

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560543

研究課題名 (和文) 金属系薄板の座屈後繰返し構造特性を応用した
軽量化耐震・制振要素の開発研究課題名 (英文) Development of light resisting wall and energy absorption element
using the post-buckling behavior of thin metal panel

研究代表者

五十嵐 規矩夫 (IKARASHI KIKUO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40242292

研究成果の概要：

本研究では、作用するせん断応力度がせん断降伏応力度以下で座屈するような金属系軽量薄板を対象に、薄板の幅厚比、形状及び周辺枠剛性が繰返し履歴挙動に与える影響を解明した。その成果をもとに、繰返し挙動をモデル化しエネルギー吸収能力を検討した上で、安定的な繰返し特性を得るための諸条件を明らかにした。そしてその成果を応用発展させた具体的な耐震・制振部材を開発するための基本的な方策について検討し、その有用性を示すとともに、薄板化耐震・制振部材の可能性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

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：せん断, 曲げ, 座屈, 薄板, 金属, 繰返し荷重, エネルギー吸収, 耐震

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の耐震工学における懸案事項の一つとして、既存木造住宅の耐震補強があげられる。この耐震補強を促進するために、安価で施行性に富み軽量の耐震補強部材、補強法が必要とされている。その解決策の一つとして、研究代表者は金属系軽量極薄板をせん断型エネルギー吸収部材として用いることを提案し、その挙動の解明を目的として研究開発を進めている。ここで金属系軽量薄板をせん断型エネルギー吸収部材として用いるためには、その繰返し挙動を明らかにしておく必要があるが、そのせん断繰返し挙動は、

座屈の発生、張力場の形成、座屈波形の反転が複雑に関与するとともに、周辺に配置される枠要素とも相互に関連するため、大変複雑である。

(2) 現状においては、せん断曲げ複合応力を受ける薄板の座屈及び座屈後挙動、耐力さえも十分検討されておらず、その学術的資料はほとんどないといっても過言ではない。ましてやその繰返し特性、エネルギー吸収能力を系統的に解明しようとした試みは見られない。これは、現在使用されているエネルギー吸収要素としてのせん断パネルにおい

て、安定した履歴挙動を得るためには座屈の発生を遅らせる、あるいは座屈を発生させてはならないという既成概念のもと、基本的には座屈を許容せず、その繰返し挙動における靱性を材料の機械的特性にたよっている現状からきている。これに対して、弾性座屈応力度が降伏応力度を上回らない極薄板をせん断型エネルギー吸収部材と使用した場合、その力学的特性は板要素の形状や周辺境界条件等によって決まり、全てが構造工学的な確性を持って把握可能であり、ばらつきが大きく不確実性の大きな材料特性に、その構造特性を頼る必要がなくなる。しかし、この薄板の座屈を伴う繰返し構造特性そのものも、研究の少なからず未だ解明されていない部分も多く、曖昧な部分も多い。

2. 研究の目的

(1) 本研究で対象とする金属系軽量極薄板は作用するせん断応力度がせん断降伏応力度以下で座屈するような薄板である。このような薄板のせん断繰返し挙動は、座屈の発生、張力場の形成、座屈波形の反転が複雑に関与するとともに、周辺に配置される枠要素とも相互に関連するため、それら影響因子の抽出とその影響度合及び重要度合を明確にしておく必要がある。本研究では、作用するせん断応力度がせん断降伏応力度以下で座屈するような金属系軽量薄板の繰返し履歴挙動に薄板の幅厚比、形状及び周辺枠剛性がどのような影響を及ぼすかを解明することを目的とする。

(2) さらにその繰返し挙動をモデル化するとともに、エネルギー吸収能力を明らかにする。そして、その成果を応用発展させた具体的な耐震部材・制振部材の開発とその展開に向けた基本的性状を検討する。

(3) 本研究を遂行するにあたり、以下に示す4つのサブテーマを設定した。

- ① せん断力荷重下における金属系軽量薄板の繰返し履歴特性の解明とモデル化
- ② 実応力状態及び境界条件を考慮した金属系軽量薄板の繰返し履歴特性の把握
- ③ せん断座屈を許容した金属系軽量薄板の繰返しエネルギー吸収能力の検討
- ④ 座屈特性を有効活用したエネルギー吸収部材の開発に向けた基本性状の把握

3. 研究の方法

(1) せん断力荷重下における金属系軽量薄板の繰返し履歴特性の解明とモデル化

金属系軽量薄板（以下、薄板）は、その幅厚比が比較的大きく、弾性座屈応力度が降伏応力度を下回るのが一般的である。そのため繰返しせん断荷重を受ける薄板の荷重変位

関係は、図1に示すように極めて特徴的なものとなる。この薄板のせん断荷重下における荷重変位関係を分解し、その挙動を分類すると次のように大別できる。

- a) 張力場形成後の耐力一定領域
- b) 張力場形成後の除荷及び荷重反転領域
- c) 荷重反転後の棚状を呈する領域
- d) 荷重上昇開始から張力場形成までの領域

そこで本研究では、普通鋼を使用したH形断面ウェブを対象として、せん断力を受けるウェブ薄板の繰返し座屈実験を計画した。試験体のパラメータは、ウェブ幅厚比、フランジ剛性及び辺長比である。載荷履歴は、変位漸増繰返し載荷である。この実験結果から先のa)~d)を特徴づける要件を特定した上で、荷重変位関係のモデル化を試みる。

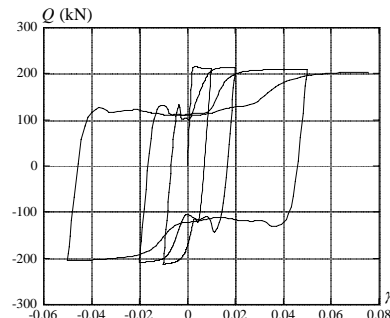


図1 繰返しせん断力を受ける薄板の荷重変位関係の例

(2) 実応力状態及び境界条件を考慮した金属系軽量薄板の繰返し履歴特性の把握

エネルギー吸収要素としての薄板せん断壁、薄板せん断パネルに作用する応力状態は、大きく分けて図2の(a)、(b)で表される。(a)は純せん断応力状態、(b)は逆対称曲げせん断応力状態である。この2つの応力状態下における繰返しせん断力を受けた場合の座屈を伴う履歴曲線を比較検討し、それらの特性を抽出する。そして、薄板の履歴挙動をより安定化するための必要条件を見いだす。

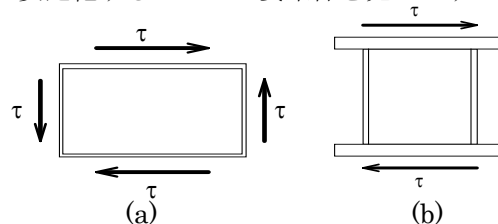


図2 薄板に作用する応力状態

(3) せん断座屈を許容した金属系軽量薄板の繰返しエネルギー吸収能力の検討

本研究で対象としている薄板を繰返しせん断荷重下においた場合、板に生じる局部座屈波形の成長、消失が荷重方向の反転ともなつて繰返し発生する。この局部波形の繰返しにより局部的な応力集中と疲労により延性き裂が発生し、断面欠損に伴う耐力低下へ

とつながることが予想できる．ここまでの性状をエネルギー吸収性能及び塑性変形量を薄板形状及び周辺境界条件との関係で考察し，エネルギー吸収及び変形に対し，有効な薄板形状について言及する．

(4) 座屈特性を有効活用したエネルギー吸収部材の開発に向けた基本性状の把握

薄板をより効果的に活用し，薄板を用いた耐震・制振部材の開発に向けての発展的手法の確立とその有用性を検討する．金属系極薄板エネルギー吸収部材に，予め大変形を加えておく繰返し履歴安定化法を施した後の繰返し履歴特性の確認と，実用化に向けた繰返し履歴挙動を把握する．

4. 研究成果

(1) 試験体は図1に示すようにウェブ板と枠フランジ及び端部板から構成されており，ウェブ板厚，フランジ形状を変化させた7体である．試験体は全て溶接組立てH形断面である．試験体には逆対称曲げせん断力を作用させている．载荷は，せん断変形角 γ で制御し， $\gamma = \pm 1/100, 1/50, 1/25$ と繰返した後， $\gamma = 1/10$ まで载荷を行っている．

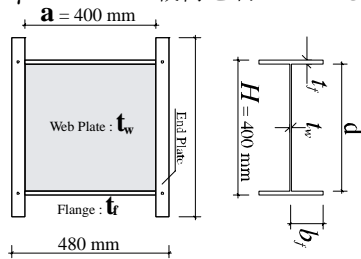
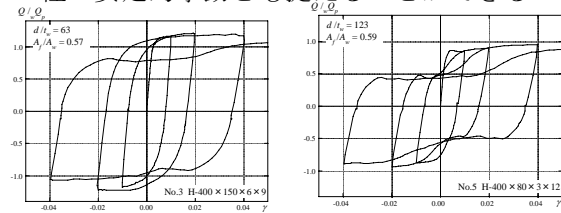


図3 試験体図

(2) 図4に得られた荷重変位関係の例を示す．ウェブ幅厚比が弾性限界幅厚比より小さい左図のものは，変形が小さいうちは紡錘形の履歴曲線を描くが，変形が大きくなると座屈を生じるとともに前サイクルまでの最大耐力を超えることがなくなり，除荷から逆方向の载荷に移る際に荷重変位関係が棚状を呈するようになる．このように，限界幅厚比より小さいウェブ幅厚比の場合には，繰返し変位が大きくなると，その挙動に変化が生じる．経験変位に伴うこの変化は，一種の不安定挙動と見ることが出来る．

ウェブ幅厚比が弾性限界幅厚比より大きい右図のものは早期に座屈が発生し，変形が比較的小さい初期の段階から，荷重変位関係に棚状を呈する部分が存在する．この棚状を呈する領域の荷重変位関係は少なからず安定しており，ほぼ一定の耐力を維持し，且つサイクルによってその耐力がほとんど変化していない．そして，棚状を呈する状態から更に変形が進むと，ある変形角を境にほぼ線形に耐力が上昇し始め，前サイクルの最大経

験変位点近傍で再び勾配が緩やかになる．これは張力場の再形成の過程である．この荷重変位関係は大変特徴的である．変形初期から大変形に至るまで，その形状は同形であり，一種の安定的挙動とも捉えることができる．



(a) ウェブ幅厚比 63 (b) ウェブ幅厚比 123
図4 荷重変位関係の例

(3) 薄板のせん断繰返し履歴曲線を図5に示すような3領域に分解し各領域で概ね線形の挙動として捉える．ここでは便宜的に3領域を(1)除荷域，(2)棚状域，(3)張力場域と定義する．除荷域は除荷開始点から棚状域に至るまでを含めた部分で除荷剛性 G によって把握する．棚状域は耐力が棚状を呈する部分でその部分での耐力の下限値を棚状耐力 Q_s として把握する．張力場域は張力場再形成に伴い耐力が上昇し始める点から除荷するまでの部分で，棚状域との境界である張力場再形成開始点と骨格曲線で把握する．張力場再形成開始点は張力場再形成に伴う耐力上昇時の変曲点における接線と棚状耐力 Q_s との交点の変形角 γ_s により定義する．張力場再形成開始後は最大経験変位点まで耐力上昇し，終局耐力 Q_{max} の骨格曲線に接続する．

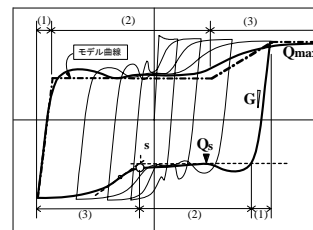


図5 せん断繰返し履歴特性の抽出

(4) 除荷剛性は張力場状態での応力度分布に影響され，その応力度が除荷とともに減少する過程が関係するため，張力場係数を参考に．種々検討した結果，除荷剛性式として次式を提案する．

$$\frac{G}{G_e} = 1 - \tanh\left(0.5 \log \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{cr}}\right) \quad \dots (式1)$$

(5) 棚状耐力はフランジに形成される塑性ヒンジの耐力を減じた ${}_wQ_s$ で評価できる．この ${}_wQ_s$ とウェブ幅厚比の関係を図6に示す．ここには数値解析により得た材料特性を変化させた場合のものも示している．全てのプロットの傾向は一致しており，弾性限界幅厚

比程度からその2倍程度までのウェブ幅厚比の範囲では、 wQ_s は最大耐力評価式 Q_{max} を用いて次式で評価できる。

$$wQ_s = Q_{max}/2 \quad \dots (式2)$$

また、材料特性の影響が見られないことから棚状耐力 wQ_s は材料の降伏耐力およびひずみ硬化特性そのものに大きく依存するものではないと推察される。

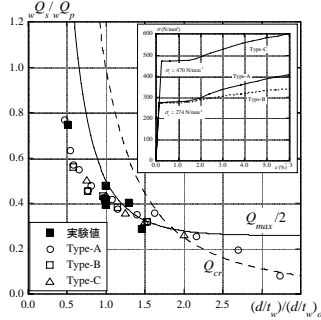


図6 棚状耐力

(6) 張力場域の張力場再形成開始点については、簡単な幾何学モデルを用いて検討し、取扱いが簡単なように近似した結果、以下の式で評価可能である。

$$\gamma_s = \frac{2}{3}\gamma_{max} + \frac{1}{3}\gamma_{min} \quad \dots (式3)$$

(7) 図7には辺長比2の場合の荷重変位関係の一例を示す。荷重変位関係の形状は、図4(b)のものと同様である。ただし棚状耐力を呈するところでの挙動は、若干辺長比2のものが不安定である。

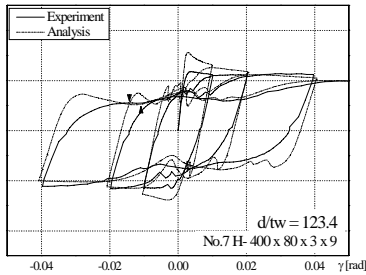


図7 辺長比2の荷重変位関係の例

(8) 繰返しせん断力を受ける薄板の荷重変位関係に見られる特徴的な点は、繰返し途中において棚状を呈することであり、その耐力を評価することが重要である。図8には、辺長比2の場合の棚状耐力を示している。辺長比1の場合は、ほぼ(式2)で評価可能であったが、辺長比2場合はその値よりも低く見積る必要がある。数値解析結果も交えて検討した結果、辺長比2の場合の棚状耐力は、次式で評価可能である。

$$wQ_s = Q_{max}/3 \quad \dots (式5)$$

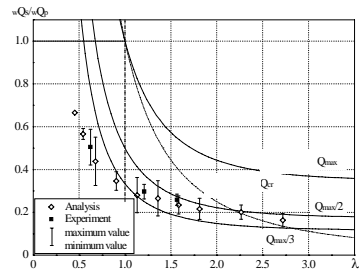


図8 辺長比2の棚状耐力

(9) 図9に性能保証限界相当点までのエネルギー吸収量と累積変形量を示す。左図から弾性限界幅厚比程度のものが高いエネルギー吸収性能を示し、同程度のウェブ幅厚比でもフランジ断面積が小さいとエネルギー吸収量が小さくなる。右図よりウェブ幅厚比に比例して累積変形量は大きくなるが、フランジ断面積が小さいと累積変形量も小さくなる。



図9 エネルギー吸収量及び累積変形量

(10) 辺長比2の性能保証限界相当点までのエネルギー吸収量、累積変形量を、辺長比1のものとの値で相対化したものを図10に示す。ともに辺長比1に比べてその性能は低下し、ウェブ幅厚比が大きいものほどその影響が大きくなる。

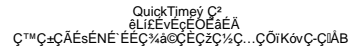


図10 辺長比2の辺長比1との相対比較

(11) 薄板の境界条件が繰返し挙動に与える影響を検討するため、図11に示す2種類の境界条件を設定した。Type-Aの薄板はほぼ純せん断状態の試験となる。Type-Bでは薄板に逆対称曲げが作用する。これはせん断応力分布が若干異なるが、先に扱ったH形断面ウェブ薄板に類似する。荷重は図に示すせん断変形角gammaで制御し、±1/600, 1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/40, 1/30, 1/20, 1/10, 1/8の変形角において繰返した後、試験体に顕著な耐力低下が見られるまで荷重を行った。ただし、荷重の途中において薄板にき裂が生じ、耐力低下が生じた場合には、荷重を止めている。

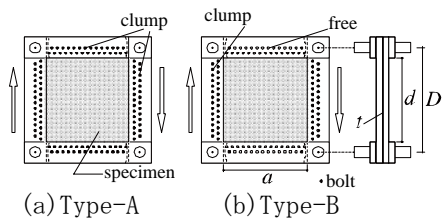


図 11 境界条件の違いを検討する試験体

(12) Type-A, Type-B とともに繰返し経験変位が増すごとに ▼ で示す座屈耐力は上昇していく傾向がある。その傾向は、Type-A の方が大きい。また骨格曲線の最大耐力上昇率も Type-A の方が大きい。これらの要因は周辺からの拘束効果が、Type-A が Type-B に比べ高いためであると考えられる。Type-B は、座屈耐力の変形に伴う座屈耐力の上昇や、その座屈後の耐力劣化は緩やかであり、座屈耐力と張力場再形成後の最大耐力の差も小さいことから、より安定した履歴挙動を示していると判断できる。これは、先の H 形断面ウェブ薄板の繰返し挙動に大変良く類似している。

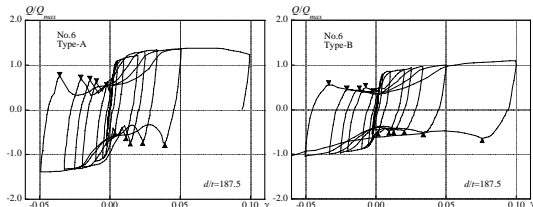


図 12 荷重変位関係の例

(13) 図 13 に試験体の境界条件の違いによる座屈発生時せん断変形角と座屈耐力との関係を示す。図より、同一経験変位での座屈耐力は Type-A の方が Type-B より大きいことがわかる。また経験変位の増加に伴う座屈耐力の上昇率も四辺固定支持した Type-A の方が大きく、Type-B のものは、経験変位の増加に伴う座屈耐力の上昇はあまり見られない。

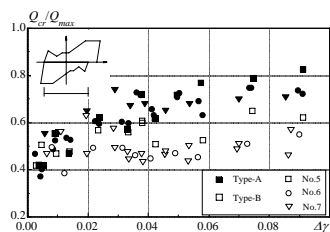


図 13 周辺境界条件の違いが座屈耐力に及ぼす影響

(14) この荷重反転時の座屈耐力の上昇は、周辺境界からうける引張力によるものであるという仮定のもと、簡単なモデルを用いたエネルギー法による座屈算定を行ったものが、図 14 である。図より、一方向あたりの引張力の大きさが同じでも座屈耐力は

Type-A の方が Type-B よりも大きい。また引張力の増加に伴う座屈耐力の増加割合も Type-A の方が大きい。また幅厚比が異なる場合を比較すると、幅厚比が大きいほど引張力の大きさが同じでも座屈耐力は高く、その増加割合も大きい。これらの傾向は図 13 における座屈耐力と経験変位の傾向と等しい。

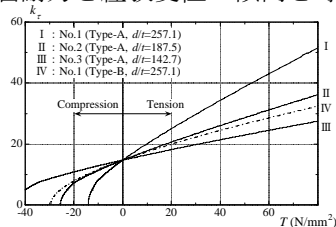


図 14 引張応力がせん断座屈耐力に与える影響

(15) 図 15 に幅厚比の異なる試験体間で履歴吸収エネルギーと変形性状を比較したものを示す。図より幅厚比の大きい試験体程図中の右上に位置しており、材料の機械的性質から期待されるより相対的に高いエネルギー吸収性能と変形性状を示す傾向にあることがわかる。また ▲ で示す漸増载荷 1 と ○ で示す同一変位における繰返し回数が多い漸増载荷 2 を比較すると漸増载荷 2 の方が耐力低下時の最大経験ひずみは小さいものの、履歴吸収エネルギーは同程度である。

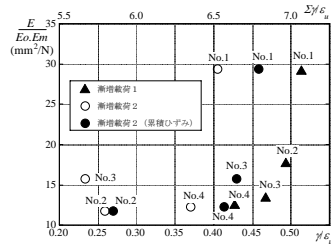


図 15 繰返し履歴がエネルギー吸収性能に与える影響

(16) 図 16(a), (b) に各幅厚比ごとに境界条件の異なる試験体の履歴吸収エネルギーと変形性状の関係を示す。縦軸に関しては、先ほどと同じである。横軸は、(a) が最大経験ひずみであり、(b) が累積ひずみであり、規準化してある。幅厚比の異なる試験体において、最大経験ひずみ、累積ひずみのどちらの指標で比較しても、Type-B の方が Type-A より高いエネルギー吸収性能と変形性状を示している。履歴曲線における座屈耐力及び最大耐力は Type-B の方が低い傾向にあるにも関わらず、高いエネルギー吸収性能を示す結果となったのは、境界の拘束を緩めることで負担応力が小さくなり、き裂の発生に伴う耐力低下が遅れ、変形性能に富んだためであると考えられる。

(17) 以上から、エネルギー吸収性能に富

む要素を開発する上では、その周辺からの拘束を必要以上に大きくすることは得策ではなく、ある程度板の面外変形が可能となるような面内自由度が必要である。

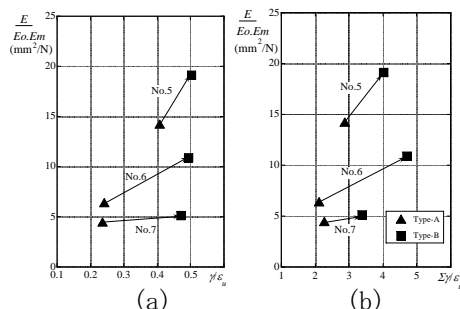


図 16 周辺境界条件がエネルギー吸収性能に与える影響

(18) 本研究の最終段階として、図 17 に示すように、エネルギー吸収部材を構造物などに設置する前段階において、あらかじめ張力場を伴う大変形を経験させておくことで、構造物に設置後に想定している地震等の外乱による最大応答変位内では、エネルギー吸収部材に極めて安定した履歴特性を実現させる方法について検討した。本方法により、弾性座屈を伴うような極薄板を備えたエネルギー吸収部材の繰返し途中における不安定な領域を消失させ、極めて安定した履歴特性を実現させることができる。

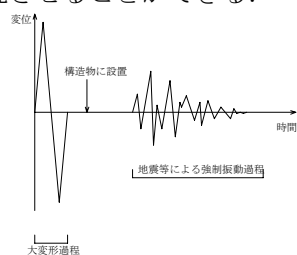


図 17 金属薄板が受ける外力の概念図

(19) パネル幅厚比が大きいものほど、図 18 のように繰返し履歴を安定化させることができる。パネル周辺境界条件はその剛性が小さな試験体ほど繰返し履歴を安定化することができた。履歴ループの安定化領域長さには、大変形履歴時の張力場再形成点で概ね把握することができ、張力場再形成開始点が予め設定された最大予測変位以上となるように、初期大変形を与えておけば良い。

(20) 現在一般的な制振パネル部材には、低降伏点鋼が使われる。本研究では、安価で広く流通している普通鋼を使用し、低降伏点鋼を使用した場合とほぼ等しい繰返し履歴性状を得ることができることを、数値解析を行うことで確認した。

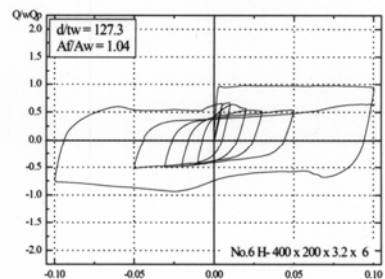


図 18 大変形及びその後の繰返し荷重変位関係の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Kikuo Ikarashi, Hysteretic Behaviour of Thin Web Plate under Cyclic Bending-Shear Loading, Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering, Vol. 6, pp. 681~691, 2009, 査読無
- ② 五十嵐規矩夫, 薄板のせん断座屈後繰返し履歴挙動の特性とその要因, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp. 21~28, 2008, 査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 小田部敏明, 五十嵐規矩夫, 繰返し荷重を受けるせん断座屈後ウェブ薄板の大変形性能, 日本建築学会大会学術講演, 2008. 9. 18 発表, 広島大学
- ② 富澤徹弥, 五十嵐規矩夫, ウェブ薄板のせん断座屈後繰返し挙動に関する研究 その 5 ウェブ薄板のせん断崩壊形式および履歴曲線形状, 日本建築学会大会学術講演, 2007. 8. 30 発表, 福岡大学
- ③ 荻原良太, 五十嵐規矩夫, 繰返し荷重を受けるせん断座屈後ウェブ薄板の大変形性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演, 2007. 8. 30 発表, 福岡大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五十嵐 規矩夫 (IKARASHI KIKUO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：40242292

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし