材料・溶接施工からみた 阪神・淡路大震災における 建築鉄骨損傷：被害から何を学ぶか

豊 田 政 男*

1. は じ め に

1995年1月17日未明、淡路島北端近傍を震源とするマグニチュード7.2の阪神・淡路大震災は、阪神地方に甚大な被害をもたらした。想像を絶する地震から既に1年以上の歳月を経たが、我々技術者はその被害を教訓として、今後のモノづくりに活かしているであろうかと問いかけられているように思われる。もはや、被害の概況を取り上げる時期ではなからうが、ここでは、被害から学べべき材料・溶接施工に関する幾つかの教訓を取り上げ、金属材料を取り扱っておられる会員各位の参考になることを願うものである。

阪神大震災では鋼構造物も大きな被害を受けることとなった。特に、直下型大地震が著しく発展・集約した近代都市を直撃した世界で初めてともいえるもので、我々の生活の基盤である住居の損壊も大きく、被害建物の絶対数の多さは例を見ないものである。これまでの多くの報告⁽¹⁾にもあるように、被害の甚大さは建築鉄骨構造においても例外でなく、ここでは、鋼構造物の破壊事例の代表例、特に鋼材の溶接が重要な役割を果たしている建築鉄骨構造の被害を例に取り上げて解説することとする。

2. 建築鉄骨の鋼材と溶接

震災における鉄骨の被害を示す前に、建築鉄骨に用いられ

る溶接施工の概要についてみてみる。

建築鉄骨に用いられる材料は、ほとんどが軟鋼・50キロ級高張力鋼のC-Mn鋼であり、それほど特殊な材料ではない。最近の高層建物などでは60キロクラスの鋼材も用いられているが、全体の割合から見れば少ないものである。現在は、建築用鋼材についてはSN材としてJISで規格化されているが、震災で被害を受けた鉄骨はSS、SM材などがほとんどで、鋼材の靱性要求もほとんどなされていなかったものが多いようである。

建築鉄骨の主な構成部材は柱と梁で、柱は角形、H形断面のものが、梁はH形断面のものが主たるものである。角形断面柱は、角形鋼管と四枚の板が溶接接合されたものの二つがある。また、H形断面部材でも、圧延H形鋼であるものと、溶接によって造り上げられたビルトアップH形部材がある。溶接角形柱材は角溶接継手で造られ、柱・梁接合部近傍を除いて部分溶込み溶接が適用される場合が多い。また、H形断面部材は、非常に大きな断面部材を除いて、一般には隅肉溶接で作成される。

このような柱、梁材を用いて鉄骨構造が溶接・ボルト接合されて造り上げられるが、図1に、柱・梁仕口および柱・柱継手などの代表的構造と用いられる溶接法をまとめて示してある。図に示すように、いろいろな構造部位にそれに見合った溶接方法が用いられる。

一般的な鉄骨ラーメン構造では、柱と梁を構成する板要素が直交して溶接接合されて柱・梁接合部が形成される。この

* 大阪大学教授；工学部生産加工学科(〒565 吹田市山田丘2-1)

Lessons Learned from Great Hanshin Earthquake for Steel Framed Structures with Particular Reference to Materials/Welding; Masao Toyoda (Department of Welding and Production Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, Suita)

Keywords: service failure, earthquake, brittle fracture, steel framed structure, welded joint, dynamic loading

1996年2月6日受理

図1 建築鉄骨の接合部の代表例と用いられる溶接法の例。

部分には、柱あるいは梁の部材端から曲げモーメント、剪断力、軸力が伝達され、地震時には大きな繰返し応力が作用する重要な構造要素であり、この部分は図2に示すように、構造上いろいろな要因が複雑に関与してクリティカルなところである。

柱・梁接合部に現在用いられているディテールは、柱断面によって異なるが、その代表的なものを図3に示す。どの構造詳細でも梁フランジに生じる応力を柱に効率よく伝達するために梁フランジに相当する位置にスティフナーやダイアフラムと呼ばれる部材が柱に溶接接合される。この部分は、力の伝達の上で重要な部分であり、通常は完全溶込みの突合せ溶接が行われる。阪神大震災の被害事例では、脚長の小さな隅肉溶接がなされているものが多くみられたのも、被害を生じさせた原因の一つであることが分かる。

継手の溶接詳細は、力の流れなどの重要性から決められているものであり、溶接施工に当たってはその意味を十分に理解しておくことが重要である。

3. 継手が壊れる —阪神大震災での鉄骨損傷パターン—

阪神・淡路大震災における建物の被害は30万戸を超える

図2 柱・梁仕口部の特徴。

図3 柱・梁接合部の詳細の例。

という未曾有のものであった。鉄骨造建物でも多くの甚大な被害が生じ、その損傷の多くは5階までの低層構造(約8割)で生じており、6階以上の建物では倒壊に至ったものはない⁽¹⁾。今回の地震による鉄骨造建物の被害をみると、損傷パターンも多岐にわたっているものの、上述のつなぎ目の破壊・破損は致命的な損傷をもたらしているものが多い。

今回の損傷の傾向を材料・溶接との関係でみると、柱材はH形鋼が多く、ついで冷間成形角形鋼管が、また梁材はほとんどがH形鋼であり、これらの柱・梁接合には、角形鋼管柱では通しダイアフラム形式が多く、H形鋼柱ではスチフナプレート形式が多い。

今回の建築鉄骨構造で図1に例示したような溶接接合部の破壊による被害状況に注目するとき、破壊までの構造部材

の変形状態で見ると、

(I) 溶接部で部材そのものに塑性(残留)変形を生じる以前に破壊した例、と、

(II) 溶接部が破壊したものの、その近傍の部材に大きな塑性変形を生じた後に破壊した例、の二つに大別される。前者では、当然ながら、大きな地震時に接合部に期待される変形レベル以前に破断してしまったもので、後者は設計で激震時に接合部に期待されている十分な塑性化がみられたものの破壊に至ったもの(ただし、構造全体として大きな残留変形を生じていないものが多い)である。

4. 期待する変形以前に接合部が壊れた

阪神大震災の震災で大きな損傷にいたった鉄骨構造物の破壊事例のうち、部材そのものが座屈などの崩壊・破断を伴うようなものを除いて、継手部で破壊している事例の大部分は、部材そのものには大きな塑性変形を生じることなく破壊にいたったものである。そのような破壊を呈した部分の破壊は、変形が小さくして破壊したために、脆性破壊であるなどといわれていることもあるが、破壊部分の破壊様式は必ずしも脆性破壊のみでなく延性破断しているものも多い。これは明らかに強度が不足していたことを意味しているといえる。

溶接接合部の破壊について考えると、このような部材が大きく変形することなく破壊した原因は、大きく分けて

- (1) 不十分な設計・接合部ディテールなもの、と
- (2) 不十分な溶接施工によるもの、

が挙げられる。

その内、溶接施工に関係する問題では、

- (a) 溶接のど断面不足などの継手強度が十分でなかったもの、と
- (b) 溶接施工不良による溶接欠陥などによるもの、が破壊をもたらしている主要なものである。

図4に示す例は前者の代表例で、仕口部周りで、現在は完全溶け込み突合せ溶接が採用されているような部分に、小脚長の隅肉溶接がなされている例である。多くは1パスの隅肉溶接のみで施工され、隅肉が延性破断している例である。一部の継手では、隅肉溶接金属が接合母材に十分に溶け込んでおらず、溶接熱影響部で剝離的に破断しているものさえある。このような破断は、倒壊や大壊にいたった場合が多い。これらの溶接継手は、隅肉溶接であるがために破壊したのではなく、溶接部の「のど断面積」が小さいがために持ちこたえられなかったものと思われる。

後者の不十分な溶接の例も幾つか見られている。図5は、柱・柱溶接継手の破壊で見られた破面の例であり、裏当て金付き完全溶込み溶接(図1参照)がなされていたが、破面から分かるように明らかにルート側の板厚の2/3ほどは融合不良であり、比較的大入熱で溶接され、溶けた溶接金属がアーク点よりも先行するような形での融合不良となった痕跡が

うかがえる。また、その他、梁端の溶接部で明らかに融合不良タイプの欠陥が破面に見られたものもある。ここに示した例は比較的古い鉄骨での溶接であるが、溶接欠陥が破断に重要な役割を果たしたことが推察される。

今回の鉄骨被害で溶接欠陥が主要な役割をどの程度果たしたかどうかは明らかではないが、今回の震災のように極限に近い負荷が作用することになると、後にも述べるように破壊するとすれば、その破壊の発生源となる原因が存在するところであり、結果として破壊部では欠陥が観察されることが多い。いずれにしても、溶接部の品質を確保することが重要であり、建築鉄骨の構造的、施工の特徴を踏まえた溶接技量と施工管理が不可欠である。

5. 建築鉄骨で脆性破壊が生じた

建築鉄骨での脆性破壊事例はこれまであまり報告がなく、実験室的なレベルでは知られていたが、現実には生じることが予想されていなかったに違いない。1994年1月17日の米国ノースリッジの地震では、柱・梁継手の梁端下フランジ溶接部で多くの脆性破壊が生じたものの⁽²⁾、我が国とはかなり異なる条件との認識があった。しかし、一方で、変形能や脆性破壊などの観点からも、建築用鋼材として新しい靱性要求が規格化され、材料的な観点からの考慮も進められてきた。

しかし、今回の震災においては、これまでに造られた建築構造において多くの脆性破壊事例が生じ、設計的・材料的な幾つかの課題を呈することとなった。今回の震災での建築鉄骨における脆性破壊例の主なものは、

(a) 梁フランジとダイアフラムとの接合(工場溶接および現場溶接)のため梁ウェブに取られたスカラップの止端から梁フランジ母材が脆性破壊したもの。

(b) 梁フランジとダイアフラムとの接合部の裏当て金部、あるいはエンドタブ部の溶接終始端部を起点とした溶接脆性破壊。

(c) 柱とダイアフラムとの接合部で、ダイアフラム側溶接熱影響部あるいはダイアフラム内を伝播する脆性破壊。

(d) 高層ビルの剛接トラス組立柱の鉛直柱で、50 mmを超える厚板の箱形断面柱(初層部で約500~600 mm□)が脆性破壊した例、などが代表的なものである(図6参照)。

(a)のスカラップ止端からの脆性破壊は、鋼材(H形鋼、あるいは圧延鋼板)そのものの脆性破壊ということで、材料的には注目を集めた。部材の三面交差部では溶接の集中を避けるためスカラップを設けることは溶接施工の常識となっている。また、梁端部溶接部のように裏当て金付き溶接が一般的な場合には、裏当て金を貫通して取り付けのため、あるいは突合せ溶接の連続性のためにはスカラップは不可欠となる。しかし、建築鉄骨仕口部のように力の流れが一番厳しい場所となると、スカラップの存在が、構造変形能を低下させるこ

柱-ダイアフラム接合部の破壊

柱-ダイアフラム隅肉溶接部の
ダイアフラム側剥離的破壊の例

柱端の隅肉溶接部の破壊の例

柱・梁接合部が隅肉溶接されている場合の詳細と破壊位置

柱・梁接合部の梁端が全周隅肉溶接
された接合部の破断例

梁端隅肉溶接部の破面の例
(白っぽく見えるところが
隅肉溶接金属の剪断破面)

図4 隅肉溶接部ののど断面不足によると思われる破壊例⁽¹⁾.

図5 柱・柱接合部の融合不良から破壊した例⁽¹⁾.
(破面の白っぽく見える部分のみが破壊面)

とは実験的にも指摘され、既にノン・スカラップ工法も提案され、最近では実施工にも適用されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾.

(b)の裏当て金、エンドタブを原因とする破壊事例は、前述のノースリッジ地震でもほとんどの破壊が、裏当て金ルート部からの破壊であることから注目されていたところであるが、今回の事例でも、同じような破壊事例が多く、溶接ビードの終始端を処理するためのタブ板や完全溶込み溶接のための裏当て金の取付部に未溶着部分が残し、その不連続部はあたかも切欠きのような応力集中部となり破壊に至ったものである。今回の破壊や亀裂発生の実例を見ても、溶接の終始端処理や裏当て金の取付方などに起因するものがかなり見られ、溶接現場でも管理とともに、それらが取り付けられている意義の十分な理解が必要である。

(d)の大断面コラムの破壊は、あたかも 50 mm 程度の厚板の鋼材そのものが脆性破断し、それも露出した柱で、多くの注目を集めることとなった。この大断面コラムの製造に関係する溶接施工としては、コラムを作成するための両面のシーム溶接とコラム・コラム接合のための突合せ溶接の二つである。シーム溶接は、サブマージアーク溶接の多層溶接が採用され、コラム・コラム接合部近傍の 200~300 mm の部分は裏当て金付き完全溶込み溶接がなされ、他の部分は部分溶込み溶接となっている。また、コラム・コラム溶接部は炭酸ガス溶接やノンガス溶接が用いられ、破断箇所では、ノンガス溶接部の数が圧倒的に多い。この例は、厚板の大きなコラムそのものの破壊も見られ、低層部に多いコラムそのものの破壊からは、一見溶接が関係していないようにも見えるが、溶接施工が破壊発生に大きく関与している。更に、今回の脆性破壊事例は、構造用鋼材の靱性要求のあり方への疑問を投げかけるものとなっている。

6. どうして壊れたのか —破壊のプロセス—

(1) 破壊プロセスと材料靱性

構造物が壊れるためには、次の三つの要因が必要である⁽⁷⁾ (図7)。

(1)壊す力、(2)壊れる原因、(3)壊れやすい材質

これらの一つでもかけると、破壊、特に不安定破壊である脆性破壊のようなものは起こりにくい。

今回の大震災の破壊事例で、(1)の壊す力をもたらしたのは、勿論地震力であり、しかも震度7という前代未聞の大きな力で、部材そのものに大きな塑性変形さえももたらすほどのものであった。(2)の壊れる原因は、不完全な溶接継手部の破壊を除くと、前述のような形状的不連続部の存在はあったものの、特に割れや疲労亀裂のような鋭い亀裂上の欠陥からの脆性破壊は見られず、スカラップ止端のように巨視的応力集中部が原因となっている。

(3)の壊れやすさは、材料の破壊靱性のレベルそのものであり、必ずしもすべての材料について靱性レベルが調べられているわけではなく、今後の課題ではあるが、壊れやすさについては、溶接熱影響のような破壊靱性を低下させる原因についても十分考慮しなければならないとともに、材料そのものの破壊靱性レベルのあり方は大きな問題となろう。例えば、図8は、今回の被災鉄骨の梁端から採取したシャルピー試験結果の一例で、破面近傍の大きな歪を受けた部分の靱性のみならず、素材そのものの靱性もそれほど大きくはない。また、図9は、米国で製作されたH形鋼のシャルピー試験結果⁽⁸⁾の例で、273 Kでの吸収エネルギーを示すが、H形鋼ではこのように靱性のかなり低いものも使われており、また、ウェブとフランジの交点となるフレット部での破壊靱性がかなり低い。材料の観点からは、形鋼などでの靱性の向上が課題であろう。

柱・梁接合部の梁端
ウェブにもうけられ
たスカラップ止端か
らの母材部の脆性破
壊の例

スカラップ止端から
破壊したH形鋼フラ
ンジの脆性破面の例

破壊経路
(スカラップ止端からの梁フランジ脆性破壊)

梁フランジ溶接部での脆性破壊
(裏当て金、タブなどからの破壊)

大断面箱形コラムの脆性破壊の例

図6 阪神大震災で見られた建築鉄骨の脆性破壊の例。
(一部は文献(1)などからの引用)

- 壊す力: 地震力, 震度7という前代未聞の大きな力
- 壊れる原因: 不完全な溶接継手部, 形状的な不連続部による応力集中
- 壊れやすさ: 材料の破壊靱性のレベルそのもの

図7 壊す3要因と阪神大震災.

(2) 脆性破壊をもたらしたもの

通常の負荷条件や設計負荷レベルでは破壊の芽となる亀裂は生じにくく, また, 例え生じても部材レベルでの脆性破壊へとは繋がりにくいのが普通である. 今回の地震でそれをもたらした原因として, 前述の形状不連続などの応力集中源の存在と材料の破壊靱性そのものの問題に加えて, 幾つかのものが考えられる. すなわち,

- (1) 脆性破壊に先立ち塑性変形が認められるものが多く, 想定されていた以上の大きな変形を受けた.
- (2) 変位速度が従来の観測結果に比較して著しく大きく, 地動レベルで100カイン(cm/s)近い変形速度で, 柱・梁止端部での歪速度にして50~100%/s⁽⁸⁾にもものぼる高歪速度負荷であった.
- (3) 今回の地動記録などによると, 初期の数サイクル目で大きな変形レベルに至っており, 最初の大きな地震波で破壊に至らなかった場合や圧縮変形を受けた場合など, その部分は大きな予歪を受けたことになる. この予歪は材料の強度を上げ, 破壊靱性を低下させ, 次のサイクルでの破壊を促進させる.

図10は, このような考察を基に, 今回の破壊をもたらした理由を模式的に示したものである.

図9 スクラップ止端から破壊した梁材の破面近傍から採取した試験片のシャルピー試験結果の例.

(3) 高歪負荷と高歪速度変形

阪神大震災で脆性破壊が生じた柱・梁接合部梁端溶接部などでは, 図6にも見られるように, 脆性破壊以前に局部座屈を生じていたり, 大きな塑性変形をうかがわせる塗料の割れや剝離が見られる. これは明らかに梁端フランジとしては全断面降伏に至っていたことを示しており, また, 設計時に想定されていたように梁端に塑性ヒンジを生じた後の破壊であることをうかがわせる. 図11は, 今回の地震においてスクラップ止端から破壊した梁端部近傍の梁下フランジから採取した引張試験片における応力・歪曲線の例であり, 梁端近傍の強度のみ著しく上昇している. これは明らかに破壊に先立ち, 大きく変形したことをうかがわせ, 硬さ・強度上昇からの歪量の推定では10%にも達する程度となる.

このように, 阪神大震災で被害を受けた建築鉄骨では, 設計段階で想定されていたレベル以上の大きな塑性変形が部材に生じていたことをうかがわせる.

図8 主な米国および日本の形鋼のシャルピー特性の例.

図10 破壊が生じた理由の模式的説明。

図11 スクラップから破断した梁端部近傍から採取した引張試験片の応力・歪曲線の比較。

図12 建築用50キロ鋼（490 MPa 級）の引張強度、降伏点の負荷歪速度依存性の例。

一方、阪神大震災の地動の特徴の一つに、変形量の大きさとともに変形速度の大きさが指摘されている。神戸海洋気象台の記録によると、変位速度の最大値が107カインにも達す

るといわれている。架村⁽⁸⁾による標準的仮想建物（2および12階建て）における各種地震における層間変形角およびその変形速度を解析した例では、梁端で数十%/s程度の歪速度が生じることが示されており、この歪速度レベルは、通常材料試験よりおよそ3, 4オーダーも大きなものである。

一般に構造用鋼材の機械的性質は歪速度依存性があり、歪速度が大きくなると降伏点や引張強さが上昇し、破壊靱性が低下することが知られている。図12は、最近の建築用鋼材SN材の降伏点と引張強さの歪速度依存性を示した代表例である⁽⁸⁾。図から分かるように、今回の震災で考えられるような歪速度レベルでは、材料の強度レベルが20%程度の上昇を生じている。また、歪速度が速くなると見掛け上の靱性は低下し、破壊遷移温度も高温側へと移行する結果はよく知られている⁽⁹⁾。

鋼材特性の歪速度依存性は、材料の活性化エネルギー論的立場からの考察では試験温度と歪速度の変化が等価であり、材料特性は次式の歪速度パラメータ R の関数として表されることが示されている（Bennet ら⁽¹⁰⁾）。

$$R = T \ln(A/\dot{\epsilon})$$

ここで、 T は温度、 $\dot{\epsilon}$ は歪速度であり、 A は材料定数である。このように、歪速度の上昇は、強度の上昇と見掛け上の破壊靱性の低下をもたらす。しかし、両者とも同じような歪速度パラメータ R で整理されることから、破壊靱性の低下は、材料の強度の上昇に伴う破壊発生部に生じる応力の上昇に起因するものとして理解できる。

高歪速度変形は、破壊発生部で塑性変形が生じにくくなり、そこに生じる応力が上昇するため、脆性破壊へと遷移しやすくなることになる。一方、材料の破壊靱性が十分に高い場合には、高歪速度負荷の方が変形部の強度上昇のため、塑性域の広がりが大きくなって変形吸収エネルギーが大きくなることも考えられる。

なお、鋼材を高歪変形させると変形部には温度上昇が生じる。この温度上昇は、強度の上昇を少なくし、見掛け上の破壊靱性の上昇をもたらすことはよく知られている⁽¹¹⁾。温度上昇は変形量が大きいほど大きくなるわけであり、破壊に先立って大きく変形する、すなわち破壊靱性がある程度大きい材料では、高歪速度負荷を受けても、破壊延性が低下しないことがある。歪速度の影響が顕著となるのは、材料の破壊靱性レベルがそれほど大きくない場合のみであることは注意する必要がある。今回の地震の変形速度の数十カイン（数10 cm/s）のレベルでは、破壊性能に関する遷移温度の上昇としては、20 K 程度であることが示されている。米国でのノースリッジ地震以後の解析では、その遷移温度移行量として、後述のように 30°F（17 K）と考えられている。

（4）脆性破壊の原因

阪神大震災で建築鉄骨のような鋼構造物に破壊が生じたのは、

- (a) 大きな負荷荷重・変位,
- (b) 形状不連続や欠陥などの応力集中源の存在,
- (c) 壊れやすい材質および種々の材質劣化,

の重畳効果によってもたらされたといえる。(a), (b)は破壊部に生じる応力の大きさを決定し, (c)は破壊の限界を決めるもので, 今回の破壊事例においては, 前述の高歪速度と地震時の繰り返し荷重履歴に伴う予歪効果による強度上昇が重なり, 結果として破壊部に生じる応力を大きくした。

脆性破壊の発生を考えると, 壊れるためには, 破壊を発生させる原因と, その破壊を止め得ない原因がある。しかし, 脆性破壊に関しては, 巨視的なレベルでの脆性亀裂の発生が支配的で, いかに発生を押さえるかということが重要となってくる。脆性破壊の発生は, 発生部に生じる応力がその材料の限界の破壊応力(正確には, 一定の破壊プロセス領域内の応力レベルというべきであろう)に達すると巨視的な破壊の発生が生じるといえる。今回の建築鉄骨の脆性破壊事例の十分な解析が今後の破壊防止対策につながろう。

7. 溶接に関して囁かれる幾つかの Myths(幻想)

阪神大震災で被害を受けた鉄骨構造溶接部の代表的例をこれまで示してきた。ここでは溶接に関する幾つかの誤解・Mythsについて取り上げる。

(a) 溶接部は壊れやすい

溶接は良くわからない, それがこの言葉をもたらす。良くわからないのではなく, わかろうとしないともいえるが, 鋼構造物をつくるのに, 繋がずにどうしてつくるのか。確かに, これまで述べてきたように, 壊れるときは溶接部であることが多い。しかし, その継手を設計した人, それを施工した人が溶接を理解していたか, と考えさせるような例も多かった。ただ, 溶接のこわさを知らなければ, 溶接は信用できない。溶接部は壊れやすいのではなく, 壊れるべく作られたものは壊れるという事実を物語っている。しかし, 「壊さない不断の努力」は溶接屋にとって不可欠なものである。

(b) 現場での溶接は品質が悪い

これこそ幻想の最たるものである。確かに現場は作業環境が良くない。だから品質が悪いのではなく, 品質が悪くなる可能性のあることを知ることが重要なのである。そのためには, 現場での施工環境をいかに整備するかが問われている。溶接方法のもつ特性を踏まえて対策をたてないと工場と同じ品質が得られないことは事実である。

(c) 隅肉継手は弱いから避けるべきである

ある意味では正しいが, これも幻想に近い。今回の仕口部の溶接でも, 隅肉溶接部の破断例が多くみられた。隅肉部の破断は, 柱や梁がほとんど塑性変形することなく生じていることから, 隅肉継手は弱いとなる。震災被害例をみると, 隅肉で強度を確保するとの考えがあったのかとも思われるほどの小さなど厚しかないものがあり, 構造全体として低変

形レベルで破断した。しかし, これは直ちに突合せ継手にしなかったからとの議論とはならない。

隅肉溶接継手と突合せ溶接継手との大きな違いは力の流れ方にある。隅肉継手に存在する不溶着部のために, 力の流れにゆがみが生じ, 隅肉溶接金属内に応力の分布が生じる。このことは溶接金属の有効断面(一般にのど厚と呼ばれる)に強度が比例しないこと, また, 裏当て金取付による未溶着部と同じように応力集中が生じることを意味し, 破壊靱性が十分でないときには脆性的な破壊の危険性があるものの, 一般的には十分など厚を持つ隅肉継手では脆性破壊の危険性は少ない。隅肉継手の特性を理解した応用が重要である。

(d) 溶接欠陥が壊した

これは事実である。しかし, 今回の破壊をみても, 溶接欠陥以前の問題である例もみられる。溶接欠陥は, 「破壊の芽」となることと, 壊れるときに「伝播するところ」となる場合がある。後者は, 破壊の原因が他にあるということである。欠陥があっても良いというわけでない。欠陥を作るような施工環境と施工条件, それに技量であったことは問われなければならない。

(e) 脆性破壊原因としての厚板説

厚板構造物は変形が難しく脆性的破壊が生じやすいと信じている人も多い。破壊の分野では, 破壊靱性は板厚が厚くなるほど小さくなること(板厚が厚い場合の靱性を平面歪破壊靱性といわれている)がよく知られている。これは, 破壊靱性試験片のような, 深い板厚貫通切欠きをもつ場合の破壊を考えたものである。集中応力の発生やマイクロ亀裂の発生は, 板厚の大小というよりは, 構造設計, 材質, 溶接施工に関係する問題である。板厚が厚くなっても, 設計的には鋼材によって決まる許容応力を基準とする応力レベルになるようにされているはずであり, 脆性亀裂の発生と板厚とはほとんど関係ない。特に, 建築鉄骨では, 比較的浅い欠陥や亀裂からの破壊が支配的であり, 板厚効果よりは応力・歪レベル支配型である。しかし, 発生した亀裂が伝播する場合に厚板であることが, 脆性亀裂伝播を促進することもある。

一般に, 厚板になると鋼材の製造プロセスなどの材質的な問題から, 靱性が低いとか延性が低いような場合もある。しかし, これは厚板を用いれば脆性破壊しやすいこととは直接関係ない。一般に, 厚板を用いられるような鉄骨では, 構造的に剛で, 接合部などの変形が拘束されているような場合が多く, そのために破壊発生部の局部応力が大きくなり, また, その高応力の範囲も板厚方向に広がるために, 脆性的破壊に至りやすいことは事実であり, この点の設計的な配慮が重要である。

(f) 溶接するともろくなる

これは事実である。ただ, その程度は材料, 溶接条件の管理によって多くも少なくもなる。材質変化は, 溶接の本質であるが, もろくなるとは限らない。設計者に十分理解してもらいたい事実の一つである。

8. 壊さないための材質に注目した課題

脆性破壊のような不安定な破壊は、鋼材および溶接部の材質、特に破壊靱性レベルの影響を大きく受ける。建築用鋼材の靱性と溶接による靱性変化について考える。

前述のように、今回の被災鉄骨やノースリッジの建築鉄骨の破壊靱性は必ずしも高いといえない。しかし、建築鉄骨としての柱・梁仕口を構成する部材としてどの程度の破壊靱性が必要かは、いまだ問題となることである。破壊靱性要求は、構造設計条件や溶接ディテールに大きく依存する。我が国では建築用鋼材として JIS で SN 材が規定されており、靱性要求の基本は「273 K で 27 J」である。それに対して、ノースリッジ地震以後米国での検討では「70°F (294 K) で 20 ft-lb (27 J)」を要求レベルとすることが検討されており、母材そのものへの靱性要求はそれほど大きくない。1994 年の米国 AISC の調査によると上述の要求はすべての形鋼の平均的な値であったということである。米国での鋼材の破壊靱性は大きいとはいえない。しかし、米国では母材そのものの脆性破壊事例がほとんどない。これは前述のように柱・梁仕口部のディテールの差によるもので、阪神大震災でみられたスカラップ止端から生じた母材の脆性破壊の発生に関しては、SN 材の最低レベルでも接合ディテールの点から防ぎうる可能性がうかがえる。

母材そのものの破壊に関しては、母材の靱性と接合部ディテールの点から防ぎうるものであるが、溶接接合部の破壊に関しては更に前述の溶接部の形状的な問題に加えて、溶接金属と熱影響部の破壊靱性のレベルが問題となる。

溶接部の破壊靱性要求も、溶接部の裏当て金やタブの取付要領などを含む溶接詳細に大きく依存するが、我が国ではいまだ明確な要求値が与えられていない。一般的には母材要求と同じレベルとするのが普通であり、SN 材レベルとなると、「0°C (273 K) で 27 J」が一つの基本となろう。

それに対して、米国ではノースリッジ地震以後の検討から、「最低使用温度より 30°F (17 K) 以上低い温度でかつ 0°F (255 K) 以下の温度において、20 ft-lb (27 J) 以上でなければならぬ。」という基準が提案され、カルフォルニア建築基準の緊急改訂にも取り入れられている。ここでの 30°F は、地震による動的負荷効果を考慮して取り入れられたものという。それ以外にも、米国溶接学会 (AWS) から、構造を 3 レベルに分け、

「重要度の低い順に 70°F, 40°F, 10°F で 27 J 以上」

とする要求案も提案されている。米国での要求の根底にあるものは、重要部材では、仕口部の溶接接合部では破壊させないという概念にある。

阪神大震災の脆性破壊事例の大部分は溶接部で生じている。溶接部の破壊靱性レベルが支配的であることが予想される。溶接部の破壊靱性は、材料のみならず溶接方法や溶接入熱に依存し、施工を誤ると靱性低下をもたらすことになり、溶接がもたらす材質劣化に十分な注意が必要である。

9. おわりに

阪神大震災は甚大な人的・物的被害をもたらした。その被害に溶接施工がどのように絡んでいるかについて述べてきた。破壊事例は、いつも我々技術者に多くの教訓を与えるものである。その事例をまとめ、その原因を考え、それをどのように活かして次の対策をとるかなどを考えると、技術者の役割の重要性が増してきているように思われる。特に、いわゆる分野の異なる技術が有機的に結びついてバランスのとれた技術となったとき、構造の使用性能が確保される。品質の安定性は、設定された品質レベルをいかにして造り込むかということであり、技術者としてその造りこみに最善の努力を重ねたかどうか問われることにもなった。

また、壊れないようにすることは、破壊しなかったものも多くあること、また、コストをかければ壊れないものを作ることが可能であることなどから考えると、技術レベルとともに、「コストパフォーマンスについて技術者とユーザーの間で十分なコンセンサスを造り上げる」努力が重要であろう。そのためにも、技術の適切な開示とやさしい言葉で説明できる技術者たることが必要であろう。

文 献

- (1) 鉄骨の破壊時例調査結果については、日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会(委員長：井上阪大助教授)：1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書、(1995. 5)参照。
その他、地震被害に関する報告は多数あり。
- (2) D. K. Miller, Northridge: The Role of Welding Clarified, Welding Innovation Quarterly, XI (1994), 4-13.
- (3) 田中淳夫, 榎本憲正, 泉 満：日本建築学会大会学術講演梗概集, (1982), 10月。
- (4) 中込忠男, 矢部喜堂, 坂本真一：日本建築学会構造系論文報告集, 432 (1992), 51.
- (5) 矢部喜堂, 坂本真一, 中込忠男：日本建築学会構造系論文報告集, 440 (1992), 125.
- (6) 坂本真一, 矢部喜堂, 真瀬伸治：日本建築学会構造系論文報告集, 456 (1994), 69.
- (7) 豊田政男：溶接技術, 7月号, (1995), 132.
- (8) 架村久哉, 小林泰男, 他：私信。
- (9) 豊貞雅宏, 後藤浩二：日本造船学会論文集, 172 (1994), 663.
- (10) P. E. Bennet and G. M. Sinclair: ASME, Paper 65-MET-11, (1965).
- (11) 日本溶接協会鉄鋼部会 APD 委員会：平成 6 年度ワーキンググループ 3, 資料, (1995)。