

(技術資料)

建築向け大入熱・高パス間温度対応CO₂溶接ソリッドワイヤMG-55

MG-55 Solid Welding Wire Applied to High Heat Input and Interpass Temperatures for Building Structures



新館 宏*
Hiroshi Shintate



山崎 圭*
Kei Yamazaki



鈴木 励一*
Reiichi Suzuki



中野 利彦
Toshihiko Nakano

MG-55 is a high potential 540MPa-class MAG solid welding wire usually used for structural beam-to-column joints. This weld metal has high tensile strength and a high notch toughness under high heat input and interpass temperatures. Welding efficiency under deregulated heat input and interpass temperature conditions possible with this wire is higher than that for conventional 490MPa-class MAG wire.

まえがき = 阪神・淡路大震災での経験から、鉄骨造建築物の耐震性を向上させるために、柱梁接合部の機械的性質確保が求められてきた。柱梁接合部の機械的性質は溶接金属の性質に依存する割合が極めて高く、鋼板や溶接材料の選定のみならず、溶接条件やその管理方法を含め、様々な要因の管理が求められている。

鉄骨製作工場では、施工効率向上の観点から、溶接電流を高めて溶着速度を増大させるか、またはパス間温度の待ち時間を短縮するために高めのパス間温度で次の層を溶接するといった方法を一般的に採用する。しかし、このような方法をとった場合、溶接部は高温に保持される時間が長くなるため、金属結晶が粗大化し強度や靱性などの機械的性質が低下する。したがって、溶接金属の機械的性質が要求値を満足するように、入熱とパス間温度に一定の制限を設ける管理が重要となる。

1996年度版鉄骨工事技術指針・工場製作編（JASS 6 日本建築学会）には、入熱とパス間温度に関する制限が設定され、溶接条件の管理範囲に関する研究が大々的に行われる契機となった。様々な研究を経て、大入熱・高パス間温度においても良好な機械的性質を備える各種ワイヤが開発された。例えば、鉄骨分野で採用される炭酸ガスアーク溶接ソリッドワイヤでは、540MPa級ワイヤとして YGW18 が 1999 年度の JIS Z 3312 改訂時に追加され

た。同時に、同 JIS 解説ではワイヤ規格と鋼板の強度グレードに対し、入熱・パス間温度の管理範囲の目安が具体的に示された（表 1 参照）。この区分は建築基準法の告示・公布に伴う工場認定制度においても引用され、鉄骨製作工場における入熱・パス間温度管理が徹底されることとなった。

当社では、JIS 改訂以前より 540MPa 級ワイヤ（YGW18）MG-55 を生産販売してきたが¹⁾、最近その改良タイプを商品化した。このワイヤは従来の MG-55 よりも溶接金属の強度を高めるとともに、靱性及び低温割れ感受性は 490MPa 級ワイヤと同等レベルとしている。

本稿では、この改良型 MG-55（以下、MG-55(改)）を使用した性能評価試験結果の一例を紹介する。

1. MG-55(改)の特徴

MG-55(改)のワイヤ成分を従来の MG-55 と比較し表 2 に示す。MG-55(改)では、C 低減や Mo の少量添加などにより溶接金属の機械的性質や高電流でのアーク安定性、そして耐割れ性といった特性の改善を図っている。YGW18 合致ワイヤは、400A 以上（1.4mm）の高電流で使用される場合が多いため、梨型割れなどに対する高温割れ感受性が高まる。一方、低入熱・低パス間温度溶接では、溶接金属の強度が増大して低温割れ感受性が高

表 1 入熱・パス間温度管理区分 JIS Z 3312 (1999)
Table 1 Control range of heat input and interpass temperature

	Welding condition		Tensile strength of base metal		
	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature ()	400MPa class	490MPa class	520MPa class
1	15 ~ 20	150	YGW11, 15, 18, 19	YGW11, 15, 18, 19	YGW18, 19
2	15 ~ 30	250	YGW11, 15, 18, 19	YGW11, 15, 18, 19	YGW18, 19
3	15 ~ 40	350	YGW11, 15, 18, 19	YGW18, 19	-

*溶接カンパニー 技術開発部

表2 MG-55(改)のワイヤ成分一例
Table 2 Chemical composition of MG-55 (Mod) wire (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu [*])	Mo	Al	Ti+Zr
MG-55(Mod)	0.04	0.84	1.97	0.014	0.007	0.29	0.20	0.01	0.20
Conventional MG-55	0.07	0.85	1.72	0.013	0.006	0.27	---	0.01	0.19
Specification YGW18	0.15	0.55 -1.10	1.40 -2.60	0.030	0.030	0.50	0.40	0.10	0.30

*) including plated Cu

表3 MG-55(改)溶接金属の機械的性質
(入熱 18.4kJ/cm, パス間温度 150)

Table 3 Mechanical properties of MG-55(Mod) weld metal
(Heat input 18.4kJ/cm, interpass temp.150)

	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	IV 0 (J, []; Avg.
MG-55 (Mod)	506	581	29	172, 175, 187 [178]
MG-55	489	563	29	162, 173, 175 [170]
Specification YGW18	430	540	22	[47]

Welding condition ; JIS Z 3312

まる。そこでワイヤの化学成分を再検討し、高強度を確保するとともに耐割れ性に優れた MG-55(改)を開発した。

MG-55(改)を JIS Z 3312 による標準条件(入熱約 20kJ/cm, パス間温度 150)で溶接した場合の溶接金属の機械的性質を、表3に示す。MG-55(改)の溶接金属は、従来ワイヤより強度及び靱性に優れており、540MPa級のワイヤ性能を十分に満足している。

2. 大入熱溶接

2.1 大入熱・高パス間温度における機械的性質

鉄骨の柱梁接合部の下向溶接では、表1に示す入熱・パス間温度管理区分に規定される上限の溶接条件が多く採用されている。そこで、MG-55(改)を使用し、パス間温度 350 一定で入熱を最大 45kJ/cm まで変化させた場合の溶接金属の機械的性質を確認した。試験結果を図1に示す。

試験の結果より、大入熱・高パス間温度においても、母材規格値下限の 490MPa 及び建築分野でスペックとされている 70J(0)を十分満足する性能が得られている。

2.2 耐高温割れ性の向上

継手による拘束が大きな厚板を高電流で溶接する場合には、高温割れに注意が必要である。特に積層を1層1

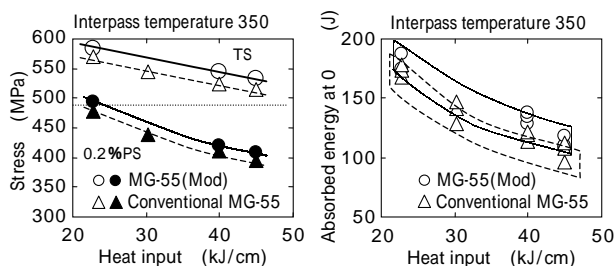


図1 大入熱・高パス間温度における溶接金属の機械的性質
Fig. 1 Mechanical properties of MG-55(Mod) under high interpass temperature and heat input

Wire diameter	1.4mm
Base plate	SM490A Thickness 25 ~ 65mm
Welding condition	350 ~ 520A, proper voltage Wire extension 35mm
Shielding gas	100% CO ₂ 25l/min
Groove end treatment	Using ceramic tab, crater current about 200A for 5-10seconds
Pass sequence	1 pass-1 layer for 3 layers continuous welding
Evaluation method of defect	Radiographic testing

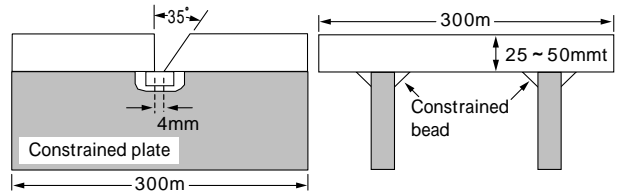


図2 大入熱・高パス間温度の高温割れ試験方法
Fig. 2 Test condition of hot cracking test

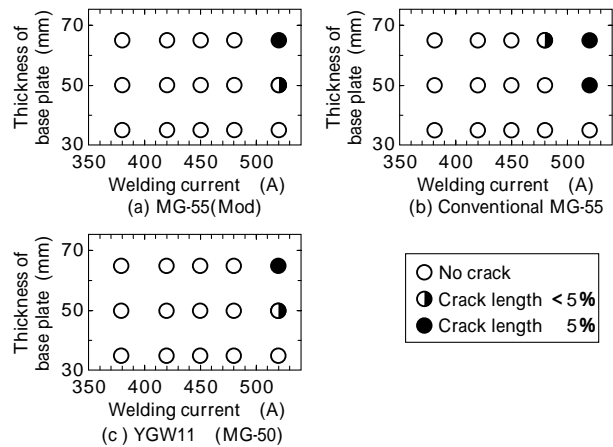


図3 大入熱・高パス間温度の高温割れ試験結果
Fig. 3 Results of hot cracking test

パスとし、固形タブなどを使用した連続溶接の折返し部分では、クレータが非常に深くなりビード断面形状が深さ方向に拡大するため、より高温割れ(梨型割れ)の危険性が増大する。そこで、最大鋼板厚さ 65mm, 最大溶接電流 520A の範囲で、3パス連続溶接(1パス/1層)による拘束割れ試験を実施した。試験の方法を図2、結果を図3に示す。

図3の厳しい溶接条件(厚板・高電流)では、MG-55(改)は従来の MG-55 と比較し耐高温割れ性が改善されている。同時に、合金元素の少ない YGW11(490MPa 級)と比較しても耐高温割れ性能は遜色ないレベルであるとわかる。一方で、いずれの溶接ワイヤにも言えることであるが、厚板・高電流の特殊な条件下では、高温割れが

発生する可能性を否定することはできない。また、溶接金属の炭素量が一定量を超えると、「包晶割れ」と呼ばれる高温割れが発生することも知られている²⁾。狭い開先内部をガウジング棒により整形し、ノ口の除去を十分に行わない場合などは、残留したノ口から溶接金属へ炭素が混入するため、高温割れ発生危険性が高くなる。従って、大入熱・高パス間温度溶接に際しては、溶接条件範囲を適正に保つと同時に、低めの電流でクレータ処理を行う、ガウジング処理後は開先面を清掃するなど、割れ防止のために特段の注意が必要である。

3. 耐低温割れ性の向上

MG-55(改)は、大入熱・高パス間温度において規定の強度が確保できるよう高めの強度に設計されている。その結果、小入熱溶接または低パス間温度など、溶接金属の冷却速度が大きくなる条件下においては、更に溶接金属の強度が上昇する。図4に、市販の溶接ワイヤ(YGW18)の溶接金属に与える冷却速度の影響を集計した結果を示す³⁾。

溶接金属の低温割れは、溶接金属の強度、鋼板の拘束力、拡散性水素量、の3つの要素に支配される。鉄骨の溶接では鋼板の拘束力が大きいので、小入熱溶接による溶接金属の硬化に注意が必要である。

実施工において、仮組溶接や金物を取付ける場合に短いビードを置くことがあるが、このような場合は溶接金属の冷却速度が大きく、同時に母材の希釈が大きくなるため、溶接金属が硬化しやすい。また、柱-柱の横向溶接あるいは工場での仕口の横向溶接では、溶接速度が速い場合に小入熱になりやすく、同時に母材の拘束力も大きいことから低温割れ感受性が増す。

そこで、冷却速度が大きい溶接条件における溶接金属の機械的性質、及び低温割れの評価試験を行った。

3.1 低入熱溶接の機械的性質

MG-55(改)の小入熱・低パス間溶接における溶接金

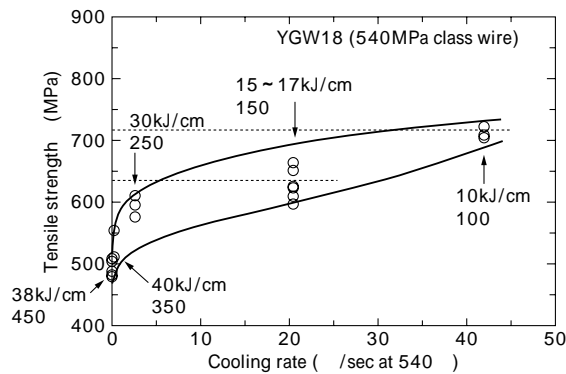


図4 引張強さに及ぼす冷却速度の影響

Fig. 4 Effect of cooling rate on tensile strength of YGW18 weld metal

表4 低パス間・低入熱溶接による機械試験結果

Table 4 Mechanical test results (Low heat input and interpass temperature)

Heat input, Interpass temp.	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	IV
				0 (J), []; Avg.
7kJ/cm-50	762	799	23	148, 142, 142 [144]
17kJ/cm-150	575	659	28	157, 154, 161 [157]

属の強度を調査した。試験結果を表4に示す。

溶接金属では一般に、硬度がHV = 350を超えると低温割れが極めて発生しやすいとされる⁴⁾。試験結果の799MPaを硬さに換算するとHV = 253程度となるため、MG-55(改)を入熱7kJ/cmで溶接して得られた溶接金属は、比較的割れ感受性が小さいと考えられる。

3.2 ショートビードによる低温割れ感受性

鉄骨溶接の組立溶接や、組立後の金物取付溶接を模擬し、ショートビードによる拘束すみ肉割れ試験を実施した。

試験は厚さ50mmの鋼板を使用し、溶接入熱6kJ/cmにて試験温度0及び-20の条件で実施している。溶接長は50~55mmとした。欠陥の評価は、表面PT(液体浸透探傷試験)、断面マクロ組織観察(18断面/条件)にて行った。試験方法を図5、試験結果を表5に示す。

試験の結果、何れの条件においても割れは検出されず、ショートビード溶接においてもMG-55(改)の低温割れ感受性は十分に小さいものと考えられる。

3.3 横向溶接

溶接試験板(厚さ50mm)を拘束板(厚さ100mm)に全周すみ肉溶接して高い拘束力を確保し、横向姿勢にて溶接試験を実施した(窓枠拘束割れ試験)。試験の方法を図6、試験結果を表6に示す。

試験の結果、何れの検査でも欠陥は認められず、MG-

Wire diameter	1.2mm
Base plate	SM490A 50mmt x 300mmW x 500mmL
Welding position	Horizontal fillet Fillet size 4mm, length 50mm
Welding condition	180 ~ 200A-25 ~ 27V-50cm/min
Heat input	6.0kJ/cm
Base plate temperature	0 and -20
Shielding gas	100% CO ₂ 25l/min
Wire extension	25mm
Number of tests	3 beads per each condition
Evaluation method of defect	Penetrant test on surface 6 cross-section macro structures

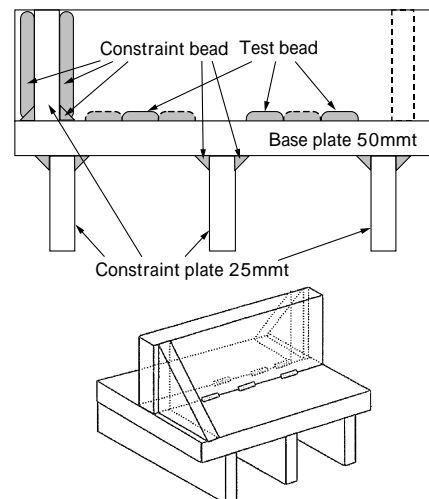


図5 拘束すみ肉割れ試験方法

Fig. 5 Test condition of constraint fillet cracking test

表5 拘束すみ肉割れ試験結果

Table 5 Results of constraint fillet cracking test

Temperature (°C)	Surface	Cross-section
0	No defect	No defect
-20	No defect	No defect

Wire diameter	1.2mm
Base plate	SM490A 50mmt × 150mmW × 300mmL
Groove shape	35° single bevel groove Root gap 7mm
Welding condition	1st pass 180A-23V 2nd pass ~ 260A-31V
Heat input, Interpass temp.	6.0 ~ 10.0 kJ/cm 50
Shielding gas	100% CO ₂ 25l/min
Wire extension	25mm
Pass sequence	13 layers-67 passes
Evaluation method of defect	Both penetrant test and ultrasonic test on welded and grinded bead surface

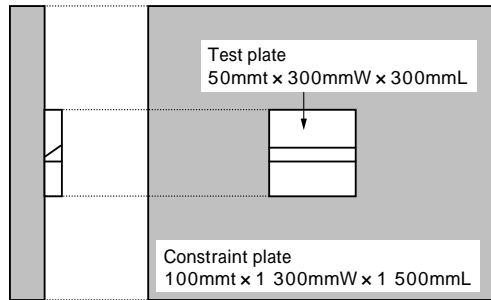


図6 窓枠拘束割れ試験方法(横向姿勢)

Fig. 6 Welding condition of constraint cracking test (horizontal position)

表6 拘束横向き溶接割れ試験結果(横向き姿勢)

Table 6 Results of constraint cracking test (horizontal position)

Test method	Welded surface	Grinded surface
Penetrant test	No defect	No defect
Ultrasonic test	No defect	No defect

55(改)は極めて良好な耐低温割れ性を有していることが確認された。

3.4 拡散性水素の影響

拡散性水素は遅れ割れの支配因子のひとつであることは述べたが、炭酸ガス溶接ソリッドワイヤの拡散性水素量は一般に低い値であると言われている。実際、実験で求まる拡散性水素量は、溶接の管理が良好であれば1ml/100g以下(グリセリン置換法 JIS Z 3118)の低いレベルである。しかし、ガス配管内の結露や、開先面の洗浄不足、またはシールド不良などの外部因子が加わると、溶接金属の拡散性水素量は3 ~ 5ml/100gの値となることもある。ここでは拡散性水素の影響について考察する。

低温割れの発生を、拡散性水素量と溶接金属の厚さ、予熱温度、溶接金属の強度より予測する下記の式が提案されている⁵⁾。

$$15\text{mm } h_W < 30\text{mm}$$

$$p_{ph}(\text{)} = 120 + 120 \log(H/3.5) + 5(h_W - 20) + \alpha(\sigma_B - 83) \dots (1)$$

$$30\text{mm } h_W < 40\text{mm}$$

$$p_{ph}(\text{)} = 120 + 120 \log(H/3.5) + 5(h_W - 20) - 0.05(h_W - 30)^2 + \alpha(\sigma_B - 83) \dots (2)$$

ここに、 p_{ph} ; 割れ防止限界予熱温度 ()

H ; 溶接金属の拡散性水素量
(グリセリン置換法, JIS Z 3118, ml/100g)

h_W ; 溶接金属の厚さ (mm)

σ_B ; 溶接金属の引張強さ (kgf/mm²)

表7 限界予熱温度の計算結果

Table 7 Calculated preheat temperature

Wire	Tensile strength of weld metal ^{*1)} (MPa)	Thickness of weld metal (mm)	Diffusive hydrogen H_D ^{*2)} (ml/100g)		
			$H_D = 1$	$H_D = 3$	$H_D = 6$
MG-55 (Mod)	705	40	61	119	155
		25	-9	49	85
YGW11	630	40	0	57	93

*1) All weld metal are welded in the same condition.
(Heat input; 10kJ/cm, Interpass temperature; 100)

*2) Analyzed by glycerin replacement method
 $H(\text{glycerin}) = 0.79H(\text{gas-chromatography}) - 1.73$

式(1),(2)を使用し、拡散性水素量が変化した場合の限界予熱温度を計算した結果を、表7に示す。溶接入熱、及びパス間温度は低入熱側の条件として10kJ/cm¹⁰⁰とし、溶接金属の引張強度はこの条件の値を用いた。表にはまた、YGW11にて同様の計算を行い結果を示した。

式(1),(2)より、厚さ40mmの鋼板にYGW11を使用する場合、拡散性水素量が3ml/100gでは、限界予熱温度は57と算出される。この条件では、従来予熱なしで施工され、経験的に割れが発生しない範囲であると考えられている。これを考慮すると、式(1),(2)によって求められる限界予熱温度は、厳しく見積もられていると言える。従って、MG-55(改)によって入熱10kJ/cm、パス間温度100で溶接する場合に予熱無しで割れの問題を生じない範囲は、拡散性水素量が1ml/100g(ガスの管理が良好な場合に相当)で、溶接金属厚さ(板厚)40mmまで、拡散性水素が3ml/100g(開先清浄度やシールドガスの露点が高いなど、施工管理がやや不良の場合に相当)で、溶接金属厚さ(板厚)25mmまでと予測される。この結果より、MG-55(改)を使用する場合、極端に低入熱となるショートビード溶接や高速溶接では、アーク及び溶融池への水分の混入を避ける必要があると言える。

むすび= 鉄骨向け大入熱・高パス間温度対応ワイヤ MG-55の改良タイプについて、諸特性を紹介した。この540MPaワイヤは、JISに制定されて大量使用が始まってからまだ3~4年しか経っていない。したがって、入熱・パス間温度範囲の更なる拡大あるいは溶接作業性の向上など、今後ともユーザーニーズに合致した改良を継続していく。

参考文献

- 1) 鈴木勲一ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.52 No.1 (2002) p.60.
- 2) 溶接学会:溶接学会技術資料 No.3 溶接冶金(レビュー)上, (1978) p.123, 溶接学会.
- 3) 日本溶接協会溶接棒部会:溶接の研究, No.40 (2000) p.196.
- 4) 溶接協会 溶接棒部会編:マグ・ミグ溶接の欠陥と防止対策, (1991) p.88, 産報出版.
- 5) 矢竹丘ほか:溶接学会誌 Vol.50, No.3 (1981) p.75.