鉄骨接合部の平面ひずみ状態における応力三軸度とひずみ集中度

(鉄骨接合部の応力・ひずみ状態—その1)

STRESS TRIAXIALITY AND STRAIN CONCENTRATION AT STEEL CONNECTIONS
UNDER PLANE STRAIN CONDITION

(Stress-strain states at steel connections—Part 1)

桑 村 仁*, 稲葉 雄一郎**

Hitoshi KUWAMURA and Yuichiro INABA

Brittle fracture in steel frames during an earthquake is triggered by a ductile crack initiated at a hot spot of inevitable discontinuities encountered at steel connections. Such a hot spot is subjected to a severe strain concentration as well as a high stress triaxiality. The capacity of global strain over the whole section which is susceptible to fracture is an important source of member ductility beyond the elastic limit to survive a destructive earthquake. It is known that the global strain capacity prior to the initiation of a ductile crack is governed by the stress triaxiality and strain concentration factors at the hot spot. Finite element analyses in this study enumerate the data on these factors for typical steel connections under a plane strain condition which provide conservative information for fracture control design.

Keywords : *steel connection, fracture, stress triaxiality, strain concentration, finite element method*
鉄骨接合部, 破壊, 応力三軸度, ひずみ集中, 有限要素法

1. 序

鉄骨構造物は、鉛直部材、水平部材、あるいは斜め部材を接合し組立て、システムとして構成されている。しかし、この接合された部分は形状的不連続部になるため、過荷重を受けたときそこから破壊が生じることがある。1995年兵庫県南部地震においても、建築鉄骨の柱と梁の接合部でき裂の発生や破断が報告されている³⁾。このような接合に伴う形状的不連続部はホットスポットと呼ばれ、そこに内在する多軸応力拘束とひずみ集中が材料の延性限界を突破することによって延性き裂が生じ⁴⁾、この延性き裂が脆性破断の引き金となる⁵⁾ことが知られている。

このように、先行発生する延性き裂が脆性破断を引き起こすという現象は、船舶や産業機械・橋梁と異なり、降伏後の塑性変形を前提として耐震設計が行われる建築鉄骨の特徴である⁶⁾。建築鉄骨の脆性破断は、延性き裂の発生、その成長、脆性破壊への転化という3段階の現象で構成されていることから^{5), 6)}、脆性破断に対しては3種類のデザイン・クライテリア、つまり、延性き裂を生じさせない設計 (no crack design)、脆性破断を生じさせない設計 (no fracture design)、骨組を崩壊させない設計 (no collapse design) が考えられる。もちろん、第3の規範は必ず遵守されなければならない。本研究は第1の規範を対象としたものである。

破壊起点の応力三軸度 τ_s と材料の一樣伸び e_u がわかれば、既往の研究⁴⁾によると、そのホットスポットのひずみが e_u/τ_s^2 になると延性き裂が発生する。しかし、その部分はひずみ集中を受けている

ので部材の変形を支配するグローバルひずみ e_g は、 e_u/τ_s^2 をひずみ集中度 a_e で割ったもの、つまり、 $e_g = \frac{1}{a_e} \cdot \frac{e_u}{\tau_s^2}$ のときに延性き裂が発生するということになる。ここで、グローバルひずみ e_g というのは、破壊する断面の大部分に生じているひずみであり、これが材長に沿って積分されて部材の変形をもたらすことになる。この e_g に基づいて、延性き裂が発生するまでの部材の塑性変形能力をひずみ集中を考慮しない平面保持を仮定した梁理論に基づく面内解析⁷⁾で計算することができる。これを地震応答解析から得られる応答塑性変形と比較することにより、延性き裂の発生を基準にした耐震性能評価が可能となる。その流れは図-1に示す通りである。延性き裂が脆性破壊に転化する条件が未だ解明されていない現段階^{5), 8)}では、延性き裂の発生が直ちに脆性破断に繋がるという実験事実⁹⁾もあるので、延性き裂の成長過程で期待される変形の余裕を無視した安全側の性能評価も有効と考えられる。また、手厚いエンジニアリングが施される高層建築や重要施設建築では大地震でもクラックフリーの要求があり得るので延性き裂を発生させない設計技術を準備しておくことも必要と考えられる。

そこで、本論文では、建築鉄骨接合部でホットスポットとなりうる箇所を兵庫県南部地震による鉄骨接合部の破断被害に基づいて抽出し、その部分の有限要素解析を行って、応力三軸度とひずみ集中度に関するデータを整理した。ただし、考慮すべきパラメータが非常に多いので、この第1報では平面ひずみ状態かつホットスポッ

本論文は、参考文献1), 2)に基づいてまとめたものである。

* 東京大学工学部総合試験所 助教授・Ph. D.

** 東京大学 大学院生・学士(工学)

Assoc. Prof., Eng. Res. Inst., School of Eng., the Univ. of Tokyo, Ph. D.
Grad. Student of the Univ. of Tokyo, B. Eng.

図一 延性き裂の発生を基準にした耐震性能評価の流れ

トに切欠きが存在しない基本となる場合を対象とした。なお、柱梁接合部の応力一ひずみ状態に関して藤本ら¹⁰⁾によるモアレ縞を利用した研究、金多ら¹¹⁾によるひずみ測定に基づく研究、棕代ら¹²⁾による有限要素解析による研究等があるが、図一1に示したような耐破壊設計のスキームに基づいて系統的な応力とひずみのデータを提供したものは今までにない。

2. 破壊起点の分類

1995年兵庫県南部地震における建築鉄骨の破壊起点の代表例を図一2(a), (b), (c)に描いた。図一2(a)は角形鋼管柱とH形梁の溶接仕口に見られた3種類の破壊、つまり、梁端におけるスカラップ底破断、梁端における通しダイアフラムとの接合部破断、および柱端における通しダイアフラムとの接合部破断の起点であり³⁾、これらの部位は後述の解析モデル「スカラップの有る板」、「幅に段差の有る板」、および「T継手」にそれぞれ対応している。図一2(b)は芦屋浜高層住宅の鉄骨柱に見られた2種類の破壊、柱一柱継手の破断および建方用ピースの接合部からの破断の起点であり¹³⁾、これらは後述の「厚みに段差の有る板」および「突起の付いた板」にそれぞれ対応している。図一2(c)はノースリッジ地震¹⁴⁾や実大実験¹⁵⁾で観察された通し柱への梁端溶接仕口に発生したコーナー部破断の起点を示している。このコーナー部は、柱フランジと梁フランジから直交2軸方向へ引張力が同時に作用する後述のモデル「直交2軸引張を受ける板」に対応している。

3. 解析方法

3.1 解析プログラム

用いた解析プログラムはABAQUS(V5.6)¹⁶⁾である。この種の汎用有限要素解析プログラムはいわゆるブラックボックスであり、個々の利用状況における解析システムの信頼性をユーザーである研究者自らが検査することが難しい。そこで、別の汎用プログラムであるMARC(K6.2)¹⁷⁾を用いて代表的な問題を可能な限り同じ条件で解き、両方の結果がほぼ一致していることから解析システムの信

(a) 角形鋼管柱とH形梁の接合部

(b) 柱一柱継手と建方用ピース

(c) 通し柱とH形梁の接合部

図二 鉄骨接合部の破壊起点

頼性を確認した。その比較検討の詳細については文献¹⁾に譲ることとする。

3.2 解析条件とモデル

一般に、脆性破壊は薄い板ではなく比較的厚い板に起こり、力学的には平面応力状態よりも平面ひずみ状態の場合に脆性破壊が起こりやすいことが知られている。そこで、ここでは十分厚みのある板を対象とし、2次元の平面ひずみ状態を仮定して解析を行った。有限要素は4節点四角形要素と3節点三角形要素である。

材料特性としては、建築鉄骨に一般的に使用されかつ400MPa級の軟鋼よりも破壊が顕在化しやすい490MPa級鋼を対象とすることとした。そこで、応力一ひずみ曲線をSN490について得られたデータ($\sigma_y=330\text{MPa}$, $\sigma_u=510\text{MPa}$, $\epsilon_u=22.6\%$)¹⁵⁾を基に図一3の太実線に示すようにモデル化した。なお、降伏後の応力一ひずみ曲線は

材料間でばらつきがあるが、それが本論で対象とした応力三軸度やひずみ集中率に及ぼす影響は大きくないので、ここでは紙面の都合上その考察は省略する。ただし、冷間成形材や490MPaを超える高張力鋼では応力-ひずみ曲線の形がSN490鋼の場合と相当異なり、その影響が無視できない場合があるので、そのような鋼材については別途検討が必要である。

数値解析は変位制御で行った。即ち、ホットスポットから十分離れた断面を自由縁とし、そこに様な強制変位を漸増させ、ホットスポット周辺の応力とひずみの変化を調べた。このとき、Misesの降伏条件、Prandtl-Reussの塑性流れ則、等方硬化則、および非圧縮性の条件を用いた。

メッシュ分割サイズは解の収束性を確認し、計算に要する時間的な経済性も考慮して適切なサイズに決定した。最終的にはホットスポット周辺の要素は1辺が0.4~0.5mmとなった。今回は、ホットスポットに切欠きが無く、大きな塑性ひずみ域を対象としているので、この程度のメッシュ分割で解は収束した。

3.3 応力とひずみの表示方法

解析結果を次の章に示すが、ここでは紙面の都合で、グローバルひずみ e_g (ひずみ集中域から十分離れたところの材軸方向ひずみ) の増加に伴うホットスポットのひずみ集中率 α_e と応力三軸度 τ_s の変化の様子を中心に掲載した。それらは、次のように定義されている。

$$\alpha_e = \frac{e_*}{e_g} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\tau_s = \frac{s_{h*}}{s_{eq*}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

α_e : ホットスポット*のひずみ集中率

τ_s : ホットスポット*の応力三軸度

e_g : グローバルひずみ (軸方向)

e_* : ホットスポット*のひずみ (軸方向)

s_{h*} : ホットスポット*の静水圧

s_{eq*} : ホットスポット*の Mises 等価応力

ホットスポット*は後述のように He 点, Hs 点, R 点, R1点の4ヵ所を採用する。上式中の静水圧 s_h , Mises 等価応力 s_{eq} は次式で計算される。

$$s_h = \frac{1}{3}(s_x + s_y + s_z) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$s_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_x - s_y)^2 + (s_y - s_z)^2 + (s_z - s_x)^2 + 6s_{xy}^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

上式の記号で添え字 x, y, z はそれぞれ軸方向 (外力による強制変位の方向), 軸直交方向, 板厚方向を表わしている。本論で対象としている平面ひずみ問題では、せん断応力 s_{yz} と s_{zx} は零であるので式から除いてある。

応力とひずみは各々真応力 s と真ひずみ e で表示しているが、公称応力 σ と公称ひずみ ϵ とは次の関係がある。

$$s = \sigma \cdot (1 + \epsilon) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$e = \ln(1 + \epsilon) \quad \dots\dots\dots(6)$$

なお、本研究におけるひずみ e_* は序で紹介した既往の研究⁹⁾におけるひずみと同じものではない。これは、本研究がひずみ集中を含む断面の平均ひずみを定義することが困難であるためである。

図-3 材料の応力-ひずみ曲線

ただし、応力三軸度 τ_s については既往の研究⁹⁾と同じ定義であり切欠きの有無の違いがあるだけである。したがって、序で述べた延性き裂発生条件式に本研究のひずみ e_* と応力三軸度 τ_s を当てはめるときはひずみの換算が必要になる。これについては、別途論考する予定である。

4. 解析結果

4.1 円形孔の有る板

先ず、図-4(1)に示す十分広い板の中央に円形孔の有る場合について解析結果を示す。このモデルは、第2章で述べた鉄骨接合部の破壊起点のいずれにも該当しないが、より複雑な他のケースを類推する基本モデルとして有用である。対称性により解析部分は図-4(1)のハッチ部分のみを取り出した図-4(2)となり、上縁は自由縁、左縁と下縁はピンローラー支持の境界条件で、右縁に様な強制変位を与えることになる。孔周辺は図-4(3)のようにメッシュ分割を細かくしている。孔の半径はここでは10としてあるが、相似性が保たれている限り、この値はひずみ集中率や応力三軸度の解析結果には影響を与えない。これは他のケースでも同様であり、解析上の寸法としては現実的な鉄骨接合部を想定してミリ単位の数値を便宜上当てはめた。

この孔あき板のグローバルひずみ e_g は図-4(2)の板の中央点Gにおける載荷方向 (x 方向) のひずみとした。つまり、

$$e_g \equiv e_{x-direction, G} \quad \dots\dots\dots(7)$$

これは、G点を通る x 方向および y 方向の2つのライン上における x 方向ひずみの分布がほぼ一様で、G点のひずみが全体のひずみを代表しているからである。

次に、ホットスポットにおける最も大きな軸方向ひずみが発生する点を He、最も大きな応力三軸度が発生する点を Hs とする。一般に、He 点と Hs 点は一致しない。それは、He 点が表面に存在するのに対し、表面にはそれに直交する応力が存在しないので多軸応力拘束が弱く、Hs 点は表面から内側に入ったところに存在するからである。さらに、やっかいなのは、塑性ひずみの進行とともに He 点と Hs 点がわずかではあるが移動するという点である。そこで、本論では、破壊が構造安全上顕在化するレベルをグローバルひずみでおよそ2.5%と考え、このときの最大ひずみ、最大応力三軸度の発生点をそれぞれ He 点, Hs 点とすることにした。しかし、今回の検討範囲では他のモデルも含めてグローバルひずみが0%~5%

程度までは He 点と Hs 点の移動による最大ひずみと最大応力三軸度の評価誤差は工学的に無視できることを確認してある⁹⁾。なお、不動点であるアールの止端を R 点、その直下 1mm 深さの点を R1 点とし、この 2 点についても応力とひずみの状態を調べた。以上のように定めた He, Hs, R, R1 点の定義は以下のすべてのケースについて共通であり、ホットスポット周辺のメッシュ図にそれぞれ位置を示してある。

さて、円形孔の有る板について、ホットスポットにある上記 4 点のひずみ集中率と応力三軸度がグローバルひずみの進行とともにどのように変化するかが各々図-4(4), (5)に描かれている。

まず、図-4(4)によると、最大のひずみ集中率が発生する He 点(この場合は R 点と一致)では、He 点が G 点に先行して降伏する領域($e_g \leq 0.15\%$)では a_e が非常に大きくスケールアウトしているが、G 点の降伏が進行するにつれて、 a_e は 7~8 の範囲で安定する。R1 点の a_e は R 点と同様の傾向を示すが、値は R1 点より約 1.0 小さい。

(1) 全体図

(2) 全体メッシュ分割

(3) 孔周辺メッシュ分割

応力三軸度が最大となる Hs 点は R 点より深いため a_e が小さい。

次に、図-4(5)の応力三軸度曲線によると、Hs 点の r_s はひずみの進行とともに低下する傾向を示すが、およそ 1.0 前後の値をもつ。He, R, R1 における r_s は比較的小さく、0.6 程度である。今回の解析モデルでは、ひずみ集中域に切欠きが存在しないので、ひずみ集中と応力三軸度が同じ位置に重ならない。両者が重畳する場合は続報で論述する予定である。

4.2 幅に段差の有る板

次に、図-5(1)に示す幅に段差の有る板について述べる。これは、梁フランジがそれより十分幅の広い通しダイアフラムに接合された部分(前出図-2(a))をモデル化したものである。ここでは、ダイアフラムの板厚 t_d が梁フランジの板厚 t_f と等しい場合 ($t_d = t_f$)、1.5 倍の場合 ($t_d = 1.5t_f$)、2 倍の場合 ($t_d = 2t_f$) の 3 ケースの板厚比について示す。板厚はアール部分で直線的に移り変わるものとする。段差部の半径 r については、 $r/b_f = 0.1$ とした。 b_f はフランジ幅の 1/2、つまり図-5(1)の小さいほうの板幅である。

ホットスポットの 4 点 He, Hs, R, R1 の位置を図-5(2)に示す。板厚比が大きいほどホットスポット部分でダイアフラムが弾性にとどまりやすいため、図示のとおり He と Hs は板厚比によって位置が異なる。

グローバルひずみはフランジ部分の中央にある G 点の材軸方向ひずみとし、その増大に伴うホットスポット 4 点のひずみ集中率と

(4) ひずみ集中率とグローバルひずみの関係

(5) 応力三軸度とグローバルひずみの関係

図-4 円形孔の有る板

(1) 全体メッシュ分割

(2) アール部のメッシュ分割

(3) ひずみ集中率とグローバルひずみの関係

(4) 応力三軸度とグローバルひずみの関係

図一五 幅に段差の有る板

応力三軸度が各々図一五(3), (4)に描かれている。これによると、G点の降伏後、He点のひずみ集中率はおよそ2～4の範囲にあり板厚比が大きいほど小さい値となる。逆に、Hs点の応力三軸度は板厚比とともに上昇する。しかし、その傾向はそれほど顕著ではなく、板厚比が1.5程度で既に収束している。

4.3 厚みに段差の有る板

次に、図一六(1)に示す厚みに段差の有る板について述べる。これは、前出図一六(b)における上部柱と下部柱の溶接継手をモデル化したものであるが、基本的には幅に段差の有る板と同じである。しかし、一般に、厚みの段差は幅の段差に比べてと小さいので、ここでは下部柱の厚み t_{c1} が上部柱の厚み t_{c2} の1.25倍の場合 ($t_{c1}=1.25t_{c2}$) と1.5倍の場合 ($t_{c1}=1.5t_{c2}$) の2ケースの板厚比について検討した。ただし、板厚変化部の半径 r については、 $r/t_{c2}=0.5$ とした。

グローバルひずみは厚みの小さい部分の中央にあるG点の材軸方向ひずみとした。アール部分のメッシュ分割を示した図一六(2)にホットスポットの中の4点の位置を示す。

ホットスポット4点におけるひずみ集中率と応力三軸度がグローバルひずみの進行とともにどのように変化するかを各々図一六(3), (4)に描かれている。He点のひずみ集中率やHs点の応力三軸度に及ぼす板厚比の影響は小さい。この場合の板厚比は、前述の幅に段差の有る板における段差比に対応するものである。しかし、厚みに段

差の有る場合は、アールが相対的に大きいので、つまり、 r/t_{c2} が前項の r/b_f より大きいので、ひずみ集中率および応力三軸度は小さくなっている。

4.4 突起の有る板

次に、図一七(1)に示す突起の有る板について述べる。これは、前出図一七(b)における建方用ピースの溶接継手をモデル化したものである。基本的には前述の厚みに段差の有る板とモデルは類似しているが、突起は細長いので突起の突出長さに比べてその幅 w は短くなる。ここでは、突起の幅 w が主材の厚み t_c の0.2倍 ($w=0.2t_c$)、0.5倍 ($w=0.5t_c$)、1.0倍 ($w=1.0t_c$) の3ケースについて検討した。アールについては、 $r/t_c=0.5$ とした。

グローバルひずみは主材部分の中央にあるG点の材軸方向ひずみとした。アール部分のメッシュ分割を示した図一七(2)にホットスポットの4点He, Hs, R, R1の位置を示す。

ひずみ集中率曲線と応力三軸度曲線を示した図一七(3), (4)によると、大ひずみ域では ϵ_g の変化に対してHe点の α_e とHs点の τ_s は比較的安定しており、それぞれ2.0, 0.8程度であり、前述の厚みに段差の有る板と同程度の値となっている。また、 α_e と τ_s に対する突起幅 w の影響は小さい。

4.5 T継手

前出図一七(a)の角形鋼管柱と通しダイアフラムの溶接仕口に代表

(1) 全体メッシュ分割

(2) アール部のメッシュ分割

(3) ひずみ集中率とグローバルひずみの関係

(4) 応力三軸度とグローバルひずみの関係

図-6 厚みに段差の有る板

(1) 全体メッシュ分割

(2) アール部のメッシュ分割

(3) ひずみ集中率とグローバルひずみの関係

(4) 応力三軸度とグローバルひずみの関係

図-7 突起の有る板 (T継手と共通)

(1) 全体メッシュ分割

(2) スカップ周辺のメッシュ分割

(3) ひずみ集中率とグローバルひずみの関係

(4) 応力三軸度とグローバルひずみの関係

図-8 スカップの有る板

される T 継手は、2 次元問題として扱う限りは、上で述べた突起の有る板と同じである。角形鋼管の板厚を t_0 、ダイヤフラムの板厚を w とおけば、前出図-7 がそのまま適用できる。

4.6 スカップの有る板

次に、図-8(1)に示すスカップの有る板について述べる。これは、前出図-2(a)における梁端仕口をモデル化したものである。ただし、左縁は柱に接合されているので固定縁とした。また、破断が問題となるせいの大きい梁では曲げモーメントによる曲率はスカップ底の応力-ひずみ状態にあまり影響を与えないので、ここではモデル右縁に一樣な変位を与えて解析した。スカップ底については円弧がフランジと直交する場合とアールがある場合の 2 ケースを検討した。後者の場合、スカップ半径 $a=40$ に対し、アール $r=10$ とした。

グローバルひずみはウェブにある G 点の材軸方向ひずみとした。ただし、このモデルでは G 点のひずみはフランジ部分の中央のひずみと同等である。スカップ周辺のメッシュ分割を示した図-8(2)にホットスポットの 4 点の位置を示す。

ひずみ集中率曲線と応力三軸度曲線を示した図-8(3), (4)によると、スカップ底におけるひずみ集中率が止端にアールがあるとやや緩和されるとは言え、グローバルひずみが数パーセント以内の範囲で 10 倍を超える大きな値を示している。応力三軸度はそれほど大きくなく、0.9 前後である。

4.7 直交 2 軸引張を受ける板

次に、図-9(1)に示す直交 2 軸引張を受ける板について述べる。これは、前出図-2(c)における柱-梁仕口のコーナー部をモデル化したものであるが、曲げモーメントによる引張応力を軸方向引張力に置換し、せん断力は無視してある。コーナー部の半径は $r=10$ とした。図-9(2)のコーナー周辺のメッシュ図に He, Hs, R, R1 の 4 点を示す。

図-9(3)によると、ひずみ集中率は 1.2 程度でそれほど大きくないことがわかる。これは仕口部が直交 2 軸引張によって塑性拘束が強くなり降伏耐力が上昇するため、塑性拘束のない G 点近傍の降伏が進行するためである。実際には、柱や梁のフランジに作用する引張応力は材軸に沿って変化し仕口位置で最大となるので、これを考慮する必要がある。

次に、図-9(4)によると、アール表面近くの応力三軸度は小さいがモデルの原点に近づくにつれて大きくなり、原点つまり Hs 点では対称性により 2.17 という大きな値となる。

5. まとめ

1995 年兵庫県南部地震で被害を受けた鉄骨接合部の破壊起点を分類し、2 次元平面ひずみ状態にモデル化して有限要素解析を行い、破壊の起点となるホットスポットの応力三軸度とひずみ集中率に関するデータを整理した。今回は、ひずみ集中域に切欠きが存在しない場合を扱ったため応力三軸度が小さくなっている。しかし、実際

(1) 全体メッシュ分割

(2) コーナー周辺のメッシュ分割

(3) ひずみ集中度とグローバルひずみの関係

(4) 応力三軸度とグローバルひずみの関係

図-9 直交2軸引張を受ける板

の鉄骨接合部では、ひずみ集中域に切欠きが存在する場合が多いので、それについては続報にて論述する予定である。さらに、3次元での応力-ひずみ状態や溶接による材質変化を考慮したより精緻なモデルに基づいてデータを今後整備していく必要があるが、先ず手始めに行った今回の単純化されたモデルでの解析により破壊の起点となるホットスポットの応力とひずみ状態に関する基本的な情報が整理できたと考えられる。

参考文献

- 1) 東京大学工学部総合試験所建築方面研究室：『建築鉄骨接合部の応力三軸度とひずみ集中度に関する研究報告書』, 1997.10
- 2) 稲葉雄一郎, 桑村 仁：鉄骨接合部の不連続部における応力三軸度とひずみ集中度, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1998.2
- 3) 日本建築学会：『阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3』 鉄骨造建築物, pp.1-211, 1997.10
- 4) 桑村 仁, 山本恵市：三軸応力状態における構造用鋼材の延性き裂発生条件, 日本建築学会構造系論文集, No. 477, pp.129-135, 1995.11
- 5) 桑村 仁：地震時における鋼構造骨組の破壊現象—材料の側面からの破壊原因と対策—, 日本建築学会大会PD講演資料, pp.33-46, 1995.8
- 6) 桑村 仁, 伊山 潤：シャルピー衝撃試験片と実大破壊部材の破面相関, 日本建築学会構造系論文集, No. 508, pp.127-133, 1998.6
- 7) 桑村 仁, 鈴木孝彦：フランジとウェブの降伏比が異なるH形断面部材の面内塑性挙動（その1．梁の解析）,（その2．梁-柱のCDC数値解析）, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.57-64, 1988.11
- 8) Kuwamura, H.: Fracture of Steel during an Earthquake—State of the Art in Japan—, Engineering Structures, Vol. 20, Nos. 4-6, pp. 310-322, 1998.4
- 9) 桑村 仁, 松本由香, 武谷政國：熱間成形および冷間成形角形鋼管の脆性破壊, 日本建築学会構造系論文集, No. 494, pp.129-136, 1997.4
- 10) 藤本盛久, 佐藤亘宏, 松塚展門：鋼構造柱梁接合部の歪集中に関する実験的研究（その1）, 日本建築学会論文報告集, No. 245, pp.63-74, 1976.7
- 11) 金多 潔, 甲津功夫：鋼構造はり端部のひずみ履歴と疲労強度に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, No. 325, pp.17-24, 1983.3
- 12) 棕代仁朗, 松尾 彰：比較的薄肉の断面を有するH形鋼柱はり接合部の耐力と塑性変形能力に関する研究（その1）, 日本建築学会構造系論文集, No. 375, pp.43-52, 1987.5
- 13) 東京大学工学部建築学科桑村研究室：『1995年兵庫県南部地震被害調査報告—構造物の被害—』, 1995.5
- 14) Skiles, J.L., and Campbell III, H.H.: Why steel fractured in the Northridge Earthquake, Welding J., 73 (11), pp.67-71, 1994.11
- 15) 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, 1997.12
- 16) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.6, 1996
- 17) MARC Analysis Research Corporation: MARC K6.2, 1995

(1998年5月10日原稿受理, 1998年11月9日採用決定)