

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21246087

研究課題名（和文）多様な巨大地震動に対する超高層鋼構造骨組の塑性変形性能向上技術の開発

研究課題名（英文）Improvement of Plastic Deformation Capacity of Steel High-rise Buildings against Various Strong Ground Motions

研究代表者

吹田 啓一郎（SUITA KEIICHIRO）

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70206374

研究成果の概要（和文）：

長周期長時間地震動を受ける超高層鋼構造骨組の柱梁接合部を対象に、繰返し塑性変形を受けた場合の破断までの変形能力を評価するための一定振幅載荷、変動振幅載荷実験を実施した。接合部耐力、溶接詳細、床スラブなどの変形能力に関わる因子の影響を定量的に明らかにし、亀裂の進展を予測する手法を開発して解析による破断予測法を提示した。また増厚フランジ補強により破断を防止する技術を開発しその効果を実験的に示した。

研究成果の概要（英文）：

In order to evaluate deformation capacity of moment connections until fracture for steel high-rise buildings subjected to long-period long-duration ground motion, a series of constant and varying amplitude cyclic loading tests were conducted. The effect of strength of connection, welding details and floor slab on deformation capacity were quantitatively indicated and the prediction method to estimate propagation of cracks was proposed to evaluate deformation capacity until fracture of connection. A method to strengthen moment connections by thick flange is proposed and its effectiveness is experimentally indicated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2010年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2011年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2012年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
年度			
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鋼構造，長周期地震動，耐震性能，柱梁接合部

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の地震動予測技術の発達により、海溝型地震による継続時間の長い地震動や直下型地震によるパルス性の強い地震動で長周期成分が卓越するものが予測されるようになり、超高層鋼構造建物の柱梁接合部に設計の想定を超える大きな塑性変形能力が必

要となることが指摘されている。1995年兵庫県南部地震の被害の教訓を経て鋼構造建築物の柱梁接合部の早期脆性破断を防止する設計・施工の方策が立てられたが、このような応答に対して破断で決まる変形の限界はまだ定量的に明らかにされていない。既往の研究では疲労破壊の考え方をを用いてマイ

ナー則による累積損傷により評価を試みた研究があるが、荷履歴によって変形能力が異なる現象を評価できないことや、接合部の性能に関わる要因の影響を定量的に評価できるデータが不十分などの問題点がある。

(2) 梁端接合部の破断までの塑性変形能力に関係する因子として、梁端接合部の最大曲げ耐力、溶接詳細、溶接条件、合成梁効果などが既に明らかにされているが、定性的な傾向に留まっている。荷振幅に応じた変形能力の相違を因子との関係を定量的に評価した実験資料は皆無である。

## 2. 研究の目的

### (1) 長周期地震動による応答特性の分析

海溝型地震による長時間長周期地震動、上町断層帯地震による長周期パルス地震動などの最新の予測地震動による高層建物および部材の損傷を数値解析的に明らかにする。

### (2) 柱梁接合部の変形能力評価法の構築

多数の繰返し塑性変形を受ける柱梁接合部の損傷を評価するために、破断までの塑性変形能力を評価する方法を構築する。

### (3) 変形能力に影響する因子の定量的評価

梁端接合部の最大曲げ耐力、梁フランジ溶接部のスカラップの有無、エンドタブ形式、溶接の積層とパス間温度の条件、床スラブの有無、部材断面寸法が変形能力に及ぼす影響を明らかにする。

### (4) 長周期地震動による損傷の評価

海溝型長時間長周期地震動を受ける高層建物の梁端接合部の破断発生時期を実験および提案する評価法により予測する

### (5) 増厚フランジによる補強法の開発

変厚鋼板を梁端フランジに用いて溶接部の破断を防止する接合部設計法を開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 長周期地震動による応答特性の分析

南海トラフ地震及び上町断層帯地震による関西地域の予測地震動を用いて、20層、40層の高層建物の平面骨組モデルによる地震応答解析を行った。層レベルおよび部材レベルの最大応答、塑性率、累積塑性変形倍率を求め、従来の設計用観測波の応答と比較し、検討すべき要求性能を分析した。

### (2) 柱梁接合部の変形能力評価法の構築

鋼構造建物に用いられることが多い、角形鋼管柱 (□-350×350×22, BCR295) とH形鋼梁 (H-500×200×10×16, SN490B) による通しダイアフラム形式の工場溶接型柱梁接合部 (ノンスカラップ工法) を対象に、ト字形試験体による梁端接合部の繰返し荷実験を実施した (図1)。荷振幅は塑性率1.2~4.0の一定値とし、終局や破断までの繰返し数と累積塑性変形倍率および梁フランジ溶接部の破断までの亀裂の進展を測定した。

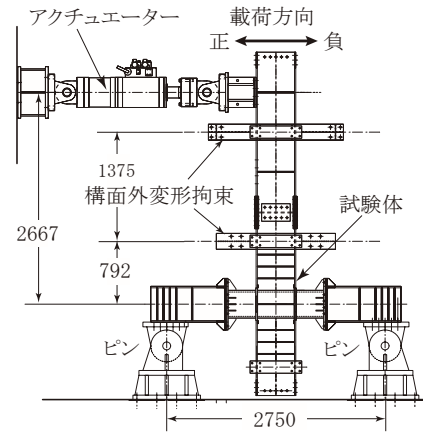


図1 実験のセットアップ

### (3) 変形能力に影響する因子の定量的評価

梁端接合部の変形能力に関わる因子の影響を定量化するために以下の試験体を用意し、一定振幅繰返し荷実験を行った。

NSS: 前項(2)の試験体で、ノンスカラップ工法により溶接し、床スラブはない。溶接条件はJASS6の標準に従い、エンドタブは固形タブを使用している。標準型と位置づける。

NSW: ウェブ接合部耐力を低減するため柱鋼管板厚を9mmとし、それ以外はNSSと同じ。SCS: NSSに複合円型スカラップ(35R+10R)を設けた。

NSL: NSSと同じ接合形式で梁をH-800×300×16×28、柱を□-550×32に大きくした。

SCL: SCSと同じ接合形式で梁、柱の断面をNSLと同じように大きくした。

NSW-A, NSW-B, NSW-C: NSWの積層変更や連続溶接により溶接条件を過大入熱などに変更。

NSW-D: NSWのエンドタブを鋼製タブに変更。NSW-E: NSWを鋼製タブで過大入熱に変更。

CNSS: NSSに床スラブを付けて合成梁とした。

CNSW: NSWに床スラブを付けて合成梁とした。

CSCS: SCSに床スラブを付けて合成梁とした。

CSCW: NSWに複合円型スカラップ(35R+10R)を設け、床スラブを付けて合成梁とした。

### (4) 長周期地震動による損傷の評価

ランダム振幅による繰返し塑性変形に対する塑性変形能力の定量的評価法を構築するために、変動振幅荷実験を行った。2段階の変動振幅による荷、(1)の地震応答解析で得られた履歴を用いるランダム振幅荷の2種類を行い、(2)の実験で得られた亀裂進展則に基づいて破断までの変形能力を評価する方法を構築し、その精度を検証した。

### (5) 増厚フランジによる補強法の開発

角形鋼管柱 (□-400×400×19, BCR295) とBH形鋼梁 (BH-500×200×9×16, SN490B) によるスカラップ工法通しダイアフラム形式の柱梁接合部に対して、梁端のフランジ板厚を29mmおよび22mmに増厚した試験体を用いて破断防止効果と塑性変形能力を調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 長周期地震動による応答特性の分析

従来観測波 (ElCentro NS, TaftEW) に対して東南海地震と上町断層帯地震の予測地震動による応答を比較した。層レベルの応答では、東南海地震は 1.5 倍、上町断層帯地震は 3.0 倍ほど大きく、最大層間変形角 0.03rad、塑性率 8 程度の大きな応答であった。また、累積塑性変形倍率は東南海地震、上町断層帯地震で最大 25、40 程度で従来観測波の 10 程度であった。部材レベルの応答では、東南海地震では塑性率 3、累積塑性変形倍率 100 であり、上町断層帯地震では塑性率 9、累積塑性変形倍率 30 であった。いずれも従来観測波よりも大きく現行の設計クライテリアを大きく上回るが、特に上町断層帯地震では塑性率が大きく、東南海地震では多数の繰返しにより累積塑性変形倍率が大きい特徴が確認された。

##### (2) 柱梁接合部の変形能力評価法の構築

梁端接合部の破壊形式は、いずれの実験でも、梁フランジ溶接部の始末端あるいはスカラップ底に延性亀裂が発生し、これがフランジ溶接部のボンドあるいはフランジ母材に進展して梁フランジが破断に至った。

標準型 NSS の一定振幅載荷実験より、載荷振幅の塑性率  $\mu$  と破断までの繰返し数  $N_F$  の間に

$$N_F = 357\mu^{-2.44}$$

の関係を得た。

フランジ溶接部の亀裂進展は、(1) 亀裂が発生しない段階、(2) 亀裂が徐々に進展する段階、(3) 亀裂が一気に進展して破断に至る段階の 3 段階に分けられ、亀裂の進展を記録して分析した結果、載荷繰返し数  $N$  を  $N_F$  で無次元化した繰返し数  $n$  と亀裂長さ  $l$  の間に次の亀裂進展則があることを見いだした。

第 1 段階  $l = 0$

第 2 段階  $l = \frac{1}{6}j_2(n^3 - n_s^3)N_F^3$

第 3 段階  $l = v_3(n - n_{F-1})N_F + l_{F-1}$

ここで、 $n_s$ : 第 2 段階開始時点の  $n = 0.22$ ,  $j_2$ : 第 2 段階の亀裂躍度 [mm/cyc<sup>2</sup>],  $v_3$ : 第 3 段階の亀裂進展速度 [mm/cyc],  $n_{F-1}$ : 第 3 段階開始時点の  $n$ ,  $l_{F-1}$ : 第 3 段階開始時点の  $l$ 。実験結果の回帰分析より、 $j_2 = 8.25 \times 10^{-6} \mu^{8.39}$  また、定義より次の関係が導かれる。

$$v_3 = \frac{l_F - l_{F-1}}{(1 - n_{F-1})N_F}$$

$$l_{F-1} = \frac{1}{6}j_2(n_{F-1}^3 - n_s^3)N_F^3$$

これらの関係から、振幅の異なる繰返しにより進展する亀裂は図 2 のように表され、これを亀裂進展曲線と呼ぶ。

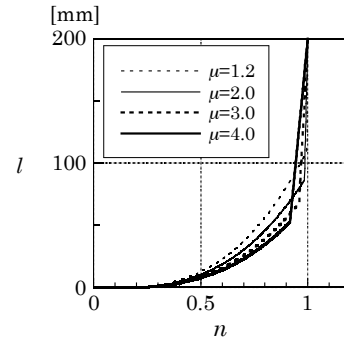


図 2 塑性率振幅別の亀裂進展曲線 (NSS)

振幅が変動する繰返し塑性変形を受けたときの破断までの塑性変形能力は、この亀裂進展曲線を用いて、各サイクルの振幅に応じた亀裂の進展を累積することにより、評価することができる。

##### (3) 変形能力に影響する因子の定量的評価

一定振幅繰返し載荷実験から破断までの繰返し数  $N_F$  または累積塑性変形倍率  $\eta_F$  を得て、各因子の影響を定量的に示した。

① ノンスカラップ形式で標準型の NSS, ウェブ接合部が弱い NSW, 大断面の NSL について比較し、図 3 の結果を得た。断面による差は小さく、ウェブ接合部耐力の影響が大きい。

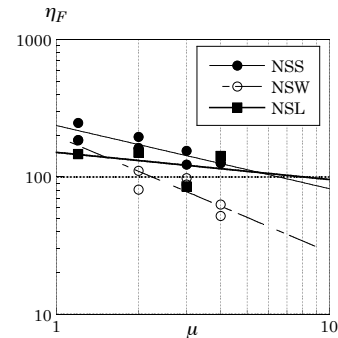


図 3 NSS, NSW, NSL の実験結果

② 標準型の NSS に対して、スカラップ工法の SCS, 断面が大きい SCL について比較し、図 4 の結果を得た。スカラップによる変形能力の低下が大きく、断面の差はそれより小さい。

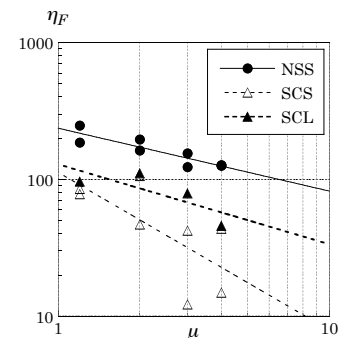


図 4 NSS, SCS, SCL の実験結果

③ NSW に対して溶接条件を変えた実験結果を

比較し、図5の結果を得た。積層やパス間温度の管理を変えたことによる溶接条件の差を見るとA,B,Cの差は小さく、鋼製エンドタブを用いたDはやや性能が高い。しかし鋼製エンドタブでかつ過大入熱のEでは著しい変形能力低下が見られる。鋼製エンドタブの場合は、溶接条件の相違に敏感である。

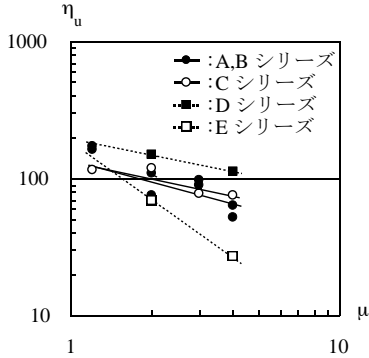


図5 NSW-A, B, C, D, Eの実験結果

④標準型NSSに対して曲げ耐力の低下と床スラブの影響を比較し、図6を得た。標準型、弱接合部型いずれもスラブが付くことにより変形能力が0.6倍程度に低下した。

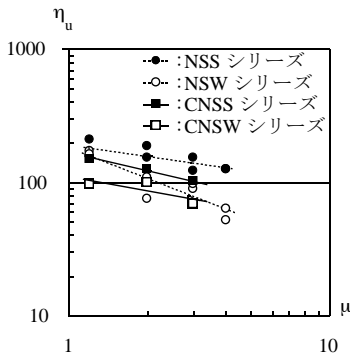


図6 NSS, NSW, CNSS, CNSWの実験結果

⑤スカラップ付のSCSに対して曲げ耐力の低下と床スラブの影響のを比較し、図7を得た。スカラップ型の場合はスラブが付くことにより0.82倍に、ウェブ接合部が弱い場合は0.57倍に大きく低下した。合成梁の変形能力はCNSS, CNSW, CSCS, CSCWの順に小さくなった。

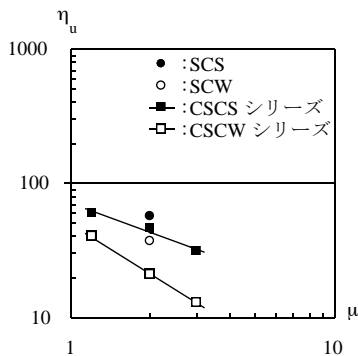


図7 NSS, NSW, CNSS, CNSWの実験結果

(4) 長周期地震動による損傷の評価

①2段階振幅荷重に対する変形能力評価

荷重振幅を塑性率4.0と1,2および4.0と2.0の2種類の組み合わせで、荷重の順序および各振幅の損傷度を変えた2段階荷重実験をNSSで16体、SCSで3体実施した。破断までの損傷度Dを亀裂進展則による計算値と比較した結果を図8に示す。荷重順序の影響は、漸増振幅よりも漸減振幅の方が変形能力が高くなっており、既往のマイナー則では評価できない荷重順序を考慮した評価が可能であることを示した。

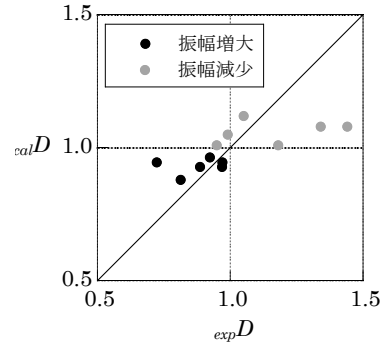


図8 2段階振幅荷重実験の結果

②ランダム振幅荷重に対する変形能力評価

4種類の地震応答履歴によるランダム荷重実験をNSSに対して行い、破断までの損傷度Dを亀裂進展則による計算値と比較した結果を図9に示す。実験では入力波によって4回~17回の入力で破断に至り、亀裂進展則による予測は高々1回程程度の誤差でこれを予測し、マイナー則よりも高い精度で予測できることを確認した。

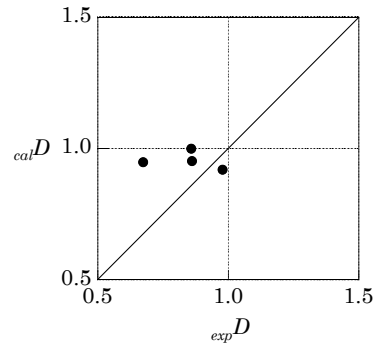


図9 ランダム振幅荷重実験の結果

(5) 増厚フランジによる補強法の開発

可変ロール圧延機により製造される変厚鋼板を梁フランジに用いることにより、梁端溶接接合部の損傷を防ぎ、梁の母材の塑性化により終局に至る構造とすることができる。梁がH-500×200×9×16, SN490B, 柱が□-400×400×19, BCR295で構成されたスカラップ工法による通しダイヤフラム形式の柱梁接合部に対して、梁端フランジ厚さを22mmおよび29mmに増厚した試験体によりその塑性

変形性能を確認した。比較の対象に用意した増厚しない試験体ではスカラップ底からの延性亀裂が進展して溶接部周辺が破断するのに対して、増厚フランジの試験体は溶接部の亀裂や破断が生じることなく、梁の局部座屈により終局を迎え、変形性能の向上が確認された。破断防止に必要なフランジの増厚寸法を、スカラップ底の亀裂発生防止とフランジ溶接部周辺の塑性化防止の2つの条件から決定する方法を提示し、せん断スパン比  $L_s/D_b$  と増厚長さ／梁せい比  $L_f/D_b$  と梁フランジ増厚比  $t_f/t_j$  の関係を図10の形で示した。

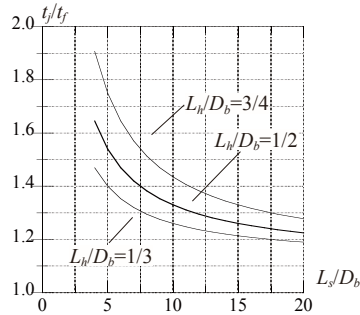


図10 せん断スパン比と梁フランジ厚さ

#### 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8件)

- ① 吹田啓一郎, 田中剛, 他2名: 振幅が変動する荷重履歴が変形能力に及ぼす影響(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その3), 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第77巻第682号, 2012, 1959-1968
- ② 井川大裕, 吹田啓一郎, 他4名: 変厚鋼板を梁フランジに用いた梁端溶接接合部の塑性変形能力と破断防止設計法, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 査読有, 第19巻第75号, 2012, 27-39
- ③ 高塚康平, 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 田中剛, 他2名: スカラップの有無が変形能力に及ぼす影響(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その2), 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第77巻第673号, 2012, 453-459
- ④ Chung, Y., Nagae, T., Matsumiya, T., and Nakashima, M., "Seismic Capacity of Retrofitted Beam-to-Column Connections in High-Rise Steel Frames When Subjected to Long-Period Ground Motions", *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 査読有, Vo. 41 No. 4, 2011, 735-753
- ⑤ 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 他2名: 現場溶接形式の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第19巻, 2011, 171-178
- ⑥ 吹田啓一郎, 田中剛, 佐藤篤司, 他3名: 梁端接合部の最大曲げ耐力が変形能力に及ぼす影響(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その1), 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第76巻第664号, 2011, 1135-1142
- ⑦ 佐藤浩太郎, 蘇鐘鈺, 川辺秀憲, 吹田啓一郎, 林康裕: 上町断層帯の予測地震動に対する超高層建物の建物応答, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第16巻第33号, 2010, 463-468
- ⑧ 蘇鐘鈺, 佐藤浩太郎, 川辺秀憲, 吹田啓一郎, 林康裕, 佐藤篤司: 上町断層帯の予測地震動に対する超高層建物の平面骨組モデルによる解析, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第16巻第32号, 2010, 75-80

[学会発表] (計18件)

- ① 朝倉直毅, 田中剛, 吹田啓一郎, 魚住奈緒美: スカラップを有する合成梁の歪性状および亀裂進展(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その16), 日本建築学会大会, 2013年8月, 北海道大学(発表決定)
- ② 魚住奈緒美, 田中剛, 吹田啓一郎, 朝倉直毅: スカラップを有する合成梁の荷重実験(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その15), 日本建築学会大会, 2013年8月, 北海道大学(発表決定)
- ③ 高塚康平, 吹田啓一郎, 田中剛, 梅田敏弘: 変動振幅履歴におけるスカラップの有無を考慮した損傷度評価塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その14), 日本建築学会大会, 2013年8月, 北海道大学(発表決定)
- ④ 梅田敏弘, 高塚康平, 吹田啓一郎, 田中剛: スカラップの有無と梁断面寸法の違いが変形能力に及ぼす影響(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その13), 日本建築学会大会, 2013年8月, 北海道大学(発表決定)
- ⑤ 高塚康平, 吹田啓一郎, 田中剛, 真鍋義貴: 梁断面寸法の違いが変形能力に及ぼす影響(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その12), 日本建築学会大会, 2012年9月, 名古屋大学
- ⑥ 津嘉田敬章, 田中剛, 吹田啓一郎, 朝倉直毅, 上田遼: 合成スラブが梁フランジの歪性状に及ぼす影響(塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その11), 日本建築学会大会, 2012年9月, 名古屋大学
- ⑦ 朝倉直毅, 田中剛, 吹田啓一郎, 津嘉田敬章, 上田遼: 合成スラブによる影響(塑

- 性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その10), 日本建築学会大会, 2012年9月, 名古屋大学
- ⑧ 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 田中剛, 高塚康平: 長周期地震動による応答を模したランダム載荷による亀裂進展と変形能力 (塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その9), 日本建築学会大会, 2012年9月, 名古屋大学
- ⑨ 田中剛, 上田遼, 吹田啓一郎, 他3名: 梁の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響 (その1 開先形状および欠陥位置を因子とした載荷実験), 日本建築学会大会, 2011年8月, 早稲田大学
- ⑩ 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 他3名: 梁の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響 (その2 破壊状況および塑性変形能力), 日本建築学会大会, 2011年8月, 早稲田大学
- ⑪ 津嘉田敬章, 田中剛, 吹田啓一郎, 上田遼: エンドタブ形式および溶接条件が変形能力に及ぼす影響 (塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その8), 日本建築学会大会, 2011年8月, 早稲田大学
- ⑫ 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 田中剛, 高塚康平: 二段階変動振幅による載荷履歴が変形能力と亀裂進展に及ぼす影響 (塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その7), 日本建築学会大会, 2011年8月, 早稲田大学
- ⑬ 高塚康平, 吹田啓一郎, 田中剛, 真鍋義貴: スカラップの有無が変形能力に及ぼす影響 (塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その6), 日本建築学会大会, 2011年8月, 早稲田大学
- ⑭ 津嘉田敬章, 田中剛, 真鍋義貴, 吹田啓一郎, 佐藤篤司, 他1名: ウェブ接合部耐力が梁フランジの歪性状に与える影響 (塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その5), 日本建築学会大会, 2010年9月, 富山大学
- ⑮ 吹田啓一郎, 真鍋義貴, 佐藤篤司, 津嘉田敬章, 田中剛, 他1名: ウェブ接合部耐力が強い梁端接合部の実験結果と亀裂進展の特徴 (塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その4), 日本建築学会大会, 2011年8月, 早稲田大学
- ⑯ 吹田啓一郎, 真鍋義貴, 佐藤篤司, 津嘉田敬章, 田中剛, 他1名: ウェブ接合部耐力の異なる梁端接合部の実験と復元力特性 (塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その3), 日本建築学会大会, 2010年9月, 富山大学
- ⑰ K. Takatsuka, K. Suita, Y. Manabe, T. Tanaka and T. Tsukada: Effect of Beam-to-Column Connection Details on Defor-

- mation Capacity of Cyclic Loading, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012.9, Lisbon, Portugal.
- ⑱ K. Suita, Y. Manabe, K. Takatsuka, T. Tanaka and T. Tsukada: Prediction of Fracture of Steel Moment Connection by Cyclic Loading with Various Deformation Amplitude, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012.9, Lisbon, Portugal.

上記以外に、日本建築学会近畿支部研究報告会にて2010年～2013年の間に12編の発表がある。

[その他] ホームページ  
<http://www.suita-lab.archi.kyoto-u.ac.jp/topic/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吹田 啓一郎 (SUITA KEIICHIRO)  
 京都大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号: 70206374

### (2) 研究分担者

田中 剛 (TANAKA TSUYOSHI)  
 神戸大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号: 90243328

中島正愛 (NAKASHIMA MASAYOSHI)  
 京都大学・防災研究所・教授  
 研究者番号: 00207771

林康裕 (HAYASHI YASUHIRO)  
 京都大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号: 70324704

佐藤篤司 (SATO ATSUSHI)  
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号: 00362319

聲高裕治 (KOETAKA YUJI)  
 京都大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号: 80343234