

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656322

研究課題名(和文) 高層鋼構造物のPCa外壁を地震時倒壊限界まで脱落防止する技術への挑戦

研究課題名(英文) Challenge to prevent falling of PCa curtain walls until collapse of high-rise steel buildings during strong ground motion

研究代表者

吹田 啓一郎 (SUITA, KEIICHIRO)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70206374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：高層建物にはロッキング形式のPCaカーテンウォールがよく用いられる。構造骨組が倒壊に至ると考えられる1/5～1/3程度の層間変形角までのPCa外壁の挙動を再現する実験を実施した。構面方向ではファスナーの圧壊によりパネルの角部が衝突して落下すること、構面外変形ではファスナーの曲げ変形により追従することを確認した。パネルの挙動を算定する計算方法を提案し、実験と比較して妥当な精度であることを確認し、変位追従性能の限界と限界後の挙動の予測法を提示し、脱落を防止する技術の構築に資する成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Rocking type precast-concrete curtain walls were usually used for high-rise steel buildings. Loading tests were conducted to simulate behavior of PCa panel accommodate to 1/5 Ó 1/3 inter-story drift of building structures. It is found that in case of in-plane direction story-drift, the panel failed by collision at the corner due to the failure of fastener of the panel, and in case of out-of-plane direction story-drift, the fastener deformed and the panel accommodate to the drift. The calculation methods of the behavior of panels are presented and those validity is verified by results of loading tests. The methods to evaluate the limit of accommodation and the post-limit behavior are presented and the useful information to prevent the fall of panels are obtained.

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：PCaカーテンウォール 変位追従性能 ロッキング方式 脱落防止

1. 研究開始当初の背景

近年、地下構造探査により詳細な地盤のデータが蓄積され、強震動予測技術の発達により建築物が現行の耐震基準を上回る極大地震動を受ける可能性が指摘されている。特に大阪平野の上町断層帯地震のようにパルス性が強い長周期地震動では、高層・超高層建物の応答が現行の2次設計のクライテリアを大きく上回り、最大層間変形角が0.03radを超え、倒壊に至る危険性も考えられるとの予測が示されている。このような大きな応答に対して建物の主体構造を倒壊させないための技術的検討が始められているが、同時に、多くの高層鋼構造建物に用いられているカーテンウォール形式の外壁の脱落による被害が懸念されている。特にプレキャストコンクリート製のパネルは重量が大きいため危険性が高く、建物の大変形時の挙動に対する関心が高まっている。現行の耐震設計では超高層建物の2次設計を対象に層間変形角0.01rad程度までの変形追従性能を確保しているが、それよりも大きな倒壊に至るレベルでの主体構造の変形状態とPCa外壁の損傷状況は明らかにされておらず、挙動の把握と安全の確保が喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

強震動予測技術の進歩により現行の耐震基準を上回る極大地震動の発生が予測されており、特に長周期成分が卓越する地震動では高層・超高層建物（以下、まとめて高層建物と呼ぶ）の応答が大きくなり、主体構造の重大な損傷や倒壊の危険性が指摘されている。高層建物の多くは鋼構造であり、応答が大きい場合にカーテンウォール形式の外壁の脱落が懸念されるが、現在の設計では2次設計レベルの応答までの変形追従性能しか評価されていない。本研究は、建物の変形がこれより大きい場合のプレキャストコンクリート外壁（以下PCa帳壁と呼ぶ）の取付部分の損傷および脱落の限界を解明する実大実験を行い、大変形時に脱落させないための要件を同定し、高層の鋼構造建物が自重支持能力を喪失して倒壊に至るより前にPCa外壁が脱落することを防止する究極の安全対策に必要な技術の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 倒壊までの変形量の確認

本研究では建物が倒壊に至るまでの変形の大きさを知る必要がある。そのため、現行の耐震基準で設計された建物を想定して倒壊までの挙動を数値解析により求め、実験的に挙動を把握する必要がある層間変形角の大きさを検討した。現行の耐震設計による4スパン10層の鋼構造ラーメンの平面骨組を対象に、地震水平力による倒壊までの挙動を静的増分解析により求めた。柱梁の部材端には局部座屈等による耐力低下を考慮したト

リニア形の復元力特性を与え、 $P\Delta$ 効果を考慮することにより、鉛直荷重支持能力を喪失するまでの各層の層せん断力-層間変形角関係を図1のように得た。この例では下部4層に亘る崩壊機構で倒壊にいたり、そのときの最大層間変形角が0.20rad程度であるとの結果を得た。この結果に基づき、本研究の実大実験でPCaパネルの挙動を検証する層間変形角は0.20rad以上とする。また、PCaパネルの構面外方向の変形に影響する柱の曲げ変形による層間変形角は図2より高々0.1rad以下であることが分かった。

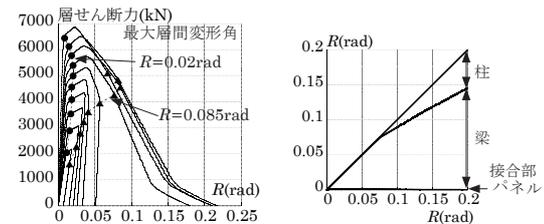


図1 各層の復元力特性 図2 4層の層間変形角内訳

(2) ロッキング方式 PCa 帳壁の構面方向載荷実験

現在、PCa外壁の取付方法として広く用いられているロッキング方式のカーテンウォールを対象に、構面方向の変位に対する挙動を把握するための実験を行った。

試験体は図3に示すように、3層1スパンの柱梁をピン接合した載荷フレームに高さ1730mm×幅2170mmのパネルを6枚設置し、各パネルの上部2箇所をロッキング方式の振れ止め、下部2箇所を台座ピン形式の荷重受け、合計4箇所のファスナーで取り付けたものである。パネルの厚さは150mmとし、この厚さに標準的なファスナーと目地の大きさを採用している。

実験では柱脚ピンの中心から3320mmの高さで片方の柱に油圧ジャッキを取り付けて水平力を作用させ、最大層間変形角0.22radまで載荷する。

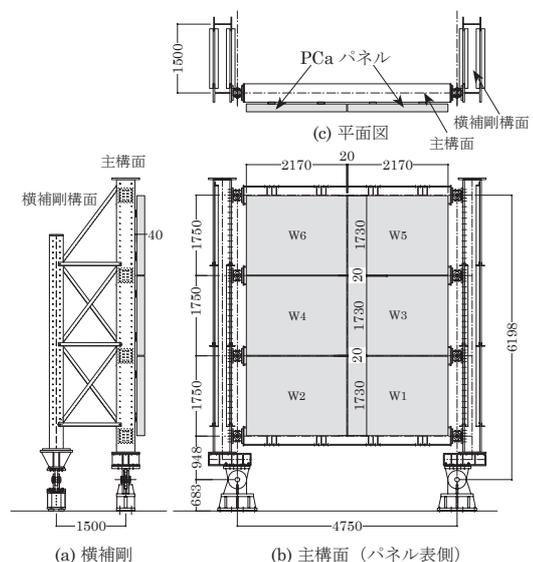


図3 構面方向載荷実験の試験体と載荷フレーム

(3) ロッキング方式PCa 帳壁の構面外方向荷重実験

構面方向荷重実験と同じ寸法のPCaパネルを用いて図4の荷重装置により構面外方向の変形を与えて実験を行った。柱頭・柱脚を梁にピン接合し、2本の平行な上部梁を緊結することにより梁は回転せずに平行移動し、柱の曲げによる層間変形だけが生じる状態を再現した。上階梁が室外側へ変位する「外向き」と室内側へ変位する「内向き」の2種類の荷重を行った。

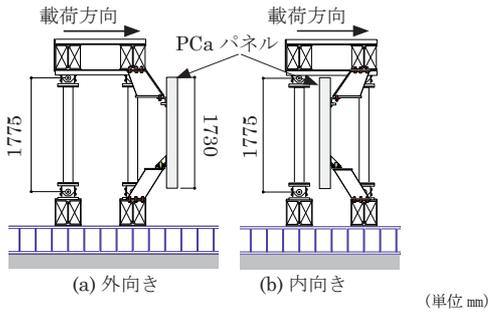


図4 構面外方向荷重実験の試験体と荷重フレーム

(4) ファスナー要素実験

PCaパネルを取り付けるファスナーの復元力特性を把握するために、実大実験と同一のPCaパネルを用いて、振れ止め、荷重受けそれぞれを対象に図5に示す方向の単調あるいは繰返し荷重実験を行った。

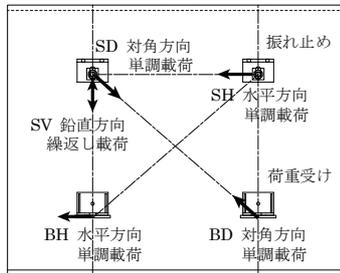


図5 ファスナー要素実験の荷重方向

4. 研究成果

(1) 構面方向荷重実験による変位追従限界までの挙動

① 復元力特性

層間変形角 0.01rad の振幅で5回繰返し荷重して得られた復元力特性を図5に示す。初期剛性は荷重フレームとファスナーの弾性変形によるもので、0.002rad程度で振れ止めのアンカーボルトの摩擦接合部にすべりが生じてロッキング機構が働き、剛性はほぼ0に低下する。このときの荷重は正負平均63.9kNであった。

図5に示すファスナー要素実験のSV鉛直方向繰返し荷重によりアンカーボルトがすべるときの荷重は34.8kNであった。パネルの自重11.07kNによるロッキング回転に対する抵抗を荷重に換算すると6.14kNとなる。パネル間の目地のガスケット等による摩擦

抵抗を15.1kNと考えると、これらの抵抗による荷重は合計69.3kNとなり、これを図6中に破線で示す。したがって、ロッキング機構による変位追従時の復元力はこれらの計算から求められることが明らかとなった。

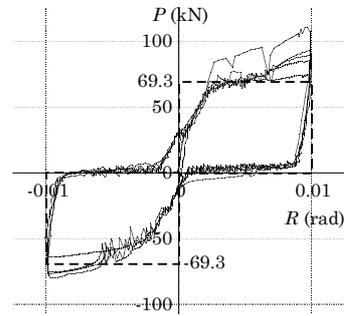


図6 荷重-層間変形角関係

② パネル回転と目地の伸縮

ロッキング方式の変位追従機構が作用すると図7の関係から、パネル回転角 θ と層間変形角 R は(1)、(2)式の関係にある。

$$\theta = \frac{\delta}{w} = \frac{\Delta}{h} \quad (1)$$

$$R = \frac{\Delta}{H} = \frac{h}{H} \theta \quad (2)$$

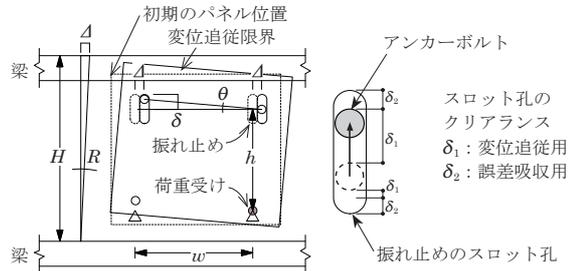


図7 ロッキング方式の変位追従機構

また、パネルの回転により図8に示す目地のずれ、伸縮が生じる。横目地のずれ g_h 、縦目地のずれ g_v は(3)、(4)式で求められる。

$$g_h = h_1 \theta_T + h_2 \theta_B - \Delta \quad (3)$$

$$g_v = w_1 \theta_L + w_2 \theta_R \quad (4)$$

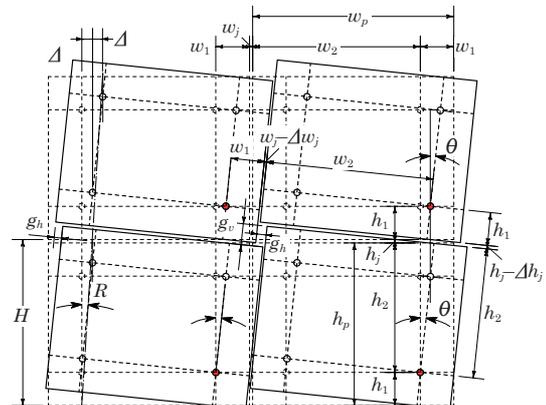


図8 パネルの回転と目地のずれ

パネル回転角と層間変形角の関係を図9に、目地のずれとの関係を図10に示す。図中に示す(1)～(3)式の関係は実験結果とよく一致していることが分かる。

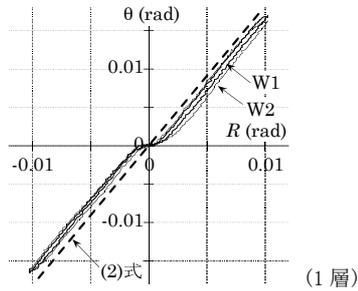


図9 変位追従時のパネル回転角-層間変形角関係

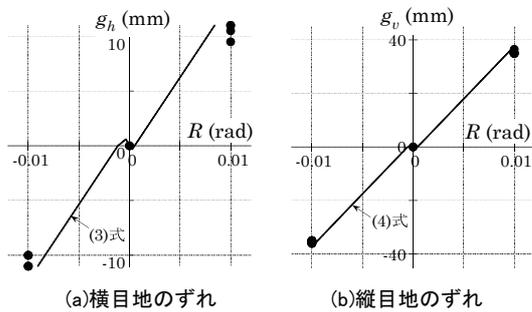


図10 目地のずれと層間変形角の関係

(2) 構面方向載荷実験による変位追従限界を超えた大変形領域の挙動

層間変形角 0.22rad まで単調載荷した後の試験体を図11に示し、得られた復元力特性を図12に示す。



図11 実験後の試験体

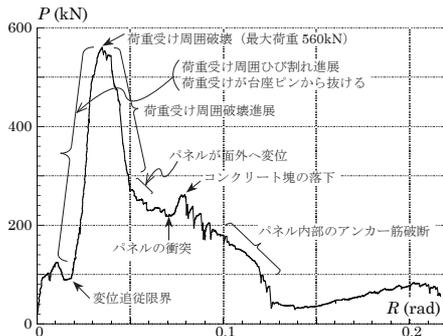


図12 大変形領域の復元力特性

ファスナーのロック機構に設けられたクリアランスの大きさから計算される変位追従限界は層間変形角 0.022rad であり、これは図12の実験結果とよく一致する。

PCa パネルの損傷は、荷重受けが埋め込まれた周囲のコンクリートの掻き出し破壊により、0.04rad のとき最大荷重 560kN となった。ファスナーの要素実験による耐力は 157kN であり、これを載荷荷重に換算すると 496kN となる。さらにパネル自重の影響を加えると 512kN となり、目地の摩擦等の影響を加えるとほぼ実験の最大荷重に等しくなる。したがって、これらの要因から最大荷重を予測できることが分かる。

パネル回転角と層間変形角の関係の一例を図13に示す。図の●で変位追従限界に至り、▲で荷重受けが圧壊し、○で最大の回転角に至るが、荷重受け圧壊後はパネルの回転は小さいことが分かる。▲に至るときの層間変形角は、要素実験から得られる荷重受け圧壊時の変形を回転角に換算して得ることができる。したがって、パネルの回転は図14に示す近似モデルで表すことができる。図のAは変位追従限界、Bは荷重受け破壊を示す。

この近似モデルを使い、目地のずれを算定することができる。図15に実験を●、計算値を実線で示すが、両者はよく一致していることから精度よく予測できることが分かる。

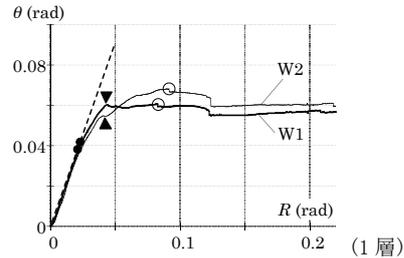


図13 大変形領域のパネル回転角-層間変形角関係

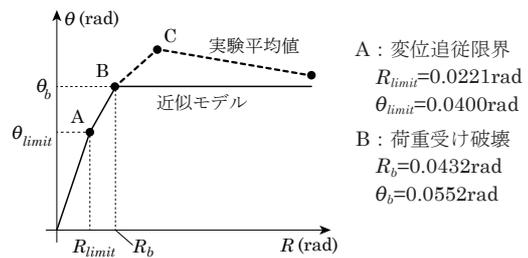


図14 パネル回転角-層間変形角関係の近似モデル

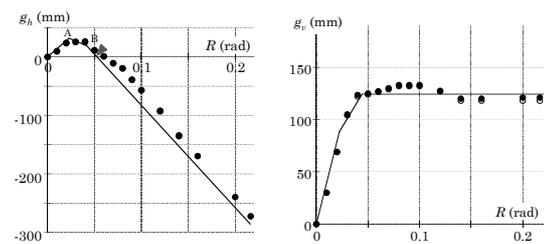


図15 目地のずれと層間変形角の関係

実験ではパネルの脱落は生じなかったが、図 12 に示すように層間変形角 0.069rad でパネルの角部が衝突し、0.08rad のときにパネルが割れてコンクリート塊が落下した。図 15(a) に実線で示す計算によると、目地のずれが目地の初期の間隔 20mm に達したときにパネルが衝突すると考えることができる。その計算値は 0.066rad であり、実験値をよく予測できることが分かる。

得られた予測法により、異なるパネル寸法の条件についても荷重受け破壊、パネル衝突が発生するときの層間変形角を予測することができる。階高 $H=3800\text{mm}$, 4500mm の場合について、予測した結果を図 16 に示す。図中の破線は荷重受け圧壊時 R_b 、実線はパネル衝突時 R_c の層間変形角のコンターを示す。

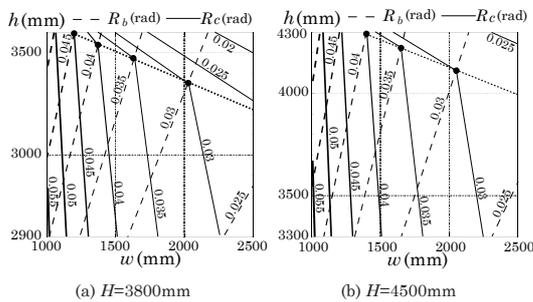


図 16 荷重受け破壊、パネル衝突の層間変形角の予測

以上の実験及び考察から、一般的なロッキング方式の PCa 帳壁は建物の倒壊と考えられる 0.2rad 以上の層間変形角でも脱落は生じにくいと考えられる。しかし、パネル同士の衝突によるコンクリート塊の落下が生じる可能性があり、その安全限界は図 16 の R_c で表すことができる。変位追従限界を超える領域での破壊形式とその発生予測法を提示したのは、本研究が初めてである。

(3) 構面外方向載荷実験による大変形領域の挙動

柱の曲げ変形によって生じる構面外の層間変形に対して、パネルファスナーは変位追従機構を備えていないので、図 17 に示すように降伏耐力が最も低い振れ止めアングルの面外曲げ変形により、変位追従する。

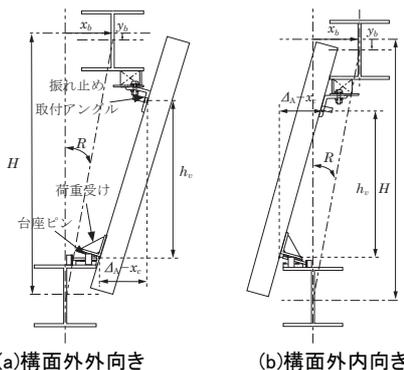
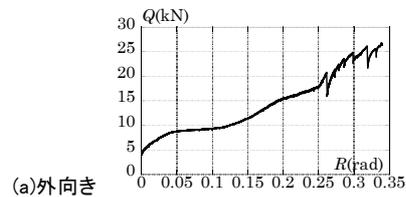
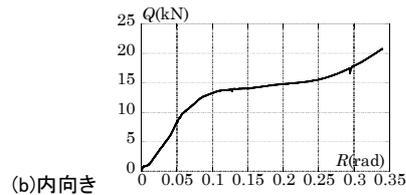


図 17 構面外方向の層間変形によるパネル回転

実験から得た荷重-変形関係を図 18 に示す。外向き、内向き、いずれの向きでも層間変形角 0.3rad 以上の変形に至ってもパネルの脱落は生じず、復元力は低下していないことが分かる。パネルに関する損傷として危険性が考えられるのは、層間変形の増大に伴って荷重受けが台座ピンより抜け出し、振れ止めだけで吊られた状態になることである。そこで荷重受けの浮き上がりの算定法を検討し、実験と比較した。その結果は図 19 に示すとおりで、精度よく予測できることが分かる。また、一般的なロッキング方式では荷重受けの抜け出しは、層間変形角 0.3rad の大変形領域でも生じないことが分かる。これらの成果は本研究で始めて明らかにされたものである。

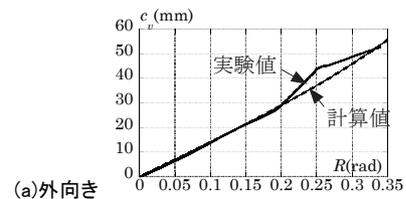


(a)外向き

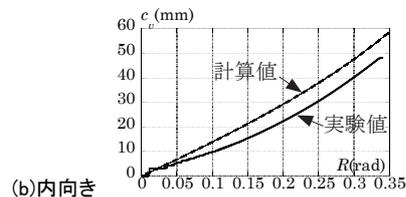


(b)内向き

図 18 構面外方向載荷による復元力特性



(a)外向き



(b)内向き

図 19 荷重受けの浮き上がり

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 1 件)

①吹田啓一郎, 平郡竜志, 高宏周, 聲高裕治, 狗飼正敏, 佐々木哲也: ロッキング方式 PCa カーテンウォールの構面方向変位追従限界

と限界後の挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻第 693 号, pp. 1841-1850, 2013. 11.

[学会発表] (計 8 件)

①高宏周, 吹田啓一郎, 狗飼正敏, 佐々木哲也: ロッキング形式 PCa 帳壁の構面外方向変位追従性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, 2014. 9 (投稿済).

②高宏周, 吹田啓一郎, 狗飼正敏, 佐々木哲也: ロッキング形式 PCa 帳壁の構面外方向変位追従性能, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 54 号・構造系, 2014. 6 (投稿済).

③平郡竜志, 高宏周, 吹田啓一郎, 聲高裕治, 狗飼正敏, 佐々木哲也: 大変形時の PCa パネルの挙動, (変形追従限界を超えるロッキング形式 PCa 帳壁の構面内挙動その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, 材料施工, pp. 1019-1020, 2013. 8.

④高宏周, 平郡竜志, 吹田啓一郎, 狗飼正敏, 佐々木哲也: ファスナー部の力学挙動と PCa 帳壁の耐力, (変形追従限界を超えるロッキング形式 PCa 帳壁の構面内挙動その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, 材料施工, pp. 1021-1022, 2013. 8.

⑤平郡竜志, 高宏周, 吹田啓一郎, 聲高裕治, 狗飼正敏, 佐々木哲也: 大変形時の PCa パネルの挙動, (変形追従限界を超えるロッキング形式 PCa 帳壁の構面内挙動 その 1), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 53 号・構造系, pp. 413-416, 2013. 6.

⑥高宏周, 平郡竜志, 吹田啓一郎, 聲高裕治, 狗飼正敏, 佐々木哲也: ファスナー部の力学挙動と PCa 帳壁の耐力, (変形追従限界を超えるロッキング形式 PCa 帳壁の構面内挙動その 2), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 53 号・構造系, pp. 417-420, 2013. 6.

⑦平郡竜志, 吹田啓一郎, 佐々木哲也, 山田健二, 狗飼正敏: PCa 帳壁の変形追従限界に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp. 1295-1296, 2012. 9.

⑧平郡竜志, 吹田啓一郎, 佐々木哲也, 山田健二, 狗飼正敏: PCa 帳壁の変形追従性能に関する既往の研究と追従限界の考察, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 52 号・構造系, pp. 369-372, 2012. 6.

[その他]

ホームページ等

<http://www.suita-lab.archi.kyoto-u.ac.jp/2-ResearchTopics/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