破断鋼材の破断面近傍補修溶接における鋼材の材料特性 および溶接継手性能について

ON MECHANICAL BEHAVIOR AND PROPERTY OF WELD JOINT FOR REPAIR AT THE NEARBY FRACTURE SECTION OF STEEL MEMBER

渡辺 誠一*, 村上 心**, 木村 衛***, 金子 洋文***, 櫛部 淳道****

Seiichi WATANABE, Shin MURAKAMI, Mamoru KIMURA,

Hirofumi KANEKO and Atsumichi KUSHIBE

In order to evaluate the safety of the buildings the structures of which was repaired, it is very important to estimate the performance of the weld structural parts. This study is based on the experiment; after giving weld repair to the distorted SM490A steel member with weld joint in the condition which is like the actual weld work, we examined the mechanical behavior and property.

The study led to the following results.

- 1) In the cold condition, the toughness doesn't change after giving weld repair to the broken steel member with weld joint.
- 2) The weld repaired steel member has the lower tensile strength than the original member.
- 3) The steel member with more load than elasticity has the higher tensile and yield strength and the less deformation.
- 4) The weld repaired section has father improved on mechanical behavior in the cold condition than the pre-loaded member.

Keywords : *steel member, weld joint, repair, mechanical behavior*

鋼材, 溶接, 補修, 材料特性

1. はじめに

1995年1月17日に起きた兵庫県南部地震（M7.2、震度Ⅶ）においては、非常に大きな地震動の入力により、鉄骨造建物の柱とはりの溶接仕口部における破断や溶接部以外の母材での破断など、多くの被害が発生した。これら破断した仕口部の修復に関しては通常損傷程度によるが、塑性変形を大きく受けた破断面近傍をガウジングし、補修溶接するという方法が多く用いられている。

補修溶接部近傍においては、塑性ひずみ履歴を受けた部位への度重なる入熱による、熱ひずみの発生や、組織変化、硬化等による、機械的性質の劣化が懸念される反面、溶接入熱を低く制御し、ビードを多パスとする等、補修溶接条件を適切に選ぶことで、ガウジングや補修溶接時の再入熱による塑性ひずみの解放および、焼鈍効果による靱性回復等の効果も同時に期待される。

例えば梁部材の場合には勾配モーメントにより材軸方向に応力勾配が生じており、SM490やSS400等の応力-ひずみ関係では、ひずみ硬化開始後5%前後のひずみで引張強さの90%を超える程度まで応力度が上昇し、その後15~20%の引張強さに対応するひずみまで徐々に応力度が上昇すると考えられる。つまり、わずかな応力勾配によって引張強さに達した破断面の補修溶接部の外側のひずみは5%~10%程度の予ひずみ量であると考えられる。また、スカラップが

存在する場合にはその部分のひずみが増大し破断ひずみに達しても、スカラップによるウェブ断面欠損のない領域まで塑性化が広がっても、その部分の発生ひずみは数%程度と思われる。このような観点から、塑性ひずみを受け機械的性質が劣化した部位に関しては、溶接入熱を低く制御し、ビードを多パスとする等の補修溶接条件を適切に選ぶことで、相反する効果として、ガウジングや補修溶接時の再入熱による塑性ひずみの解放および、焼鈍硬化による靱性回復等の効果が期待できれば、補修溶接部の耐力や靱性が改善され、梁部材の破断に対する変形能力がかなり回復されると考える。

したがって、補修溶接部の再入熱による機械的性質の劣化と靱性回復の兼ね合いを十分に考慮することが重要である。しかしながら、このような観点からの補修溶接部の性能評価の検証の報告はほとんどされていないと思われる。

よって、構造物のその後の安全性を評価するうえで、補修後の溶接部を含む部材がどの程度の保有性能を維持するのかを総合的に評価することが非常に重要となる。

このような背景から本研究では溶接継手を含むSM490A材に破断ひずみに近い予ひずみを与えた後に、割れが梁端フランジ完全溶け込み溶接部内、その溶接部から母材部、あるいはスカラップ底から母材部へ進展するそれぞれの場合の梁端フランジ完全溶け込み溶接

* 梶山女学園大学生生活科学部生活環境学科
教授・博士(工学)

** 梶山女学園大学生生活科学部生活環境学科 講師・工修

*** 榊竹中工務店技術研究所 工博

**** 榊竹中工務店技術研究所 工修

Prof., Dept. of Human Environment, Sugiyama Jogakuen Univ., Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Human Environment, Sugiyama Jogakuen Univ., M. Eng.
Research and Development Institute, Takenaka Co., Dr. Eng.
Research and Development Institute, Takenaka Co., M. Eng.

部とガウジング後の補修溶接部との位置関係に着目して、その位置関係が実際の補修工事に近い状態で補修溶接を行い、種々の塑性ひずみ履歴および熱履歴等の諸因子の影響を受けた母材および溶接継手部の機械的性質を評価した。

2. 研究の方法

2.1 試験フロー

本試験では、図-1に示すフローに従って、無載荷材と載荷材（予ひずみ材）及び溶接材の各種性質を調査し比較検討を行う。試験項目は以下の通りである。

図-1 試験フロー

1) 静的引張試験

摂氏0度での静的荷重を各々2回計測し、応力-ひずみの関係及び伸び性能を調べる。使用する供試体は、A1,A2,A3Type1~5-WBHの4種類および載荷母材（JIS14A号）である。（供試体の設定条件に関しては、2.2節を参照。）

2) ピッカース硬度試験

常温で供試体平行部の厚さ方向中心1/2tの位置において長手方向の試験を行い溶接部および破断面近傍の硬度分布を求める。供試体は、無載荷材（Virgin材）,A1（破断面近傍）,A2,A3Type1~5破断面近傍の母材の8種類である。

3) シャルピー衝撃試験

エネルギー吸収能力に及ぼす採取位置、塑性ひずみ履歴等による差異を明らかにする。摂氏0度で各3回計測の平均値で評価する。試験片採取位置は、板厚中心から、溶着金属部、ボンド部、HAZ部、母材部とする。供試体は、Virgin材,A2,A3Type1~5および予ひずみ材である。ここに、予ひずみ量は補修溶接する前の供試体を破断させて引張強さに対応するひずみ量を与える。ただし、載荷前の溶接部は供

試体の母材の引張強さを余盛分を含む面積で除した平均応力度に対応する予ひずみ量となる。一方、補修溶接部の予ひずみ量は0である。

4) 組織観察

A3Type1~5については光学顕微鏡によるミクロ組織観察を行い、塑性ひずみ履歴及び熱履歴による素材の組織変化を調べた。

2.2 供試体

1) 各種条件

鋼種は溶接構造用圧延鋼材SM490Aを用いる。板厚は $t=16\text{mm}$ とする。溶接は、表-2に示す条件での完全溶込溶接とし、裏当金、エンドタブを用いる。溶接線は、材軸方向に直行方向とする。なお、CO₂半自動溶接による溶接条件は、 $\Phi 1.2$ の溶接棒を用いて、板厚16mmを7パスで溶接することを考慮し、入熱量を16KJ/cmに設定している。これは筆者らが塑性ひずみ履歴を受けた鋼材の補修溶接に際し、通常よりも低入熱量で多パスの補修溶接を行うことを意図したものである。又、ここでは以下の理由により残留応力の影響は考慮していない。建て方時に両端の柱の拘束度によっては梁材軸方向に残留応力が生ずる可能性がある。しかし、梁下フランジが破断した場合には建て方時に発生した残留応力や長期荷重による応力が部材断面内において応力の再配分により下フランジにおいて一旦解放されると考えられる。補修溶接時にはスラブの梁材軸方向に対する拘束もあり、残留応力は再び発生すると予想される。部材断面内の応力の釣合状態において補修溶接部に生じる残留応力の大きさは降伏応力レベル前後となっていることも考えられるが、そのひずみレベルは0.15%前後である。しかしながら、ここで対象とする溶接時の性能に及ぼす影響を評価するひずみレベルは引張強さに対応するもので、それは15%~20%程度の大きな値である。

表-1 使用鋼板のミルシート

鋼種	mm	化学成分 (wt%)					降伏応力 N/mm ²	抗張力 N/mm ²
		C	Si	Mn	P	S		
SM490A	16	0.17	0.42	1.41	0.015	0.004	383	545

表-2 溶接及び補修溶接の条件

溶接方法	溶接材料	電流 A	電圧 V	速度 cm/min	入熱 KJ/cm
GMAW (CO ₂)	MGS-50 $\Phi 1.2$	210	24	20	16

2) 供試体A1（無載荷母材）

鋼板よりJIS1A号試験片を製作した。

$$W = 40\text{mm}$$

図-2 JIS1A号試験片

3) 供試体A2 (無載荷溶接材)

鋼材を完全溶込溶接したJIS1A号試験片とし、母材、HAZ、溶着金属で構成される。なお、裏当金および余盛はそのままとする。

4) 供試体A2-f (載荷母材)

A2試験片を引張試験し破断させた供試体である。

写真-1にA2試験片の破断状況を示すが、一部裏当金止端部から破断したものがあつたが、試験では母材で破断したもののみを用いている。

5) 供試体A3 (補修溶接材)

A2-f試験片の破断面近傍をガウジングし、旧溶接部からの距離と熱履歴をパラメータとして補修溶接を行った供試体である。これは割れが、溶着金属から母材に入る場合の元の溶接部と破断面の位置関係を想定したもので補修溶接位置と破断位置は必ずしも一致していない。

いずれのTypeも破断面近傍および補修溶接部近傍に2度の熱履歴を受けている。溶接の方法をType1~5の5種類とした。

図-3 載荷後の補修溶接位置およびJIS14試験片の採取位置

6) 供試体A3WBH (載荷溶接材)

A3試験片の溶接部近傍から取り出した、A3Type1~5補修溶接部及び熱影響部を平行部とするJIS14A号試験片である。

図-4 JIS14A号試験片

7) シャルピー衝撃試験の供試体

シャルピー衝撃試験の形状及びノッチの採取位置は図-5, 6とする。

図-5 シャルピー試験片の形状

図-6 シャルピー試験片の採取位置

3. 試験結果及び考察

3.1 静的引張試験

引張試験の結果を表-3および図-7、図-8に、引張試験後の破断状況の例を写真-1に示す。また、結果を平均値でまとめたものを図-9に示す。

まず、試験片形状の違いによる検討を行うとJIS14A号丸棒試験片は、JIS1A号板状試験片に比してやや耐力が低く引張強さ（抗張力）が高くなり、降伏比では約6%低くなるが機械的性質を比較する上で大きな差は生じていない。

無載荷の母材（A1）と継手材（A2）を板状試験片で比較すると、耐力においてやや継手材の値が低い、引張強さには殆ど差はみられない。しかし、降伏比は、継手材がやや低い。伸び及び絞りについては、継手材が数%前後低い値を示す。これは、溶接部の性状によるものであると考えられる。

載荷により、引張強さに達した母材は、ひずみ硬化により、耐力、引張強さいずれも約200~300N/mm²上昇する。これは、耐力で約80%、引張強さで約25%の上昇にあたる。ただし、引張強さの上昇は真応力で比較すると10%程度である。この上昇は、ひずみ硬化の他に予ひずみを与えた時期と載荷時期の差である約3カ月のひずみ時効の影響もを受けていると考えられる。降伏比は、約65%から約95%へ約30%上昇する。伸びは、約35%から約15%へと約20%減少する。絞りも約75%から約65%とやや減少傾向である。

載荷継手の引張試験片JIS14A号の破断部位は全て溶接ボンド部であり、載荷母材と載荷継手を比較すると、継手の耐力、降伏比（約95%→約80%）共にやや低い。伸び及び絞りには有意の差は認められない。特にType3は、高い降伏比を示しているが、溶接による熱影響が少ないためであると思われる。なお、このような性質の部位が部材軸方向に広がっている場合には、破断後補修した部材の伸び変形や回転能力が無載荷の部材に対してかなり劣化することになる。

写真-1 静的引張試験後の破断状況

表-3 静的引張試験の試験結果

採取条件	試験片形状	耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %	絞り %	備考
無載荷母材 A1	板状試験片 JIS-1A	398	549	72.5	26.0	30.0	
		401	551	72.8	26.2	31.0	
無載荷継手 A2	板状試験片 JIS-1A	386	558	69.2	21.2	25.9	
		390	557	70.0	22.3	26.2	
		386	556	69.4	20.1	27.5	
		387	556	69.6	21.2	26.7	
		382	557	68.6	22.0	27.5	
		384	556	69.1	20.5	26.2	
		388	558	69.5	20.3	26.5	
		389	557	69.8	21.0	27.3	
		383	556	68.9	20.9	26.4	
		385	556	69.2	22.9	27.5	
無載荷母材	丸棒試験片 JIS-14A	377	573	65.8	34.0	75.1	
		388	568	68.3	36.0	75.1	
		366	567	64.6	33.3	73.4	
		379	572	66.3	33.3	75.1	
載荷母材	丸棒試験片 JIS-14A	685	724	94.6	16.3	69.7	
		675	715	94.4	12.7	66.1	
載荷継手 A3 Type1~5 WBH	丸棒試験片 JIS-14A	521	642	81.2	17.7	71.6	Type1
		517	647	79.9	18.0	71.7	
		528	658	80.2	17.3	69.9	Type2
		499	638	78.2	19.3	65.7	
		523	641	81.6	18.0	71.6	
		543	645	84.2	19.0	62.1	Type3
		598	653	91.6	15.0	60.0	
		481	635	75.7	16.7	60.0	Type4
		508	637	79.7	15.0	60.0	
		494	640	77.2	18.3	62.1	Type5
		487	637	76.5	19.7	66.1	

※ 板状試験片の場合は、幅絞り、
丸棒試験片の場合は、断面絞り

図-7 試験体A1及びA2の代表的な応力-ひずみ曲線

図-8 採取条件と耐力・引張強さ及び伸びの関係

図-9 各種試験片の耐力・引張強さ・伸びの比較

3.2 ビッカース硬度試験

図-10に無載荷母材の板厚方向のビッカース硬度を示すが、板厚方向に顕著な差は見受けられず、約150Hv程度の硬さ分布である。次に図-11にこの母材を引張破断させた後の破断面近傍の板厚中央での硬度と板厚変化を示す。これより、引張強さを示す程度まで塑性ひずみを受けた母材部の硬度は約200Hv程度まで上昇し、破断面近傍のしぼり変形の激しい部分においては約240Hv程度にまで達していることがわかる。

図-10 母材板厚方向硬さ分布 図-11 引張試験後における板厚中央位置の硬さと板厚変化

次に図-12に無載荷溶接継手、そして、図-13~図-17に補修溶接を行った状態であるType1~5（図-3参照以下T1~T5）の硬度分布を示す。なお、図中の溶接部の模式図は、最初に存在したものを、旧、引張試験後補修溶接の際に行ったものを新として区別している。計測は試験片の板厚方向に上面から1mm（上面）、板厚中央（中央）、下面から1mm（下面）の3箇所で行った。図-12より母材の溶接継手近傍でのビッカース硬度は、溶接により全体的に増加し、熱影響部において約200Hv程度まで上昇することがわかる。また、溶接の最終パスのボンド部では、局部的に硬化した部分が見られる。

次に、引張破断後、補修溶接を行った図-13~図-17の硬度試験結果より、いずれのタイプの補修溶接方法を用いても、板厚中央の硬度分布は200Hv前後の値を示した。

すなわち、一様に大きな予ひずみを受けた母材に補修溶接を行っても、入熱の影響及び予ひずみによる顕著な硬度上昇をほとんど起こさないことが明らかとなった。

図-12 無載荷溶接部の硬さ分布

図-13 T1溶接部の硬さ分布

図-14 T2溶接部の硬さ分布

図-15 T3溶接部の硬さ分布

図-16 T4溶接部の硬さ分布

図-17 T5溶接部の硬さ分布

3.3 シャルピー衝撃試験

引張試験前後での母材および溶接継手近傍の低温靱性を調査するため、シャルピー衝撃試験を行った。ノッチは板厚中央部から採取し、試験温度は0℃にて行った。結果は、3回計測の平均値で評価し、検討を加えている。

表-4に無載荷の溶接部及びT1～T5の補修溶接部の各位置での試験結果を示す。また、図-18に各種試験片のシャルピー衝撃値の比較を図示したものである。これらより無載荷の溶接部の溶着金属およびHAZは150～160J/mmの衝撃値を示すのに対し、ボンドおよび母材は100J/mm程度であった。

また、破断後補修溶接を行ったT1～T5試験体の母材及び各部位のシャルピー衝撃試験結果から、補修溶接部近傍に関しては、どのタイプの補修溶接方法を用いても、衝撃値が無載荷の溶接部と比べて大きく劣化したものはなかった。それに対し、補修溶接部から離れた母材部では、衝撃値が無載荷母材より著しく劣化する結果となった。これは、母材部では予ひずみが解放されず材質劣化を起こすのに対し、補修溶接部近傍では、破断した部位をガウジング後、補修溶接を行うといった熱サイクルの付加によって焼鈍効果を生じ、補修溶接部近傍の

母材に与えられていた予ひずみが解放されたことによるものと思われる。これは、T1～T5の条件の中で旧溶接部が補修溶接部から最も離れて位置し、補修溶接入熱による影響を受けにくいT3旧溶接部のHAZの靱性値が他のタイプに比べ低いことから裏付けられる。

表-4 溶接部近傍でのシャルピー衝撃試験結果

	位 置	シャルピー衝撃試験	
		吸収エネルギー J	衝撃値 J/mm ²
無載荷	無載荷溶着金属	131	164
	無載荷ボンド	79	99
	無載荷HAZ	120	151
	無載荷母材	81	101
Type1	溶着金属 補修溶接 (新)	125	156
	本溶接 (旧)	110	138
	新旧溶着金属溶込境界	112	141
	新旧溶着金属溶込境界近傍	119	148
	母 材	27	34
Type2	溶着金属	116	145
	ボンド 補修溶接 (新)	131	164
	本溶接 (旧)	114	143
	HAZ	106	133
	母 材	31	39
Type3	溶着金属 補修溶接 (新)	122	153
	本溶接 (旧)	106	133
	ボンド 補修溶接 (新)	109	136
	本溶接 (旧)	89	111
	HAZ 補修溶接 (新)	108	135
	本溶接 (旧)	71	89
	母 材	35	44
Type4	溶着金属 補修溶接 (新)	108	135
	ボンド 補修溶接 (新)	111	138
	HAZ 補修溶接 (新)	110	138
	母 材	23	29
Type5	溶着金属	101	126
	ボンド 補修溶接 (新)	124	155
	本溶接補修 (新)	85	106
	HAZ	105	131
	母 材	31	39

*試験温度：0℃

3.4 補修溶接熱影響部の組織観察

ビッカース硬度試験およびシャルピー衝撃試験により得られた結果と、補修溶接部の熱影響部のミクロ組織との対応を調査するため、光学顕微鏡による組織観察を行った。写真-2～4に例として、T1の補修溶接部溶着金属、ボンド部、熱影響部の板厚中心付近におけるミクロ組織写真を示す。なかでも複雑な溶接熱サイクルを受ける熱影響部においても全般的には微細なフェライト及びベイナイトからなる組織であり、ガウジング及びその後の溶接による溶接熱サイクルの付加により熱影響部に懸念されるような、結晶粒粗大化等の材質的な劣化はみられず、むしろこの熱サイクルによる焼鈍効果及び焼き戻し効果が生じ、引張性質や低温靱性が、予ひずみを受けた母材部より改善されたと考えられる。

図-18 各種試験片のシャルピー衝撃値の比較

写真-2 T1補修溶接溶着金属部のミクロ組織

写真-3 T1補修溶接ボンド部のミクロ組織

写真-4 T1補修溶接熱影響部のミクロ組織

4. おわりに

地震等により構造物の溶接仕口、継手が破断した場合の溶接補修に関して、その部分の機械的性質の評価を行うため、モデルとして無載荷鋼材に溶接継手を設け、それらを静的引張により破断させ、種々の補修溶接を行った。それらについて、引張試験、ミクロ組織観察、シャルピー衝撃試験、ビッカース硬度試験、等により、以下のような結果を得た。

- 1) 無載荷の溶接継手と破断して補修溶接した後の溶接継手部の低温靱性を比較すると、母材の靱性は30%程度まで低下しているが、溶着金属、ボンド部、そして熱影響部の靱性に顕著な変化は認められない。
- 2) 母材と、健全な溶接継手の引張試験の結果を比較すると、母材よりも溶接継手の耐力や降伏比が若干低くなっている。
- 3) 引張試験後の破断面近傍の母材は、加工硬化（ひずみ硬化）およびひずみ時効の影響もあり、降伏比が約95%にまで達した。その部位をガウジングして補修溶接した後に溶接部近傍の引張試験を行っても脆性破断せずに引張強さに達した。また、付加される熱サイクルにより、溶接ボンド部で破断したが、降伏比は80%程度まで改善され、無載荷母材に溶接継手を設ける場合に、無載荷母材の降伏比は70%であるが、それに近づいており、補修溶接部は継手としての保有性能がほぼ満足される。
- 4) 補修溶接継手部の熱影響部のミクロ組織は、ベイナイトおよび微細なフェライトからなる組織となり、補修溶接の前後で硬度および低温靱性に大きな変化は生じず、結果的に予ひずみを受けたままの母材に比べ機械的性質が大きく改善される。ただし、溶接継手部の硬さ分布に極度に高い硬さを示す部分がある。

以上のことから補修溶接継手およびその近傍の母材については再入熱による予ひずみの解放の効果が大きく、同時に起こる加熱・拘束による組織変化、硬化の影響が少なく、本実験結果からみれば、補修溶接部の保有性能はほとんど問題がないといえる。ただし、応力勾配がほとんどない場合には、補修溶接部や母材は引張強さまで部材耐力が保証されるので、その部位については強度的な設計が考えられる。

本研究は梶山女学園大学と竹中工務店技術研究所との共同研究である。本研究費助成として、梶山女学園大学研究費助成（C）によっていることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺誠一：阪神震災における鉄骨梁フランジ破壊例とその破断面近傍の材料の機械的性質について，梶山女学園大学研究論集 第27号「自然科学編」，pp.149～161, 1996.3
- 2) 渡辺誠一，村上心，木村衛，金子洋文，櫛部淳道：破断鋼材の破断面近傍補修溶接における鋼材の材料特性及び溶接継手性能について その1 研究方法と引張試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ，pp.523～524, 1997.9
- 3) 櫛部淳道，木村衛，金子洋文，渡辺誠一，村上心：破断鋼材の破断面近傍補修溶接における鋼材の材料特性及び溶接継手性能について その2 硬さ試験、靱性試験他，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.525～526, 1997.9
- 4) 材料強度学，pp.21～24，社団法人 日本材料学会
- 5) 材料強度工学ハンドブック，pp.46～84，朝倉書店

（1997年10月3日原稿受理，1998年5月8日採用決定）