1980年代初頭に建設された既存鉄骨建物の溶接品質と現有耐震性能

WELDING QUALITY AND SEISMIC PERFORMANCE OF
EXISTING STEEL BUILDINGS CONSTRUCTED IN EARLY 1980S

吹田 啓一郎*, 佐藤 有希**, 長田 暢浩***

Keiichiro SUITA, Yuki SATOH and Nobuhiro NAGATA

This paper presents results of welding inspection and loading tests conducted to beam-to-column connections cut out from two existing steel buildings constructed in the early 1980s. From the results of thorough welding inspections, i.e. macro-structure tests and ultrasonic inspection, characteristics of welding defects are investigated regarding the location of defects in the deposited metals, kind of defects, and the rate of occurrence. From the results of dynamic loading tests conducted on the beam-to-column connections, the influence of defects on the deformation capacity and the failure procedure are observed.

Keywords : existing building, beam-to-column connection, welding defect, ultrasonic inspection, dynamic loading test, deformation capacity,

既存建物, 柱梁接合部, 溶接欠陥, 超音波探傷検査, 動的載荷実験, 変形能力

1. はじめに

建築物の地震被害に関する予測や防災対策を考えるには実在する建物の耐震性能を精度よく評価することが求められる。鉄骨構造では兵庫県南部地震の被害とその後の研究から、溶接接合部の設計・施工の違いにより早期に破断することがあり、その解決には施工技量、接合詳細や品質管理技術も重要であることが分かってきた。鉄骨構造の普及は圧延H形鋼の製造により1960年代から本格化し、1970年代から柱に角形鋼管を用いるラーメン構造が増え始め、1981年の新耐震設計法からは大半がこの形式を採用し、いずれも柱梁の接合は溶接が主流となり現在に至っている。このような変遷が明らかであっても、溶接の品質と性能を知らずにその時々設計規範や構造形式、工法などの条件だけから建物が有する耐震性能を予測することは難しい。

溶接接合部に欠陥がある場合の力学性能は、加藤ら1~3)による人工欠陥のある平板の突合せ溶接部の引張実験、藤本ら4,5)による未溶着のあるT継手の疲労実験、佐藤ら6,7)による切欠きのあるT継手の引張実験、小野ら8~10)による切欠付平板や人工未溶着を有する梁端溶接部の実験、さらに兵庫県南部地震後の鈴木ら11)、嶋ら12)、田淵ら13)による人工欠陥を有する柱梁接合部の実験など、多くの研究が行われて欠陥の幾何学的条件あるいは破壊靱性などの材料特性と破壊との関係が明らかにされてきた。だが、これらの研究はいずれも人工

的な欠陥を対象にしており、実際の施工で発生する溶接欠陥の実態と、そのような欠陥を有する接合部の構造性能を明らかにした研究は少ない¹⁴⁾。現在の材料と溶接技術で各時代の構造物を再現することは容易ではなく、施工品質の影響を受ける性能の実態を知るには実物を相手に実測調査を重ねて情報を蓄積する以外に方法はない。

この研究は1980年代初頭に建設された鉄骨建物が解体されたものを対象に、その現有性能を実験的に調べたものである。溶接柱梁接合部を対象にまず材料試験や超音波探傷検査(UT検査)で予め機械的性質と溶接欠陥を調べ、次いで切り出した架構の一部を破壊に至るまで載荷して履歴特性と破壊過程を明らかにし、その後、溶接部を切り出して破断状況を観察した。このような手順で当時の鋼材特性と溶接施工技術を確認し、欠陥を有する接合部が保有する変形能力について定量的な情報を得た。

また、施工品質に応じて耐震対策を検討するには、既存鉄骨建物の欠陥を検出する技術が重要となる。溶接の普及に伴って品質を確認するための検査法も発展し、中でも超音波探傷検査(UT検査)は加藤ら1,2)の研究で有効な検査法が確立されて以来、鉄骨建物に適した方法として検査規準¹⁵⁾が整備され、現在も広く活用されている。だが、機器やディテールが今と異なる旧世代の溶接技術と技量で実際に発生する様々な欠陥に対して、今のUT検査がどれほどの検出能力を持つ

本論文は文献21)の発表に追加試験を加えて整理したものである。

* 京都大学防災研究所 助教授・博士(工学)

** 大林組 工修

*** 大林組

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.
Obayashi Corp., M. Eng.
Obayashi Corp.

かについては、十分な検証がされていない。そこで荷重実験後の試験体溶接部を切断してマクロ試験により実際の欠陥位置と種類を確認し、事前のUT検査結果と照合することにより検出精度を調べ、また欠陥発生状況の詳細を確認した。これらの実験や検査を通して、一例ではあるが1980年初頭の鉄骨建物の柱梁接合部の溶接品質と現有する力学性能を調べた。

2. 対象建物

2.1 建物の概要と鋼材

調査対象は1980年建設の建物A、1981年建設の建物Bの2棟あり、いずれも平屋建てで平面、立面を図1に示す。建物Aは1×4スパン、建物Bは1×2スパンで、いずれもX方向両側に長い片持梁が張り出している。構造形式は純ラーメン構造で角形鋼管柱とH形鋼梁を通しダイアフラム形式で溶接接合している。この構成は現在、最も広く用いられているものであり、これが普及する初期の建設とみることができる。2棟の用途や設計仕様はほぼ同じだが、施工者は異なる。図中の波線で囲った7箇所の柱梁接合部を特に重点的に調査した。図中の記号は後述の荷重実験の名称を示し、先頭のLは梁が片側だけのL形、Tは両側に梁のあるT形の試験体を意味する。

梁はSS400材のH-350×175×7×11、柱はSTKR400の□-250×250×9で、断面の幅厚比は柱、梁ともにFAランクである。Y方

図1 建物の平面と立面および調査対象位置

図2 シャルピー衝撃試験結果 (JIS Z2201 V ノッチ試験片)

向通りの梁と、X方向通りの片持梁は梁端に溶接組立のハンチを設けて断面をH-300×150×6.5×9としている。通しダイアフラムは板厚12mmである。引張試験による柱、梁の機械的性質を表1に、シャルピー衝撃試験による梁フランジの遷移曲線を図2に示す。遷移温度は吸収エネルギーで11.5℃、脆性破面率で2.1℃であり、0℃での吸収エネルギーは79.5Jである。これらの鋼材の特性は現在のSN材やBCR材の規格も満足している。

2.2 柱梁接合部

柱梁接合部の詳細をL形について図3に示す。上ダイアフラムは屋根面のブレース端接合部のガセットプレートを用いているので形状は不整形で柱フェイスからの寸法が125mmと大きい。下ダイアフラムは20mmの寸法である。なお、T形は両側に梁ハンチがある以外はL形と同じである。図中にM1～M4で示す太線は後述のマクロ試験片の採取位置を示す。

図4に採用された溶接の種類を示す。現在の柱梁接合部に用いられる方法と同じであり、以下ではパネルとダイアフラムの溶接をSU、SL、梁フランジとダイアフラムの溶接をFU、FL、柱とダイアフラムの溶接をCLと呼ぶ。梁フランジの完全溶込み溶接(FU、FL)はスカラップ工法が採用されているが、現在の標準的な溶接詳細と比較すると以下の点が異なっている。

- (1) スカラップ: 加工はガス切断により、半径は28～42mmの間で一定ではない。スカラップ底にはアールを設けず、フランジの内面に対してほぼ垂直に切断されている。また、開先加工も同様にガスで切断した後にグラインダで仕上げたものと推察される。
- (2) 裏当て金とエンドタブ: ガウジングによる裏はつり形式を採用し、裏当て金は使っていない。裏はつりの作業性のために梁フランジの開

表1 鋼材の引張試験結果 (JIS Z2201 1号試験片)

建物	断面	部位	上降伏点 N/mm ²	下降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	破断伸び %	絞り %	降伏比 %
A	□-250×250×9	柱管壁	352*	320	451	23.5	42.6	77.9
		フランジ	330	320	467	26.2	41.4	70.7
		ウェブ	367	353	481	25.8	54.6	76.3
B	□-250×250×9	柱管壁	348*	321	444	22.3	34.5	78.3
		フランジ	341	321	463	28.3	40.1	73.7
		ウェブ	380	361	479	26.3	46.4	79.2
		フランジ	314	311	436	-	41.9	72.1
	H-300×150×6.5×9	ウェブ	354	335	442	27.0	43.8	80.2

*0.2%offset

図3 柱梁接合部詳細 (図中のM1～M4はマクロ試験片採取位置)

先はすべて内開先である。開先と裏はつりはマクロ試験で確認でき、写真とそのスケッチを図5に示す。図中の①②③の順に溶接を積層した後、①のルート部をガウジングではつり、最後に④を裏溶接したと推察される。柱とダイアフラムの完全溶込み溶接には裏当て金を使用しているが、母材との密着が十分でない場合が多く、図6に例を示すように大きいところで3mmほどの隙間が確認された。

3. 溶接部の検査結果

3.1 超音波探傷検査

図1に示した7箇所の柱梁接合部を対象にUT3種（日本非破壊検査協会）の資格者によりUT検査を行った。文献15)の判定基準に従い、接合部別に集計した合格数などを表2に示す。全体で126の検査箇所があり、その中から212個の欠陥が検出された。合格と判定された溶接は40箇所では合格率は31.7%とかなり低い。建物別に見ると2棟の間での違いが顕著である。建物Aは全検査数が52箇所であり、1箇所あたり平均2.6個の欠陥が見つかって合格率は11.5%と低いのにに対し、建物Bは全検査数が74箇所では1箇所につき平均1.1個の欠陥が見つかり、合格率は45.9%である。2棟の建物の間では1本の溶接線（1検査箇所）に含まれる欠陥数で2.5倍、合格率で4倍ほどの差がある。これは溶接技能者の技量、使用する設備や溶接条件、品質管理技術などによる差が現れたものと推察される。

次に、溶接部位別に集計した判定結果を表3に示す。2棟全体の合格率は、柱とダイアフラムの溶接(CL)が5/28=17.9%、パネルとダイ

アラムの溶接が下部(SL)は5/28=17.9%、上部(SU)は4/28=14.3%となり、全溶接部の平均合格率31.7%よりも低い。建物別に見てもこの3箇所が平均より低い傾向は共通している。一方、梁フランジ溶接は下フランジ(FL)が12/21=57.1%、上フランジ(FU)が14/21=66.7%で、全平均合格率31.7%よりも高い。特に建物BのFU、FLは70～90%の合格率で、これは全平均合格率より2倍以上高くなっている。このように、同じ建物の中でも溶接位置により合格率には顕著な差が見られた。ここで梁フランジに欠陥が少ない理由の一つに、裏はつりによって初層の欠陥が除去されたことが考えられる。

さらに、溶接継目の断面における欠陥位置の分布を調べた。特に欠陥が多く見られたCL、SL、SUを対象に、溶接継目の断面を板厚方向、幅方向にそれぞれ3分割して図7に示す9領域に分け、各領域の欠陥数を集計して表4に示す。板厚方向に3等分した初層、中層、表層に分けて比較すると、合計212個の欠陥の82.5%に当たる175個が初層に位置している。特に初層のダイアラム側では87個の欠陥が検出され、この領域だけで全体の41.0%を占めている。また、継目内の幅方向に比較すると、ダイアラム側、中間、開先側はそれぞれ47.2%、21.2%、31.6%であり、中間よりも、両側の母材と融合する位置に欠陥が多い、などの特徴が見られた。

3.2 マクロ試験

UT検査で欠陥が検出された位置を対象に、重点的にマクロ試験を行った。後述の載荷実験後に塑性変形の生じていない位置から試験体

図4 柱梁接合部の溶接種類と位置記号

図5 梁フランジ完全溶込み溶接のマクロ写真例

図6 柱完全溶込み溶接のマクロ写真例

表2 UT検査による判定結果の全体集計

建物	接合部位置	検査数	合格数	合格率(%)	欠陥数	1箇所当り欠陥数
A	X1Y3(L3U)	18	0	0.0	64	3.56
	X1Y2(L4U)	16	1	6.3	31	1.94
	X2Y3(L5R)	18	5	27.8	39	2.17
	合計	52	6	11.5	134	2.58
B	X1Y1(L2R)	18	9	50.0	15	0.83
	X1Y2(T2R)	18	5	27.8	25	1.39
	X2Y1(L1U)	18	14	77.8	9	0.50
	X2Y2(T1U)	20	6	30.0	29	1.45
	合計	74	34	45.9	78	1.05
合計		126	40	31.7	212	1.68

表3 溶接位置別の UT 検査判定結果

建物	A			B		
	検査数	合格数	合格率(%)	検査数	合格数	合格率(%)
CL	12	0	0.0	16	5	31.3
SL	12	0	0.0	16	5	31.3
SU	12	1	8.3	16	3	18.8
FL	8	3	37.5	13	9	69.2
FU	8	2	25.0	13	12	92.3
合計	52	6	11.5	74	34	45.9

表4 溶接継目内の位置別の UT 検査判定結果

位置	ダイアラム側			中間			開先側			合計
	初層	中層	表層	初層	中層	表層	初層	中層	表層	
CL	27	0	4	4	4	2	25	2	3	71
SL	24	2	1	11	1	2	17	1	1	60
SU	36	3	3	18	2	1	13	2	3	81
合計	87	5	8	33	7	5	55	5	7	212
比率(%)	41.0	2.4	3.8	15.6	3.3	2.4	25.9	2.4	3.3	100

図7 溶接継目の領域分割

の溶接部を切断して試験片を採取した。試験片は建物 A の X1Y3 (L3U) から 7 片, X1Y2 (L4U) から 2 片, 建物 B の X2Y2 (T1U) から 1 片の計 10 片である。採取位置の一例を図 3 に M1～M4 の記号を付して太線で示す。1 片につき 2 断面ずつ, 計 20 断面に含まれる 33 の溶接継目を試験の対象とした。

マクロ試験により合計 46 の欠陥が確認された。欠陥の種類別に見るとスラグ巻き込み 19, 融合不良 6, 割れ 10, 溶込み不良 3, ブローホール 1, オーバーラップ 6, アンダーカット 1 である。マクロ試験の例を図 8, 9 に示す。予め行った UT 検査で確認された欠陥位置も同図 (c) に示す。図 8 の SL のスラグ巻き込み, 図 9 の割れは UT 検査でも対応する位置に欠陥が検出されているが, 図 8(b) 右側の CL の割れのように UT で検出されなかった欠陥もある。

5 種類の欠陥について, 種類別の欠陥発生位置を図 10(a)～(e) に示す。また全ての欠陥の発生位置を重ねて図 10(f) に示す。ここでは, オーバーラップとアンダーカットの外部欠陥, 裏当て金の組立溶接と余盛で確認された欠陥は UT 検査範囲外なので除き, 残る 37 個の欠陥位置を示した。図中のマーカーが欠陥の位置を示し, ● はマクロ試験で確認された欠陥が UT 検査でも検出された場合を示し, ○ はマクロで見つかった欠陥が UT 検査で検出されなかった場合を示す。

UT 検査とマクロ試験の結果を照合した結果, マクロ試験で確認された欠陥 37 のうち UT 検査で検出された欠陥は 28 である。ここで, マクロ試験の欠陥数に対する UT 検査の欠陥数の比を UT 検出率と定義すると, 全欠陥の UT 検出率は 76% である。欠陥の種類別に発生位置と UT 検出率を調べると次の特徴が見られる。スラグ巻き込みは板厚方向の偏りがなく, UT 検出率は $13/18=72\%$ である。融合不良はフランジ開先側に多く見られ, 板厚方向の偏りがなく, UT 検出率は $4/6$

=67% である。割れは開先側の初層に多く, また幅方向の中間にも見られる。UT 検出率は $7/9=78\%$ で高い。溶込み不良はダイアフラム側の初層にだけ見られ, 検出率は $3/3=100\%$, ブローホールは 1 件だけで検出率は 100% であった。

個数が少ない溶込み不良やブローホールを除くと, 欠陥の種類による検出率の差はほとんど認められない。欠陥の位置別の UT 検出率を表 5 に示す。ダイアフラム側, 中間, 開先側の幅方向の位置の違いによる検出率の差は認められないが, 板厚方向では初層, 中層, 表層の順に高い検出率となり, 1.8 倍ほどの差が見られた。表層の検出率が低い理由の一つに, 対象が角形鋼管の柱, パネルとの溶接部であり, 初層は直接波で探査するが, 表層は反射波で探査するという, 探査条件の違いが考えられる。裏はつり形式の梁フランジの場合は両面から探査できるのでこれより高い検出率が期待される。

4. 柱梁接合部の載荷実験

4.1 試験体

前章で説明した溶接欠陥を持つ柱梁接合部の塑性変形能力を, 部分架構試験体による繰返し載荷実験で確認した。試験体は図 1 の記号末尾に U を付した 4 体で, L 形は L1U, L3U, L4U の 3 体, T 形は T1U

表 5 マクロ試験との照合による UT 検査の欠陥検出率

位置	ダイアフラム側	中間	開先側	合計
表層	3/6	1/2	—	4/8
中層	2/3	1/1	5/7	8/11
初層	4/5	2/2	10/11	16/18
合計	9/14	4/5	15/18	28/37

図 8 下ダイアフラムにおけるマクロ試験と UT 検査の例

図 9 上ダイアフラムにおけるマクロ試験と UT 検査の例

図 10 マクロ試験による欠陥種類別の発生位置と UT 検査の検出率

の1体である。記号末尾にRを付した3体は文献16)で補強策の性能確認に用いたので、ここではふれない。L形は柱心から500mm、T形は750mmの位置に高力ボルト摩擦接合の梁継手が設けられているが、試験体では全て溶接により接合しなおした。載荷実験の対象となる接合部は、前述のUT検査で予め欠陥の位置を調べ、また外観検査による表6の結果を得た。外観の不具合は梁フランジに多く見られ、始端の溶込み不良や余盛の不足が見られる。材料試験による強度から柱と梁の全断面、および梁のスカルップ欠損を考慮した有効断面について全塑性モーメント cM_p 、 bM_p 、 bM_{pe} を求め、試験体の曲げモーメントがこの全塑性モーメントに達するときの載荷荷重 cP_y 、 bP_y 、 bP_{ye} をそれぞれ求めて表7に示す。この値が最小となる断面で塑性化が先行すると考えられ、L形は梁端のスカルップ欠損のある断面、T形は柱の端部がこれに該当する計算となる。

4.2 実験方法

図11に2種類の試験体と載荷装置の全体を示す。L形は柱梁接合部の片持ち側から載荷し、反対側の梁端はリンク材でローラー支持した。またT形では、梁両端をピン支持し、柱の先端から載荷した。いずれも図中に示す試験体の各所で構面外変形を拘束している。図中の矢印の位置で変位を計測し部材の変形角を求めた。実験は載荷点の変位で制御し、振幅は試験体架構の全塑性耐力に対応する弾性変形角 θ_y ($=0.021\text{rad}$)を基準に、その整数倍で各振幅2サイクルずつ $4\theta_y$ まで漸増振幅で正負繰り返し載荷した。それでも試験体が破断しない場合は振幅 $4\theta_y$ による載荷を破断するまで繰り返した。また、加力は振幅に応じて振動数の異なる正弦波を用い、最大層間変形角速度が 0.22rad/s の動的載荷とした。

4.3 実験結果

実験から得られた各試験体の履歴特性と最終破断状況の写真を図12

表6 試験体柱梁接合部の溶接外観検査結果

試験体	位置	外観検査結果
L1U	梁フランジ溶接部	上フランジ：始終端部溶込み不良 下フランジ：始終端部溶込み不良
L3U	梁フランジ溶接部	欠陥なし
L4U	梁フランジ溶接部	上フランジ：余盛不足、始終端部溶込み不良 下フランジ：始終端部溶込み不良
T1U	柱仕口溶接部	補強隅肉、オーバーラップ、ビード不整、余盛不足

(a) L形試験体

(b) T形試験体

図11 試験体と載荷装置・変位計測位置 (単位: mm)

～15に示す。履歴特性は、縦軸に載荷荷重 P を試験体が全塑性に至る水平耐力 P_y で無次元化した値、横軸に部分架構の層間変形角 θ をとる。図中に終局に至った点を●、破断した点を×で示す。終局はそのサイクルの最大荷重が、それ以前の最大値の90%を下回ったとき、または破断が生じたときとした。また事前のUT検査で溶接欠陥が検出されたを試験体については欠陥の位置を各図(c)に継目断面の黒丸と、平面図の太線で示した。実験で観察された破壊状況を以下に記す。

(1) L形試験体 (L1U, L3U, L4U)

3体とも層間変形角振幅 0.06rad の2サイクル目で、層間変形角 0.05rad あたりから梁フランジの局部座屈が生じて耐力が低下し、最大耐力の90%以下となって終局と判断された。この終局までの履歴挙動は3体の試験体でほぼ同じであるが、その後の半サイクルから1サイクルの間に、それぞれ梁フランジの溶接部周辺の異なる位置から亀裂が生じて延性破断した。UT検査結果を参照しながら、欠陥の有無による破壊過程の違いを以下に説明する。

L1U (図12)：外観検査では上下フランジの溶接始終端部に溶込み不良が観察されたが、UT検査による内部欠陥は検出されなかった。実験では振幅 0.06rad の2サイクル目で下フランジ側のスカルップ底からフランジ母材へ亀裂が進展して全面破断した。L形の3体の中で唯一、溶接部から破断しなかった試験体である。この破壊形式はスカルップの形状が原因で応力集中により生じることが既往の研究で指摘されている。例えば山本ら17)、田淵ら18)の実験をまとめた文献19)によれば、スカルップ底にアールがない場合、裏当て金の組立溶接がスカルップ底に重なるときに特に変形能力が小さく、また裏はつり形式でもかなり変形能力が小さいことが確認されている。この試験体は当時の接合詳細の特徴である、底にアールのないスカルップ形状が原因で変形能力の限界に至ったと考えられる。

L3U (図13)：外観検査で不良はなかったが、UT検査では図13(c)に示す欠陥が検出され、特に初層の端部に多く集中していた。実験では梁フランジ局部座屈で耐力が低下した後に、梁フランジ溶接の始終端からの亀裂が起点となり、ほぼダイアフラム側の熱影響部に沿って延性破断した。スカルップ周辺にはL1Uに見られた損傷は観察されず、また上フランジ側は通しダイアフラムの出寸法が大きいこともあり特に損傷は観察されなかった。亀裂の発生位置はUT検査による欠陥の位置と一致し、また載荷後の破面観察でこの亀裂の起点となった溶接端部には幅5mm程度の赤錆が板厚方向に貫通する位置に観察されていて、この未溶着部分が破断に至った原因と判断される。後述の破断までの変形能力はこの試験体が最も低く、溶接端部の板厚貫通欠陥

表7 試験体の全塑性耐力計算値

試験体	cM_p	bM_p	bM_{pe}
	kN・m		
L1U	264	277	252
T1U	267	275	250
L3U,L4U	267	275	250
試験体	cP_y	bP_y	bP_{ye}
	kN		
L1U	108	112	102
T1U	96.2	207	188
L3U,L4U	110	111	101

は破断と変形能力の低下に大きく影響するという鈴木ら¹¹⁾の指摘に符合する。

L4U (図14) : 外観検査で梁フランジ溶接に余盛不足や始末端部の溶込み不良が確認された。UT検査でも欠陥が見つかり、上フランジはダイアフラム側に、下フランジは開先側に位置していた。実験では上フランジの溶接始末端部の亀裂から破断し、破断線の大部分はダイアフラムの母材であった。亀裂の発生位置は、UT検査により欠陥が検出された位置とは一致しないが、外観検査で溶接始末端部の溶接不良や余盛不足が確認された位置であり、外観に現れたこれらの欠陥が破断に影響しているとみられる。なお、下フランジのスカルップ底にもわずかに亀裂が発生したが、これが全面破断に至る前に、上フランジ

(a) 履歴曲線

(b) 破断状況写真

図12 L1Uの実験結果

(a) 履歴曲線

(b) 破断状況写真

図13 L3Uの実験結果

(a) 履歴曲線

(b) 破断状況写真

図14 L4Uの実験結果

(a) 履歴曲線

(b) 破断状況写真

図15 T1Uの実験結果

の破断が先行した。

(2) T形試験体 (T1U、図15)

表7の部材耐力を見ると梁端が柱端の約2倍の耐力を持ち、損傷は柱端に生じることが予想される試験体である。振幅0.06radの载荷を2回繰り返した後に柱母材が局部座屈し、次の0.08radの振幅を3回繰り返した後、柱の局部座屈で大きな繰返し面外変形を受けた部分から亀裂が発生して柱が破断した。梁端溶接部やスカルップ底には損傷が観察されなかった。UT検査では図15(c)に示すように通しダイアフラムと柱の溶接の初層に全線にわたる大きな欠陥などが見つかったが、この溶接には図8(b)に例示する補強隅肉がされており、これが内部欠陥に起因する破断を防いだと考えられる。この補強隅肉は、他の試験体でも柱とダイアフラムの溶接に多く用いられており、溶接継目の耐力に対する補強効果があると見られる。

(c) 破断部スケッチ

表8 各試験体の変形能力

試験体	最大層間変形角 rad	累積塑性変形倍率 η	
		終局時	破断時
L1U	0.0610	13.9	18.0
L3U	0.0608	12.9	13.7
L4U	0.0635	13.9	21.6
T1U	0.0814	16.7	56.2

(c) UT検査結果

(d) 破断部スケッチ

(c) UT検査結果

(d) 破断部スケッチ

(c) UT検査結果

4.4 柱梁接合部の変形能力

実験から得た変形能力を表8にまとめる。最大変形角はどの試験体も0.06radを超えてかなり大きい。その理由には弾性限変形角 θ_y が0.021radと大きいことがある。梁端接合部が破断したL形では最大塑性変形角が0.03rad程度まで持ちこたえたが、これは板厚が11mmと比較的小さく、鋼材は400N/mm²級で機械的性質が十分な強度と靱性を持ち、破面の大部分が延性破断であったことが関係すると考えられる。だが、実験から得た履歴曲線の囲む面積を $P_y\theta_y$ で除して計算される累積塑性変形倍率 η を見ると、フランジの局部座屈で決まる終局までの値はL形が3体とも13～14でほぼ同じ値を示し、T形はこれよりやや大きく17程度である。破断までの値を比較すると、L形は3体の試験で1.5倍ほどの差があるが、これは溶接欠陥との関係で破断位置や発生時期が異なったことによる。この η の大きさを既往の研究と比較すると、弾性限変形の大きさや載荷履歴が異なるので直接の比較は難しいが、それでも文献20)などで示されている欠陥のない現在の接合詳細による場合の変形能力が概ね40以上であるのと比較して小さく、文献19)でスカラップ底にアールのない場合に多く示される5～10に近い値であり、欠陥による変形能力の低下が認められる。また、T形は終局から破断までの間で η に余裕があるが、これは局部座屈の繰返しで破断に至ったことによる。

5. 結論

1980～1981年に建設された平屋建て鉄骨建物2棟を対象に柱梁接合部の溶接品質をUT検査、外観検査とマクロ試験で調べ、また柱梁接合部の一部を切り出して動的載荷により変形能力を調べた。一例ではあるが、当時の鉄骨建物の品質と性能について以下の知見を得た。

(1) 角形鋼管柱とH形鋼梁を通しダイアフラム形式で接合する場合の溶接詳細として、開先加工、スカラップ加工、溶接詳細などの現在の標準と異なる詳細を確認した。

(2) 完全溶込み溶接のUT検査では、建物により欠陥数や合格率の平均が最大4倍ほど異なり、裏はつり形式の梁フランジは合格率が高いが、裏当て金形式の柱やパネルと通しダイアフラムの溶接に欠陥が多く検出された。特に、初層のダイアフラム側、初層のフランジ側に多く、両者で全体の70%近くを占めた。欠陥の発生に対する技量と溶接方法や管理技術の影響が改めて確認された。

(3) マクロ試験の結果から、溶接欠陥の種類によって発生する位置と比率が異なる実態を示した。UT検査による欠陥検出率を比較した結果、スラグ巻込み、融合不良、割れの欠陥の76%を検出することができた。また、鋼管柱の溶接部の検出率は表層よりも初層が1.8倍ほど高いなど、溶接部位と欠陥位置によりUT検査による検出率に差がみられた。

(4) 柱梁接合部を繰返し載荷した実験から接合詳細や溶接欠陥と、破壊性状や変形能力の関係を調べた。梁端溶接部が最危険断面のL形試験体では梁フランジの延性破断により破壊に至ったが、溶接欠陥がない場合は鋭角なスカラップ底からの亀裂が起点となり、また、溶接欠陥がある場合は欠陥の関与する位置からの亀裂が起点となり、欠陥の有無と位置により破壊過程と塑性変形能力が異なることを確認した。破断までの累積塑性変形倍率は14～22で、現在の接合詳細による欠陥のない接合部よりも小さく、また欠陥による低下が認められた。最大塑性変形角は0.03rad程度であった。

謝辞

既存建物の鉄骨をご提供いただいた関係の方々、並びに溶接部の検査にご協力いただいた故 浅野孝男氏（ダブルアイエル）、丸岡義臣氏（丸岡義臣技術研究所）に厚く感謝の意を表します。本研究の一部は科学研究費・基盤研究B（代表者：吹田啓一郎）の助成を受けた。

参考文献

- 1) 加藤勉、古沢平夫、森田耕次：超音波斜角探傷法による欠陥の評価(Ⅰ)、日本建築学会論文報告集、第241号、pp.33-41、1976年3月
- 2) 加藤勉、古沢平夫、森田耕次：超音波斜角探傷法による欠陥の評価(Ⅱ)、日本建築学会論文報告集、第244号、pp.21-31、1976年6月
- 3) 加藤勉、森田耕次、古沢平夫、下村波基：欠陥を有する溶接部の耐力と変形能力に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第350号、pp.86-93、1985年4月
- 4) 藤本盛久、泉満：欠陥を有する溶接部の変形能力に関する研究（T継手突合せ溶接部の低サイクル塑性疲労実験 その1）、日本建築学会論文報告集、第288号、pp.61-71、1980年2月
- 5) 藤本盛久、泉満：欠陥を有する溶接部の変形能力に関する研究（T継手突合せ溶接部の低サイクル塑性疲労実験 その2）、日本建築学会論文報告集、第303号、pp.21-30、1981年5月
- 6) 佐藤邦彦、豊田政男、岡本修平：骨組構造物における溶接欠陥を持つ部材の全面降伏後破壊性能に関する研究（第1報）、溶接学会誌、第50巻第1号、pp.71-77、1981年1月
- 7) 佐藤邦彦、豊田政男、岡本修平：骨組構造物における溶接欠陥を持つ部材の全面降伏後破壊性能に関する研究（第2報）、溶接学会誌、第50巻第7号、pp.42-48、1981年7月
- 8) 小野徹郎、中川進一郎：COD破壊基準による切欠付平板引張実験の検討（欠陥を有する溶接接合部の破壊挙動に関する研究 その1）、日本建築学会構造系論文報告集、第347号、pp.75-82、1985年1月
- 9) 小野徹郎、中川進一郎、鈴木孝彦：切欠付平板の破壊挙動に関する数値解析（欠陥を有する溶接接合部の破壊挙動に関する研究 その2）、日本建築学会構造系論文報告集、第352号、pp.90-97、1985年6月
- 10) 小野徹郎、中川進一郎：欠陥を有する柱－はり接合部の塑性変形能力に関する破壊力学的検討（欠陥を有する溶接接合部の破壊挙動に関する研究 その3）、日本建築学会構造系論文報告集、第357号、pp.72-80、1985年11月
- 11) 鈴木孝彦・石井匠・森田耕次・高梨晃一：欠陥を有する柱梁接合部の破断性状に関する実験的研究、日本鋼構造協会、鋼構造論文集、第6巻第23号、pp.149-164、1999年9月
- 12) 嶋徹、石原完爾、濱田弘行、原田幸博、西川耕二、鄭聖王民、鈴木眞一、森田耕次：始終端部に欠陥を有する突合せ溶接部の脆性的破壊に関する実験的研究、日本鋼構造協会、鋼構造論文集、第10巻第38号、pp.17-30、2003年6月
- 13) 田淵基嗣、田中剛、吉村鉄也、安井一浩、石原完爾、横田和伸、藤田哲也、三村麻里：梁端部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響（その5～9）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、C-1構造Ⅲ、pp.867-876、2003年9月
- 14) 尾熊政男、石原節夫、大垣克己、高松隆夫、松尾彰、南宏一、山口清司、丸山陵：既存鉄骨造屋内運動場の耐震性能に関する研究（その5～その10）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、C-1構造Ⅲ、pp.1023-1034、2003年9月
- 15) 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説、日本建築学会、1989年
- 16) 佐藤有希、吹田啓一郎：既存鉄骨建物の柱梁接合部の耐震補強、日本鋼構造協会、鋼構造年次論文報告集、第11巻、pp.451-458、2003年11月
- 17) 山本昇、石井匠、森田耕次：はり端溶接接合部の力学的挙動におよぼすスカラップ形状の影響、構造工学論文集、Vol.39B、pp.493-506、1993年3月
- 18) 田淵基嗣、金谷弘、佐柳光昭：鋼管柱・はり接合部の力学性状に与える接合部詳細の影響（その7内ダイアフラム補剛形式接合部の実験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、C構造Ⅱ、pp.1139-1140、1991年9月
- 19) 鋼構造接合部の力学性状に関する研究の現状、4.2節 スカラップ、日本建築学会（鋼構造運営委員会・接合小委員会）、pp.135-142、1993年10月
- 20) 井上一朗、甲津功夫、吹田啓一郎、多田元英、立山英二、田中剛、中島正愛、丸岡義臣、南二三吉、森田耕次：通しダイアフラム形式で角形鋼管柱に接合されるH形鋼梁の塑性変形能力に関する実大実験（その1～5）、日本鋼構造協会、鋼構造論文集、第4巻第16号、pp.27-104、1997年12月
- 21) 吹田啓一郎、佐藤有希、長田暢浩：既存鉄骨建物の耐震性能と耐震補強（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、C-1構造Ⅲ、pp.937-942、2003年9月

（2004年4月10日原稿受理、2004年8月19日採用決定）