

「繰返し大変形を受ける建築鉄骨溶接接合部

の強度と破壊靱性」 (中間報告書Ⅲ)

WG 3 研究成果

(破壊靱性要求決定の考え方と評価法)

1996年7月

**社団法人 日本溶接協会
鉄鋼部会 APD委員会**

「繰返し大変形を受ける建築鉄骨溶接接合部の強度と破壊靱性」 **(中間報告書Ⅲ)**

WG 3 研究成果

(破壊靱性要求決定の考え方と評価法)

1996年7月

**社団法人 日本溶接協会
鉄鋼部会 APD委員会**

APD委員会WG-3

主査	高梨 晃一	千葉大学 工学部 建築学科 教授
WGリーダー	豊田 政男	大阪大学 工学部 生産加工工学科 教授
世話人	島貫 広志	新日本製鐵(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第2研究部
中立委員	大政 光史	大阪大学 工学部 生産加工工学科 助手
	中込 忠男	信州大学 工学部 社会開発工学科 教授
委員	南 二三吉	大阪大学 工学部 生産加工工学科 助教授
	村川 英一	大阪大学 溶接工学研究所 助教授
	安部 研吾	(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 厚板技術管理室
	有持 和茂	住友金属工業(株) 総合技術研究所 研究主幹
	泉 満	大成建設(株) 技術研究所 構造研究部 鋼構造・風工学研究室 室長
	久保 高宏	川崎製鉄(株) 技術研究所 厚板・条鋼研究部門 主任研究員
	小林 泰男	日本鋼管(株) 総合材料技術研究所 福山材料研究センター 鋼材研究室 主任研究員
	坂本 真一	清水建設(株) 技術研究所 構造技術研究部 構造特性グループ
	佐藤 統宣	(株)神戸製鋼所 溶接事業部 技術部
	塩飽 豊明	(株)神戸製鋼所 鉄鋼事業本部 厚板部 主任部員
	竹俣 裕行	(株)日本製鋼所 室蘭研究所 鉄鋼研究部 主任研究員
	田中 淳夫	新日本製鐵(株) 厚板営業部 厚板商品技術室 部長代理
	萩原 行人	新日本製鐵(株) 大分製鉄所 技術開発本部 大分技術研究部
	東久保 智広	三菱重工業(株) 神戸造船所 鉄構部 工作課 係長
	平井 征夫	川崎製鉄(株) 鉄鋼企画・営業本部 厚板技術 主査部長
	道場 康二	川崎重工業(株) 生産技術開発センター 生産技術開発部
	矢部 喜堂	清水建設(株) 技術研究所 構造技術研究部 部長
	吉成 仁志	東京大学 工学部 船舶海洋工学科 助教授
	渡辺 祐一	住友金属工業(株) 鋼板事業部 厚板技術部 次長

目 次

1. はじめに [南, (阪大)]	1
1.1 WG-3の研究活動の目的	1
1.2 平成7年度までのWG-3の研究活動の内容	1
1.3 研究項目の一覧	2
2. 繰返し歪履歴を受ける構造用鋼材およびその溶接部の材質変化特性 [南(阪大), 半田(川鉄)]	5
2.1 試験の目的と予歪試験の内容	5
2.1.1 試験目的	5
2.1.2 SM490A鋼の予歪脆化特性試験	5
2.1.3 SM490A鋼再現HAZの予歪脆化特性試験	9
2.2 繰返し予歪によるSM490A鋼の材質変化特性	12
2.2.1 繰返し予歪による機械的性質および破壊靱性の変化	12
2.2.2 材質変化特性に及ぼす予歪履歴の影響	19
2.2.3 スケルトン予歪によるSM490A鋼の材質変化特性評価	23
2.3 繰返し予歪によるSM490A鋼再現HAZの材質変化特性	27
2.3.1 繰返し予歪による機械的性質の変化	27
2.3.2 繰返し予歪による破壊靱性の変化	29
2.4 繰返し予歪によるSM490A鋼および再現HAZの材質変化特性の比較	32
2.4.1 機械的性質の変化の比較	32
2.4.2 破壊靱性の変化の比較	33
2.5 まとめ	35
3. 繰返し荷重下での構造用鋼の延性き裂成長特性 [南(阪大)]	37
3.1 試験の目的と内容	37
3.1.1 試験目的	37
3.1.2 試験の内容	37
3.2 繰返し荷重下での延性き裂成長特性	41
3.2.1 繰返し荷重下での変形挙動	41
3.2.2 繰返し荷重下での成長き裂先端近傍の歪分布特性	43
3.3 繰返し荷重下での延性き裂成長抵抗の評価パラメータの考察	45
3.3.1 従来手法の問題点	45
3.3.2 90%スケルトンCTODに注目した延性き裂成長抵抗の評価	50
3.4 まとめ	53

4. 動的荷重下での構造用鋼の応力・歪特性	55
4.1 試験の目的と内容 [久保 (川鉄), 誉田 (住金), 大政 (阪大)]	55
4.1.1 試験の目的	55
4.1.2 平滑丸棒引張試験の内容	55
4.1.3 両側切欠き材の動的引張試験の内容	57
4.1.4 両側切欠き材の動的FEMの内容	59
4.2 機械的性質に及ぼす歪速度の影響 [久保 (川鉄)]	61
4.2.1 母材の機械的性質に及ぼす歪速度の影響	61
4.2.2 予歪付加材の機械的性質に及ぼす歪速度の影響	65
4.2.3 強度のStrain rate-temperature parameter 依存性	69
4.3 動的荷重下での形状不連続部の応力・歪応答特性	73
4.3.1 両側切欠き材の動的試験 [誉田 (住金)]	73
4.3.2 両側切欠き材の動的FEM解析 [大政 (阪大)]	75
4.4 まとめ	81
5. おわりに [南 (阪大)]	83

1. はじめに

1. はじめに

1. 1 WG-3の研究活動の目的

繰返し荷重を受ける建築骨組鋼構造溶接接合部の変形・破壊特性を把握し、建築構造における脆性破壊限界評価のための基本的考え方と破壊防止のための力学的制御因子を明らかにすることを目的として、建築骨組構造のもつ構造的特徴と荷重履歴を考慮した次のような共同研究を計画・実施した。

- (1) 繰返し歪履歴を受ける構造用鋼材およびその溶接部の材質変化特性
- (2) 繰返し荷重下での構造用鋼の延性き裂成長と不安定破壊遷移挙動
- (3) 動的荷重下での応力・歪応答を考慮した建築構造用鋼の必要性能評価手法

平成6年度までは、比較的大きな塑性歪が繰返し作用するときの鋼材の破壊抵抗の変化と、き裂成長に続く不安定破壊現象の解明 [(1)と(2)の内容] が主たる検討内容であったが、平成7年1月17日に生じた兵庫県南部地震では建築鉄骨の脆性破壊（延性き裂成長のほとんど認められないものもあった）というこれまでに経験したことのない破壊形態が建築構造物に出現し、平成7年度から新たに「動的荷重下での構造用鋼の応力・歪応答と必要性能評価試験法 [(3)の内容]」を研究テーマに設定して重点的に研究を行っている。また、それに関する基礎的情報を整理する目的で、「構造用鋼の動的荷重下での変形・破壊特性」について文献調査を行い、調査結果をレビュー報告書（別冊）としてまとめた。

平成8年度は、前年度までの研究結果を基礎として、動的荷重に対する建築構造用鋼の不安定破壊クライテリアを明らかにし、構造用鋼とその溶接接合部に要求される動的破壊性能確保のための鋼材必要特性の評価試験法を確立することを目指した研究を行う。

1. 2 平成7年度までのWG-3の研究活動の内容

平成7年度までに行ったWG-3の研究活動の概要を以下に示す。

(1) 繰返し歪履歴を受ける構造用鋼材およびその溶接部の材質変化特性

建築構造用鋼材が繰返し予歪を受けるときの機械的性質および破壊靱性の変化特性を、単調引張予歪の場合と比較しながら検討し、繰返し予歪による構造用鋼の材質変化特性評価のための有効歪パラメータを明らかにする。また、鋼溶接継手で生じうる材質劣化部を想定して作成した再現溶接熱影響部についても同様な検討を行い、材質劣化部での機械的性質・破壊靱性の変化特性が母材と比較してどのように異なるかを調べる。（詳細は本報告書の第2章）

(2) 繰返し荷重下での構造用鋼の延性き裂成長特性

繰返し荷重下での建築構造用鋼の延性き裂成長挙動と成長き裂先端近傍の力学的状態量の変化特性を調べる。また、き裂成長特性に及ぼす荷重履歴の影響についても検討を行い、繰返し荷重下でのき裂成長抵抗評価のための力学的パラメータについて考察する。（詳細は本報告書の第3章）

(3) 動的荷重下での構造用鋼の応力・歪応答特性

建築構造用鋼の降伏応力、引張強さ、破断延性などの機械的特性に及ぼす歪速度の影響を把握し、従来から提案されているStrain rate - Temperature parameter R による動的強度の統一的評価を試みる。また、建築構造における応力集中部を模擬した両側切欠き材を用いて動的引張試験とその動的FEM解析を行い、形状不連続部における動的応力・歪集中特性が静的負荷の場合とどのように異なるかを明らかにする。（詳細は本報告書の第4章）

1. 3 研究項目の一覧

本共同研究の実験には主として50キロ級の構造用鋼を用いた。繰返し荷重の影響に関わる(1)と(2)の実験では、予歪履歴あるいは荷重履歴を種々に変化させ、動的特性の調査が目的の(3)の実験では歪速度を 10^{-4} ~ 10^2 の範囲で変化させた。以下に各実験の実験パラメータを整理する。

(1) 繰返し歪履歴を受ける構造用鋼材およびその溶接部の材質変化特性

表1.1 繰返し歪履歴を受ける構造用鋼材およびその溶接部の材質変化特性に関する実験計画

試験目的	予歪条件		試験項目													
			母材(SM490A, as roll)								再現HAZ					
			Hv	丸棒引張		シャルピ試験		三点曲げCTOD試験				Hv	丸棒引張	シャルピ	CTOD	
				L	LT	LZ	LT		LZ		L		LZ	LZ a/W=0.2		
単調引張予歪による材質変化特性の把握	単調引張予歪	0%	20°C	○	◎	◎	-100°C	-100°C	◎	◎	20°C	20°C	◎	◎		
		5%	20°C	○	-	◎	-	-	-60°C	-100°C	-60°C	20°C	20°C	◎	◎	
		10%	20°C	○	-	◎	-	-	◎	◎	20°C	20°C	◎	20°C		
		20%	20°C	○	-	◎	-	-	-60°C	-100°C	-60°C	20°C	20°C	◎	20°C	
繰返し歪履歴の影響による材質変化特性把握	一方向繰返し予歪	定歪振幅	2%×5	20°C	○	-	◎	-	-	-60°C	-100°C	-	20°C	20°C	◎	20°C
			3%×5	20°C	○	-	◎	-	-	-60°C	-100°C	-	20°C	20°C	◎	20°C
			4%×5	20°C	○	-	◎	-	-	-60°C	-100°C	-	20°C	20°C	◎	20°C
	歪漸増	2+4+6%	20°C	○	-	◎	-	-	-60°C	-100°C	-	20°C	20°C	◎	20°C	
		2+4+6+8%	20°C	○	-	◎	-	-	-60°C	-100°C	-	20°C	20°C	◎	20°C	
	正負交番繰返し予歪	定歪振幅	±1%×5	20°C	20°C	◎	◎	-100°C	-100°C	◎	-	/				
歪漸増 ±(1+2+3)%			20°C	20°C	◎	◎	-100°C	-100°C	◎	-						

◎：温度依存性調査試験、○：-100°C, -50°C, 20°C

L：試験片の長手方向が鋼材の圧延方向

LZ：試験片長手方向が鋼材圧延方向でき裂が鋼材の厚さ方向に進展

LT：試験片長手方向が鋼材圧延方向でき裂が鋼材の圧延方向に垂直に進展

(2) 繰返し荷重下での構造用鋼の延性き裂成長特性

表1.2 繰返し荷重下での構造用鋼の延性き裂成長特性に関する実験計画

	試験片採取方向*	試験温度	荷重履歴			
			単調載荷	一方向繰返し	正負交番繰返し (荷重漸増型)	正負交番繰返し (荷重漸減型)
SM490A	LT	20℃	○	/	5条件	5条件
脆化鋼	TL	-20℃	○	定歪振幅 $\epsilon_i = 1\%, 2\%$	$\epsilon_i = \pm 1\%, \pm 2\%$	/
SM400B	LT	-40℃	○	定歪振幅 $\epsilon_i = 1\%, 2\%$	$\epsilon_i = \pm 1\%, \pm 2\%$	/

*：用いた試験片は全て $aW=0.1$ の4点曲げ試験片

ϵ_i ：各荷重サイクルにおける作用歪の増分

(3) 動的荷重下での構造用鋼の応力・歪応答特性

表1.3 機械的性質に及ぼす歪速度の影響に関する実験計画

鋼種	厚さ (mm)	位置	方向	試験温度	予歪量 (%)	歪速度 (1/s)
SN490B (鋼板)	25	1/2t	L	室温	0	$10^{-4} \sim 10^2$
					5	
					10	
SM490A (高N系鋼板)	22	1/2t	L	室温	0	
					5	
					10	
SM490A (H形鋼)	22	フランジ 1/4W 1/2t	L	室温	0	

表1.4 動的荷重下での形状不連続部の応力・歪応答特性に関する実験／解析計画

鋼種	厚さ (mm)	切欠き先端 半径(mm)	静的応力 集中係数	実験/ FEM解析	負荷速度 (mm/s)	歪速度 (1/s)
SN490B (鋼板)	25	2.5	3.0	実験	0.02	10^{-4}
					2	10^1
				FEM解析	静的負荷	静的負荷
					1	0.5×10^1
2	10^1					