アングルを用いた露出型柱脚の実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EXPOSED TYPE COLUMN BASE WHICH USES ANGLE AS A JOINT ELEMENT

山田 哲^{*1}, 岡田 健^{*2}, 國岡 恭子^{*3}, 薩川 恵一^{*4}
Satoshi YAMADA, Ken OKADA, Kyoko KUNIOKA
and Keiichi SATSUKAWA

In this study, a new type column base, which has high deformation capacity and high reparability, is proposed. Plastic deformation capacity of this column base is brought by the plastic deformation capacity of the angle, which is a joint element. Thus, in this column base, the part which is allowed plastic deformation is limited to the angle, and other part including the anchor bolt is kept in elastic range. The angle can be exchanged easily, when it was damaged. The deformation capacity and the reparability of this column base are verified by axial loading test of angle element and cyclic loading test of column base.

Keywords, Exposed type column base, Experimental study, Reparability, Deformation Capacity, Angle

露出型柱脚, 実験的研究, 補修性, 変形能力, アングル

1. 序

鋼構造骨組における柱脚は、上部構造から基礎構造に力を伝達する重要な接合部であるだけでなく、地震荷重下において上部構造が変形しエネルギー吸収する際の要となる。柱脚が備えるべき耐震性能を考えた場合、梁降伏型やパネル降伏型と言った全体降伏型の骨組においては骨組全体のエネルギー吸収に占める柱脚のエネルギー吸収の寄与は僅かであり直接的な影響は少ないが、上部構造に十分なエネルギー吸収能力を発揮させるための変形追従能力が備わっていることが必要不可欠である¹⁾。変形追従能力に優れた柱脚に関する研究はこれまでも数多く行われているが^{2)~4)}、その多くはアンカーボルトあるいはベースプレートの塑性変形により大きな変形に追従する形式のものである。大地震時に塑性化したアンカーボルトやベースプレートは、重力を支える基礎構造や柱と一体化されていることから、損傷後の補修が困難である。

一方、地球環境問題を考えた場合、建物の長寿命化、部材レベルにおける長寿命化であるリユース、素材レベルでの長寿命化であるリサイクルは、構造躯体における環境負荷を低減する上での重要な方策となる。これらの方策を実施するには、施工性、解体性、補修性に優れた構法を採用することが望ましい。環境性という観点で構造要素の一つである柱脚に着目した研究はこれまで行われていない。

本研究では柱脚の変形能力だけでなく補修性にも着目し、変形追

従能力に優れ、かつ補修性に優れた柱脚を提案する。この柱脚では、地震時に塑性変形する箇所を交換可能な部品に集約し、損傷後は変形箇所を交換することで継続使用する。大地震後においても建物を継続使用できる補修性は、地震国である我が国で建物を長寿命化するためには必要不可欠であり、環境負荷の低減を考える上で重要な意味を持つ。また、大地震時における損傷箇所を交換可能な部品に集約する考え方は、重力を支持する主架構を弾性範囲に留め地震による入力エネルギーを取り替え可能なダンパーで吸収させる「損傷制御構造⁵⁾」の考え方に基づくものである。本論文では、変形追従能力と補修性に優れた露出型柱脚を提案し、要素レベルおよび部材レベルでの繰り返し載荷実験を通じて、その力学的特性を示す。

2. 本研究で提案する柱脚の概要

本研究で提案する露出型柱脚を、図-1に示す。この柱脚は、鉄骨造の柱と基礎構造を、接合金物であるアングルを介してボルト接合するものである。アングルの耐力を柱や基礎に比べ低くすることで、大地震時に建物が大きく変形する際、柱と基礎を弾性範囲に留めることができる。この柱脚はベースプレート降伏型の露出型柱脚の1つと見ることもできるが、塑性化部位がボルト接合されたアングルに限定されていることで、柱とベースプレートが溶接で一体化されている従来の柱脚とは一線を画する高い補修性を有する柱脚となっている。

^{*1} 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)

^{*2} 東京工業大学 大学院生・修士(工学)

^{*3} 元東京工業大学 大学院生・修士(工学)
(現 JR 九州)

^{*4} 元東京工業大学建築物理研究センター 研究員・博士(工学)
(現東京理科大学 助手)

Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Former Research Fellow, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

大地震後における補修性を確保するために、塑性化部位をアングルに限定するためには、損傷を受けた場合に補修が困難なアンカーボルトを弾性範囲に留める必要がある。本研究で提案する柱脚では、アングルと柱の接合には高力ボルトを使用し、アンカーボルトにも高強度材料を使用して、アングルが大きく塑性変形するような状況においてもボルト類は弾性範囲に留める。

アングルに引き抜き力が作用した状況を図-2に模式的に示す。アンカーボルトには、アングルに作用する引き抜き力 P と、アングルの先端に生じる反力 R の和と釣り合う大きな引き抜き力 T が作用することから、アングルの降伏耐力に応じた引き抜き力が作用した場合にも、アンカーボルトが離間しないよう設計する。また、引き抜き力が作用する際、アングルには図-2に示したようなモーメントが作用する。曲げモーメントはボルト位置で最大となり、アングルの曲げ変形に伴いアンカーボルトにも曲げモーメントが加わる。ボルト位置でアングルが塑性化する場合にアンカーボルトを弾性に留めるためには、曲げモーメントにも抵抗できる大きな断面とするなどの対策が必要である。そこで本研究では、ボルト位置でアングルを曲げ降伏させないための2つの方法を採用した。

1つ目は、図-3に示す板厚の厚い座板を設ける方法⁹⁾である。厚い座板を設けることで、アングルが曲げ降伏する位置を座板端部とする。そして、ボルト位置に作用する曲げモーメントに対しては、座板の降伏モーメントをアングルが塑性化した時にボルト位置に作用するモーメントより大きく設計することで、座板およびアングルを弾性範囲に留め、ボルトに大きな曲げが加わらないようにする。2つ目は、図-4に示すように、アングルに切り欠きを設ける方法である。ヒンジが形成される切り欠き部の耐力が低くなっていることで、ボルト位置に作用する曲げモーメントは低減される。切り欠きの位置と大きさは、アングルが塑性化した時にボルト位置に生じる曲げモーメントが、アングルの降伏モーメントを越えないように設計する。

図-1 柱脚の概要

3. アングルの要素実験

3.1 実験概要

本研究で提案する柱脚においては、接合金物であるアングルが変形要素となっている。軸力と繰り返し曲げを受ける柱脚の履歴挙動は、アングルの弾塑性挙動に基づいたものとなる。柱脚の部材実験に先立ち、アングルの弾塑性履歴挙動を把握するため、柱脚に組み込まれた状態を想定したアングルの繰り返し載荷実験を行った。

試験体に用いたアングルは、L-150x150x12(SS400)であり、幅は130mmとした。試験体のパラメータはアングルの接合方式であり、座板を用いるタイプ(座板型)と切り欠きを設けるタイプ(切欠型)の2体とした。座板型では、板厚28mm、幅44mmの座板(SS400)を使用し、切欠型では、先端から44mmの位置に $r=8\text{mm}$ の切り欠きを設けた。試験体の断面形状を図-5に、JIS-1A号試験片による素材引張試験結果を図-6に示す。アングルの取り付けに用いたボルトはM16F10Tの高力ボルトである。

セットアップの概略を図-7に示す。加力には変位制御型万能試験機を用い、鉛直方向片振幅繰り返し載荷を行った。実験では、試験体である2体のアングルを加力治具を挟んで対称に設置し、加力治具及び反力治具に高力ボルトで接合した。高力ボルトの締め付けは、設計用トルク値により管理した。実験における計測項目は、試験機のロードセル出力である鉛直力と、鉛直変位 δ_v であり、 δ_v で0.5mm、1.0mm、2.5mm、5mm、12.5mm、25mmの片振幅各1回の載荷を行った。

3.2 実験結果

要素実験の結果を、片側のアングルで負担する鉛直力 P と鉛直変位 δ_v の関係で整理し、図-8に示す。座板型と切欠型のいずれの要素試験体も、25mmの振幅まで安定した履歴挙動を示した。また、載荷終了に至るまで、アングルへの亀裂の発生およびボルトの塑性変形は観察されなかった。25mmの浮き上がり量を柱脚部引張側の浮き上がり量としてみると、柱の成で250mmに対して柱脚部の回転角で1/10、500mmに対して1/20に相当する。露出型柱脚の接合金物としては十分な変形領域に至るまで、安定した履歴挙動を示したと言えよう。

図-2 アンカーボルトに作用する力

図-3 座板を設ける方法

図-4 切り欠きを設ける方法

図-5 要素実験試験体

図-6 素材試験結果(要素実験)

図-7 要素実験セットアップ

図-8 要素実験結果

3.3 アングルの履歴挙動の解析

図-9に示す力学モデルを用いて、アングルの履歴挙動を鉛直力 P と鉛直変位 δ_v の関係において解析する。このモデルでは、鉛直力を受ける場合に主要変形要素となる横材について、座板型では両端固定、切欠型では一端固定一端ピンの梁材にモデル化し、変形要素を固定端に設けた弾塑性ヒンジに集約した。一方、軸力を伝達する以外は鉛直方向の復元力にはあまり寄与しないと考えられる縦材は、両端ピンの剛体にモデル化した。アングルが塑性化し、降伏機構を形成した後の挙動については、変形の大部分が横材の塑性変形に起因すると考えれば、このようなモデル化でも履歴挙動は概ね評価できると考えられる。ただし弾性範囲の挙動については、実際の変形状態に応じた剛性とするため、縦材と横材の間に剛性を調整するための弾性バネを挿入し、解析モデルの弾性剛性が撓み角法により求めたアングルの弾性剛性の値と一致するよう弾性バネの剛性を設定した。また、アングルの浮き上がりに伴う横材のモーメントアームの変化については、図-9中に示すように、ヒンジ間を繋ぐ剛体の回転に伴う変化を考慮することで対応した。モデル化された横材におけるヒンジの位置については、図-10に示すように、先端側は座板型では座板端位置に弾塑性ヒンジを設け、切欠型では切り欠き底位置をピンとした。またフィレット側ではコーナー部分の変形を考慮して、平行部端よりフィレット側に $r/3$ 入った位置に弾塑性ヒ

ンジを設けた。

撓み角法による弾性剛性の算定においては、アングルを図-11に示す線材モデルに置換した。ここで、座板型については、座板で拘束される端部が完全な固定端とはならないことから、固定度の影響を反映するために、端部に弾性回転バネ(剛性 K')を挿入したモデルとした。 K' の値は実験結果における弾性剛性と比較検討した結果、座板端部において、座板端部からボルト位置までの区間を単純梁と仮定したときに、座板端部において曲げを受けた場合に発生する材端回転角相当の回転角が生じるものとして、

$$K' = 3EI/L_w \quad (1)$$

ここで、 L_w : ボルト中心位置から座板端までの距離

とした。一方、切欠型については、切り欠き位置をピンとしたモデルを用いた。

弾塑性ヒンジの履歴挙動については、図-12に示すような、骨格曲線、弾性除荷部、バウシinger部の組み合わせで構成されたモデルを用いた。このうち、新たに到達した荷重領域における履歴曲線をつなぎ合わせた骨格曲線は、一方向載荷時における荷重-変形関係と等価である⁷⁾ことから、数値積分による面内解析法⁸⁾などによるせん断曲げを受ける横材の荷重-変形関係の解析結果に基づきモデル化した。座板型については、横材を逆対象曲げを受ける梁材にモデル化したことから、半スパン分であるスパン $L_s/2$ の単純梁について荷重-変形関係(モーメント-部材角関係)を解析し、解析結果をTri-Linear型にモデル化した。骨格曲線のモデルを解析結果と併せて図-13に示す。このモデルでは、第1折点は全塑性モーメント $M_{p,a}$ と全塑性モーメントに対応する弾性変形角 $\theta_{p,a}$ であり、式(2),(3)で与えられる。

$$M_{p,a} = \sigma_{y,a} \cdot t_a^2 \cdot B_a / 4 \quad (2)$$

$$\theta_{p,a} = [M_{p,a} \cdot L_s / (6 \cdot E \cdot I) + 2M_{p,a} / (G \cdot t_a \cdot B_a \cdot L_s)] \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{y,a}$: アングル材の降伏点

t_a : アングルの板厚

B_a : アングルの幅

L_s : ヒンジ間距離(図-9参照)

E : 弾性係数

$I = B_a \cdot t_a^3 / 12$

G : せん断弾性係数

一方、切欠型では切欠部は完全なピンとなるわけではなく、板厚に応じて外力に抵抗する。反曲点より切欠側の領域における曲げ変形は微小であると考えられることから、以下のようにモーメント-部材角関係をモデル化した。アングルの板厚を t_a 、切欠底の板厚を t_n 、 $\alpha = t_n^2 / (t_a^2 + t_n^2)$ とすると、塑性化した状態での横材の反曲点位置はフィレット側から $(1-\alpha) \cdot L_s$ の位置となる。反曲点からフィレット側の部分について、一端に曲げを受ける単純梁として荷重-変形関係を解析する。これを、変形角については切欠側の $\alpha \cdot L_s$ の領域が剛域であるとみなして $1/(1-\alpha)$ 倍し、モーメントについても横材が伝えるせん断力が切欠位置での曲げ抵抗を考慮した場合と等しくなるよう $1/(1-\alpha)$ 倍したものを、横材を一端固定一端ピンの条件に置換した場合の荷重-変形関係とみなし、Tri-Linear型にモデル化した。骨

格曲線のモデルを、モーメント、変形角ともに $1/(1-\alpha)$ 倍した解析結果と併せて、図-12に示す。このモデルにおける第1折点である全塑性モーメント $M_{p,a'}$ とそれに対応する弾性変形角 $\theta_{p,a'}$ は、式(4),(5)で与えられる。

$$M_{p,a'} = 1/(1-\alpha) \cdot \sigma_{y,a} \cdot t_a^2 \cdot B_a / 4 \quad (4)$$

$$\theta_{p,a'} = M_{p,a'} \cdot L_s \cdot (1-\alpha) / (3 \cdot E \cdot I) + M_{p,a'} / \{ G \cdot t_a \cdot B_a \cdot L_s \cdot (1-\alpha) \} \quad (5)$$

降伏後の挙動については、座板型・切欠型のいずれについても、第

1折点から第2折点の区間は弾性剛性の2%の剛性とし、第2折点は回転角で $16\theta_{p,a}$ (切欠型では $16\theta_{p,a'}$)の点、第2折点以降は弾性剛性の1%の剛性とした。また、バウシンガー部については、文献9)のモデルを用いることとした。

以上のようにモデル化して計算したアングルの履歴挙動の解析結果を、実験結果と比較し図-14に示す。解析結果はバウシンガー効果による剛性低下を含め、実験結果と良い対応を示している。繰り返し荷重を受けるアングルの履歴挙動は、図-9に示す力学モデルを用いることで予測できることが判った。

図-9 アングル要素の力学モデル

図-10 ヒンジ位置の設定

(1)座板型 (2)切欠型

図-11 撓み角法による弾性剛性の算定

図-12 弾塑性ヒンジにおける履歴挙動の分解

図-13 横材の骨格曲線

図-14 解析結果と実験結果の比較

図-19 実験装置

図-20 柱脚部詳細

4.3 実験結果

各試験体の荷重-変形関係を、柱脚部に生じるモーメント θM と柱脚部の回転角 θ の関係で整理し、図-21に示す。全試験体、最大変位振幅である $\theta = 0.05(\text{rad})$ に至るまで耐力を喪失することなく安定した変形能力を発揮した。載荷終了に至るまで、アングルに亀裂は発生せずボルトも塑性化しなかったことから、部材実験によってアングルを接合金物として用いた露出型柱脚の変形追従能力の高さが検証できたと言える。

荷重-変形関係であるが、一定の圧縮軸力を作用させた試験体は、原点付近で軸力による抵抗モーメントを発揮した後前回の除荷点を指向する安定した履歴曲線を描いた。本研究で提案した柱脚は、基本的にベースプレート降伏型の露出型柱脚であることから、典型的なスリップ型の復元力特性となる一般的なアンカーボルト降伏型の露出型柱脚に比べ、安定した履歴挙動を示したと言える。また、軸力を0とした試験体と一定の引張軸力を作用させた試験体は、紡錘型の復元力特性を示した。そして、変動軸力を作用させた試験体は、圧縮軸力が作用する領域では一定の圧縮軸力を作用させた試験体と同様の復元力特性を示し、引張軸力が作用する領域では一定の引張軸力を作用させた試験体と同様の復元力特性を示した。なお、一定の圧縮軸力を作用させた試験体および軸力を0とした試験体の降伏耐力は、概ね降伏線理論による予測値と対応した結果となった。

また、全ての試験体において、ボルトが塑性化しなかったことにより載荷終了後のアングルの取り替えは支障無く行えた。本柱脚の特徴である補修性についても、実験的に検証できた。

図-21 試験体の荷重-変形関係

4.4 柱脚の履歴挙動の解析

柱脚の履歴挙動を解析するにあたり、柱脚部を図-22に示すように、複数のバネでモデル化した。図中、バネ S_{lo} およびバネ S_{ro} は曲げモーメントの作用する側のアンクルに対応し、バネ S_{li} およびバネ S_{ri} は側面のアンクルに対応する。このうち、曲げモーメントの作用する側のアンクルについては、3.3 節で示した方法により鉛直方向に作用するバネとしてモデル化した。バネの位置は横材における反曲点位置であり、図-22中の L_i は、柱端より横材の反曲点位置までの距離である。

一方、側面側のアンクルについては、座板型と切欠型のいずれについても、図-22中に示すように先端側には斜め方向に降伏線ができ、これとフレット側の降伏線によって降伏機構が形成される。斜め方向の降伏線は、変形方向ごとに反転した位置にできるだけなく、柱脚全体に浮き上がり変形が生じるような場合には、浮き上がり状態に応じて移動する。本研究では、複雑な挙動を示す側面側のアンクルを平均的に捉えるため、座板型については、幅方向に 1/2 に分割した上で、柱脚全体の浮き上がり変形が生じない場合のヒンジ間距離の平均値 L_s' を以て横材の長さヒンジ間距離として、3.3 節で示した方法による鉛直方向に作用するバネとしてモデル化を行った。バネの位置はそれぞれ幅方向に 1/2 に分割したときの重心位置である。一方、切欠型の側面側のアンクルについては、降伏機構が座板型と等価となることから、弾性剛性の対応においては恣意的ではあるが、座板型のモデルを適用した。

これらアンクルをモデル化したバネは、その位置において浮き上がり変形が生じる際に変形し、柱の左右両端においては、柱端における浮き上がり変形が 0 となると同時に、基礎からの支圧反力 C_i もしくは C_r が作用する。柱脚における力の釣り合いを、図-22中に模式的に示す。図中、 N は柱脚に作用する軸力であり、 ${}^B M$ は柱脚に作用するモーメント、 Q は柱脚が伝えるせん断力、 F_{lo} 、 F_{li} 、 F_{ri} 、 F_{ro} はそれぞれバネ S_{lo} 、 S_{ro} 、 S_{li} 、 S_{ri} の復元力である。軸方向力の釣り合いは式(6)で、曲げモーメントの釣り合いは式(7)で表される。

図-22 柱脚のモデル化

図-23 解析結果と実験結果の比較

$$N = F_{10} + F_{11} + F_{12} + F_{13} + C_1 + C_2 \quad (6)$$

$$BM = \{F_{10} \cdot (L_1 + D/2) + C_1 \cdot D/2 + F_{11} \cdot L_a/2 \quad (7)$$

$$-F_{12} \cdot L_a/2 - C_2 \cdot D/2 - F_{13} \cdot (L_1 + D/2)\} \cdot \cos \theta$$

ここで、 D :柱成

L_a :アングルの幅

θ :柱脚の回転角

軸力および曲げモーメントの釣り合いと、変形の釣り合い条件から、各バネの状態そして反力の分布が決まる。なお、せん断力 Q は、圧縮軸力による摩擦抵抗と側面のアングルによって柱から基礎に伝達されることから、バネと圧縮反力でモデル化した柱脚の力学モデルには反映しなかった。

各試験体の荷重-変形関係の解析結果を実験結果と比較し、図-23に示す。解析結果は実験結果と概ね良好に対応しており、図-22に示すモデルにより、軸力と曲げモーメントを受ける柱脚の履歴挙動が予測できることがわかった。

5. 結論

本研究では、地震時に塑性変形する箇所をアングルを用いた接合金物に集約し、損傷後は変形箇所を交換することで継続使用する、変形追従能力と補修性に優れた柱脚を提案した。この柱脚では、基礎構造に埋め込まれ補修が困難なアンカーボルトを軸降伏させないようにするだけでなく、ボルト位置でアングルを曲げ降伏させないことが必要であることから、アングルの接合方法として、アンカーボルト位置に板厚の厚い座板を設け曲げモーメントに抵抗させるタイプ(座板型)と、アンカーボルト位置に作用する曲げモーメントを低減するため近傍に切り欠きを設けるタイプ(切欠型)の2つの方法を採用した。アングルの履歴挙動に着目した要素レベルの実験ならびに部材レベルでの繰り返し載荷実験を行い、以下の結論を得た。

1)軸力と繰り返し曲げを受ける柱脚の履歴挙動は、変形要素であるアングルの弾塑性挙動に基づいたものとなることから、柱脚に組み込まれた状態を想定したアングルの片振幅繰り返し載荷実験を行った。L-150x150x12を使用した要素試験体は、座板型と切欠型のいずれについても、柱の成が250mmであれば柱脚部の回転角で1/10、500mmであれば1/20に相当する振幅まで安定した履歴挙動を示しただけでなく、載荷終了に至るまで、アングルへの亀裂の発生およびボルトの塑性変形は観察されなかった。本研究で提案した方法で接合されたアングルは、露出型柱脚の接合金物としては十分な変形領域に至るまで、安定した履歴挙動を示す。

2)鉛直力を受けるアングル要素の履歴挙動について、主要変形要素となる横材を、座板型では両端固定、切欠型では一端固定一端ピンの梁材、主として軸力を伝達する縦材を、両端ピンの剛体とした簡単な力学モデルで表した。この力学モデルに、パウシンガー効果を考慮した履歴モデルを適用することで、繰り返し荷重を受けるアングルの履歴挙動は、パウシンガー効果による剛性低下を含め予測できる。

3)柱に作用する軸力と柱脚の接合金物であるアングルの接合方式をパラメーターとした柱脚の部材実験においては、全ての試験体が柱脚の回転角で1/20の大変形領域に至るまで安定した履歴挙動を示した。柱脚部における変形は接合金物であるアングルの変形に集約され、載荷終了に至るまでアングルへの亀裂の発生およびボルトの塑性変形は観察されなかった。部材実験から、アングルを接合金物として用いた露出型柱脚の変形追従能力の高さが検証できた。

4)柱脚の部材実験においては、全ての試験体でアングルを接合する高力ボルトが損傷を受けなかったことから、載荷終了後のアングルの取り替えは支障無く行えた。本柱脚の特徴である補修性についても、実験的に検証できた。

5)アングルの浮き上がり挙動を表す力学モデルを、柱脚の力学モデルに適用することで、軸力と曲げを受ける柱脚の履歴挙動が概ね予測できる。

謝辞

本研究は旭硝子財団平成13年度自然科学系研究助成(研究代表者:山田 哲)の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1)山田 哲, 秋山 宏, 貞許美和: スリップ型の復元力特性を有する柱脚の弾塑性挙動が鋼構造多層骨組の終局耐震性能に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp.141-147, 1997.12
- 2)小川博之, 貞許美和, 山田 哲, 秋山 宏: 施工性に優れた改良型露出型柱脚の実験的研究(その1.実験計画)(その2.実験結果), 日本建築学会学術講演梗概集 構造III, pp.521-524, 1998.9
- 3)市川 俊, 荒木孝博, 増田浩志, 田中淳夫, 元田 徹, アンカーボルト先行降伏型露出柱脚に関する研究-その1 実験計画・結果- -その2 考察-, 日本建築学会学術講演梗概集 構造III, pp.617-620, 1999.9
- 4)是此田涉, 吉住孝志, 土井紀佳, 野田喜弘, 西小野芳壮, 梶山博光: ベースプレート降伏先行型鉄骨露出柱脚の弾塑性変形性状に関する研究(その1)実験計画および実験結果(その2)履歴則と1方向復元力特性のモデル化, 日本建築学会学術講演梗概集 構造III, pp.967-970, 2001.9
- 5)和田 章, 岩田 衛, 清水敬三, 安部重孝, 川合廣樹: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998.
- 6)谷川充丈, 山田 哲, 和田 章: 弦材に応力制限機構をもつトラス柱の提案 その1 鋼管継ぎ手の実験, 日本建築学会学術講演梗概集 構造III, pp.539-540, 2000.9
- 7)加藤 勉, 秋山 宏: 鋼構造部材の耐力(その4), 日本建築学会論文報告集, 第151号, pp.15-20, 1968.9
- 8)山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文報告集, 第444号, pp.135-144, 1993.2
- 9)秋山 宏, 高橋 誠: 鋼構造剛接骨組の耐震性に及ぼすパウシンガー効果の影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第418号, pp.49-57, 1990.12
- 10)日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2001.11

(2003年4月8日原稿受理, 2003年7月25日採用決定)