1 阪神・淡路大震災における建築鉄骨のぜい性破壊*

中 込 忠 男**

Brittle Fracture of the Steel Structure from
Hanshin-Awaji Earthquake*

by Tadao NAKAGOMI**

キーワード：阪神・淡路大震災，建築鉄骨，ぜい性破壊，材料試験，耐震性能

1. はじめに

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災は、人口の集中した都市部を直撃したことから、建築構造物の多くに損傷が見られた。コンクリート構造や在来工法の本造建築物は一階部分がつぶれてしまったり、完全に崩壊してしまったりと人身に大きな被害をもたらす破壊が見られた。鉄骨構造物の被害例も少なからず報告されており、わが国で鉄骨構造物が建築に広く採用されるようになってから初めて経験する大きな地震であったと言える。

今回の震災の建築鉄骨の被害の特徴として、ノースリッジ地震でも見られたようなぜい性破壊が報告されている。ぜい性破壊とは形状不連続部などに発生したき裂が瞬時に進展し、部材が破断に至る破壊形式である。

ぜい性破壊についてはこれまでに研究レベルではその発生が危惧されていたが、実際の設計・施工においてぜい性破壊の発生を防止するための努力があまりなされてこなかったのが現状であろう。ぜい性破壊の発生を防止するためには、地震などによる外力に対して、構造物がどのような変形能力を有しているのか、破壊挙動はどのような変形能力を有しているのか、破壊挙動はどのようなかをすべて把握した上で破壊防止設計をする必要がある。

地震発生後2年以上を経過し、破壊が生じた様々な要因が明らかになってきており、建築鉄骨物の耐震性能を確保するための議論が行なわれている。本稿では建築鉄

骨が地震によりうけた影響を鋼材レベルで調査するとともにぜい性破壊が生じた要因を検討する。

2. 阪神・淡路大震災での被害例

この地震による鉄骨造建築物の破壊形態は部材がわずかに塑性変形を示して破壊しているものと顕著な塑性変形を伴って破壊しているものに分けられる。塑性変形を伴わない破壊の要因の一つとして、図1に示すような施工不良があげられる。溶接部が完全溶込溶接で行わなければならない所をすみ肉溶接や部分溶込溶接で施工しており、しかもすみ肉溶接のサイズも不足していることから、十分な耐力を示さず破壊している。

このような溶接施工が不十分であるものを除いた現行の耐震基準に基づき設計され、施工された鉄骨構造物の被害を見ると、極厚部材および柱梁接合部におけるぜい性破壊が見られた。

図2は柱部材が破壊した例であるが、これは地震時の

図1 溶接施工不良による破壊

*原稿受付 平成9年7月1日

**正 員 信州大学 Member, Shinshu University

図2 柱部材の破壊

図3 柱梁接合部の破壊

縦揺れまたは横揺れに伴う転倒モーメントによって柱に大きな引張軸力が作用したために破壊したと考えられる。

図3は柱梁接合部で破壊が生じた例である。柱梁接合部の場合、下フランジのスカラップ端部を起点とした破壊が報告されている。

3. 建築鉄骨物が地震をうけた影響

実際に阪神・淡路大震災で被災し、柱梁接合部がぜい性破壊した5階建て鉄骨ラーメン構造建築物を対象にして柱梁接合部がどのような履歴を受けて破壊に至ったのかを調査検討した結果を紹介する。

3.1 建物概要

以下に建物概要をあげる。建物の伏図、軸組図を図4に示す。

- ・階数 地上5階建，地下なし，塔屋なし
- ・高さ 18.70 m (パラペット上端まで)
- ・延べ床面積 1,624 m²
- ・構造種類 鉄骨造
- ・構造形式 2方向ラーメン構造

図4 被災建築物の伏図、軸組図

図5 被害状況

図6 破壊の起点

- ・主要構造部使用材料 梁－H形鋼 (BH-600×200×12×19)
- 柱－角形鋼管 (□-400×16)

建物は南北方向に4スパン、東西方向に2スパンの2方向ラーメン構造で、事務所ビルとして使用されていた。主要構造部使用鋼材はSS41で、柱梁接合部は梁スカラップを有するブラケットタイプである。

3.2 被害状況

建物の被害状況は、H形鋼を用いた梁については、南北方向のスカラップ近傍の下フランジで破壊が多くみられ、2, 3階床梁はほとんどぜい性破壊もしくは延性破壊が生じていた。東西方向の梁は、2, 3階段床梁で多少の塑性変形が見られた程度で、ほとんど被害は見られない。角形鋼管の柱は、3階柱頭部で局部座屈が見られただけであった。東西方向ラーメンにおける被害状況を確認できた範囲で図5に示す。

ぜい性破壊は図6に示すようにスカラップ端部と裏当て金の組立て溶接止端部が重なる部分を起点として生じている。しかし、ぜい性破壊した梁においても、はっきりと降伏線が入っているのが確認でき、梁フランジが降伏後にぜい性破壊したものと思われる。

3.3 試験概要

被害の状況からみて、大きな変形を受けたであろう2階から4階床梁を含む3箇所の柱梁接合部を、柱・梁ともに接合部から約1m離れた位置まで採取した。図5中に採取した柱梁接合部及び近傍の柱梁部材の位置を示す。取り出した柱梁接合部近傍の柱梁部材から、ビッカース硬さ試験片、シャルピー衝撃試験片、引張試験片をそれぞれひずみを受けていないと考えられる位置まで連続的に採取した。建物は南北方向に入力があったと思われるので、南北方向ラーメンについて検討を行なう。

3.4 試験結果

(1)引張試験結果

2階床梁下フランジの接合部からの距離と降伏応力、引張強さ、一様伸びの関係を図7に示す。梁端部近傍で降伏応力、最大応力の上昇、一様伸びの減少等の力学的性能の変化が顕著に見られ、300mm程度まで材質が変化している。降伏応力は約40 N/mm²、引張強さは約30 N/mm²の上昇、一様伸びは約15%の低下が見られる。

(2)ビッカース硬さ試験結果

硬さ試験片は南北平行面において、柱梁接合部から塑性ひずみを受けていないと考えられる位置まで、切れ目のないように連続的に採取した。

接合部からの距離-ビッカース硬さ関係を図8に示す。ひずみを受けていないと考えられる位置での硬さは約150 HVであり、柱梁接合部に近付くにつれて硬化が進んでいる。梁端部付近で硬さが200 HV以上の値を示し、50 HV以上の硬さの上昇が見られた。硬さは、梁端部から約300mm離れた所から上昇している。

(3)シャルピー衝撃試験結果

シャルピー衝撃試験結果の一覧を表1に示す。接合部

図7 降伏応力・引張強さ・一様伸びと梁端接合部からの距離の関係

図8 梁フランジのビッカース硬さと梁端接合部からの距離の関係

表1 シャルピー衝撃試験結果の概要

	距離 (mm)	vEshelf (J)	vEo (J)	vTre (°C)	vTrs (°C)	vBo (%)
2階床梁 上フランジ	39.5	157.5	10.5	29.6	31.9	100.0
	800	176.1	106.3	-5.0	-4.4	36.6
2階床梁 下フランジ	39.5	179.4	48.2	37.6	38.3	83.2
	800	187.8	94.8	-0.4	1.5	52.3
3階床梁 上フランジ	39.5	155.6	44.0	21.1	23.7	79.2
	800	164.2	120.7	-8.3	-4.1	35.7
3階床梁 下フランジ	39.5	146.9	18.4	40.5	46.5	95.4
	800	167.9	125.7	-11.2	-8.2	26.0
4階床梁 上フランジ	39.5	156.4	111.4	-12.3	-6.1	41.1
	800	164.4	121.0	-15.1	-8.3	35.8
4階床梁 下フランジ	39.5	160.7	63.2	10.9	14.7	69.6
	800	166.7	123.0	-14.5	-11.0	19.8

vEshelf : 上部棚吸収エネルギー vEo : 0°C吸収エネルギー
vTre : エネルギー遷移温度
vTrs : 破面遷移温度 vBo : 0°C破面率

図9 エネルギー遷移温度・破面遷移温度と梁端接合部からの距離の関係

からの距離とエネルギー遷移温度、ぜい性破面遷移温度

図10 vEe25- η_s 関係

の関係を図9に示す。ひずみをうけていないと思われる距離で0℃吸収エネルギーが100 J以上となっており、十分なじん性を示している。しかし、ぜい性破壊が見られた2, 3階床梁フランジで遷移温度が-5℃～+2℃となっており、4階床梁に比べて高い遷移温度を示している。また、2階床梁下フランジにおいて、柱梁接合部に近づくにつれてじん性の劣化が顕著に見られ、塑性ひずみを受けていないと考えられる位置に比べて梁端部近傍では遷移温度が約40℃上昇しており、0℃の吸収エネルギーは50 J～90 J程度低下している。梁端部から300 mm程度までの間で遷移温度の上昇が顕著に見られる。

素材試験結果より、梁端部から300 mmの距離から材質の変化が顕著に見られ、大きな入力による十分な塑性変形の後にぜい性破壊したものと考えられる。また、梁下フランジが多く破断したのは、梁上フランジが床スラブによって拘束されていることが原因と考えられる。

4. ぜい性破壊が生じた原因

構造物の耐震性能を低下させる要因として、以下のようものが挙げられる。

- (1)使用鋼材および溶接材料の力学的性能
- (2)ひずみ速度の影響
- (3)接合部ディテールの影響

これらの因子が複合的に絡み合いぜい性破壊の発生要因となる。

そこで、これまでに行われてきた研究結果をもとにぜい性破壊を防止するための注意点について述べる。

4.1 使用鋼材の力学的性能

鋼材や溶接材料に低じん性なものを使用した場合、ぜい性破壊は生じやすくなる。そこで鋼材のじん性が接合部の塑性変形能力にどのような影響を及ぼすかを検討した³⁻⁷⁾。図10は無次元化した吸収エネルギーと梁端部の変形能力の関係であるが、実験時の温度で、シャルピー吸収エネルギーが70 J以上あれば、破壊が生じやすい現場型柱梁溶接接合部でも十分な変形能力を示し、工場溶

図11 $\bar{J}$ -温度関係

接接合形式のノンスラップ工法を用いた場合にはシャルピーの吸収エネルギーは27 J以上あればぜい性破壊は生じにくいという結論が得られた。しかし、吸収エネルギーが70 J以上という値は現行のJIS規格下限値よりも高い値である。

4.2 ひずみ速度の影響

鋼材の力学的性能はひずみ速度の依存性が大きく、ひずみ速度が大きくなると、降伏点や引張強さは上昇し、じん性は低下する。そこで、建築構造物がさらされる温度領域(-20℃前後から+30℃までの範囲)において、溶接接合部が延性からぜい性への遷移現象を含む領域の変形能力や破壊性状について明らかにするため、ひずみ速度、試験温度の影響を実験的に検討した^{8,9)}。その結果、図11は $\bar{J}$ 値と温度の関係を各載荷速度毎に示したものである。図11より、静的な載荷と比較すると、動的な載荷の方が遷移温度が約20℃程度上昇している。このことから地震時のような大きなひずみ速度を受ける場合、鋼材の力学的性能は静的載荷時から-20℃程度温度を低下させた時とほぼ同じ傾向を示すと言える。したがって、阪神・淡路大震災発生時のように外気温が0℃の場合、使用鋼材は-20℃で70 Jの吸収エネルギーが必要になる。今回の被災建築物は0℃では100 J程度の吸収エネルギーであったが、遷移温度は2階梁下フランジで-5℃～0℃程度であったためひずみ速度の影響を受け、破壊じん性が低下していたものと考えられる。

4.3 接合部ディテールの影響

柱梁溶接接合部は、従来の施工法では、梁端部にスカラップが設けられてきた。しかし、梁端部に断面欠損として存在するスカラップは応力やひずみの集中部となりやすく、ぜい性破壊が生じやすい事が報告されている^{10,11)}。

梁スカラップの有無が梁端部の変形能力に及ぼす影響を検討した実験結果を図12に示す。ノンスラップ工法

図 12 α - η_s 関係

はスカラップがある場合に比較して、最大耐力で約1割増し、変形能力で5割増しかそれ以上の向上が見られる。

今回紹介した被災建築物もスカラップ近傍を起点としたぜい性破壊が生じており、建築鉄骨物の柱梁溶接接合部にはノンスカラップ工法を適用することが望ましい。

またエンドタブや裏当て金の組立溶接などもぜい性破壊の起点となりやすい箇所である。組立溶接は不適切な溶接施工でおこなうとショートビードとなるため、著しい材質の劣化が生じる。このため、エンドタブや裏当て金の組立溶接の方法や位置には十分な注意が必要である。

これらの詳細については日本建築学会の鉄骨工事技術指針を参考にしていきたい。

5. ま と め

実際に被災した建築鉄骨物からぜい性破壊した要因について考察したが、適切な施工がなされた鉄骨については人身に被害があるような倒壊をした例はなく、部分的に壊

れたものが大部分である。今回紹介した被災建築物は、十分に塑性変形を示した後破壊しており、建物全体の崩壊を防ぐという、現行の耐震設計法の基本方針を十分に満足したと言える。これは、鉄骨建築の耐震能力が高いことの現れである。また、接合部ディテールの改良や使用鋼材および溶接接合部の力学的性能の向上等留意すれば、激震時にもぜい性破壊を防止することは可能であろう。

参 考 文 献

- 1) 青木, 中込, 大林, 吉田, 杉本: 兵庫県南部地震の被災鉄骨建築物における柱梁部材の材質劣化に関する実験的研究 その1・その2, 日本建築学会 学術講演梗概集 (近畿) 1996. 8
- 2) 藤本, 青木, 中込, 西沢: 電炉広幅平鋼及び電炉厚鋼板 (SM490A) を用いた柱梁溶接接合部の実験, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 1994. 12, pp. 127~142
- 3) 藤本, 青木, 中込, 西沢: 電炉広幅平鋼及び電炉厚鋼板 (SM490A) を用いた柱梁溶接接合部の破壊性状と素材特性の関係, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 1994. 12, pp. 143~157
- 4) 藤本, 青木, 中込, 西沢: 電炉広幅平鋼及び電炉厚鋼板 (SM490A) を用いた柱梁溶接接合部の塑性変形能力確保のための鋼材の性能, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 1995. 8, pp. 61~72
- 5) 藤本, 青木, 中込, 西沢: 電炉広幅平鋼 (SM490A) を用いた柱梁接合部の仕口ディテールの改良と塑性変形能力の向上, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 1996. 9, pp. 19~30
- 6) 藤本, 青木, 中込, 西沢, 南: 500 N/mm²級鋼の強度と必要靱性, 日本建築眼科医学術講演梗概集 (北海道) 1995. 8
- 7) 中込, 土橋: 高速載荷による溶接 T 継手の変形能力と破壊性状に関する実験的研究, 構造物の安全性および信頼性に関する国内シンポジウム, pp. 495~500, 1987
- 8) akagomi, Tsuchihashi: Fracture and Deformation Capacity of a Welded T Shape Joint Under Dynamic Loading, Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering August 2-9, 1988, JAPAN
- 9) 中込, 矢部・坂本: 梁スカラップの有無が H 形断面柱に溶接接合される H 形鋼梁端部の力学的性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 432 号, 1992. 2
- 10) 中込, 矢部・坂本: 梁スカラップの有無が箱形断面柱に溶接接合される H 形鋼梁端部の力学的性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 440 号, 1992. 10, pp. 125~132

【在庫案内】

溶接法ガイドブック 3 アーク溶接の自動化技術

溶 接 学 会
溶接法研究委員会編

体裁 B5判, 427頁, ソフトカバー, 定価 8,000円 (消費税込み)。

購入の申込は下記へご連絡ください。

申込先: 社団法人 溶接学会 事務局

〒101 千代田区神田佐久間町1-11

TEL 03-3253-0488 FAX 03-3253-3059