

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03339

研究課題名（和文）復旧資料と実験検証に基づく鋼部材の実践的な被災後補修法の構築

研究課題名（英文）Seismic repair for steel structural members based on experimental evaluations

研究代表者

吉敷 祥一（Kishiki, Shoichi）

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：00447525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,790,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、災害復旧資料に基づき被災後補修法の実態を明らかにするとともに、それらの実験検証によって鋼部材の損傷度と目標復旧性能に応じた被災後補修法を構築することを目的として研究を推進した。主に構造実験による検討の結果、鉄骨柱の損傷度に応じて補修材ディテールを選択する被災後補修法、ターンバックルブレースおよび露出柱脚のアンカーボルトの締め直しによる被災後補修法を構築した。また、締め直しについて、錆止め塗料を塗布しておけば、施工性の指標としたトルク係数は安定しており、現実的な条件下においても締め直しによる被災後補修法が有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築構造分野では、構造部材・骨組の力学挙動の把握、免震・制振などの高性能な耐震技術の開発、既存建築物に対する効果的な耐震改修技術の開発・普及、およびそれらの設計法の構築を目指した研究がほとんどである。このような建築構造分野の多くが取り組んできた都市防災における“予防力”の研究に対して、本研究課題は“回復力”の研究として「鋼部材の損傷度と目標復旧性能に応じた被災後補修法の構築」を目標としている点に学術的な特色、および社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research project is to investigate the actual status of seismic repair methods based on disaster restoration information and to establish seismic repair methods according to the damage level of steel members and target restoration performance through experimental evaluation of these methods. As a result of the structural experiments, a seismic repair method that selects details of the repairing plate according to the damage level of steel columns and a seismic repair method that retightens turnbuckle braces and anchor bolts of exposed column bases were developed. And, the results showed that the seismic repair method by retightening was effective even under realistic conditions, because the torque coefficient, which was used as an index of workability, was stable when rust-preventive paint was applied.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：損傷評価 被災後補修 応急復旧 現地調査 構造実験 鉄骨構造

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

建築基準法における耐震設計の最低目標は人命保護であり、塑性変形に立脚した現行の耐震設計では、大地震時に構造骨組の損傷を許容している。したがって、都市部に大地震が発生すれば、社会・経済活動の場として重要な役割を担っている建築物の多くが損傷し、個々の建築物における損傷は都市全体の機能を低下させ、ひいては甚大な経済損失を引き起こすと考えられる。都市における地震災害を最小限に抑えるには、個々の建築物の損傷抑制が重要となるが、それと同時に“損傷した建築物の機能を如何に早く復旧させられるか”を考慮しておくことも必要である。つまり、大地震時には構造骨組が損傷を受けることを前提とし、構造部材がどの程度の損傷を受けたかを速やかに把握し、損失した性能を早急に復旧できる術を有していることも重要である。

建築物の地震抵抗力と機能(継続使用性)は、横軸に変形量を共通に用いて図1のように表せる。構造骨組は弾性限を超えた塑性化領域では基本的に補修を要することになるが、特に鋼部材では“RC造部材のひび割れ”のような明瞭な損傷指標がないため、これまで国内外では、

(1) 被災状況(塗装剥離、局部座屈変形など)から具体的な残存耐力を推定する方法

(2) 損傷の程度に応じて目標復旧性能を達成させる被災後補修法

に関する研究がほとんど行われていない。また、建築物の地震被害調査に比べて被災建築物の復旧過程に関する調査研究は稀少であるため、

(3) 被災建築物の復旧事例・過程を整理した技術資料

が不足しており、これらが被災後補修に関する研究・発展を妨げている要因であると言える。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、以上の背景から、復旧資料に基づき被災後補修法の実態を明らかにするとともに、それらの実験検証によって鋼部材の損傷度と目標復旧性能に応じた被災後補修法を構築することを目的とする。これは、被災建築物に対する応急復旧の流れ(図2)において、被災後区分判定と復旧計画・工事に相当する。ただし、ここでは骨組全体の補修計画(必要性能や骨組全体の復旧後性能の評価)は対象とせず、個々の鋼部材に対する補修法を検討する。

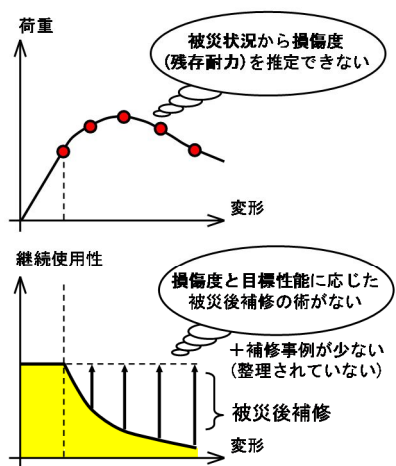


図1 被災後補修の問題点

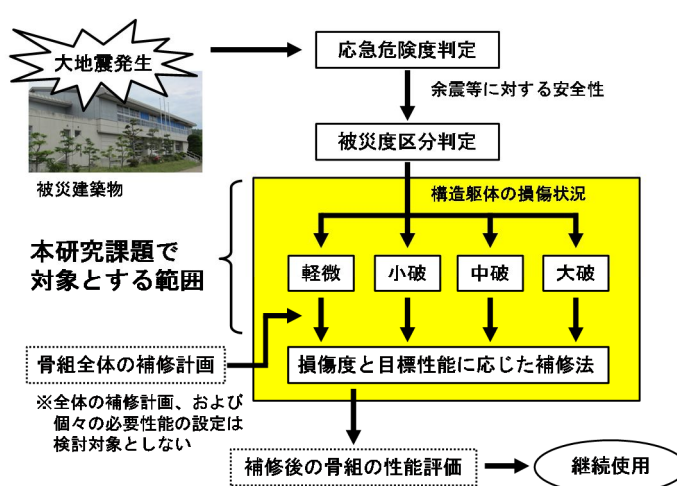


図2 被災建築物の復旧の流れと本研究課題の検討範囲

### 3. 研究の方法

本研究課題の目的を達成するための方法として、主には【1. 震災復旧資料による調査】および【2. 構造実験および数値解析による補修効果の検証】の2種類の方法で研究を遂行した。以下に方法ごとの詳細を示す。

#### 【1. 震災復旧資料による調査】

(1-1) 2016年 熊本地震において被災した屋内運動場の情報と復旧資料の整理を進めた。

(1-2) 2021年2月13日に発生した福島県沖地震の被害調査を実施し、東日本大震災にて被災した屋内運動場を中心に被害調査を行った。

(1-3) 上記の地震被害について、東日本大震災における被災状況、およびその後の復旧過程を含め、この度の被災状況について整理した。

#### 【2. 構造実験および数値解析による補修効果の検証】

(2-1) 応募前年(平成28年度)から実施している「柱を対象とした被災後補修法」について、構造実験や数値解析による追加検討を行った。

(2-2) 引張ブレースの被災後補修技術を対象とし、ターンバックルの締め直しによる方法を想定した余震を含めた地震応答解析による検討を行い、補修が必要となる余震の大きさ、および余

震に対して補修効果を得るための必要補修量を検討した。

( -3)上記の検討結果を受け、実際にターンバックルの締め直しによる補修の有効性を確認する構造実験を行った。

( -4)プレースと同様、地震時の被害が散見される露出柱脚に着目し、露出柱脚の残存耐力および被災後補修に関する構造実験を行った。

( -5)ターンバックルプレース、露出柱脚に対する締め直しによる被災後補修について、より現実的な条件下における締め直しの施工性について、要素実験による検討を行った。ボルトの呼び径に加え、塗装の有無、外気下における錆の有無などをパラメータとし、トルク係数を施工性の指標にした実験を計画した。

#### 4. 研究成果

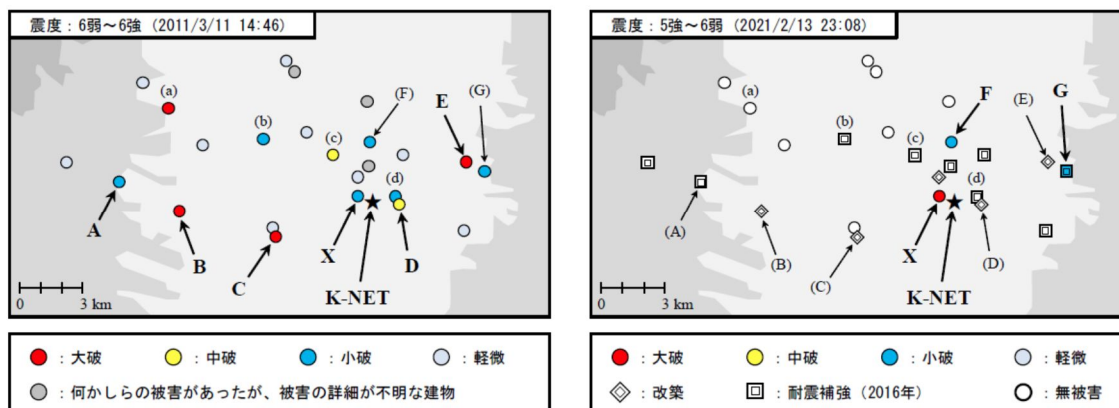
前章で述べた2種類の方法に応じた研究成果を以下に示す。

##### 【1. 震災復旧資料による調査】

(1-1) プレースに関する被害事例に着目して調査を進め、付加応力によってガセットプレートの溶接部が破断した事例を発見し、実験にて扱っている付加応力の推定が重要であることが明らかとなった。また、1978年宮城県沖地震、および2011年東北地方太平洋沖地震等の地震被害調査を含めた比較から、プレースの被害事例の変遷を整理し、破断被害から残留たわみへと、その様相が変化している傾向を得た。また、1978年当初でも復旧方法として、ターンバックルの締め直しが選択されていたことが分かった。

(1-2) 2021年2月13日に発生した福島県沖地震の被害調査より、福島県某市において大きな被害が生じていたことが明らかとなり、東日本大震災後の市内の補修状況についてヒアリング調査を実施した。その結果、被災後補修として新たに設置した鉛直プレースに破断被害が生じていることが明らかとなった。

(1-3) 東日本大震災における被災状況、およびその後の復旧過程を含めて整理した結果、1963~72年建築かつ「中破」以上の被災度区分に判定された建物が改築に至っていた(図3)。また、応急復旧した非構造部材には2011年と同様の損傷が繰り返し発生しており、現状復旧に代わる方法の議論が必要であることが浮き彫りとなった。一方、内外壁のラスモルタルをガルバリウム鋼板に張り替えた建物では、被害の軽減効果が確認できた。構造被害としてはキールトラス構造では新たに追加した鉛直プレースの破断被害が生じており、当該構造形式における復旧方法の課題が明らかとなった。



(a) 2011年 東北地方太平洋沖地震の被害 (b) 2021年 福島県沖地震での被害  
図3 2021年 福島県沖地震における福島県某自治体の被害と東北地方太平洋沖地震から変遷

##### 【2. 構造実験および数値解析による補修効果の検証】

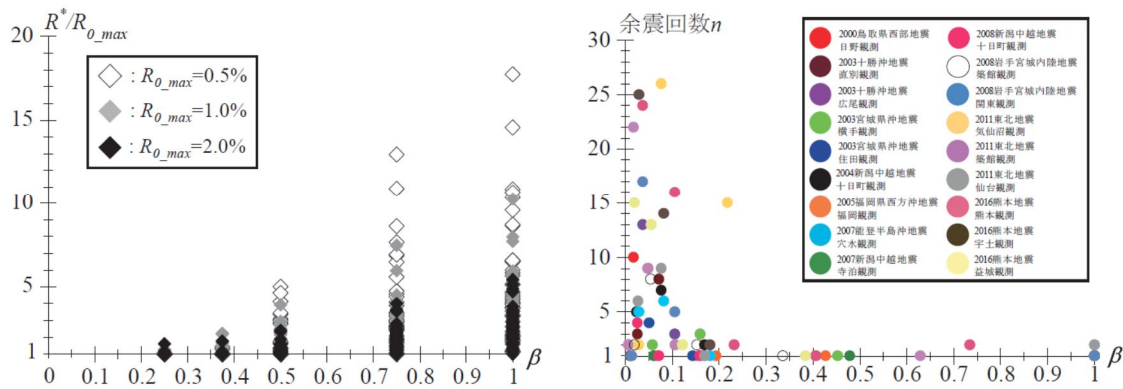
( -1)柱の損傷度と補修材ディテールに応じて得られる補修効果を整理し、被災後補修設計法としてまとめた。

( -2)数値解析による検討結果より、大多数の余震(本震の25%以下の強さ(PGV))では最大変形の増加が見られないことから緊急の被災後補修は必要ないことが分かった(図4)。また、それ以上の余震については余震の大きさに応じて必要となる補修量(ターンバックルの締め直しを行うべき数量)を提示することができた。

( -3)ターンバックルの締め直しによる補修効果に着目した実験の結果より、多数回の塑性変形を経験してもターンバックルの締め易さ(トルク係数値)が変化することはなく、耐力と剛性(除荷剛性)の回復を確認することができた。また、ターンバックルプレースの変形に伴う付加応力についても検討を行い、それらを予測できる力学モデルを構築した。さらに、締め直し後の耐力上昇を地震時に現れる残留たわみと関係づけ、補修前に耐力上昇を予測できる方法を構築した。また、ターンバックルプレースの変形に伴う付加応力については、主として引張力と偏心距離に起因する力学モデルを構築し、実験結果との比較から、その妥当性を示すことに成功した。特に、設計時における偏心距離の影響は小さく、むしろ羽子板とガセットプレートの板厚の差に起因する偏心距離が重要であることが分かった。

( -4)露出柱脚の破壊モードとして基礎コンクリートのコーン状破壊に對象を絞り、その残存耐力を推定できる力学モデルを構築し、実験結果から妥当性を確認することができた。また、柱型のせん断補強筋については、コーン状破壊耐力への影響は小さいが、残存耐力を上昇させることが分かった。一方、柱型主筋については、コーン状破壊による最大耐力の向上に寄与することが分かった。さらに塑性変形の生じたアンカーボルトに対して、締め直しによる被災後補修の有効性を確認することができた。

( -5)現実的な条件下における締め直しの施工性について検討するため、ボルトの呼び径、塗装の有無、外気下における錆の有無をパラメータとして実験を実施した。錆止め塗料を塗布しておけば、いずれの場合も施工性の指標としたトルク係数は安定しており、現実的な条件下においてもアンカーボルト等の締め直しは有効な補修方法であることが分かった(図5)。



(a) 余震による変形増大  $R^*/R_{0\_max}$  と余震倍率 (b) 余震倍率と実際の頻度  
 図4 余震による変形増大(0.25以下だと増大しない)と実際の余震倍率

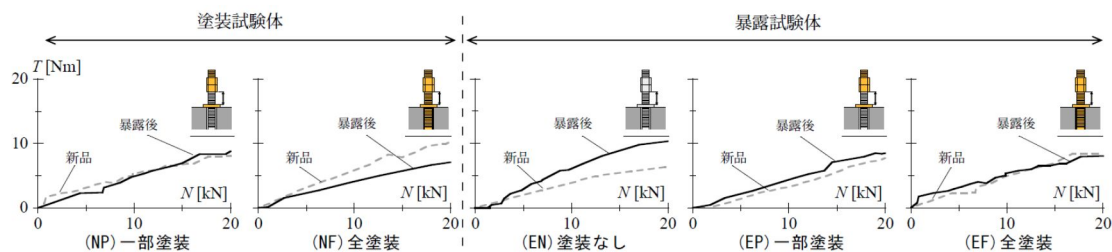


図5 締め付けトルク  $T$  と導入軸力  $N$  の関係 (新品と暴露後の比較)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 仲田章太郎, 吉敷祥一	4. 巻 86
2. 論文標題 鋼部材の被災後補修に関する研究(その2) ターンバックルブレースの締め直しによる被災後補修	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 309-319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 仲田章太郎, 吉敷祥一	4. 巻 67B
2. 論文標題 ターンバックルブレースの締め直しによる被災後補修の要否と余震に対する変形抑制効果に関する解析的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 589-596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 仲田章太郎, 吉敷祥一	4. 巻 27
2. 論文標題 損傷したターンバックルブレースの締め直しによる性能回復	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 仲田章太郎, 吉敷祥一	4. 巻 26
2. 論文標題 被災した低層ブレース構造の余震に対する安全検証に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 220-225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉敷 祥一、岩崎 祐介	4. 巻 83
2. 論文標題 局部座屈により耐力劣化した角形鋼管柱の被災後補修法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 179 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.83.179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kishiki Shoichi、Nakada Shotaro、Lin Guan Hong	4. 巻 763
2. 論文標題 Seismic Repair by Cover Plate to the Damaged RHS Column with Strength Deterioration due to the Local Buckling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 1129 ~ 1135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.763.1129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 茂木一将, 仲田章太郎, 吉敷祥一
2. 発表標題 露出柱脚におけるコーン状破壊後の残存耐力 その1 実験結果と結果の概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲田章太郎, 茂木一将, 吉敷祥一
2. 発表標題 露出柱脚におけるコーン状破壊後の残存耐力 その2 フープ筋の拘束力に基づいた残存耐力評価
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤岡寛朗、仲田章太郎、吉敷祥一
2. 発表標題 ターンバックルの締め直しによる被災後補修 その1 ブレースの性能回復
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲田章太郎、藤岡寛朗、吉敷祥一
2. 発表標題 ターンバックルの締め直しによる被災後補修 その2 ブレース変形時に生じる付加応力
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲田章太郎、吉敷祥一
2. 発表標題 露出柱脚の被災後補修 その1 コーン状破壊後の残存耐力
3. 学会等名 日本建築学会関東支部 2019年度（第90回）研究発表会，
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shotaro Nakada, Shoichi Kishiki
2. 発表標題 Safety Verification of Tension-Only Braced-Frame Structures Subjected to Multiple Aftershocks
3. 学会等名 the 10th International Symposium on Steel Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shotaro Nakada, Shoichi Kishiki
2. 発表標題 SAFETY VERIFICATION OF TENSION-ONLY BRACED-FRAME STRUCTURES SUBJECTED TO MULTIPLE AFTERSHOCKS
3. 学会等名 the 12th Pacific Structural Steel Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川裕貴、仲田章太郎、吉敷祥一
2. 発表標題 被災した低層ブレース構造の余震に対する安全性検証 その1 最大層間変形角の収束値
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仲田章太郎、石川裕貴、吉敷祥一
2. 発表標題 被災した低層ブレース構造の余震に対する安全性検証 その2 補修による変形抑制効果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仲田章太郎、吉敷祥一
2. 発表標題 ターンバックルブレースの締め直しによる被災後補修
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 仲田章太郎、林冠泓、吉敷祥一
2. 発表標題 被災した低層ブレース構造の余震に対する最大変形の推移
3. 学会等名 日本地震工学会・大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 仲田章太郎、林冠泓、吉敷祥一
2. 発表標題 被災した低層ブレース構造の余震に対する最大変形の推移 その2 余震の頻度と最大層間変形角の収束値
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山田 哲  (Yamada Satoshi)  (60230455)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授   (12601)	
研究分担者	浅田 勇人  (Asada Hayato)  (70620798)	芝浦工業大学・建築学部・准教授   (32619)	
研究分担者	石田 孝徳  (Ishida Takanori)  (80746339)	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授   (12701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------