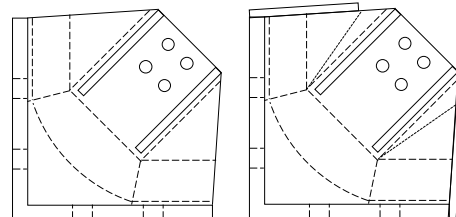
(b) H-6-95-S



(c) H-6-120-N

(d) H-6-130-N

図 14 H 形鋼ブレースの圧縮荷重試験結果



(a) H-6-95-N (元) (b) H-6-95-N (補修後)

図 15 終局状態における GPL の降伏線

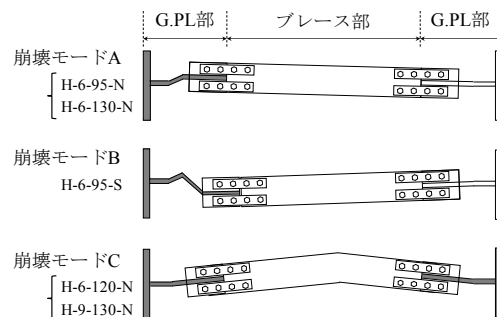


図 16 実験で観察された各種崩壊モード

表 5 H 形鋼ブレースの圧縮荷重実験結果

試験体		初期剛性 [kN/mm]	最大荷重 [kN]	座屈後安定耐力 [kN]
H-6-95-N	初期載荷	95.4	463.72	150
H-6-95-S	初期載荷	99.0	497.54	378
	二次載荷	77.2	398.42	380
H-6-120-N	初期載荷	33.3	321.14	40
H-6-130-N	初期載荷	87.8	488.84	255
	二次載荷	82.0	495.92	-
H-9-130-N	初期載荷	30.0	392.35	55

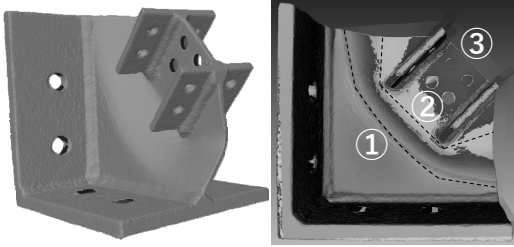
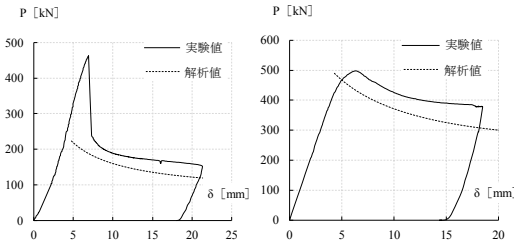


図 17 3D モデルの一例



(a) H-6-95-N

(b) H-6-95-S

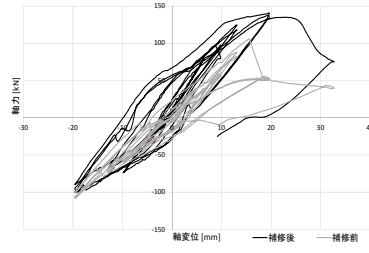
図 18 実験結果と解析結果の比較

以上の結果に関して、以下の結論を得た。

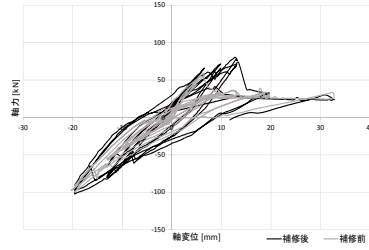
- 1) 鉛直荷重実験により GPL に局所的な曲げ変形が生じる被害事例を再現し、その崩壊性状を明らかにした。
- 2) 補強用としてサイドスチフナを用いた場合、GPL の塑性化後の荷重劣化を抑制し、塑性吸収エネルギーを増加させることができる。
- 3) 補修用としてサイドスチフナを用いた場合、GPL 端部の面外変形を抑制し、最大耐力は概ね元の状態と同程度になる。
- 4) GPL に過度な変形が生じた場合は、フィンスチフナ孔の拡大のみではブレース材を取り換えることが出来ず、本稿の補修方法を適用することができない。
- 5) 3D 計測データに基づいて、劣化域の復元力特性に関わる力学モデルを提案し、GPL 塑性化後の劣化挙動の傾向を概ね評価できる。
- 6) 提案した力学モデルを元に、補修・補強計画の立案が可能になると考えられる。

4-3. 山形鋼ブレース付鉄骨骨組の水平荷重試験

図 5 の実験結果において、ブレース材の軸力-軸変位関係を図 19、骨組とブレース材の

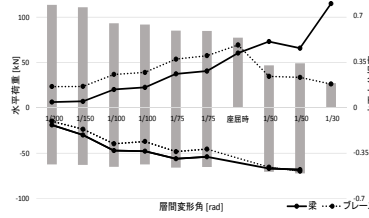


(a) L-70 試験体

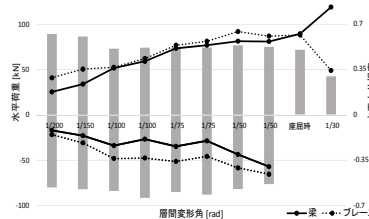


(b) L-120 試験体

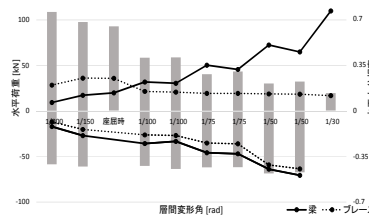
図 19 ブレース材の軸力-軸変位関係



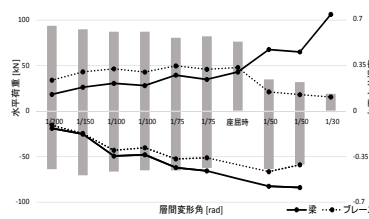
(a) L-70 試験体の元の状態



(b) L-70 試験体の補修後の状態



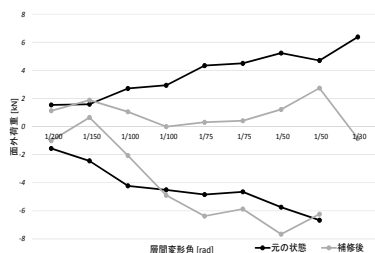
(c) L-120 試験体の元の状態



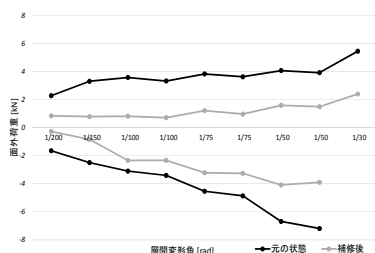
(d) L-120 試験体の補修後の状態

図 20 骨組とブレース材の水平荷重ならびに水平力分担率-層間変形角関係

水平荷重ならびに水平力分担率一層間変形角関係を図 20, 柱梁接合部の面外荷重一層間変形角関係を図 21 にそれぞれ示す。また, 実験結果の一覧を表 6 に示す。



(a) L-70 試験体



(b) L-120 試験体

図 21 柱梁接合部の面外荷重一層間変形角

表 6 山形鋼ブレース付鉄骨骨組の水平載荷実験結果の一覧

試験体名	座屈荷重	座屈長さ	面外変位
L-70	初期載荷	105.88kN	1788mm
	二次載荷	134.93kN	378mm
L-90	初期載荷	73.87kN	1268mm
	二次載荷	107.03kN	392mm
L-120	初期載荷	54.88kN	1090mm
	二次載荷	73.37kN	412mm

以上の結果に関して、以下の結論を得た。

1. 補修により、ブレース材の座屈までの荷重・変形角は大きくなるが、座屈後の荷重の負担に変化はない。
2. GPLの面外曲げ剛性が上昇したことで崩壊モードが変化し、座屈長さが短くなり、座屈荷重が上昇した。
3. 崩壊モードの変化で、柱梁接合部の面外への影響が小さくなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 8 件)

1) Y.Yonezawa, K.Aoki, T. Ito, C.H.Choi: STUDY ON ULTIMATE STATE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONNECTION JOINT OF DAMAGED H-SHAPED BRACING STRUCTURE, 4th World Congress on Construction & Steel Structure, 2017.10

2) 米澤泰斗, 青木謙太, 伊藤拓海, 崔彰訓: 損傷した鉄骨ブレース構造の修復工法と性能回復性に関する研究, その 8 3次元計測に

よる塑性変形のモデル化と塑性解析法, 2017年度日本建築学会大会学術講演会, 2017年8月

3) 米澤泰斗, 青木謙太, 荒井亮太郎, 伊藤拓海, 崔彰訓: 損傷した鉄骨ブレース修復工法と性能回復性に関する研究 その7 H形鋼ブレース材端部の固定度を変数とした実験的検討, 日本建築学会関東支部研究報告会, 2017年3月

4) R. Arai, H. Satoh, K. Aoki, T. Ito, C.H. Choi: REPAIR METHOD OF DAMAGED STEEL BRACED STRUCTURE AND RESTORING FORCE CHARACTERISTICS AFTER REPAIR STATE, 3rd World Congress on Construction & Steel Structure, 2016.10

5) 荒井 亮太郎, 青木 謙太, 伊藤 拓海, 崔彰訓: 損傷した鉄骨ブレース構造の修復工法と性能回復性に関する研究、その6 補修後の座屈耐力の評価方法, 2016年度日本建築学会大会学術講演会, 2016年8月

6) 青木 謙太, 荒井 亮太郎, 伊藤 拓海, 崔彰訓: 損傷した鉄骨ブレース構造の修復工法と性能回復性に関する研究、その5 補修によるブレース構造の力学特性と座屈耐力の関係, 2016年度日本建築学会大会学術講演会, 2016年8月

7) 青木謙太, 荒井亮太郎, 佐藤華子, 伊藤拓海, 崔彰訓: 損傷した鉄骨ブレース構造の修復工法と性能回復性に関する研究、その4 ブレース材の細長比を変数とした実験的検討, 2015年度日本建築学会関東支部研究報告会, 2016年3月

8) H. Sato, T. Ito, R. Arai, C.H. Choi: REPAIR METHOD AND RECOVERY AFTER REPAIR OF DAMAGED STEEL BRACE JOINT, 2015 International Symposium on Steel Structures, 2015.11

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 拓海 (ITO, Takumi)

東京理科大学・工学部建築学科・准教授

研究者番号: 50376498