

[建築構造]

阪神・淡路大震災で破断した柱梁仕口部近傍と破面の調査

—き裂発生を検証と材質変化の分析—

杉本 浩一 高橋 泰彦

概 要

阪神・淡路大震災で梁端溶接部が破断して解体したS造建物がある。本研究では、このS造5階建の建物から、柱梁部材を持ち帰り、震災による被害の実態および原因を分析するとともに、材質および破壊状況を調査した。その結果、次のことがわかった。1) 使用していた鋼材には材質的な問題点は存在しなかった。2) 鉄骨柱梁仕口部の破面観察から、き裂発生の実態を解析した。3) スカラップ底と溶接部に冶金的なノッチや微小欠陥が存在していた。4) 梁フランジは塑性履歴を受けた後、3) のような部分から延性破断を誘発し、それが脆性的な劈開破断となり伝播したことがSEM解析により確認された。5) 今後、裏当て金とスカラップの仮付け溶接は重複させないことが重要であることがわかった。

1. はじめに

阪神・淡路大震災で、多くの柱梁仕口部が破断して、解体したS造5階建の建物の損傷状況の調査は、現行の接合形式を評価する上で重要な教材となる。

本報告は、被害状況ならびにき裂部の実態を調査するとともに、地震による塑性履歴と溶接による熱履歴が材質に与える影響を把握し、損傷の範囲と補修溶接の適否を明らかにすることを目的とした。

2. 被災建物調査

2.1 建物概要

大震災で被災し、解体撤去した鉄骨造建物は、冷間成形角形鋼管柱とH形鋼梁のラーメン構造5階建て建物である。2階～屋上梁伏図をFig. 1に、軸組図をFig. 2に示す。本建物は新耐震施行以後に設計・施工された事務所ビルである。

Table 1, Table 2に南北方向(A, B, C通り)の梁、柱の断面を示す。この建物は主に南北方向の構面に被害を受けていたため、東西方向の梁の断面は示していない。

柱梁仕口部では、梁通しダイヤフラム形式が使用されている。工場溶接によるブラケット方式の梁端部はスカラップを設けた裏当て金付きの標準的な完全溶込み溶接となっている。

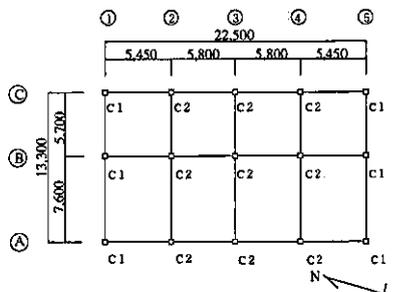


Fig. 1 2階～屋上梁伏図  
2~R Floor Framing Plan

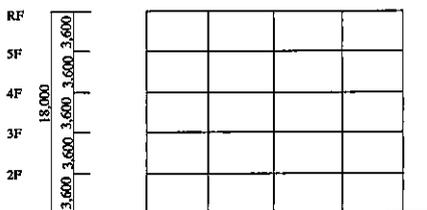


Fig. 2 A, B, C通り 軸組図  
A, B, C Section Framing Plan

Table 1 梁断面リスト  
Schedule of Beams Member

階	A, B, C 通り
5～屋上階	H-496 x 199 x 9 x 14
3～4 階	H-596 x 199 x 10 x 15
2 階	H-600 x 200 x 11 x 17

Table 2 柱断面リスト  
Schedule of Columns Member

階	A, C 通り		B 通り	
	C1	C2	C1	C2
5階	□-350 x 12	□-350 x 12	□-350 x 12	□-350 x 12
4階	□-350 x 12	□-350 x 12	□-350 x 12	□-400 x 12
3階	□-400 x 12	□-400 x 12	□-400 x 12	□-400 x 16
2階	□-400 x 16	□-400 x 16	□-400 x 16	□-400 x 19
1階	□-450 x 19	□-450 x 16	□-450 x 19	□-450 x 22

用語説明)

ディンプル：金属材料が延性を有する状態で過荷重を受けて、多数の微小空洞 (micrvoid) を生じ、その合体 (coalescence) により破壊した場合、このディンプル (dimple) を示す。

シェvronパターン：矢筈模様 (chevron pattern) のことをいう。脆性破壊の進行方向とこの模様には一定の関係がある。劈開破断：結晶格子面に垂直な方向は分子間の結合力が弱く、この面に沿って生じた割れ (cheavage fracture) が主要なものをいう。

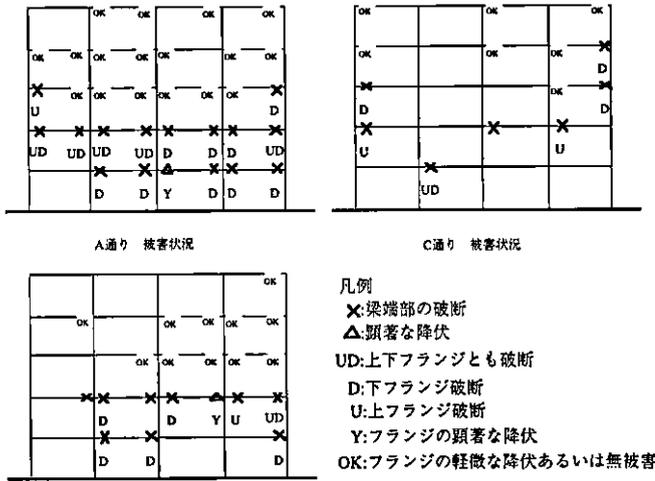


Fig.3 各構面の被害状況  
Damage of Each Plane of Structure

Table 4 梁フランジの材料試験結果  
Material Test Results for Beam Flanges

板厚 mm	摘要	0.2% 耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	降伏比 %	破断伸び %	0. C	
						vE J	B %
15	圧延H形鋼 RH-596x199x10x15	332	473	70.0	36.0	97.0	43.7
17	組立H形鋼 BH-600x225 200*12x16	309	457	67.7	41.0	107.7	0.3

Table 5 化学成分分析結果と炭素当量  
Chemical Composition Results and Carbon Equivalent 単位 (wt%)

板厚 mm	摘要	化学成分											炭素当量 Ceq	
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti		Nb
15	圧延H形鋼 フランジ	0.17	0.17	0.80	0.019	0.015	0.007	0.021	0.030	<0.005	0.002	0.001	0.001	0.313
16	組立H形鋼 フランジ	0.14	0.25	0.73	0.008	0.010	0.016	0.020	0.019	<0.005	0.003	0.001	0.001	0.308
22	鋼板 ダイヤフラム	0.19	0.20	0.45	0.01	0.007	0.008	0.015	0.021	<0.005	0.004	0.001	0.001	0.279
-	溶接金属	0.08	0.38	1.01	0.013	0.007	0.21	0.020	0.029	0.007	0.035	0.009	-	-

\*炭素当量 計算式: Ceq=C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/40Ni + 1/5Cr + 1/4 Mo + 1/14V (wt%)

2.2 被害状況

2.2.1 被害概要 海岸から0.7kmの位置にあり、周辺には、中破程度の被害が多数見られた。海辺近くでは大破や倒壊など被害が大きくなる傾向が見られた。

この建物では、1階柱は北方向に傾斜しており、残留傾斜角は約1/100であった。外壁PCコンクリートパネルには、目地ずれおよび不陸が生じていた。耐火被覆を剥がして調査したところ、5階を除くすべての階で梁の破断が観察され、建物の骨組には南北方向の損傷が著しかった。Fig. 3に各構面の被害状況を示す。

梁端部の上下のフランジに破断を生じたにもかかわらず、落床を免れていたのは、被害があった方向と直交する合成梁に鉛直荷重が流れたためと考える。

2.2.2 柱梁仕口部の被害 梁端部はいずれも局部屈曲と塑性変形が生じた後、スカラップ底を起点にした脆性的な破断面と延性な破断面が確認された (Photo1~3参照)。

骨組全体は設計地震力をはるかに上回る地震動に対し、典型的な梁降伏型のメカニズムを形成して抵抗したものと推察される。

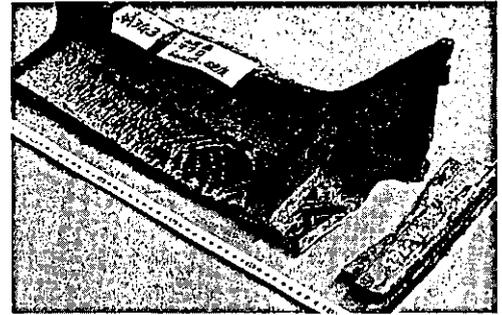


Photo 1 脆性的に破断した柱梁仕口の梁端部  
Beam End of Beam-to-Column Connection Broken in Brittle Manner

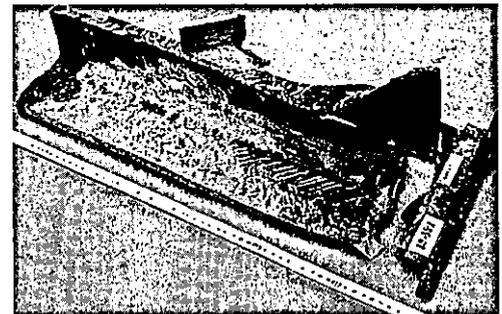


Photo 2 延性的に破断した柱梁仕口の梁端部  
Beam End of Beam-to-Column Connection Broken in Ductile Manner (Rolling H-Section)

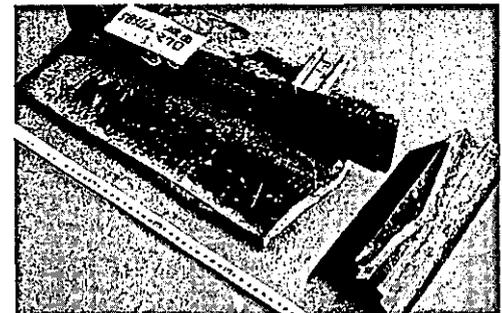


Photo 3 延性的に破断した柱梁仕口の梁端部  
Beam End of Beam-to-Column Connection Broken in Brittle Manner (Built-up H-Section)

と推察される。

2.3 梁材の材質

設計図書によれば、梁には一般構造用鋼材 (SS41) が使用されていた。

Table 4に示す梁フランジの材料試験結果によれば、どちらもSS41の規格値を満足している。0℃における吸収エネルギーの値は、ともにSM400C材の規格値 (47J以上) に合致し、極端な低靱性材ではないと考えられる。

次に、梁フランジ、ダイヤフラムおよび溶接金属の化学成分分析結果と炭素当量をTable 5に示す。フランジおよびダイヤフラムは元素P,Sが非常に低い値をもっていたので、高炉材と推察される。溶接金属はTi,Cuの分析結果から、炭酸ガスアーク溶接用鋼ワイヤ (YGW-11) 系ソリッドワイヤが使用されていたと考えられる。

### 3. 柱梁仕口部の破断面の調査

建物の梁には圧延H形鋼と組立H形鋼が使用され、別々の破断パターンが確認された。以下、Table 6の試料名称を用いて、調査結果を説明する。

本調査では、目視によって梁端部の破面パターンを識別し、マクロ横断面の金属組織によりき裂部付近を観察する。最後に、ミクロ破面のSEM（走査電子顕微鏡）解析像と照合し、破断原因を推察するとともにき裂の伝播が延性的か脆性的かを判定する。

#### 3.1 梁材の端部の観察

(1) 圧延H形鋼 (RH-1) 垂直で単純な破面を呈している。シェブロンパターンが観察されることから、脆性的な破断であると判断される (Photo 4 参照)。

Table 6 柱梁仕口部の破断面  
Fracture Surface of Beams-to-Column Connection

試料名称	梁材	柱梁仕口部の破断状況
RH-1	圧延H形鋼	脆性的な破断
RH-2	圧延H形鋼	延性的な破断
BH-1	組立H形鋼	脆性的な破断

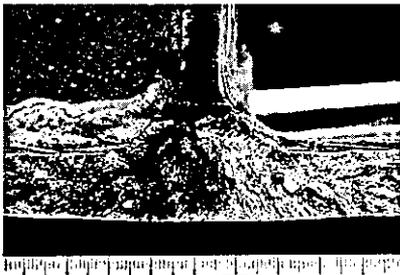


Photo 4 脆性的に破断したフランジの破面 (RH-1)  
Fracture Surface of Flange Broken in Brittle Manner

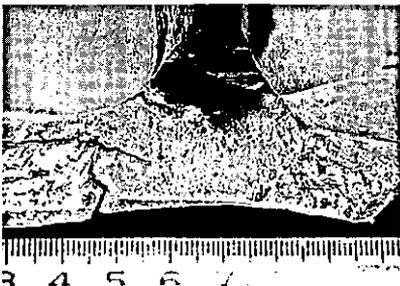


Photo 5 延性的に破断したフランジの破面 (RH-2)  
Fracture Surface of Flange Broken in Ductile Manner

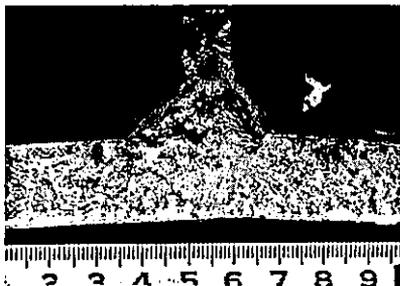


Photo 6 脆性的に破断したフランジの破面 (BH-1)  
Fracture Surface of Flange Broken in Ductile Manner

(2) 圧延H形鋼 (RH-2) 絞りを伴った複雑な破面を呈し、板表面に対して斜めの部分が多く、延性破壊に特有のきめ細かい灰色を呈している。座屈を起こしていない側の約2/3はすべりの痕跡が、残りの1/3は伸長の痕跡が観察された。

したがって、延性的な破断であると判断される (Photo 5 参照)。

(3) 組立H形鋼 (BH-1) 破面には延性的な痕跡が少なく、ほぼ垂直で粗いシェブロンパターンが観察されることから脆性的な破断であると判断される (Photo 6 参照)。

#### 3.2 マクロ横断面の金属組織観察

(1) 圧延H形鋼 (RH-1) 破断は、「ガス切断したスカラップ底」と「裏当て金のすみ肉溶接」との境界付近で脆性的に発生した (Photo 7 参照)。

(2) 圧延H形鋼 (RH-2) 破断は、「裏当て金のすみ肉溶接」の止端部で延性的に発生した (Photo 8 参照)。

(3) 組立H形鋼 (BH-1) 破断は、「スカラップの回し溶接」と「裏当て金のすみ肉溶接」との中間付近で脆性的に発生した (Photo 9 参照)。

#### 3.3 ミクロ破面のSEM解析

(1) 圧延H形鋼 (RH-1) 脆性的な破面は「裏当て金のすみ肉溶接部」と「母材」からなり、二つの破面形態を呈していた。前者は細かなディンプルパターンであり (Photo 10 参照)、後者は劈開破面であった (Photo 11 参照)。

き裂はスカラップのガス切断部をすみ肉溶接した部分に存在した「融合線に沿ってできた0.1~0.5mmクラスの気孔群」から延性破壊を起こし、溶接熱影響部から母材へ脆性的に劈開破壊が伝播したと考えられる。

この気孔群は、狭隘なウェブ貫通のスペースで連続溶接を強いるため十分な溶接条件を確保しにくいことに起因する「微小きず (ピンホール等)」であると思われる。

(2) 圧延H形鋼 (RH-2) 延性的な破面は「すみ肉溶接部」と「母材」からなり、横断面はすべてディンプルパターンであった (Photo 12 参照)。したがって、き裂は局部座屈が先行した後、もろい溶接熱影響部から母材へ断面収縮を伴いながら、延性的に伝播したものと考えられる。

(3) 組立H形鋼 (BH-1) 脆性的な破面は「裏当て金のすみ肉溶接部とスカラップの回し溶接部」と「母材」からなり、二つの破面形態を呈していた。前者はディンプルパターンであり (Photo 13 参照)、後者は劈開破面であった (Photo 14 参照)。

き裂はスカラップ底で回し溶接と裏当て金のすみ肉を重複させる部分に存在した「ビード間の不完全な融合組織」から延性破壊を起こし、母材へ脆性的に劈開破壊が伝播したと考えられる。この融合組織は、交差する溶接であったため不安定な多重熱履歴を受けることに起因する「冶金的な切欠き」と思われる。



### 4.2 引張試験結果

応力-ひずみ曲線を Fig. 5 に示す。健全部分は、降伏点が現われ、塑性履歴を受けた部分は、降伏棚が消滅していることが分かった。

次に、引張試験結果を Table 7 に示す。塑性履歴を受けた部分の一樣伸びは健全部分の 0.73~0.83 倍の値 (22.5~25.3%) になっている。Fig. 6 に示す機械的性質の分布によれば、各特性の変化量と破断位置からの距離の関係は明瞭な相関性を示していない。塑性ひずみが一定値 (5~10%) を越えたため、各特性に有意差は残っていないと思われる。

### 4.3 シャルピー衝撃試験結果

シャルピー衝撃試験結果を Table 8 に示す。破断位置から約 60mm 離れている部分の 0℃における吸収エネルギーは健全部分の 0.12~0.24 倍の値 (12~23J) と非常に低い値になっていることが分かった。

次に、Fig. 7 に示す破断位置からの距離を横軸にした吸収エネルギーの分布によれば吸収エネルギーは破断位置および縁端からの距離が短いほど、低い値となり、距離と比例の関係になっている。ただし、破断位置から 250mm 以上離れると、変化量とばらつきが相殺し合うため、一定値に漸近していると思われる。

### 4.4 硬さ試験結果

破断位置からの距離を横軸にした硬さの分布を Fig. 8 に示す。吸収エネルギーを評価ができない範囲 (0~60mm) の硬さは、健全部分の約 1.3~1.5 倍 (Hv180~205) の値になっていることが分かる。

破断位置からの距離が短いほど、高い硬さの値を示し、おおむね距離と反比例の関係になっていた。ただし、破断位置から 200mm 以上離れると、一定値に漸近し、健全部分の硬さ (Hv140 前後) に戻っていた。

このように、硬さの変化量と破断位置からの距離の関係は相関性を示すことが確認できた。

## 5. 補修溶接による材質変化の調査

塑性履歴を受けた部分の補修溶接において、局部的な溶接ひずみによる割れや溶接熱影響部付近の軟化現象が懸念される。そこで、塑性履歴後、破断した柱梁接合仕口部 (前述 3 章の RH-1) から梁フランジを採取して、補修溶接によって材質がどの程度変化するかを明らかにすることを目的とし、塑性履歴の有無を実験変数として溶接熱影響部の吸収エネルギーと硬さを調査した。

### 5.1 調査概要

Fig. 9 に試験体の形状と寸法を、Table 9, Table 10 に補修溶接条件を、Fig. 10 に補修溶接部の積層法を示す。

試験体はガウジングにより健全部分と塑性履歴を受けた部分の破断面同士を船底型に加工し、突合せ溶接を施した。

なお、JIS 4 号シャルピー衝撃試験片は試験片長手方向

Table 7 SS41の引張試験結果  
Tensile Test Results of SS41

破断位置からの距離 (mm)	0.2%耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	一樣伸び %
60	316	504	23.9
120	310	496	25.3
180	337	507	22.5
240	309	491	23.7
300	304	495	24.9
健全部分	332	473	30.8

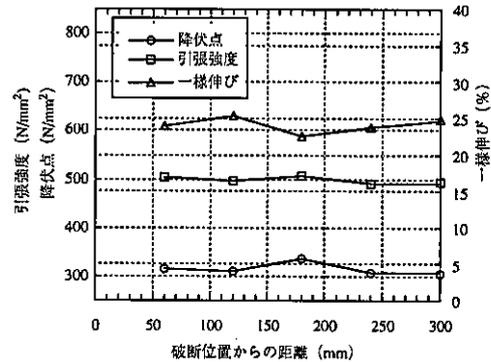


Fig.6 塑性履歴を受けた梁端の機械的性質の分布  
Distribution Chart of Tensile Properties of Suffered Beams End from Plastic Hysteresis

Table 8 SS41のシャルピー衝撃試験結果  
Charpy Test Results of SS41

破断位置からの距離 (mm)	vE0 (J)			
	縁端からの距離 (mm)			
	35	55	75	平均値
60	23	17	12	17
120	12	35	44	30
180	55	35	88	59
240	33	94	132	86
300	52	104	89	82
健全な部分	73	104	114	82

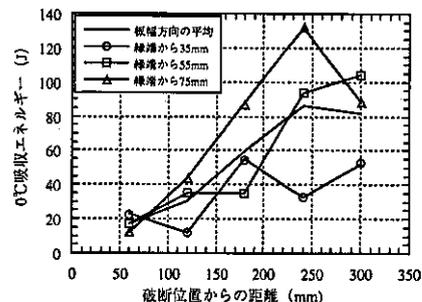


Fig.7 塑性履歴を受けた梁端の吸収エネルギーの分布  
Distribution Chart of Energy Absorption of Suffered Beams End from Plastic Hysteresis

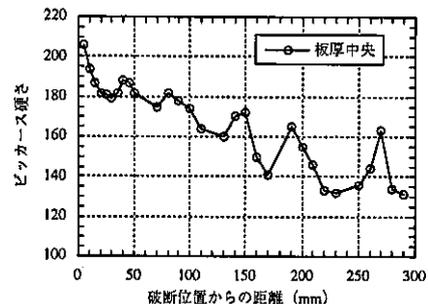
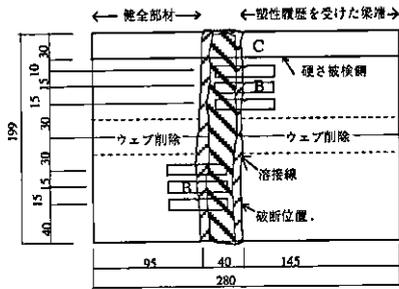


Fig.8 塑性履歴を受けた梁端の硬さの分布  
Distribution Chart of Hardness of Suffered Beams End from Plastic Hysteresis



B:シャルピー衝撃試験片 C:硬さ試験片 単位 (mm)  
 Fig. 9 補修溶接部の形状と寸法  
 Shape and Dimension of Repair Welding

Table 9 補修溶接の電流, 電圧  
 Electric Current and Voltage for Repair Welding

溶接方法	溶接材料	電流 A	電圧 V
炭酸ガスCO <sub>2</sub>	JIS Z 3312	350	36
アーク溶接	YGW II 1.4 #		

Table 10 補修溶接の速度, 入熱量  
 Speed and Heat Input for Repair Welding

パス	パス間温度 °C	溶接速度 cm/min	入熱量 kJ/cm
1	-	27.9	27.1
2	-	28.6	26.4
3	290	27.3	27.7
4	375	18.8	40.2
5	410	18.2	41.5

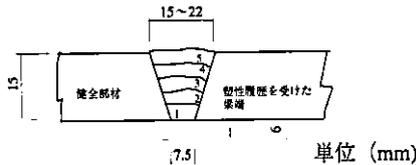


Fig. 10 補修溶接部の積層法  
 Split-Layer Technique of Repair Welding

と圧延方向が一致するように採取し、ノッチを溶接線と平行に加工した。ピッカース硬さ試験は、試験荷重 10kgf, 2mm ピッチで、溶接線に直角に測定した。

### 5.2 溶接熱による焼鈍効果

溶接熱影響部にノッチ部が来るように行ったものと前述した破断位置近傍と健全部分の吸収エネルギーの値をまとめて Table 11 に示す。塑性履歴を受けた部分の 0°C の吸収エネルギーは溶接前、23J と低い値であった。補修溶接後、その熱影響部は健全な部分の熱影響部の 0.79 倍、元の健全な部分の 1.09 倍の値 (106J) になっている。このように、塑性履歴を受けた部分を溶接すると、熱影響部に鋼材組織の焼鈍現象が起きることが確認された。

### 5.3 溶接部の硬さ勾配

溶接線に直角な断面のピッカース硬さを計測した結果を硬さの分布として Fig. 11 に示す。塑性履歴を受けた部分の熱影響部の硬さは健全な部分の熱影響部の (Hv 135~145) にほぼ等しく、溶接金属部で最高値 (Hv 160 程度) を示すことから、鋼材の溶接性に化学組成上の問題は生じていないと考えられる。一方、非加熱部分にかけての硬さ勾配を比較すると、塑性履歴を受けた部分の勾配は健全な部分の勾配に比べ、変化量が大きくかつ逆勾配となることが確認された。

Table 11 補修溶接部のシャルピー衝撃試験結果  
 Charpy Test Results of Repair Welds

試験位置	0 °C		
	vEb J	B %	
塑性履歴を受けた梁端	非加熱部	23	100
	熱影響部	106	36.0
健全部分	熱影響部	134	46.0
	非加熱部	97	43.7

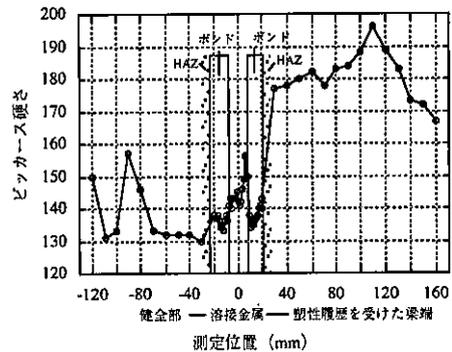


Fig. 11 補修溶接のシャルピー衝撃試験結果  
 Distribution Chart of Hardness of Suffered Beams End from Plastic Hysteresis

## 6. 結論

阪神・淡路大震災で解体された建物の被害調査ならびに柱梁仕口部の観察を行うとともに、梁の破断位置近傍と補修溶接部の材料試験を行い、次のことが明らかになった。

(1) 被災建物調査 骨組全体は設計地震力をはるかに上回る地震動に対し、典型的な梁降伏型のメカニズムを形成して抵抗したものと推察される。

(2) き裂部の破断形態 梁フランジは塑性履歴を受けた後、スカラップ底で組織の不連続部に存在した微小きずや冶金的な切欠きから延性破壊を誘発し、それが脆性的な劈開破壊となり伝播したことがSEM解析により確認された。

(3) 塑性履歴を受けた部分の材質 吸収エネルギーと硬さの値から、損傷の程度を推測できることが分かった。リューダースラインの見られた約 300mm の調査範囲では降伏棚は消滅し、一様伸びは健全部分の 70~80% に低下していたことが確認された。0.2% 耐力および引張強さの変化量と破断位置からの距離の関係は、明確な相関性を示すには至らなかった。

(4) 補修溶接部の材質 塑性履歴を受けた部分で直接補修溶接した場合、溶接熱影響部から非加熱部にかけて通常の処女材よりも鋭い硬さ分布が生じ、かつ逆勾配であることが確認された。

### 参考文献

- 1) 中込忠男, 青木博文, 増田正之: 塑性歪を受けた構造用鋼板の力学的特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.1491~1492, (1984.10)
- 2) 矢部喜堂, 石川 登: 硬さ測定による鉄骨部材の塑性損傷度の推定方法に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.1079~1080, (1985.10)