

建築鉄骨「設計編」*



多賀謙蔵**

Architectural Steel Structure (Structural Design)*

by TAGA Kenzo**

キーワード 建築, 溶接接合, 高力ボルト接合, 柱梁接合部, 脆性的破断の防止

1. はじめに

建築物の骨組みを構成する構造は、主として木造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造に大別でき、我が国の着工床面積データによると、そのうち約1/3を鉄骨造が占め¹⁾鉄骨は建築分野において重要な構造材料となっている。鉄骨造の建物では、鋼材で構成された柱や梁部材が溶接あるいはボルトによって接合されて骨組が形成される。

本稿では、建築において鉄骨はどのように使われるかを例示した後、接合方法として溶接接合を選定する理由ならびにその際の設計上の留意点等について解説する。

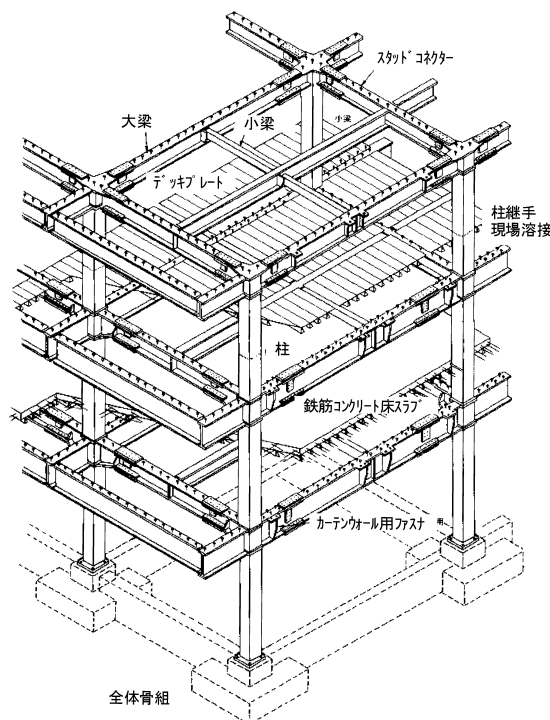
2. 製品概要

2.1 建築における鋼材の使い方

鋼材は、圧縮に対しても引っ張りに対してもその重さに比して剛性と強度が大きく、加工性にも優れた材料である。この特性を利用して、細長い棒材や薄い板材を様々な工夫して組み合わせて比較的少ない材料で大規模な構造物を造ることが可能となる。写真1に示すような大スパン構造や、曲面を有する構造などは鋼構造の特徴を活かしたものである。一方、軽量で工期短縮が可能なこと、鋼材の粘り強さを活かして耐震性能を確保しやすいこと等から、事務所建築をはじめ一般の建物にも鋼構造は多く採用される。図1²⁾に一般的な鉄骨造建物の構成を示す。鉛直部材である柱には、H形断面材、箱形断面材、円形断面材が、水平部材である梁にはH形断面材が主として用いられる。これらの部材は、圧延、溶接組立、プレス成型などの方法で製造される。



写真1 大スパンの湾曲トラス構造



全体骨組

図1 一般的な鉄骨造建物の構成²⁾

*原稿受付 平成23年3月11日

** 神戸大学大学院工学研究科 KOBE UNIVERSITY

鋼材種としては、引張強度が $400 \text{ N/mm}^2 \sim 490 \text{ N/mm}^2$ クラスのものが最もよく用いられる一方、エネルギー吸収能力に優れた低降伏点鋼材や、弾性限度が高い高強度鋼材も高層建築物などで採用されている。(建築鋼材に関しては「材料」の頁で詳述される。)

鋼材の長所を活かした構造を実現するためには、細長い材や薄い材を如何に安定的に挙動させるか、そしてこれらを如何に効率よく繋ぐかにかかっている。すなわち鋼部材の“補剛”と“接合”が鋼構造の設計の基本であるといっても過言ではない。

2.2 建築における鋼材の接合

鉄骨造建物では、H形断面や箱形断面などからなる部材同士をつなぎあわせ、組み立てることによって骨組みを構成する。部材同士の「接合部」にはいろいろな種類があるが、日本建築学会では、次のように用語を定義している³⁾。

接合部：二つ以上の部材が接合される部分の総称

継手：部材をその軸方向に接合する方法またはその部分

継目：部材のつなぎ合わせ目

仕口：二つ以上の部材が直角またはある角度をもって接合される部分

接合部は、接合の方法別に溶接接合、高力ボルト接合、中ボルト接合などに、また接合部の剛性別には、剛接合、半剛接合、ピン接合に、それぞれ分類できる。ここでは建築鉄骨において代表的な接合方法である高力ボルト接合と溶接接合の概要ならびに両者の選択にあたっての基本的な考え方を示す。

(1) 高力ボルト接合

高力ボルト接合では、初期導入張力(引張接合の場合)およびこれによって生じる部材間の摩擦(摩擦接合の場合)が力の伝達の基本となる。したがって、図2に示すような高力ボルトを用いた接合部においては、ボルト自身も機械的な性質、ボルトに与えられる張力、またそれによって期待できる摩擦係数などがその性能を支配する。高力ボルトは工業製品であり品質のばらつきが小さいこと、施工における管理・監理の手間が溶接接合と比べて少なくて済むことなどが長所である。

(2) 溶接接合

建築においては、溶接方法としてはガスシールドアーク溶接、被覆アーク溶接、エレクトロスラグ溶接、サブマージ溶接などが、また接合方法によって、隅肉溶接、完全溶込み溶接、部分溶込溶接などが主に用いられる。部材に作用する力を溶接金属が次の部材へと伝達しなければならないので、溶接金属自身も強い強さ、靱性などが構造物の性能を支配する。高力ボルト接合と比べて、コンパクトで剛性の高い接合部とできることが主な長所であり、建築物における代表的な接合部である柱梁接合部では、図3³⁾に示すように各種の溶接方法が用いられている。

(3) 溶接接合と高力ボルト接合の選択

溶接接合と高力ボルト接合の主な留意点、短所は次のようである。

溶接接合：

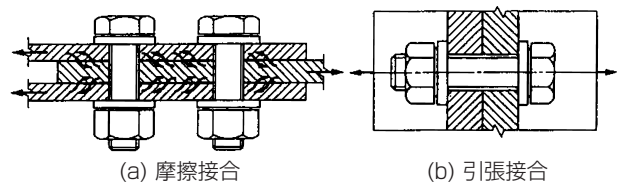


図2 高力ボルト接合の形式

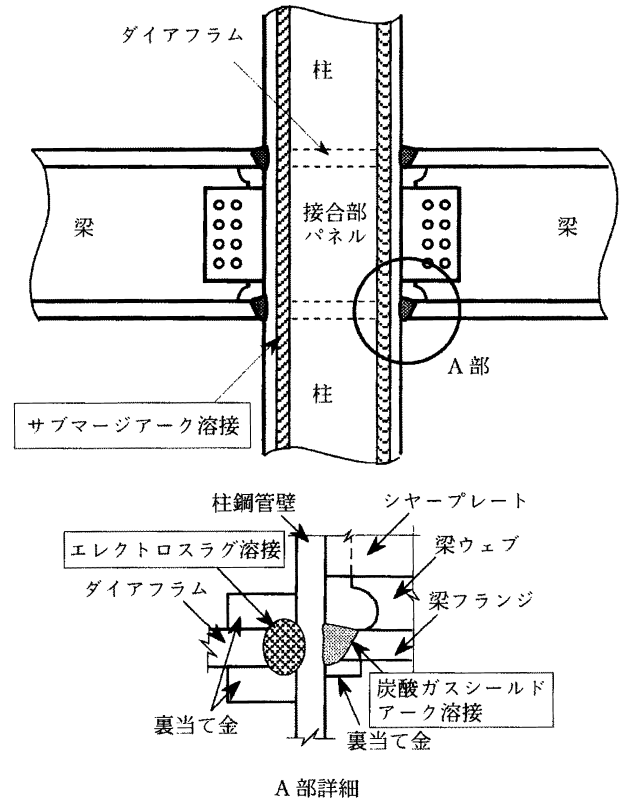


図3 建築鉄骨の柱梁接合部に用いられる各種溶接方法の例³⁾

- ・溶接部の性能を左右する要素が多く(溶接工の技能、溶接条件など)一定の品質を確保するためには、相応の管理が必要となる。
- ・溶着金属が冷却するときの収縮変形に対する配慮が必要である。

高力ボルト接合：

- ・部材にボルト孔をあける必要があるため、断面欠損が生じる。
- ・初期導入軸力や摩擦面に関する管理が必要となる。
- ・閉断面の接合は基本的に不可である。
- ・板厚が厚い場合は、接合ボルト本数が多くなり、添板の寸法が大きくなる。

以上により、溶接接合が必然的に選択されるのは次のような場合である。

- ①設計上、接合部において断面欠損が許容できないような場合
- ②閉断面柱の接合のようにボルトの施工が困難な場合
- ③納まり上(外装材ファスナーの取り合いなど)添板、ボルト頭が邪魔な場合

上記以外で両者の適用が可能な場合は、接合部に作用する応力や施工性を考慮して決定される。

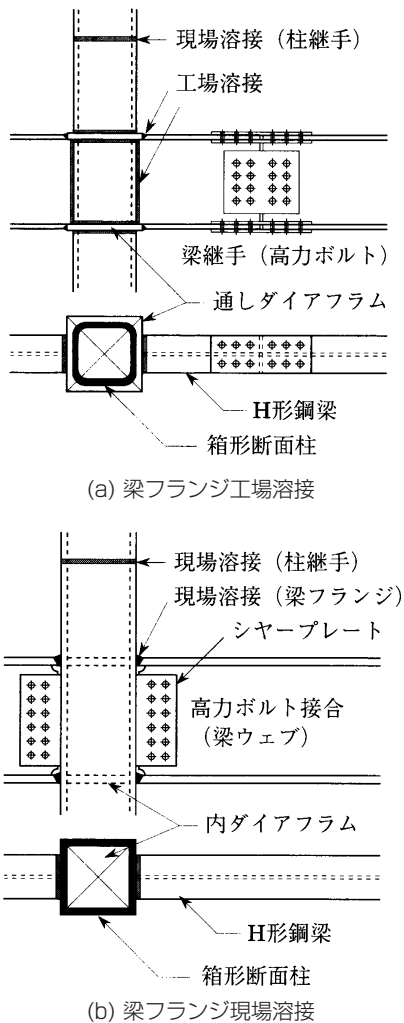


図4 角形鋼管柱—H形梁の代表的な柱梁接合例⁴⁾

柱に箱形断面（角形鋼管）を用いるラーメン構造が建築で現在最も多用されており、その典型的な柱梁接合部を図4⁴⁾に示す。施工性および工事現場における品質管理の容易さから、図4(a)のように工場製作の範囲は溶接接合とし、現場施工では高力ボルト接合を用いる、という使い分けが一般的であったが、近年建設コスト低減のための方策のひとつとして、図4(b)のように現場においても溶接接合が多用されるようになってきている。

2.3 鉄骨製作工場の大員認定制度と資格制度

建築鉄骨の製作工場については、従来、建設省告示第1103号により「高度な品質を確保し得る溶接作業能力」を有するか否か（該当しない場合には、溶接継目の強度を母材強度の90%に低減しなければならない）が認定され、また、鉄骨加工業者の団体である鉄骨建設業協会（鉄建協）および全国鐵構工業連合（全構連）が製作能力などに関する自主認定グレードをそれぞれ設けていた。

平成12年の改正建築基準法の施行に伴い、告示第1103号の規定に基づく認定制度は撤廃され、新たに同法68条の26の規定による工場の性能評価に基づく大臣認定が開始された。これは建築基準法の性能規定化の主旨に基づき、鉄骨製作工場において溶接された鉄骨の溶接部の性能を評価するものであり、溶接を伴う建築構造物を、表1に示すように建築規模・使用する鋼材等により5つの

表1 鉄骨製作工場のグレード別適用範囲

グレード	適用範囲
J	1. 鉄骨溶接構造の3階以下の建築物（延べ床面積500㎡以内、高さ13m以下かつ軒高10m以下） 2. 400N級鋼で板厚16mm以下の鋼材。ただし…（以下略） 3. 作業条件の原則として下向き姿勢とし、溶接技能者の資格はSA-2FかA-2Fとする。ただし…（以下略） 4. 溶接材料と入熱、パス間温度の組合せは別表による。ただし…（以下略）
R	1. 鉄骨溶接構造の5階以下の建築物（延べ床面積3,000㎡以内、高さ20m以下） 2. 400N及び490N級鋼で板厚25mm以下の鋼材とする。ただし…（以下略） 3. 作業条件の原則として下向き姿勢とし、溶接技能者の資格はSA-3FかA-3Fとする。ただし…（以下略） 4. 溶接材料と入熱、パス間温度の組合せは別表による。ただし…（以下略）
M	1. 鉄骨溶接構造の400N及び490N級鋼で板厚40mm以下の鋼材とする。ただし…（以下略） 2. 作業条件は下向き及び横向き姿勢とする。溶接技能者の資格はSA-3Fと3HかA-3Fと3Hとする。 3. 溶接材料と入熱、パス間温度の組合せは別表による。ただし…（以下略）
H	1. 鉄骨溶接構造の400N、490N及び520N級鋼で板厚60mm以下の鋼材とする。ただし…（以下略） 2. 作業条件は下向き、横向き及び立向き姿勢とする。溶接技能者の資格はSA-3Fと3H及び3Vか、A-3Fと3H及び3Vとする。 3. 溶接材料と入熱、パス間温度の組合せは別表による。ただし…（以下略）
S	1. 全ての建築物の溶接部とする。 2. 使用する鋼種及び溶接材料に適合した適切な作業条件を自主的に計画し、適切な品質のものを製作できる体制を整えていること。

別表：入熱・パス間温度の管理値（性能評価基準）

鋼材の種類	溶接材料	入熱 (kJ/cm)	パス間温度 (°C)
400N 級鋼	JIS Z 3211,3212	40 以下	350 以下
	YGW-11,15		
	YGW-18,19		
	JIS Z 3214		
	YGA-50W,50P		
490N 級鋼	JIS Z 3212	40 以下	350 以下
	YGW-11,15	30 以下	250 以下
	YGW-18,19	40 以下	350 以下
	JIS Z 3214		
	YGA-50W,50P		
520N 級鋼	YGW-18,19	30 以下	250 以下

表2 鉄骨工事に関わる技術者、技能者の資格一覧

	資格名称
鉄骨構造の設計者に関わる資格	1,2級建築士 構造設計1級建築士
鉄骨製作管理技術者に関わる資格	鉄骨製作管理技術者
溶接管理技術者に関わる資格	溶接管理技術者 WES1,2、特別級 エンドタブ溶接管理技術者
品質検査技術者に関わる資格	建築鉄骨製品検査技術者 建築鉄骨超音波検査技術者 各 NDT の方法毎にレベル1~3 AWA 検査技術者
建築鉄骨溶接技能者に関わる資格	溶接技能者 JIS 資格 AW 検定資格 エンドタブ溶接施工者資格 溶接作業指導者 スタッド溶接技術検定資格
鉄骨構造の工事監理者に関わる資格	1,2級建築士 構造設計1級建築士
鉄骨工事の現場施工技術者に関わる資格	鉄骨工事管理責任者 建築高力ボルト接合管理技術者

グレードに区分している。

一方、我が国においては、建築鉄骨の品質確保を目的として、表2に示すような技術者（管理者）資格、技能者資格が存在し、(社)日本溶接協会、(社)日本鋼構造協会、AW 検定協議会等の機関により資格付与あるいは認定が行われている。

これらの資格の中には、要求技量が似かよったものなどがあり、資格者の対応業務区分が不明確であること、資格取得への経済的負担が大きいこと、等の課題を抱えながらも、前述した工場の性能評価を取得するためや設計図書仕様を守るために、このような多くの資格が鉄骨製作工場に要求されている。

3. 溶接構造物としての設計思想

3.1 接合部を設ける位置と継目の強度

高力ボルト接合も含めて、接合部ではその部位に作用する応力を把握し、その応力以上の接合部耐力を付与しておくことが基本になる。したがって接合部をできるだけ応力の小さい部位に配置することが設計の基本方針となるが、柱と梁で構成される建築の一般的なラーメン構造では、力学的な条件の厳しいところに接合部を設けざるを得ない。

溶接継目の強度は、この厳しい条件下での接合を前提として、接合される鋼材と同等以上の強度（降伏点または0.2%耐力および引張強さ）を有する溶接材料を使用すべきことが、建築基準法の告示（平12建告第1464号）に示されているので、オーバーマッチングを前提に溶接継目を設計することになる。

かつては2.3で述べたように溶接継目の強度を母材強度の90%に低減しなければならない時代もあり、この場合にはいやがうえでも溶接部を意識した設計をせざるを得なかったが、現在では上記のような前提となっているため、設計者が「溶接部」をあまり意識しなくなった、という懸念もある⁶⁾。

3.2 柱梁接合部の設計

我が国の建築物の構造設計においては、地震荷重が支配的になる場合が多く、かつ発生頻度の少ない大地震に対しては、鉄骨造の長所でもある部材の塑性化を許容する設計が一般的であり、この場合は部材の塑性変形能力を発揮させるために塑性化後の耐力上昇等も含めた応力状態を想定する必要がある。

図4に示すような柱梁接合部は部材端部の集約部であるため、大きな曲げモーメント、せん断力および軸方向力を伝達しなければならない。大地震時には図5⁷⁾に示すように梁が先行して塑性化するように断面設計を行う場

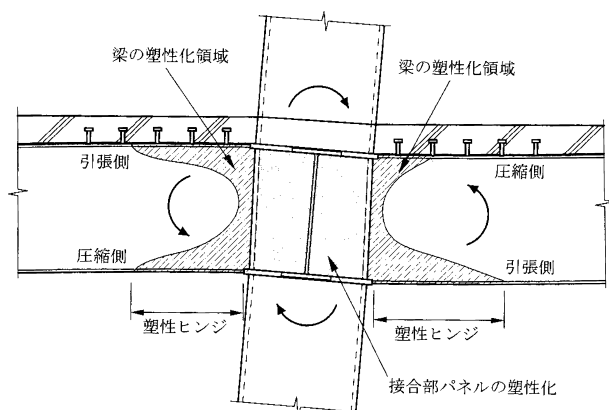


図5 柱梁接合部周辺の塑性化⁷⁾

合が一般的であり、この場合、梁の接合断面には部材の降伏応力を超える応力が作用するため溶接部はこの応力に対して十分な耐力を有していなければならない。

梁端接合部に要求される最大耐力は次式で表わされる。

$${}_jM_u \geq a \cdot {}_bM_p \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに ${}_jM_u$: 梁端接合部の最大曲げ耐力

${}_bM_p$: 梁の全塑性モーメント

a : 梁端の接合部係数

a は継手部での応力集中、鋼材の降伏点のバラツキやひずみ硬化の影響、部材の塑性化や崩壊メカニズム予測の不確実性等を考慮して設定する必要があるとされ設計実務で多用されている技術基準解説書⁸⁾では、400N級鋼材に対して1.3、490N級鋼材に対して1.2が提示されている。また、建築学会の鋼構造接合部設計指針⁹⁾ではSS400材：1.4、SN400材：1.3、SM490材：1.35、SN490材：1.25と若干大きめの値が示されている。(1)式において、溶接接合部側の耐力を評価する場合、溶接継目の引張強さを用いて評価する。すなわち、建築における主要な溶接接合部に対する基本的な設計思想は、「被接合材が塑性変形能力を発揮できるように、被接合材と同等以上の耐力を付与すること」ということができる。

4. 溶接接合部の特徴と要求性能

4.1 柱梁接合部における脆性的破断の懸念

これまで述べてきたように、建築鉄骨では種々の接合形式があるなかで、ラーメン構造における柱梁接合部の重要度が高い。ここではこの部位における溶接継手の特徴と要求性能について述べる。

兵庫県南部地震での注目すべき被害現象のひとつとして、「鉄骨造ラーメン架構の柱梁接合部近傍の脆性的破断」がみられた⁹⁾。これは、ねばりのある構造と考えられていた我国の鉄骨構造が受けた少なからず衝撃的な洗礼であった。3.で述べたように、建築物では水平荷重時に大きな応力が発生する柱梁の交点を溶接接合によって形成するという厳しい設計が一般に行われるため、これらの現象に関する研究は、震災以前からも行われていたが、これを機にさらに研究が進み、解決すべき課題が明らかになってきた¹⁰⁾。

脆性破壊は1) 引張り力が働くこと2) 大きな応力集中源（亀裂・欠陥）が存在すること3) 材料が脆い（破壊靱性が低い）ことという3つの要件が重なったときに生じるとされるが、建築鉄骨で激震時に脆性破壊が生じ得るのは、これらの要件を助長する、次のような要因が存在するからである（図6¹⁰⁾）。

- ① 終局強度設計がなされていて、破壊発生部に生じる変形レベルが大きい。
- ② 主として溶接施工によって作り上げられる形状の不連続部の存在が避けがたい。
- ③ 溶接施工によって、破壊靱性の低下が生じることがある。
- ④ 地震時の拘束変形によって、破壊発生部の応力が高くなる。

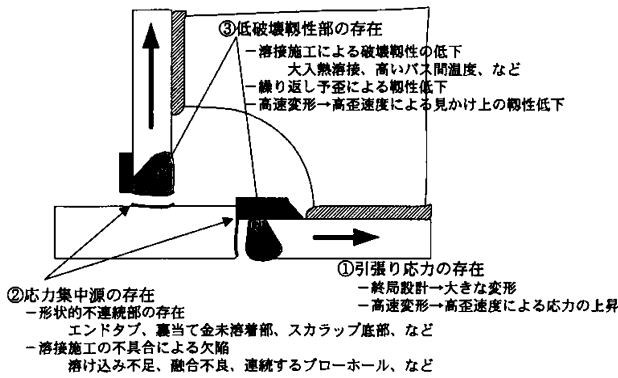


図6 建築鉄骨において、激震時に三つの要件を助長する要因¹⁰⁾

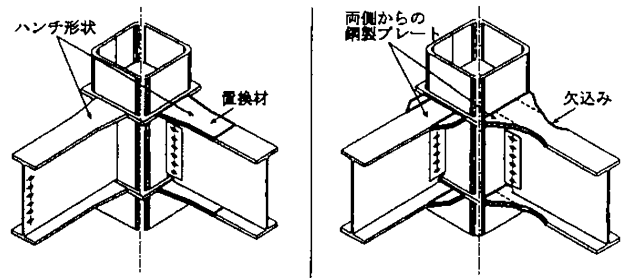


図7 梁端部の断面形状の工夫による応力集中の緩和例³⁾

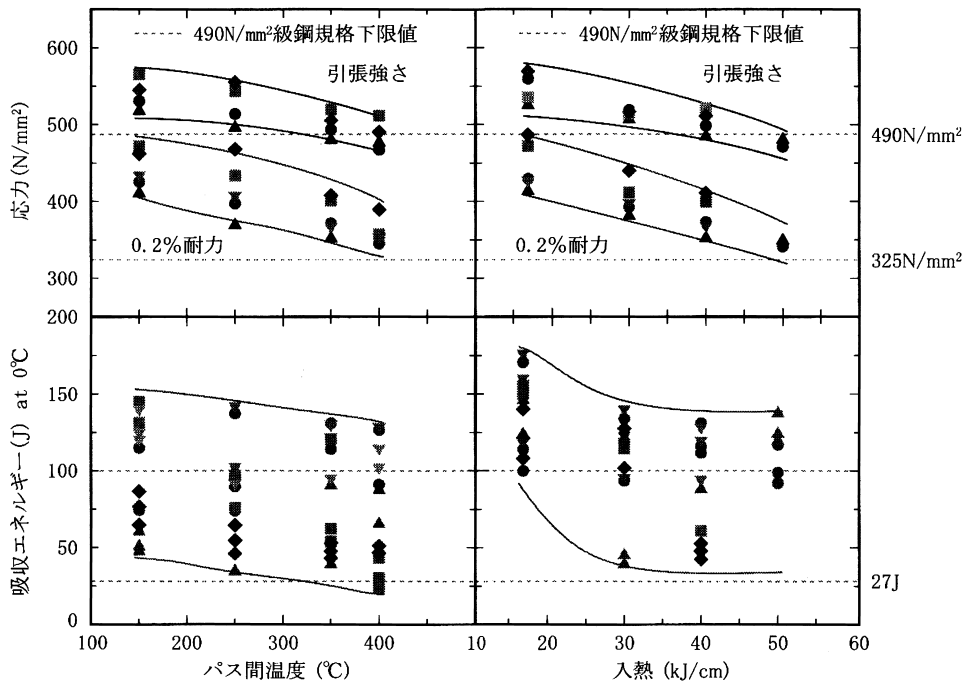


図8 強度、靱性に及ぼす溶接条件の影響¹¹⁾

⑤ 破壊に先立って、大きな変形レベルの繰り返しを受け、予歪効果によって破壊靱性の低下が生じる。

4.2 脆性的破断の防止

前述のように、脆性破壊は3つの要件が重なったときに生じるのであるから、以下のいずれかにより要件を排除することが、脆性破壊を避ける基本となる。

- (1) 大きな引張り力（大変形）を生じさせない
 → 構造設計上の配慮または免震・制震など構造システムの工夫により部材に大きな引張力が作用しない構造設計をする。[設計上の対策]
- (2) 応力集中を避ける
 → 応力集中の少ない接合部ディテールを採用する。図7³⁾のような梁端水平ハンチなど。[設計上の対策]
 ・ 入念な施工と検査により、応力集中源となり得る溶接欠陥を排除する。[施工上の対策]
- (3) 材料特性に対する配慮（破壊靱性の確保）
 → SN材の適切な使用など、十分な破壊抵抗を持つ材料を選択する。[設計上の対策]
 ・ 図8¹¹⁾に示すような入熱・パス間温度などの溶接条件の管理などにより、溶接接合部の破壊靱性を確保す

る。[施工上の対策]

震災後の諸研究の成果として纏められた「鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン¹²⁾」では、梁端溶接接合部の継手破断耐力を確保するための性能を母材および溶接部のシャルピー衝撃値と関連づけて要求し ($vE_{act} \geq 70J$ など)、そのための材料選定や溶接条件などを示している。

4.3 溶接施工に対する要求仕様の明確化の必要性

脆性的破断を防止するためには、上記のように、破壊靱性の高い材料（一般に高コスト）を使うことと、不具合を排除するための他の手法、をコストとの兼ね合いで選択することになる。しかしながら、現状では、不具合を排除するために要するコスト、特に溶接施工に起因する品質を向上させようとしたときに、それに要するコストが正当に評価されているとは言い難い。

これは、例えば、次の2ケースのコスト比較を客観的かつ公平に行う、ということである。

手法A：梁端溶接接合部を含めて「大きなエネルギー吸収能力」を要求する。溶接施工にいくつかの付加要求事項がある。

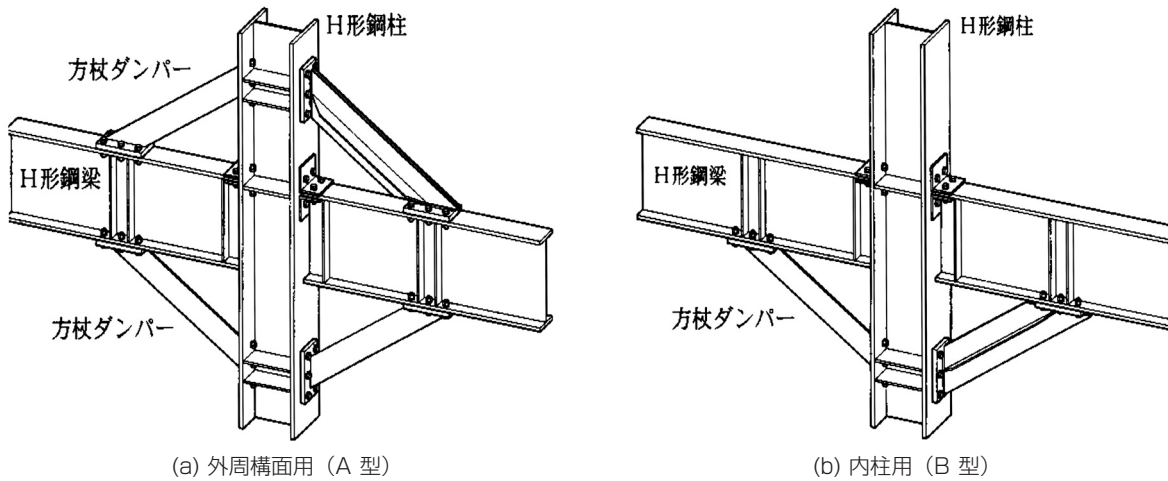


図9 突き合わせ溶接を行わない制震接合システムの接合形式¹³⁾

手法 B：設計ディテール上の対応により，梁端溶接接合部には大きな引っ張り応力を生じさせないようにしつつ手法 A と同等の耐震性能を確保する．溶接部は一般的な突き合わせ溶接．

溶接部の性能に優劣があってよいか？という点でも議論が分かれるところであるが，仮に上記のような 2 ケースが選択可能であった場合，どちらを選択するかによって，溶接施工に対する要求が明らかに異なってくる．

溶接施工に対する要求仕様を明確にするためには，溶接接合部の製作・管理条件と力学的性能の関係がより明確にされることが望まれる．一方，この関係を踏まえて，構造設計者は施工に対する要求仕様を十分吟味し，明示していく必要がある．

4.4 柱梁接合部の今後の可能性

震災の経験およびそれを契機とするその後の研究等により，鋼構造が本来有すべき“ねばり”を発揮させるために「塑性変形を期待する梁端が溶接接合である場合，その溶接部に期待される性能を発揮させるためには，従来以上の高靱性材料の選択ならびに入念な施工管理が必要である」との方向性が示されていると言える．

これは，梁端部に塑性ヒンジを形成させてエネルギー吸収を図るといって我が国の耐震設計の常套手段を見直すきっかけともなっている．すなわち，「そもそも部材の最大応力発生位置で，溶接接合してよいのか？」というあたりまえの議論と，極端には「溶接接合そのものを回避しよう」とする指向の再燃である．

具体的には図 7 に示すような，梁端拡幅フランジやドッグボーン（RBS）の採用による母材での塑性化の保証や，図 9¹³⁾に示すような積極的なダンパーの活用である．

一方，図 10¹³⁾に示すような bolts 耐力を従来の約 1.5 倍に向上させたトルシア型超強力ボルト（SHTB）や，一方のみからの取り付け，締め付けが可能なトルシア型高力ワンサイドボルト（TCBB）などが実用化され，高力ボルト接合の短所とされていた点がカバー可能となっている．

これらを背景として，図 11¹³⁾に示すような柱—梁接合部が見直されあるいは新たに提案されている．

“溶接接合部に塑性ヒンジを期待できるための相応の

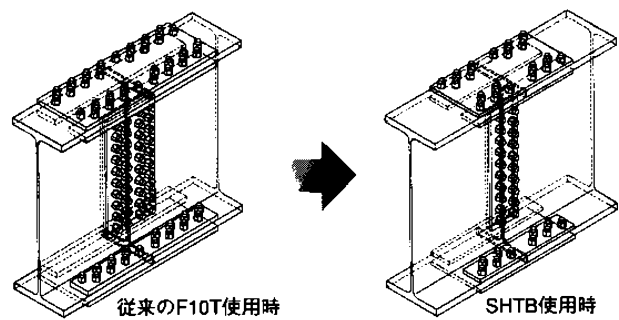


図 10 SHTB を適用した梁継手例¹³⁾

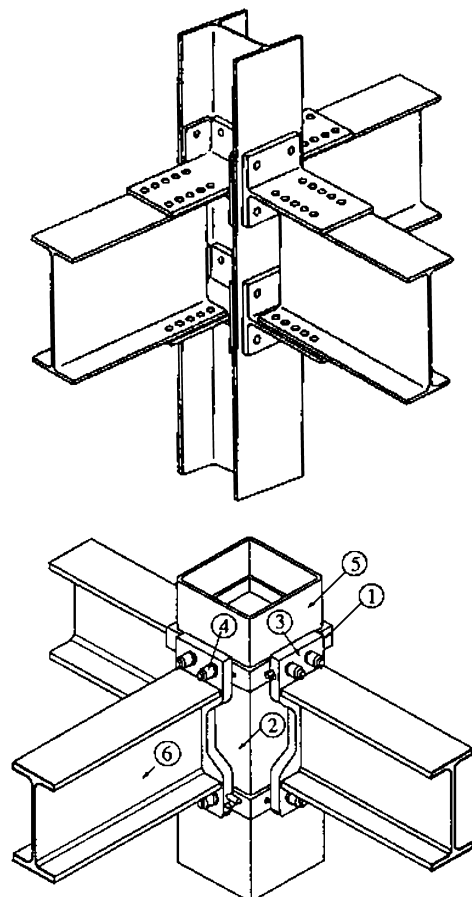


図 11 突き合わせ溶接に頼らない柱梁接合の提案¹³⁾

材料選択と施工管理ならびに検査”に要するコストが明らかになってくれば、このように“できるだけ溶接に期待しない”接合が普及する可能性があり得る。

5. おわりに

“建築鉄骨における溶接接合”というテーマに対して、一般建築物の耐震性能確保の観点から、私見を交え解説した。兵庫県南部地震から約16年が経過し、その被害教訓に基づく種々の研究が確実に成果を上げているが、実務上の対応については、設計上の要求性能の明確化等今後の課題も多く、未だに試行錯誤が続いている感がある。本来の長所を活かした鋼構造の健全な発展のために、貴重な研究成果を活かし、設計者・材料メーカー・施工者が連帯意識をもって解決していくことを期待する。

参考文献

- 1) 例えば国土交通省ホームページ。
- 2) 日本建築学会：構造用教材，1995年。
- 3) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2001年制定，2006年改定。
- 4) 井上一朗，吹田敬一郎：建築鋼構造—その理論と設計—，鹿島出版会，2007年。
- 5) 社団法人日本鉄鋼連盟：鉄骨関連技術者・技能者資格の制度改革への提言，2004年。
- 6) 護雅典：溶接接合のあるべき姿，structure No.115，2010年7月
- 7) 日本建築学会：溶接接合設計施工ガイドブック，2008年。
- 8) 国土交通省住宅局建築指導課他監修：2007年版建築物の構造関係技術基準解説書，2007年8月。
- 9) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書，1995年。
- 10) 豊田政男：なぜ破壊韧性が必要なのか，鉄構技術，1997年11月号。
- 11) 向井他：建築構造用マグ溶接ワイヤの検討，日本鋼構造協会鋼構造論文集，Vol7, No.26, 2000年。
- 12) 日本建築センター：鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説，2003年。
- 13) [特集]：合理的な柱－梁接合部，鉄構技術，2002年2月号。