

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18206059

研究課題名（和文）鋼構造部材のランダム振幅下における破断変形能力の研究

研究課題名（英文）A Study on Fracture-Governed Deformation Capacity of Steel Structural Members under Random Amplitudes

研究代表者

桑村 仁（KUWAMURA HITOSHI）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：20234635

研究成果の概要（和文）：鋼構造建築物は地震の作用により部材が破断することがあり、1995年兵庫県南部地震でその被害が多数報告された。破断が生じると構造物の安全性が損なわれることがある。地震時には鋼構造部材に不規則な振幅が作用し、その過程で破断が生じる。本研究は、そのようなランダム振幅が加わったとき、破断までのサイクル数および変形の限界能力を実験的に調査し、それを予測する方法を提示したものである。この手法を用いて、地震時に破断が生じないような耐震設計が可能となる。

研究成果の概要（英文）：Structural members in steel-framed buildings are susceptible to fracture during the attack of severe earthquake, as reported about the building damages in Kobe at the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake. The fracture possibly causes the fatal loss of safety of buildings. Earthquake motions make steel structural members experience cyclic deformations with random amplitudes, during which the fracture is triggered. In this study, pre-fracture loading cycles and deformation capacity under such random amplitudes were experimentally investigated and the evaluation methods were proposed. Applying these methods, the seismic design will be able to develop steel-framed buildings free from fracture at the future-coming events of big earthquakes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2008年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
総計	32,400,000	9,720,000	42,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 ・ 建築構造・材料

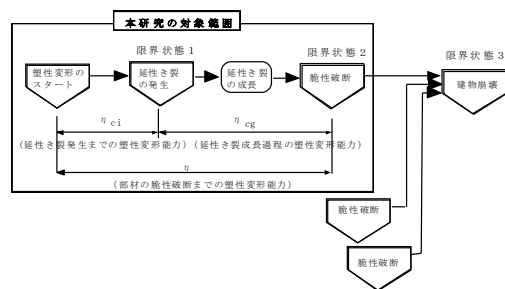
キーワード：建築構造・材料、構造工学、耐震、鋼構造、安全性、破壊、溶接

1. 研究開始当初の背景

本研究の全体構想は、鋼構造建築物の破壊を考慮した終局耐震設計の方法を開発する

ことである。1995年兵庫県南部地震で建築鉄骨に生じた脆性破断により、鋼構造建築物の耐震安全性が座屈だけでなく破壊にも支配

されることが認識された。これを契機にして、鋼構造の破壊に関する研究が進められ、多くの研究成果が蓄積されてきた。これを総括的に示すと、下図のように説明される。すなわち、地震応答による塑性変形過程で生じる脆性破断は、多軸応力とひずみ集中を受ける接合部のホットスポットに延性き裂が先ず発生し、その延性き裂が成長して、ある限界サイズに達したとき、脆性破断が生じるというプロセスを経る。すなわち、脆性破断までの塑性変形能力は延性き裂発生までと延性き裂成長過程の和である。さらに、脆性破断が複数の部材に発生し、建物のリダンダンシーがすべて失われたときに、建物崩壊が起きる。本研究は、図にも示すように、部材レベルでの脆性破断までの塑性変形能力を評価することを目的としている。それ以降の複数部材の脆性破断がもたらす建物崩壊の問題は、システム信頼性という別の大きな課題として取扱うべきであるので、本研究の対象としない。すなわち、図中の限界状態2を設計規範とする耐震設計の方法を開発することを目標とする。



本研究課題に関連した国内における研究成果を要約すると次のとおりである。脆性破断までの塑性変形能力を支配する要因は、载荷条件、材料条件、溶接条件の3つに大きく分類できる。このうち本研究課題に密接な関係のある载荷条件については、単調破断変形能力は累積破断変形能力を超えず、振幅が小さいほど累積塑性変形能力が大きいこと（文献1）、繰返し载荷での破断には『破断履歴の相似則』が成り立ち、振幅と累積破断変形能力の関係が、材料、溶接、ディテールによらず、単調破断変形能力のみを含んだ不変式で表現できること（文献2）が明らかにされている。ところが、以上の知見は振幅が一定の場合であり、変動振幅の場合については未だ検討が行われていない。地震による応答塑性変形は、当然、振幅が変動するので、そのような場合の累積塑性変形の限界について早急に検討が必要であるが、実験データの不足がそれを困難にしている。

次に、本研究課題と関係のある溶接条件の影響については、溶接入熱が大きくなると破断変形能力が小さくなること（文献3）、梁端の溶接におけるスカラップやエンドタブ

などの幾何学的不連続は破断変形能力の低下を招くことなど（文献4-8）が明らかとなっている。

国外の研究は、ノースリッジ地震で建築鉄骨の脆性破壊を経験した米国での研究がある。しかしながら、米国の研究者は脆性破壊の原因を溶接の問題にのみ帰着させ、溶接継目の応力低減を狙った接合ディテール設計の改良に中心をおいた（文献9）。したがって、米国の研究は本研究課題との関係が薄い。

（文献1）一戸康生，桑村 仁：鉄骨の脆性破断に及ぼす繰返し変位振幅の影響—鉄骨破断に関する研究 その3—，日本建築学会構造系論文集，No. 534，pp. 145-151，2000

（文献2）桑村 仁，高木直人：「破断履歴の相似則」の検証，日本建築学会構造系論文集，No. 548，pp. 139-146，2001

（文献3）桑村 仁，高木直人，松井康治：鉄骨の脆性破断に及ぼす溶接入熱の影響 —鉄骨破断に関する研究 その2—，日本建築学会構造系論文集，No. 531，pp. 157-164，2000

（文献4）井上一朗ほか：通しダイアフラム形式で角形鋼管柱に接合されるH形鋼梁の塑性変形能力に関する実大実験（その1-5），日本鋼構造協会鋼構造論文集，第4巻第16号，pp. 27-104，1997

（文献5）田淵基嗣，坂本真一，金谷 弘，藤原勝義，上場輝康：角形鋼管に接合されるH形鋼はり端部の曲げ耐力の評価，日本建築学会構造系論文報告集，No. 389，pp. 122-131，1988

（文献6）立山英二，井上一朗，杉本正三，松村弘道：通しダイアフラム形式で角形鋼管柱に接合されるH形断面はりの耐力と変形性能に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No. 389，pp. 109-121，1988

（文献7）中込忠男，矢部喜堂，坂本真一：梁スカラップの有無がH形断面柱に溶接接合されるH形鋼梁端部の力学的性状に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文報告集，No. 432，pp. 51-59，1992

（文献8）桑村 仁，伊山 潤，横山幸夫：高層建築における柱-梁溶接仕口の脆性破壊，日本鋼構造協会鋼構造論文集，第4巻第16号，pp. 1-16，1997

（文献9）SAC Joint Venture：『Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings』，FEMA-351，2000

2. 研究の目的

本研究課題の具体的な目的は、脆性破壊で決まる鋼構造部材の塑性変形能力（以下、破断変形能力）を明らかにすることである。破断変形能力を支配する要因とその因果律については、上で述べたように、既に、ある程度のことが分かっている。しかしながら、

一つの重要な法則がまだ考究されていない。それは、地震応答で生じるランダムな塑性変形振幅での破断変形能力の評価方法が未解決であるということである。すなわち、一定振幅下での破断変形能力からランダム振幅下での破断変形能力を予測する技術が緊急の課題となっており、疲労破壊で用いられるマイナー則の準用が可能か否か、あるいは全く別の損傷則を必要とするのかを研究する必要がある。これが、本研究課題の具体的な目的となる。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために実験と解析の両面から検討を行う。検討対象は、鉄骨ラーメン構造で破壊が起きやすい柱-梁溶接接合部を中心とする。検討すべき項目と手法は次のとおりである。

(1) 溶接接合部の実態調査 (1年目)

破壊起点となりうる溶接ビード周辺の形状と材質を調査する。そのために、実機の溶接仕様に基づく部分試験体を製作する。部分試験体は次の3種類とする。

- A：突合せ継手
- B：T継手
- C：角形鋼管一通しダイヤフラム継手

上記の3種類の部分試験体から溶接ビードを傷めないように丁寧に機械切断法によってマクロ試験片を採取する。採取位置は破壊の起点となりうる溶接止端を含むようにする。マクロ試験片を研磨エッチングして次の調査を行う。

- 調査1：マイクロ形状測定
- 調査2：金属組織調査
- 調査3：硬さ分布測定
- 調査4：溶接欠陥の形状と寸法の測定

(2) 溶接接合部の応力状態の解析 (1年目)

部分試験体の調査結果に基づいて有限要素解析を行い、多軸応力状態とひずみ集中を定量化する。これは、次のステップの研究に必要な相似試験体の設計に結びつく。

(3) 相似試験体の設計 (2年目)

繰返し載荷試験における溶接のばらつきを排除するために、相似試験体を用いる必要がある。相似試験体は、溶接を施した部分試験体の応力三軸度とひずみ集中率を再現するもので、鋼素材から溶接無しで製作する。用いる鋼材の力学的特性を調査する。

(4) 相似試験体の基礎実験 (2年目)

相似試験体を用いて単調載荷実験と一定振幅載荷実験を行い、従来から知られている破断履歴の相似則を確認する。

(5) 相似試験体のランダム載荷実験 (3年目)

相似試験体を用いて変動振幅履歴を与え破断までの塑性変形能力を調査する実験を行う。変動振幅履歴は、漸増振幅、漸減振幅、混合振幅、平均変位増加型振

幅、片振幅の5つの基本形、および地震応答解析に基づいて決定するランダム振幅である。このときの地震波は神戸波、八戸波、エルセントロ波の3種類とする。
(6) 実機溶接試験体のランダム載荷実験 (4年目)

小型相似試験体のランダム振幅における破壊実験から導かれた損傷則を実機構造物で検証するための実験を行う。試験体は、鉄骨構造物の柱-梁溶接接合部の施工で一般的に用いられている溶接仕様で製作する。

4. 研究成果

(1) 実機溶接接合部の実態調査結果

実機の溶接仕様に基づく部分試験体の溶接接合部周辺を調査した結果に基づき、マイクロ形状および材質区分を精密にモデル化した。その一例を図1に示す。

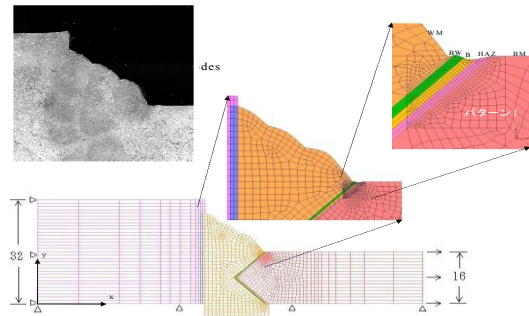


図1 溶接接合部の形状・材質モデル

(2) 溶接接合部の応力解析結果

有限要素解析により破壊起点となりうるホットスポットの応力三軸度と等価塑性ひずみを解析した(その一例を図2に示す)。その結果、破壊を支配する応力三軸度-等価塑性ひずみ曲線が3パターンに類型化できることが明らかとなった(図3)。

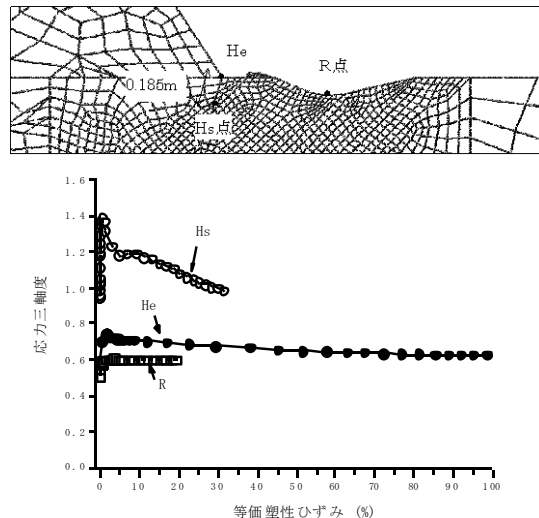


図2 ホットスポットの応力ひずみ状態

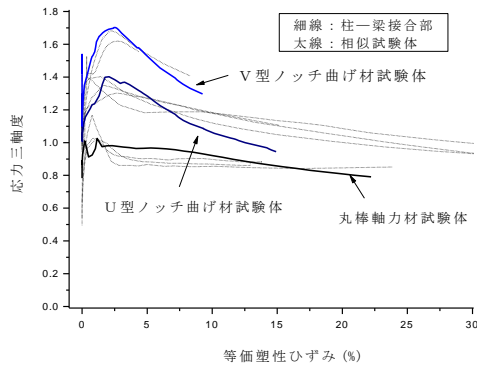


図3 応力三軸度-等価塑性ひずみの3類型

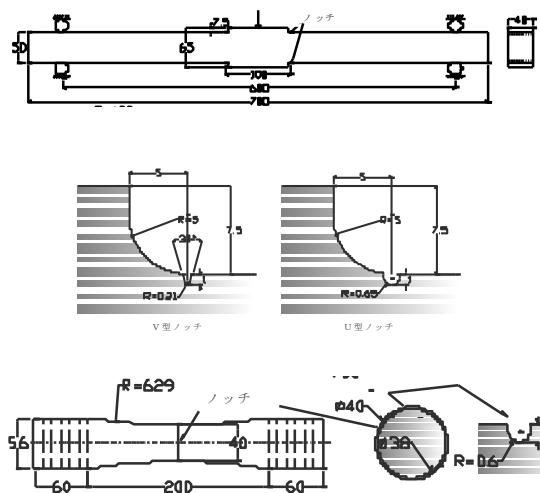


図4 相似試験体

(3) 相似試験体の設計結果

実機溶接接合部で観察された3パターンの応力三軸度-等価塑性ひずみ曲線を再現しうる相似試験体を試行錯誤的に数値計算し、3種類のディテールを決定することができた。それらは、曲げ試験体にV型ノッチを入れたもの、同じく曲げ試験体にU型ノッチを入れたもの、および丸棒引張試験体にU型ノッチを入れたものである(図4)。図3に併記されたこれらの応力三軸度-等価塑性ひずみ曲線を実機溶接接合部のそれと比較すると相似性が保たれていることがわかる。

(4) 相似試験体の基礎実験結果

相似試験体を1枚の厚鋼板から切り出すことによって材質のばらつき要因を排除することとした。まず、この鋼板から採取した引張試験片によって材料力学的性質を調査し、またシャルピー衝撃試験によって破壊力学的性質を予め調査した。かなり大きなサイズの鋼板であるがほぼ一定した材質であるこ

とが確認できた。

繰返し振幅による破断性能の調査の第1段階として、曲げ試験体と丸棒引張試験体それぞれについて単調载荷実験と一定振幅载荷実験を行い、従来から知られている破断履歴の相似則(塑性率振幅と破断サイクル数の関係が1本の直線で表され、その直線勾配が不変量であるという法則で、桑村-高木則とも呼ばれる)を満たしているかどうかについて分析を先ず行った。その結果、かなり高い精度で相似則が成立していることが明らかとなった(図5)。このことにより、実験方法の妥当性も確認されたこととなる。

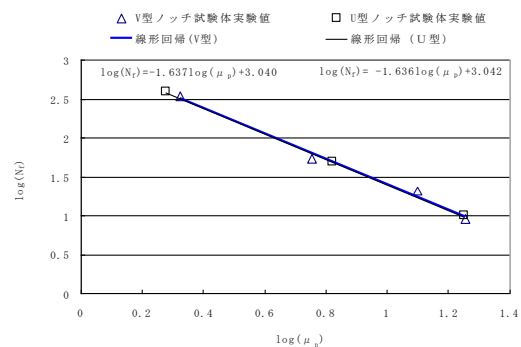


図5 破断履歴の相似則

(5) 相似試験体のランダム载荷実験結果

ランダム载荷実験結果を総合すると、当初、想定していたマイナーの線形累積損傷則が危険側の破断予測となることが判明した。その理由として、正側と負側の作用力で生じる累積変形の偏りが影響を与えていることが明らかとなった。これに基づき、正負の偏りを考慮した損傷則を新たに定式化し、予測精度を上げることができた(図6)。破断変形能力に対する振幅履歴の影響をダイレクトに調査した研究は国内外で初めてである。

(6) 実機溶接試験体のランダム载荷実験結果

実機溶接試験体のランダム载荷実験の結果、マイナー則(直線累積損傷則)は、小振幅波形の混在が少ない八戸波での破壊を比較的よい精度で予測できるが、小振幅波形の混在が多い神戸波では予測精度が粗く、しかも危険側の予測を与えることが明らかとなった。このことは小型相似試験体でも同じ傾向が見られたもので、今回の実機構造物で再確認されたことになる。ランダム振幅におけるこのような予測誤差の原因は、振幅の評価法にあることが推測されたので、振

幅評価の手法について検討した。その結果、大振幅に混じって現れる小振幅を無視し、その前後の大振幅をさらに合算して振幅を見直すことによって、予測精度が向上することが明らかとなった（図7）。これは、破断履歴の相似則直線から明らかなように、振幅を大きめに評価すれば、破断サイクル数あるいは破断変形能力が小さめに予測されること、および小振幅波形は破断性能に対して相対的に影響が小さいことと関係している。本研究の成果は次のような耐震設計

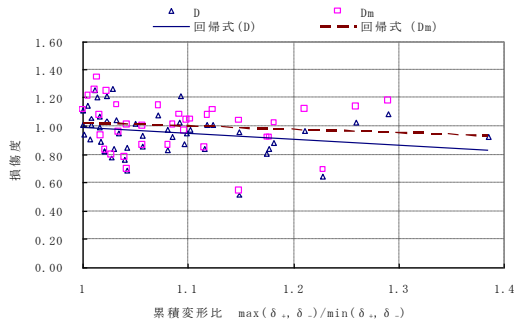


図6 損傷評価の精度

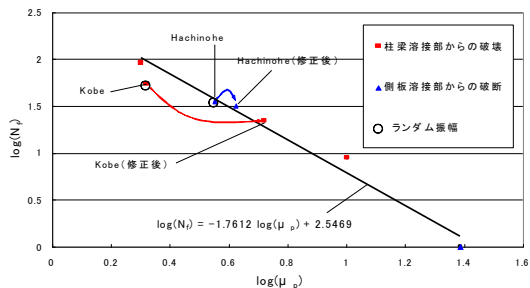


図7 実機溶接試験体の破断性能

に適用することが可能である点に意義がある。すなわち、構造物の地震応答解析によって、柱-梁接合部が経験するランダム振幅過程が分かるので、それを元に、地震応答途中で破断が起きるか否かを本研究から得られた損傷則より判定することができる。破断が起きると判定されたときは、その溶接仕様、あるいは使用鋼材を変更して、接合性能を上げる工夫をすればよいことになる。あるいは、より高度な解析プログラムを用いれば、破断した後の応答を追跡して、建物が崩壊しないことを確認することによって安全性を保証することができる。

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4件)

- ①周 志光, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (鉄骨接合部の応力・ひずみ状態 その4), 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 637, pp. 551-559, 2009.3 (査読有り)
- ②桑村 仁: アングルの屈伏, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 629, pp. 1169-1175, 2008.7 (査読有り)
- ③周 志光, 桑村 仁: ノッチを有する鋼材の弾塑性状態に対するマイクロボイドの影響 (鉄骨接合部の応力・ひずみ状態 その3), 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 625, pp. 449-455, 2008.3 (査読有り)
- ④伊藤拓海, 稲葉知之, 桑村 仁: 閉断面鋼ビームカラムの耐力と変形能力のデータベース, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol. 53B, pp. 157-170, 2007.3 (査読有り)

[学会発表] (計12件)

- ①周 志光, 伊藤拓海, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その9 相似試験体のランダム振幅実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), No. 22507, pp. 1013-1014, 2009.8.26-29, 仙台
- ②周 志光, 伊藤拓海, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その8 冷却した丸棒軸力材の破断変形能力に及ぼす塑性率振幅の影響), 2008年度日本建築学会関東支部研究報告集, No. 2034, 2009.3.5-7, 東京
- ③周 志光, 伊藤拓海, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その7 丸棒軸力材の破断変形能力に対する温度の影響), 2008年度日本建築学会関東支部研究報告集, No. 2033, 2009.3.5-7, 東京
- ④周 志光, 伊藤拓海, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その6 曲げ材の破断変形能力に対するノッチ形状と塑性率振幅の影響), 2008年度日本建築学会関東支部研究報告集, No. 2032, 2009.3.5-7, 東京
- ⑤周 志光, 伊藤拓海, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その5 相似試験体の変動振幅載荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), No. 22500, pp. 999-1000, 2008.9.18-20, 広島
- ⑥ Kuwamura, H.: Flattening and Buckling of Thin-Angle Section Beams, Proc. of

- the Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures (CIMS2008), Sydney, Australia, pp. 101-108, 23-25 June 2008
- ⑦周 志光, 伊藤拓海, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その4. 相似試験体の一定振幅載荷実験), 日本建築学会関東支部研究報告集 I, No. 2034, pp. 257-260, 2008. 3. 6-8, 東京
- ⑧周 志光, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その3. 相似試験体), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), No. 22385, pp. 769-770, 2007. 8. 29-31, 福岡
- ⑨Hitoshi Kuwamura: Fracture of Steel in Earthquake Resisting Structures, Proceedings of Eighth Pacific Structural Steel Conference, Wairakei, New Zealand, Vol. 1, pp. 31-42, 2007. 3. 13-16.
- ⑩周 志光, 桑村 仁: ノッチを有する鋼材の応力-ひずみ状態に対するボイドの影響, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, No. 2019, pp. 157-160, 2007. 3. 8-10, 東京
- ⑪周 志光, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その2. ノッチモデルの応力-ひずみ解析), 日本建築学会関東支部研究報告集 I, No. 2018, pp. 153-156, 2007. 3. 8-10, 東京
- ⑫周 志光, 桑村 仁: 鉄骨柱-梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ (その1. 実態調査に基づくノッチモデルの作成), 日本建築学会関東支部研究報告集 I, No. 2017, pp. 149-152, 2007. 3. 8-10, 東京

[図書] (計4件)

- ① Kuwamura, H. : Earthquake-Resistant Engineering of Steel Structures, Stock Management for Sustainable Urban Regeneration, Y. Fujino and T. Noguchi Eds., Springer, pp. 133-156, 2009.
- ② 桑村 仁: 建物の壊れ方いろいろ, 『建築大百科事典』(長澤泰他編), p. 16-17, 朝倉書店, 2008. 11
- ③ 桑村 仁: 脆性破壊はなぜ怖い, 『建築大百科事典』(長澤泰他編), p. 296-297, 朝倉書店, 2008. 11
- ④ 桑村 仁: 鉄骨造建築の耐震性に関する課題を考える, 東京大学講義ノート『アーバンストックの持続再生』(藤野陽三・野口貴文編著) 第7章, 技報堂出版, 137-162, 2007. 11

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等
<http://stahl.arch.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑村 仁 (KUWAMURA HITOSHI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 20234635

(2) 研究分担者

伊藤 拓海 (ITO TAKUMI)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 50376498
期間: 2006~2007

(3) 連携研究者

伊藤 拓海 (ITO TAKUMI)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 50376498
期間: 2008 (2009. 4 転出)