サステナブルビル構造システムの柱梁接合部の 力学モデルとその検証

A MECHANICAL MODEL OF THE BEAM-TO-COLUMN CONNECTION FOR A SUSTAINABLE BUILDING STRUCTURE SYSTEM AND ITS VERIFICATION

岩田 衛^{*1}, 平田 倫央^{*2}, 山本 重治^{*2}, 長尾 真奈^{*3}
Mamoru IWATA, Michihisa HIRATA, Shigeharu YAMAMOTO
and Mana NAGAO

The authors developed a sustainable building structure system with a primary goal of extending the service life of the entire structure system and a secondary goal of permitting the reuse of structural members if the primary goal cannot be attained. In this paper, a mechanical model is established based on the mechanical properties of the beam-to-column connection tests revealed by the authors' past experimental studies. The mechanical model is compared with the results obtained from beam-to-column connection in detail. The model is further compared with the results from partial frame testing in which buckling-restrained braces are attached to beams and columns like knee braces. The findings obtained from the comparisons indicate that the mechanical model has satisfactory stiffness and strength, and accurately demonstrates the behavior of the beam-to-column connection. Thus, the effectiveness of the model has been proven. The authors believe that the mechanical model is applicable to analysis of the entire structure system.

Keywords : Sustainability, Re-use, Beam-to-column connection, Bolted connection, Buckling-restrained brace, Damage-controlled-structure

サステナビリティ, リユース, 柱梁接合部, ボルト接合, 座屈拘束ブレース, 損傷制御構造

1. 序論

著者らは, 建築構造分野からの地球環境負荷削減を目標とし, 構造全体の長寿命化を第一に, それが叶わない場合には部材を容易に解体し, さらにリユースを可能とする「サステナブルビル構造システム」(図1)を提案した¹⁾。本構造システムは主架構と地震エネルギー吸収部材を明確に分離することで大地震時であっても主架構を弾性域に留め, 地震力は方杖状に設置した制振部材としての座屈拘束ブレースのみによって吸収する損傷制御構造の一つである。大地震後に損傷した座屈拘束ブレースのみを点検, 必要に応じて取替えることにより構造全体の持続性を図っている。

本論では, 既往の研究¹⁾²⁾により明らかにした柱梁接合部の力学的特性を基に, 力学モデルを構築する。さらに, その力学モデルと柱梁接合部実験結果との比較を行い検証をする。また, 座屈拘束ブレースを方杖状に設置した部分架構実験結果との対比も行い, サステナブルビル構造システムに力学モデルを組み込んだときの有効性を確認する。

2. 柱梁接合部

柱梁接合部の概要を図2に示す。梁部材の端部には接合部ユニットと称する部品を溶接接合する。この接合部ユニットと柱部材は, 両端をネジ切りしてある接合鋼棒(以下, 鋼棒と呼ぶ)に初期張力を導入して接合する。

図1 サステナブルビル構造システム

図2 柱梁接合部

^{*1} 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

^{*2} 神奈川大学工学部建築学科 大学院生

^{*3} ㈱構造システム

Prof., Department of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Kanagawa Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Kanagawa Univ.
Kozo System Corporation

柱梁接合部の曲げモーメントと回転角の関係を図3に示す。この関係は図に示すようなトリリニアスリップモデルであり、大きく3段階に分けることができる。まず第1段階は、柱梁接合部に作用する曲げモーメントによって鋼棒に導入された初期張力が解放され、柱梁接合部が離間する以前の状態である。離間後、すべての接合鋼棒が塑性化するまでを第2段階としている。第1段階に比べ剛性は低下し、半剛接合状態となる。すべての鋼棒の塑性化以降を第3段階とする。

ここで柱梁接合部に作用するモーメントを定義する。離間時の曲げモーメントを離間モーメント M_s 、鋼棒の塑性化が開始される時の曲げモーメントを降伏モーメント M_y 、すべての鋼棒が塑性化する時の曲げモーメントを半剛限界モーメント M_{sem} とする。 M_s に達するまでは、図3に示される番号で①の直線上で荷重が上昇し、同様に低下する。初めて荷重が M_s を超えるとき、 M_{sem} に達するまでは、②、③の順で荷重が上昇し、④の剛性で荷重が低下する。2回目以降は、④に沿って荷重が上昇する。③に沿って変形が進行し、 M_{sem} を初めて超えるとき、⑤の剛性となり、変形が進む。荷重が低下する際は、⑥の剛性で低下する。これ以降は、⑦、⑧、⑨の順に荷重が上昇する。この様に接合部に生じる曲げモーメントに応じて剛性が段階的に変化することで、使用時に要求される剛性と大地震時に要求される変形能力を両立している。

図3 曲げモーメントと回転角の関係

3. 柱梁接合部の力学モデル

サステナブルビル構造の全体構造モデルの設定に対して、梁部材を①部材と②部材の2つに分ける(図4a)。さらに、図4a)の①部材を図4b)のように直列に結びつく要素a、要素b、要素cの3つの要素に分ける。②部材は通常の線材要素とする。要素a、要素b、要素cを図2の梁部材に対応させると図4c)のようになる。要素aは、図2の接合部ユニットに対応し、要素cは梁部材心々と座屈拘束ブレース心々の接点に対応している。

鋼棒とフランジはモデル化した軸バネで構成している。鋼棒は平行部とネジ部を軸バネとし、直列につないでいる。

図4b)の l_1 は鋼棒の平行部の長さ、 $l_2 + l_3$ は鋼棒のネジ部の長さを表す。 Z_1 は要素aの長さであり、接合ユニット上部のアンカープレートから柱フランジ補強プレートまでの長さである。 Z_2 は要素cの長さ、 L は①部材の内法寸法である。本力学モデルでは、 $Z_2 \leq 0.1L$ としている。

3.1 要素a

要素aにおける鋼棒の構成方程式は次のようになる。ここで、 ΔN_{BAR} 、 ΔN_{BOLT} 、 ΔN_s は各々平行部荷重増分、ネジ部荷重増分、鋼棒部荷重増分である。

$$\begin{aligned} \text{・平行部構成方程式} & \quad \Delta N_{BAR} = k_{BAR} \Delta u_{BAR} \\ \text{・ネジ部構成方程式} & \quad \Delta N_{BOLT} = k_{BOLT} \Delta u_{BOLT} \\ \text{・鋼棒構成方程式} & \quad \Delta N_s = k_s \Delta u_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{BAR} &: \text{平行部剛性,} & \Delta u_{BAR} &: \text{平行部変位増分} \\ k_{BOLT} &: \text{ネジ部剛性,} & \Delta u_{BOLT} &: \text{ネジ部変位増分} \\ k_s &: \text{鋼棒の剛性,} & \Delta u_s &: \text{鋼棒の変位増分} \end{aligned}$$

a) 全体構造モデル

b) ①部材

c) 梁部材と力学モデルの対応

図4 力学モデル

鋼棒の平行部とネジ部を直列に連結するので以下の関係がある。

$$\Delta N_s = \Delta N_{BAR} = \Delta N_{BOLT} \quad \Delta u_s = \Delta u_{BAR} + \Delta u_{BOLT}$$

従って、上式より鋼棒の剛性は以下ようになる。

$$k_s = \frac{k_{BAR} k_{BOLT}}{k_{BAR} + k_{BOLT}}$$

また、平行部の変位増分とネジ部の変位増分は、鋼棒の変位増分を用いると以下ようになる。

$$\Delta u_{BAR} = \frac{k_{BOLT}}{k_{BAR} + k_{BOLT}} \Delta u_s$$

$$\Delta u_{BOLT} = \frac{k_{BAR}}{k_{BAR} + k_{BOLT}} \Delta u_s$$

要素 a である接合部ユニット部の剛性は次のようである。ここで $\{f_i\}$, $\{d_i\}$, $[K_i]$ は要素 a の応力ベクトル, 変位ベクトル, 剛性マトリクスである。i 番パネの x 座標, i 番パネの y 座標は図 5 のように, 要素 a である接合部ユニットを AA' で切断したときの梁部材断面の座標で示す。座標系は梁部材芯を原点とし, プラス, マイナスは図 5 に示すとおりである。

$$\{f_i\} = [K_i] \{d_i\}$$

$$[K_i] = \begin{bmatrix} k_{yy}^1 & k_{xy}^1 & k_y^1 \\ & k_{xx}^1 & k_x^1 \\ Sym. & & k_0^1 \end{bmatrix}$$

$$k_{yy}^1 = \sum k_i \cdot y_i^2, \quad k_y^1 = \sum k_i \cdot y_i, \quad k_{xy}^1 = \sum k_i \cdot x_i \cdot y_i^2$$

$$k_{xx}^1 = \sum k_i \cdot x_i^2, \quad k_x^1 = \sum k_i \cdot x_i, \quad k_0^1 = \sum k_i$$

$$\text{鋼棒の剛性: } k_i = k_s, \quad k_{BAR} = \frac{E_i A_i}{l_i}, \quad k_{BOLT} = \frac{E_i A_i}{l_2 + l_3}$$

$$\text{梁フランジの剛性: } k_i = \frac{E_i A_i}{Z_i}$$

k_i : i 番パネの軸剛性, x_i : i 番パネの x 座標, y_i : i 番パネの y 座標

E_i : i 要素のヤング係数, A_i : i 要素の断面積

Z_i : 要素 a の長さ

図 5 梁部材断面座標系

以上より, 要素 a の構成方程式は柔性マトリクス $[D_i]$ を用いて次のようになる。

$$\{d_i\} = [D_i] \{f_i\}$$

$$[D_i] = [K_i]^{-1} = \begin{bmatrix} \delta_{yy}^1 & \delta_{xy}^1 & \delta_y^1 \\ & \delta_{xx}^1 & \delta_x^1 \\ Sym & & \delta_0^1 \end{bmatrix}$$

3.2 鋼棒の復元力特性

既往の研究^{1) 2)} でモデル化した復元力特性を基に, 鋼棒の平行部に座屈型復元力特性をネジ部にスリップ型復元力特性を図 6 のように与える。

接合鋼棒の平行部とネジ部の間の不釣り合い力の処理を行い, 負担する軸力は図 7 のように常に等しくする。

ここで, 初期張力の考慮を図 8 に示す。鋼棒の平行部とネジ部に初期引張応力を与え, 梁フランジ部にはそれと釣り合う初期圧縮応力を与える。要素 a の初期軸力, 初期曲げモーメントを 0 とする。

a) 座屈型復元力特性

b) スリップ型復元力特性

図 6 鋼棒復元力特性

図 7 鋼棒の平行部とネジ部の不釣り合い力

a) 平行部・ネジ部の初期応力 b) 梁フランジ部初期応力

図 8 鋼棒の初期張力

3.3 要素 b

要素 b は, 要素 a と梁部材端部の要素 c を弾性の線材要素でつないでいる。線材要素の柔性マトリクスは梁部材の EI_x , EI_y , EA , と線材要素の長さより求める。

$$\{d_3\} = [D_3] \{f_3\}$$

$$[D_3] = \begin{bmatrix} \delta_{y1} & \delta_{y3} & 0 & 0 & 0 \\ & \delta_{y2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \delta_{x1} & \delta_{x3} & 0 \\ & & & \delta_{x2} & 0 \\ Sym. & & & & \delta_0 \end{bmatrix}$$

$$\delta_{y1} = \delta_{y2} = \frac{L - Z_1 - Z_2}{3EI_x}, \quad \delta_{x1} = \delta_{x2} = \frac{L - Z_1 - Z_2}{3EI_y}$$

$$\delta_{y3} = -\frac{L - Z_1 - Z_2}{6EI_x}, \quad \delta_{x3} = -\frac{L - Z_1 - Z_2}{6EI_y}$$

$$\delta_0 = -\frac{L - Z_1 - Z_2}{EA}$$

L : ①部材の全長, E : 要素のヤング係数

A : 要素の断面積, Z_1 : 要素aの長さ, Z_2 : 要素cの長さ

3.4 c 要素

梁部材心々と座屈拘束ブレース心々の接点である要素cの剛性は次のようである。ここで $\{f_2\}$, $\{d_2\}$, $[K_2]$ は要素cの応力ベクトル, 変位ベクトル, 剛性マトリクスである。 i 番バネの x 座標, i 番バネの y 座標は, 梁部材断面の座標で示し, 梁部材心々と座屈拘束ブレース心々の接点を指す。

$$\{f_2\} = [K_2]\{d_2\}$$

$$[K_2] = \begin{bmatrix} k_{yy}^2 & k_{xy}^2 & k_y^2 \\ & k_{xx}^2 & k_x^2 \\ Sym. & & k_0^2 \end{bmatrix}$$

$$k_{yy}^2 = \sum k_i \cdot y_i^2, \quad k_y^2 = \sum k_i \cdot y_i, \quad k_{xy}^2 = \sum k_i \cdot x_i \cdot y_i^2, \quad k_i = \frac{E_i A_i}{Z_2}$$

$$k_{xx}^2 = \sum k_i \cdot x_i^2, \quad k_x^2 = \sum k_i \cdot x_i, \quad k_0^2 = \sum k_i$$

k_i : i 番バネの軸剛性, x_i : i 番バネの x 座標, y_i : i 番バネの y 座標

E_i : i 要素のヤング係数, A_i : i 要素の断面積

Z_2 : 要素cの長さ

以上より, 要素cの構成方程式は柔性マトリクスを用いて表わす次のようである。

$$\{d_2\} = [D_2]\{f_2\}$$

$$[D_2] = [k_2]^{-1} = \begin{bmatrix} \delta_{yy}^2 & \delta_{xy}^2 & \delta_y^2 \\ & \delta_{xx}^2 & \delta_x^2 \\ sym. & & \delta_0^2 \end{bmatrix}$$

3.5 ①部材 (= 要素a + 要素b + 要素c)

①部材の構成方程式は, 要素a, 要素b, 要素cを直列につなぐことにより柱梁接合部を含む①部材が次のようにモデル化される。

$$\{d\} = [D]\{f\}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \delta_{yy}^1 + \delta_{y1} & \delta_{y3} & \delta_{xy}^1 & 0 & -\delta_y^1 \\ & \delta_{yy}^2 + \delta_{y2} & 0 & \delta_{xy}^2 & \delta_y^2 \\ & & \delta_{xx}^1 + \delta_{x1} & \delta_{xy}^2 & -\delta_x^1 \\ & & & \delta_{xx}^2 + \delta_{x2} & \delta_x^2 \\ Sym. & & & & \delta_0^1 + \delta_0^2 + \delta_0 \end{bmatrix}$$

表1 柱梁接合部実験の試験体一覧

試験体名称	柱断面	梁断面	鋼棒				
			材料	ヤング率 (N/mm ²)	降伏耐力 (N/mm ²)	本数 (配置)	長さ (mm)
C1	H-594×302×14×23	H-440×300×11×18	S45C	2.05×10^5	674	4本 (2行2列)	400
C2	H-582×300×12×17	H-300×300×10×15					400
C3	H-482×300×11×15	H-250×250×9×14					200

4. 柱梁接合部実験との比較

4.1 比較モデル概要

図9に比較モデルを示す。図9a)は柱梁接合部実験を表しており, 試験体一覧を表1に示す。試験体はC1, C2, C3の3種である。各試験体ともに, 鋼棒の位置は全て梁部材芯から75mm離れた位置に4本配置している。解析では, 鋼棒とフランジの位置を図10のような座標系になおす。鋼棒の座標は x 座標, y 座標ともに各試験体の位置と同様とし, 梁部材フランジの x 座標は板厚方向中心位置, フランジの y 座標は原点である梁部材芯から±75mmとする。

図9b)は各試験体を, 3.で述べた力学モデルを用いて, 解析するために線材モデルに置き換えたものである。この図の要素a, 要素b, 要素cは図4b)の要素a, 要素b, 要素cに対応している。解析では, 試験体C1, C2の Z_1 は524mm, l_1 は448mm, $l_2 + l_3$ は76mm, 試験体C3の Z_1 は324mm, l_1 は248mm, $l_2 + l_3$ は76mmとし, $l_2 + l_3$ は柱部材のフランジ, 補強プレート, アンカープレートを合せた長さとしている。各試験体ともに鋼棒の材料はS45Cであり, 降伏耐力は引張試験結果である。

解析モデルの設定では実験値との対応を詳細に比較するため, 柱芯から柱梁接触面に当る距離を図9b)のように剛域とし, 柱材縁端はピン支持としている。接合ユニットのウェブの剛性は考慮しない。図6の復元力特性の設定において, 鋼棒の並行部, ネジ部ともに圧縮で α は0.25, β は0.01, 引張側では α , β は0とする。これらの値は, 図11に示すような, 既往の研究²⁾における鋼棒の繰返し加力実験結果の履歴ループ (実線) を破線のようにモデル化したものである。

図9 比較モデル

図10 接合部ユニット断面

解析にあたって、載荷点は実験と同様に柱芯から2,350mmとし、加力点の水平変位をこの長さで割った値を回転角に相当するものとみなす。載荷方法は図12に示す載荷履歴で正負交番繰返し載荷を行う。

図11 鋼棒の復元力特性

図12 載荷履歴

a) C1 試験体

b) C2 試験体

c) C3 試験体

図13 曲げモーメントと回転角の関係

4.2 考察

各試験体の実験結果と解析結果の曲げモーメントと回転角の関係を図13に示す。実線は実験値、破線は解析値を表している。全ての試験体において実験値と解析値は、ほぼ同等の履歴ループを描いており、本力学モデルにより精度よく曲げモーメントと回転角の関係を表現していることが分かる。

図14はC1試験体の図3で示した第2段階までの曲げモーメントと回転角の関係を示したものである。初期張力解消時での初期剛性、離間モーメントともに精度よく表現されている。また、鋼棒降伏後の接合部挙動の変化においてもほぼ正確に追跡できている。実験値と解析値の誤差は、実験では鋼棒中央部の歪ゲージを確認しながら鋼棒の締め付けを行ったが、必ずしも鋼棒全ての初期張力が均等にならないことも一因であると考えられる。

C1試験体の回転角1/25の挙動を取り出した曲げモーメントと回転角の関係を図15に示す。履歴ループ1回目と2回目の剛性低下、梁部材のフランジ縁端が接触するまでのスリップ型復元力特性がよく表現できている。回転角0時に曲げモーメントが0にならないのは、そのときの鋼棒の座屈荷重が的確に評価されているためである。

図14 第2段階時挙動

図15 1/25 時接合部挙動

5. 部分架構実験との比較

今後の研究において、サステナブルビル構造システムの全体架構に本力学モデルを組み込んだときの挙動を追いつき、サステナブルビル構造システムの特徴を明確にするつもりである。そのため、ここでは設計した平面モデルから部分架構を取り出した実大試験体を正負交番繰返し載荷した実験結果と、柱梁接合部の力学モデルを組み込み解析した部分架構モデルの結果を比較し、最低限の架構における本力学モデルの有効性を確認する。平面モデルとして図16に示すように座屈拘束ブレースを方杖状にそれぞれ4本、2本配置させたものを考える。これらの平面モデルは、既往の研究1)で用いた地上7階建て、階高2.75m、6m×6スパンの中規模鉄骨造集合住宅を想定したものである。この建物の耐震性能は、1次設計では層間変形角1/200以下、柱部材・梁部材・座屈拘束ブレースの全てが弾性、2次設計では層間変形角1/100以下、柱部材・梁部材は弾性、座屈拘束ブレースのみ塑性としている。これらの設計条件のもとで柱部材・梁部材・座屈拘束ブレース芯材の断面を決定した。

5.1 比較モデルの概要

図17に部分架構の比較モデルを示す。図17a), c)は部分架構実験を表しており、試験体一覧を表2に示す。試験体はF1, F2, F3, F4の4種である。F1, F3試験体は、それぞれ設計した4ブレースモデル(図16a)), 2ブレースモデル(図16b))の中間層から部分架構を取り出したものとする。また、F2試験体はF1試験体より柱部材、梁部材断面を小さくし、座屈拘束ブレース芯材の断面積を大きくしたものである。F4試験体はF3試験体と柱部材、梁部材断面は同じで、座屈拘束ブレース芯材の断面積を小さくしたものである。各試験体ともに、鋼棒の位置は全て梁部材芯から75mm離れた位置に4本配置している。解析では、鋼棒とフランジの位置を柱梁接合部実験と同様に図10のような座標系におす。鋼棒の材料はS45Cであり、降伏耐力は引張試験結果である。

図17b), d)の要素a, 要素b, 要素cは図4b)の要素a, 要素b, 要素cに対応している。解析では、各試験体ともに Z_1 は524mm, l_1 は448mm, l_2+l_3 は76mmとする。

解析モデルの設定にあたって、図17b), d)に示すように剛域を設定する。接合ユニットのウェブの剛性は考慮しない。図6の復元力特性の設定において、鋼棒の並行部、ネジ部ともに圧縮で α は0.25, β は0.01, 引張側では α , β は0とする。これらの値は、4.1の設定と同様である。座屈拘束ブレースはエネルギー吸収部はトラス材とし、ガセット部は剛性の高い矩形材とし区別する。座屈拘束ブレースの復元力特性として、図18に示すように、既往の研究³⁾の履歴ループ(実線)を破線のようにモデル化したものを用いる。

載荷点は実験と同様に柱芯から2,350mmとし、加力点の水平変位をこの長さで割った値を回転角に相当するものとみなす。載荷方法は図12に示す載荷履歴で正負交番繰返し載荷を行う。

図16 サステナブル構造ビルモデル

図17 比較モデル

図18 座屈拘束ブレースの復元力特性

5.2 考察

各試験体の実験結果と解析結果の荷重と載荷点変位の関係を図19に示す。実線は実験値、破線は解析値を表している。実験値、解析値ともにほぼ同等の履歴ループを描いており、本力学モデルにより精度よく荷重と載荷点変位の関係を表現していることが分かる。また、サステナブルビル構造システムに力学モデルを組み込んだときの挙動として、本構造システムの特徴である鋼棒の初期張力解消後の座屈拘束ブレースによるエネルギー吸収も表現できている。

2ブレースモデルであるF3, F4試験体の解析結果では、実験において観測された、圧縮側から引張側へと移行する時に接合部ユニット縁端が柱フランジに接触することによって生じる荷重上昇の確に表現されている。

表2 部分架構実験の試験体一覧

試験体 名称	柱断面	梁断面	鋼棒 (S45C)	座屈拘束ブレース		
			降伏耐力 (N/mm ²)	芯材断面	本数 (本)	エネルギー吸収 部長さ (mm)
F1	H-588×300×12×20	H-300×300×10×15	669.0	PL-80×12	2	1350
F2	H-488×300×11×18	H-294×302×12×12	475.3	PL-80×22		1100
F3	H-588×300×12×20	H-300×300×10×15	478.0	PL-80×22	1	1350
F4	H-588×300×12×20	H-300×300×10×15		PL-80×12		

図20にF3試験体の接合部の曲げモーメントと載荷点変位の関係を示す。実線が実験値、破線が解析値を表している。スリップ挙動も含めて、解析値は実験値をよく追従していることが分かる。

実験値に比べて、解析値は圧縮方向載荷時に接合部に作用する曲げモーメントがやや小さい。しかしながら、接合部に比べて座屈拘束ブレースの剛性の負担率が大きいことを考えると、座屈拘束ブレースの性能を的確に評価しておけば、サステナブルビル構造システムの全体架構の解析に際して影響は少ないと考える。

a) F1 試験体

b) F2 試験体

c) F3 試験体

d) F4 試験体

図19 荷重と載荷点変位の関係

図20 F3 試験体接合部挙動

6. 結論

本論では、既往の研究¹⁾²⁾により明らかにした柱梁接合部の力学的特性を基に、力学モデルを構築した。また、柱梁接合部実験との比較を行い、座屈拘束ブレースを方杖状に設置した部分架構実験結果との対比も行った。この結果本力学モデルは柱梁接合部の力学的特徴や、実験結果をほぼ的確に表現できることが分かった。

本研究により、サステナブルビル構造システムの架構に本力学モデルを組み込み、その挙動を追うことが可能であることが確認できた。今後、この力学モデルを組み込んだ全体架構モデルを設計し、サステナブルビル構造システムの特性を明確にしていく。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学建築物理研究センター助教授 山田哲博士、同研究員(当時) 岡田健博士に御助言を頂きました。記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 會澤貴浩, 山田哲, 岩田衛: サステナブルビル構造システムの提案とその基本特性, 日本建築学会環境系論文集, 第581号, pp.109-116, 2004年7月
- 2) 岡田健, 山本重治, 山田哲, 岩田衛: サステナブルビル構造システムの柱梁接合部に関する実験, 日本建築学会構造系論文集, 第591号, pp.145-152, 2005年5月
- 3) 小林史典, 村井正敏, 和泉田洋次, 岩田衛: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 —その2 製作簡易化と心材厚比の変化—, 日本建築学会構造系論文集, 第586号, pp.187-193, 2004年12月

(2005年11月8日原稿受理, 2006年4月24日採用決定)