

溶接管理技術者の体験紹介

柱梁接合部のぜい性的破断防止対策について
取り組んできたこと

株式会社竹中工務店
鈴木直幹

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震（阪神大震災）は建築構造物や土木構造物に対して大きな被害をもたらした。中でも鋼構造建築物においては、建築構造に関わる溶接管理技術者や構造技術者が従来想定していなかった柱梁接合部のぜい性的破断の事例が多数報告され、私達に衝撃を与えた（図1）。



図1 兵庫県南部地震における柱梁接合部の被害

また、構造技術者が設計時に考えている「大地震時には部材の塑性変形により地震エネルギーを吸収し、主架構（主に大梁の端部）に損傷は生じるものの、崩壊・倒壊を防ぎ人命および財産を守る」という思想・設計法が必ずしも一般社会に受け入れられないことが明らかになった。

筆者は、この地震後にそれまでの溶接設計、構造設計に対する自らの考え方を反省し、特に地震被害の多かった柱梁接合部のぜい性的破断に対して、一人の溶接管理技術者・構造技術者としてこの問題に取り組み、実務に活かしてきた。無論、建築界として産官学全体で原因究明や技術開発がすすめられ今日に至っているが、ここでは筆者が阪神大震災以降に取り組んできた活動を中心に個人の経験を述べる。

2. 鋼構造建築が抱える柱梁接合部の問題点と課題

一般に建築鉄骨では長期荷重時、水平荷重時（地震や風など）ともに最大応力位置となる柱梁接合部（図2）で溶接接合を行う必要がある。一番大切な部分に溶接接合が用いられており、鋼構造建築の性能は溶接接合部の性能に依存していると言っても過言ではない。

さらに、溶接作業自体も比較的幅が狭く板厚の厚いH形鋼のフランジを溶接することから入熱量・パス間温度などが非常に厳しい条件となる。また、工程上の問題でノンブラケットとし、柱梁接合部

を工事現場溶接とせざるを得ない場合があるなど、求められる構造性能に対して溶接条件は厳しくなっている。

筆者は、鋼構造建築の柱梁接合部には以下に示す問題点および課題があると考えた。

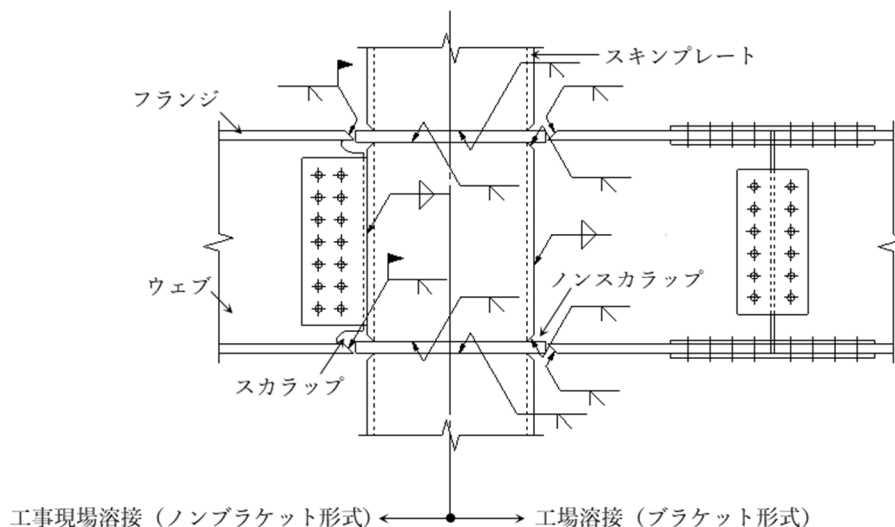


図2 柱梁接合部

① 柱梁接合部全般

スカラップ形状の工夫や、ノンスカラップ工法の採用など様々な研究者・実務者から提案がなされているが、建物に要求される変形のレベルは様々であるとともに、ウェブの接合形式も高力ボルト・すみ肉溶接・完全溶け込み溶接などバリエーションがあり要求性能に見合った最適の組み合わせが明確ではない。

② ノンブラケット工法

i) 現場混用接合

工事現場において、梁端フランジを柱と完全溶け込み溶接とし、梁ウェブを高力ボルト摩擦接合とする現場混用接合(図3)は、ブラケットが無いとため部材の運搬効率が良いこと、ボルトやスプライスプレートの鋼材量が低減できるなどのメリットがあるため、かつて多用されてきた。しかしながら、現場混用接合にはウェブ接合部の曲げ伝達効率の低下や、下フランジが内開先になることにより溶接欠陥の影響を受け易くぜい性的破壊が生じやすいなど、工場溶接接合に比較して慎重な設計、工事監理および施工を行わないと性能低下につながり易いというデメリットがある。

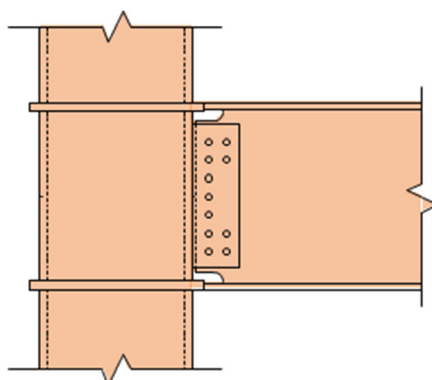


図3 現場混用接合

ii) 梁フランジ・ウェブとも工事現場溶接とするノンブラケット工法

前述の現場混用接合のデメリットを克服する工法として、梁ウェブを高力ボルトではなく梁端フランジと同様に工事現場溶接とする工法が用いられている。しかし、工事現場で溶接を行うという特性上、スカラップは不可避であり、ノンスカラップ工法が主流となってきた工場製作のブラケットタイプに比較すると、ウェブ接合部の曲げ伝達効率が下がるため性能面ではワンランク落ちると言わざるを得ない。

③ 改良型柱梁接合部

溶接部を最大応力位置としない工夫として梁端フランジを拡幅するなどの改良工法（図4）が提案されているが、前述したウェブ接合形式の影響が当時は明確でなかった。



図4 梁端拡幅による改良工法の例（現場混用接合）

④ 鋼材系制振部材

柱梁接合部を大地震時にも弾性に保つために制振構造の採用が考えられる。鋼材系制振部材は比較的小さな地震から降伏を許容することで効率的に地震エネルギーを吸収する。そのため耐震部材に比較して大きなエネルギー吸収能力を必要とされる。しかしながら、元々耐震部材として開発された部材を制振部材として活用するにあたり、鋼材系制振部材や部材を構成する溶接部の低サイクル疲労特性が不明であった。

⑤ 社会に対する説明責任

柱梁接合部のディテールと変形性能の関係を明解に建物所有者に説明し、「大地震時の壊れ方」あるいは「壊さない」とするか合意手段を持っていなかった。

3. 解決策の立案と実施

前述した各課題に対して以下に述べる対策を立案・実施した。また課題解決にあたっては筆者が当時所属していた設計部門だけでは困難であったため、一時的に技術研究所に異動した。そして再び設計部門に戻ってきてからも継続して課題に取り組んできた。

① 柱梁接合部全般に対して

入熱量、パス間温度などの溶接条件は規定を守った上で、スカラップの有無、形状、ウェブの接合形式、柱スキンプレートの幅厚比などをパラメータとして構造実験およびFEM解析を実施し、各ディテールの破断に至るまでの変形性能を明らかにした。これによりぜい性的破断を防止しながら建物の特性や鉄骨製作工場に合ったディテールの採用が可能となった。

検討結果の一例を図5に示す。グラフの縦軸は梁端モーメント M 、横軸は梁端回転角 θ である。また、図中の M_p は全塑性モーメント、 M_{pw} はウェブの全塑性モーメントを示す。パラメータとなる柱の幅厚比は柱径 (D) を板厚 (t) で除した値であり、中空部を無くしたものを便宜的に $D/t=0$ と表記し、0、10、20、30、40 に関して解析を行った。図5ではノンスカラップ (グラフ左) とスカラップ 35R (グラフ右) の $D/t=0$ と $D/t=30$ の比較を行っているが、スカラップや柱スキンプレートの幅厚比の影響によりウェブの伝達効率が落ちることが示されている。

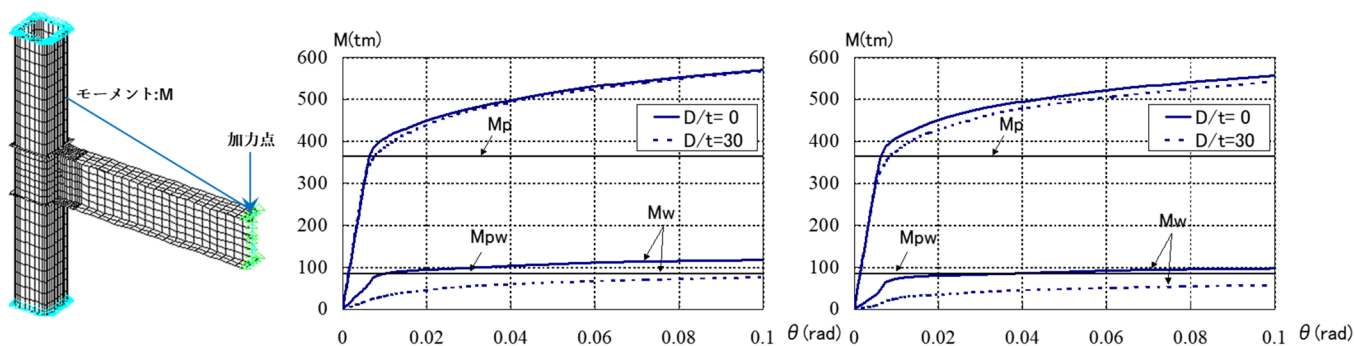


図5 柱幅厚比・スカラップ有無による変形性能の違い

② ノンブラケット工法に対して

i) 現場混用接合

現場混用接合は性能が低いため、ある程度の規模以上の建築ではあまり用いられない状況であったが、社会的にはまだ一般的な工法の一つである。

筆者のこれまでの経験を活かして、日本建築学会接合小委員会のメンバーとして現場混用接合の設計・施工上の注意事項を検討した。さらに、その結果を設計・工事監理上の留意点、材料・工法・施工上の留意点、設計法の試案としてまとめ日本建築学会のシンポジウム¹⁾で発表している。

ii) 梁フランジ・ウェブとも工事現場溶接とするノンブラケット工法

まず、現場混用接合に比較するとフランジ・ウェブとも工事現場溶接とする工法は変形性能が良いことを構造実験により明らかにした。しかしながら工場溶接接合のノンスカラップ工法と比較すると変形性能が劣ることが次の課題となった。これに対しては鉄骨製作工場とスカラップ形状についての試行錯誤を重ね、工事現場でフランジ・ウェブの完全溶け込み溶接が終わった後にスカラップを充填する工法を開発し、工場溶接接合のノンスカラップ形式と同等の性能があることを確認した。さらに建築物では上フランジに鉄筋コンクリートスラブが設置されることが多く、水平力伝達の観点から梁上フランジにはスタッドボルトが設置されている。これにより中立軸位置が上フランジ側になることに着目し、スカラップ充填を下フランジのみとする工法を考案し構造実験を行った。結果として上下とも充填する工法と同等の性能を有することを確認し、溶接施工の合理化を図ることが

できた (図 6)。なお、スラブが設置されることによる梁耐力の上昇については設計上評価せず剛性のみ評価することが建築鉄骨では一般的である。



図 6 スカラップ充填を下フランジのみとする工法の構造実験

③ 改良型柱梁接合部に対して

梁端フランジ拡幅工法のウェブ接合形式の違いをパラメータに構造実験、FEM 解析を行った。図 7 では実験における荷重変形関係、骨格曲線と FEM 解析による荷重変形関係を示すが、改良の効果でウェブの伝達効率の違いが塑性変形倍率に及ぼす影響がわずかであることを確認した (図 7)。実施プロジェクトではこの結果をもとに施工性・溶接性に優れた工法を選定しぜい性的破断を防止した建築を提供することができた。

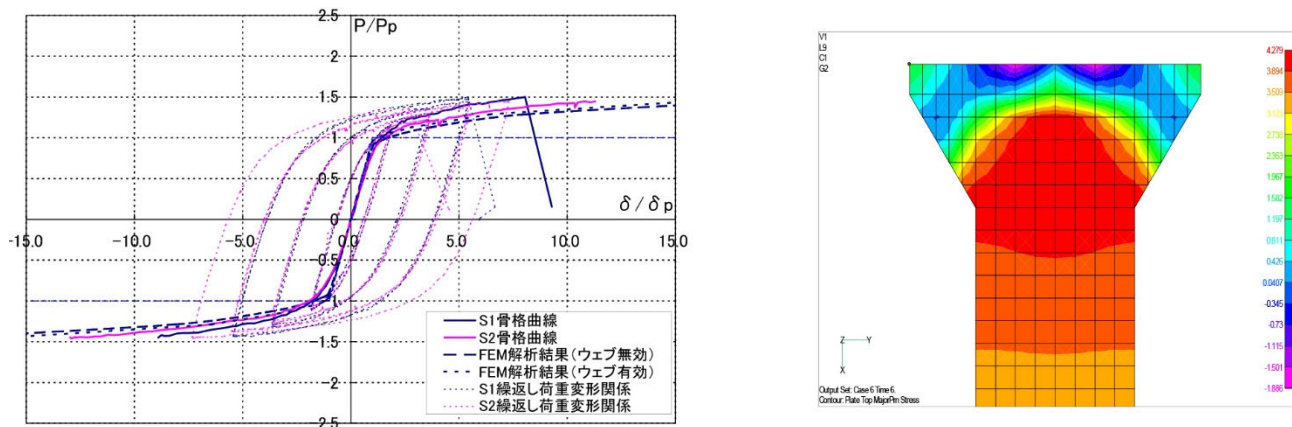


図 7 改良型柱梁接合部の構造実験と FEM 解析の比較

④ 鋼材系制振部材に対して

低降伏点鋼を用いたブレース型、間柱型の制振部材に対して溶接継ぎ手形式、母材幅厚比をパラメータとした構造実験を行い S-N 曲線を導くことができた。図 8 に間柱型制振部材の例を示す。せん断降伏するウェブの幅厚比は 48、パネルのせん断変形角 γ は疲労曲線導出用の一定振幅として片振幅 $1/50\text{rad}$ および $1/200\text{rad}$ を実施した。その結果、既往の実験結果を補完し S-N 曲線を導いた。これらの成果により主架構の柱梁接合部を大地震時にも弾性に留める設計が可能となり多くの制振構造建物を社会に提供できた。

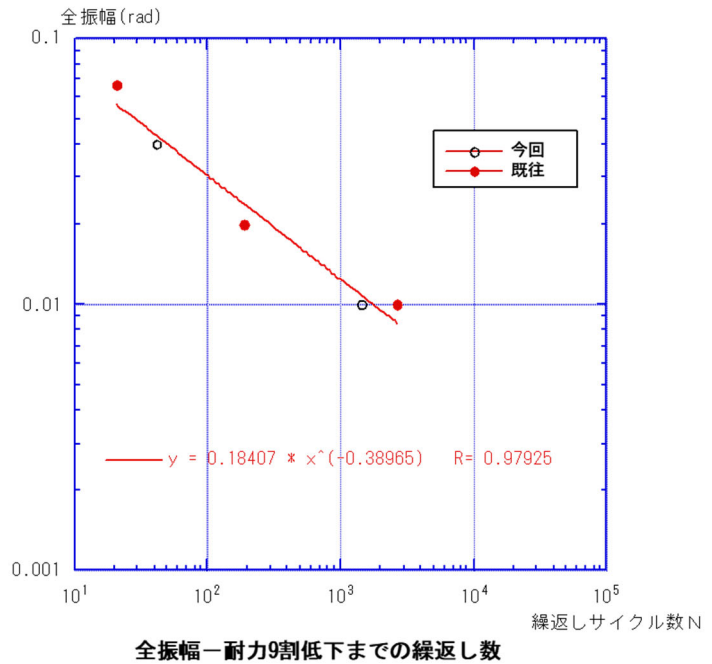
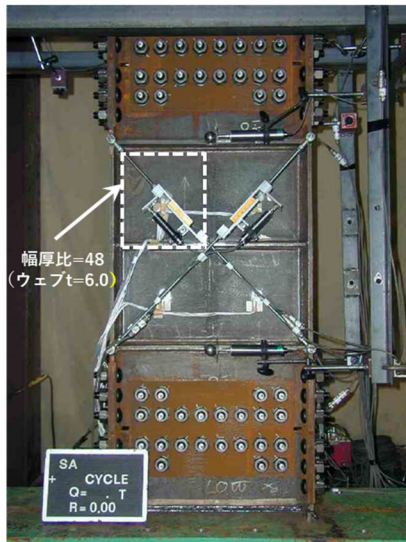


図 8 制振間柱の構造実験と疲労曲線

⑤ 社会に対する説明責任

以上の成果により、建物所有者に耐震性能をより明解に説明することができるようになった。建物所有者には今まで分かりづらかった溶接接合部を含む鋼構造建築の大地震時の被害目標について、設計時に合意するための一助になっている。

4. まとめ

コロナ禍の影響があるものの、鋼構造建築は次々と建設されている。これからも社会に対して安心・安全な鋼構造建築を提供し続けるためには、私たち溶接管理技術者が大きな役割を果たしていかなければならない。そのためには技術者が常に自己研鑽し、課題を一つ一つ解決していく必要がある。私の経験がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 現場溶接による梁端混用接合の構造性能と設計・施工 2016.9.2 日本建築学会鋼構造接合小委員会

鈴木直幹 (すずき なおみき) 溶接管理技術者特別級

<略歴>

- 1991年 日本大学 理工学部 建築学科 卒業
- 1991年 株式会社竹中工務店 入社
- 1992年 株式会社竹中工務店 大阪本店設計部構造部門
- 1999年 株式会社竹中工務店 技術研究所
- 2001年 株式会社竹中工務店 大阪本店設計部構造部門
- 2020年 株式会社竹中工務店 大阪本店設計部構造部門 部長 構造担当
- 現在に至る