

低い板厚方向絞り値を有した鋼材十字溶接継手の強度特性に関する研究

設計工学講座 許田 千晶

1. はじめに

我が国の社会基盤設備は、1960年から1970年代の高度経済成長期に急速に建設された。近年、橋梁の架け替えや大規模な補修が日本全国で行われている状況にあり、老朽化は深刻な社会問題となっている。鋼橋の老朽化は腐食と金属疲労がある。金属疲労の対策事例として、既設鋼製橋脚の隅角部で疲労損傷対策が行われ、補強後に溶接補修が実施された。その溶接補修時に鋼材内にラメラテアといわれる鋼材内部で板厚方向に裂ける割れが生じた¹⁾。発生原因は、板厚方向の絞り値 [RAZ(ϕ_z)] が10%以下と低いこと、隅角部の十字溶接継手という非常に高い拘束下での溶接であったことなどが挙げられた¹⁾。また、建設当時(1970年代)の製鋼技術が低かったため、鋼材内に硫黄量などの非金属介在物量が多く含有していたことも原因として考えられている¹⁾。このような古い年代の鋼材で製作された鋼橋は日本国内に多数存在しており、その強度特性を評価する必要がある。また、橋梁の寿命を左右する破壊として、地震時の低サイクル疲労、常時の高サイクル疲労がある。これらの破壊形態に対する古い年代の鋼材特性の影響として、強度や破壊特性を明確にする必要がある。以上の背景から、本研究では、古い年代の既設鋼橋から低い ϕ_z の鋼材を採取し、製作した荷重伝達型十字溶接継手試験体を用いて、引張試験及び疲労試験を行い、低い板厚方向絞り値を有する十字溶接継手部の強度特性及び破壊特性を明らかにする。

2. 試験方法

2.1 試験片の作製方法

図1に実橋から採取された1960～1970年代の古い鋼材を用いて製作した荷重伝達型十字溶接継手を示す。試験体は研究対象の古材を十字溶接継手の挟まれ板に用いて、その両側は現代の鋼材を溶接接合して製作した。図2に製作した試験体に検出された非金属成分MnSによるMT指示模様、ラミネーション及びラメラテアの例を示す。

表1に古材の板厚方向絞り値 ϕ_z 、化学成分、採取した鋼橋の竣工年、材質を示す。板厚方向絞り値(ϕ_z)の区分として、現行基準(JIS G3199)²⁾の耐ラメ鋼(Z15S)の ϕ_z 最低保証ランク15%を基準として、5%未満を低ランク、5%以上15%未満を中ランク、15%以上を高ランクとした。このランクに進じて区分された試験体は、40体(8体×5)が低ランク、20体(4体×5)が中ランク、65体(13体×5)が高ランクである。

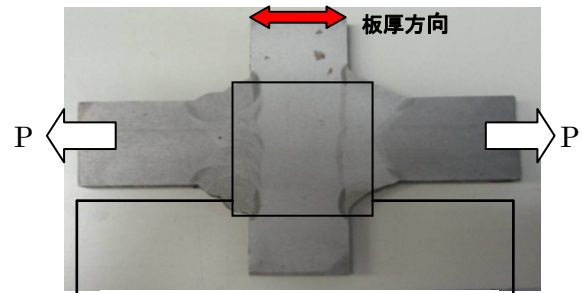


図1 十字溶接継手 (切断前)

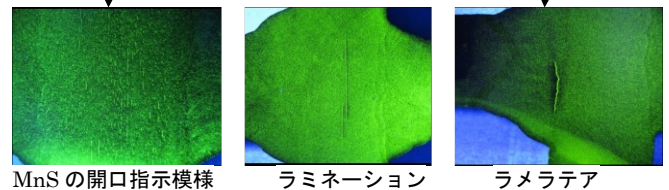


図2 挟まれ板の古材(MT試験)

表1 試験片一覧

古材の種類	鋼材 ϕ_z	ϕ_z の区分	鋼材成分(%)					竣工年	材質	計測板厚(mm)
			C	Si	Mn	P	S			
1	2.7	低	0.15	0.26	1.41	0.026	0.005	1980	SM58	32
2	2.7		0.15	0.26	1.41	0.026	0.005	1980	SM58	32
3	2.7		0.15	0.26	1.41	0.026	0.005	1980	SM58	32
4	2.7		0.15	0.26	1.41	0.026	0.005	1980	SM58	32
5	2.7		0.15	0.26	1.41	0.026	0.005	1980	SM58	32
6	2.7		0.15	0.26	1.41	0.026	0.005	1980	SM58	32
7	3.7		0.20	0.45	1.44	0.020	0.010	1967	SM50B	32
8	3.7	0.20	0.45	1.44	0.020	0.010	1967	SM50B	32	
9	10.3	中	0.16	0.38	1.26	0.016	0.022	1967	SM50B	28
10	10.3		0.16	0.38	1.26	0.016	0.022	1967	SM50B	28
11	10.3		0.16	0.38	1.26	0.016	0.022	1967	SM50B	28
12	10.7		0.14	0.48	1.32	0.020	0.007	1966	HT60	40
13	15.3		0.15	0.41	1.28	0.026	0.005	1967	SM60	29
14	15.3		0.15	0.41	1.28	0.026	0.005	1967	SM60	29
15	15.3		0.15	0.41	1.28	0.026	0.005	1967	SM60	29
16	15.3	0.15	0.41	1.28	0.026	0.005	1967	SM60	29	
17	18.7	高	0.25	0.02	1.00	0.024	0.011	1971	SS41	25
18	18.7		0.25	0.02	1.00	0.024	0.011	1971	SS41	25
19	18.7		0.25	0.02	1.00	0.024	0.011	1971	SS41	25
20	18.7		0.25	0.02	1.00	0.024	0.011	1971	SS41	25
21	22.0		0.17	0.24	1.40	0.017	0.008	1969	SM58	32
22	22.0		0.17	0.24	1.40	0.017	0.008	1969	SM58	32
23	22.0		0.16	0.11	1.31	0.012	0.007	1971	SM58	25
24	22.0	0.16	0.11	1.31	0.012	0.007	1971	SM58	25	
25	22.0	0.16	0.11	1.31	0.012	0.007	1971	SM58	25	

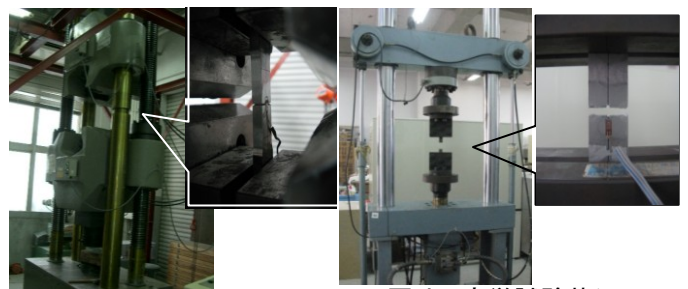


図3 引張試験状況

図4 疲労試験状況

2.2 引張試験方法

引張試験は、金属材料引張試験方法[JIS Z 2241]に準じて試験片形状を決定するのが一般的であるが、本研究で用いる試験片は、実橋から採取した鋼材の関係で試験片長さが制限されている。よって FEM 解析にて引張試験片形状を決定した。図 3 に引張試験状況を示し、図 5 に引張試験体を示す。試験は 2000kN 万能試験機を用いて、変位制御にて試験を行った。

2.3 疲労試験方法

疲労試験には、図 4 に示した 200kN サーボ型疲労試験機を用いて、弾性域内で片振引張振幅にて試験を行った。载荷速度は約 10Hz、応力の算出に動歪計測結果を用いた。試験片は、図 5 に示すように ①古材の基本的な疲労特性を検討する目的で平板状の試験片、②低 ϕz による熱影響部の影響を検討する目的で円孔ノッチ($\phi=2\text{mm}$)³⁾ を設けた円孔を有した平板状試験片とした。また、③荷重伝達型十字溶接継手の疲労強度を検討する目的で十字溶接継手試験体を製作し、合計 3 種類について疲労特性を調べた。ここで、円孔を設けた平板状の試験片は、円孔位置が挟まれ板である古材部中央、溶接熱影響部 HAZ の 2 パターンで疲労試験を行った。さらに十字溶接継手は実構造体の三軸応力状態下での疲労特性の検討目的で斜め十字溶接継手状も加えて疲労試験を行った。

3. 静的引張試験特性

表 2 に引張試験結果(計 23 体)の一覧を示す。本研究が古材の板厚方向特性に着目している点から挟まれ板内で破断した結果について以下に考察する。

3.1 強度特性

図 6 に引張試験から得られた応力-歪曲線を示す。右図が新材、左図が ϕz 低ランクの一例を示す。 ϕz 低ランクでは降伏強度を満足するが、降伏強度に達した後急激に破断した。この現象は、 ϕz が低いほど顕著であった。一方、現代の鋼材では降伏強度、引張強度ともに十分な特性を示した。

3.2 破壊特性

図 7 に試験後の破断状況を示す。 ϕz 低ランクでは絞りがほとんどみられず、複数の破断起点がみられた。また、 ϕz のランクにかかわらず古材の破面では脆性的な破面がみられた。一方、新材では十分な絞りがみられ、破面は全て延性破面を示した。

4. 疲労特性

4.1 強度特性

図 8 に平板状試験片の疲労強度曲線を示す。縦軸は応力範囲、横軸は破断までの繰り返し回数を示す。通常、平板状試験片の疲労強度は、母材の疲労強度 JSSC-A 等級に相当するが、 ϕz 高ランクで E 等級、低ランクでは H 等級まで低下する試験片もみ

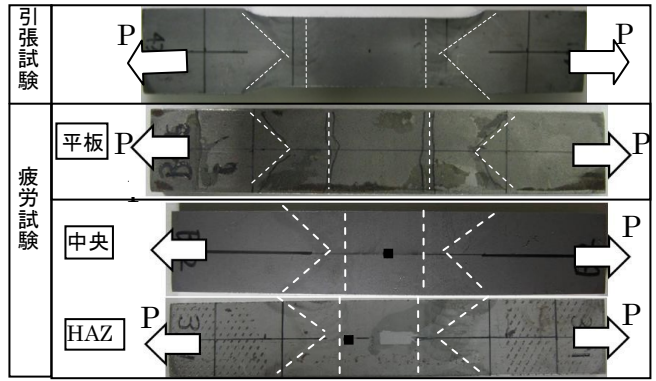


図 5 試験片形状

表 2 引張試験結果一覧

試験片名称	ϕz の区分	ϕz [%]	YP[N/mm ²]	ϵ_{yp}	TS[N/mm ²]	ϵ_{ts}	絞り [%]	伸び [%]	破断位置	材質
			試験値	[%]	試験値	[%]				
1 142	低	2.7	477.9	0.4	479.9	0.5	1.2	4.0	古材	SM58
2 143		2.7	497.1	0.4	504.3	0.7	3.6	4.1	古材	SM58
3 431		2.7	490.5	0.3	495.2	0.9	1.9	1.9	古材	SM58
4 772		2.7	509.2	0.4	527.7	0.9	0.7	3.4	古材	SM58
5 72		3.7	328.5	0.3	400.0	2.1	2.1	5.6	古材	SM50B
6 74		3.7	366.2	0.3	424.8	2.7	4.5	4.6	古材	SM50B
7 521		3.7	365.4	0.4	465.2	3.7	5.1	1.7	古材	SM50B
8 213	中	2.7	429.6	0.2	471.4	0.4	60.4	16.8	溶接	SM58
9 775		2.7	509.0	0.4	531.1	1.9	15.3	7.2	HAZ	SM58
10 22		10.3	326.8	0.2	431.9	5.6	9.3	10.3	古材	SM50B
11 791	高	10.3	340.2	0.3	483.5	10.0	3.7	5.8	古材	SM50B
12 794		10.3	343.9	0.3	491.2	9.4	6.4	7.0	古材	SM50B
13 835	高	15.3	484.6	0.4	595.6	12.3	15.0	11.6	古材	SM60
14 851		22.0	535.2	0.4	572.2	3.7	9.1	6.6	古材	SM58
15 864		22.0	307.7	0.3	374.2	2.2	15.5	7.1	古材	SM58
16 875		22.0	525.0	0.5	637.0	16.7	14.8	10.8	古材	SM58
17 193		15.3	523.6	0.3	588.0	3.5	41.0	15.2	溶接	SM60
18 833		15.3	513.3	0.3	593.2	3.5	31.7	8.5	HAZ	SM60
19 335		18.7	362.9	0.3	464.8	3.1	72.7	21.7	溶接	SS41
20 365	18.7	367.0	0.2	500.1	4.2	7.2	6.0	HAZ	SS41	
i A-1	新材	-	331.3	0.4	448.5	-	19.6	17.5	母材	SM400A
ii C-1		-	379.5	0.4	525.5	-	26.5	21.7	母材	SM490A
iii E-2		-	380	0.4	419	-	20.7	18.6	溶接	SM570

YP:降伏強度
TS:引張強度

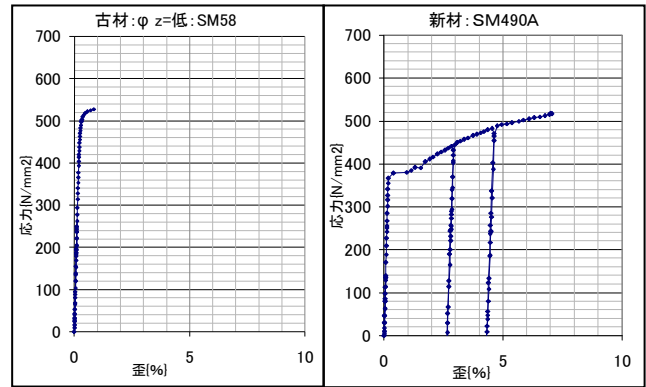


図 6 応力歪曲線

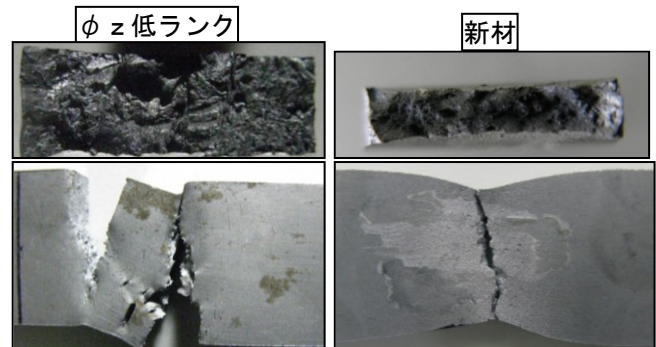


図 7 引張試験による破断状況

られ、 ϕ_z が低下するほど疲労強度も低下する傾向がみられる。

図 9 に円孔を有した平板状試験片の疲労試験結果を示す。縦軸が純断面応力範囲、横軸が破断までの繰り返し回数を示す。ここで円孔を有した平板状試験片の強度は、JSSC-C 等級に相当する。試験の結果、疲労強度等級を満足する試験結果も一部みられたが、 ϕ_z 高ランクで E 等級、低ランクでは H 等級を示し、多くの試験片で疲労強度の低下がみられた。これは ϕ_z が低下するほど疲労強度も低下する傾向がみられる。次に、熱影響部の影響を検討する。 ϕ_z 中及び高ランクに着目し円孔位置が中央または、HAZ の疲労強度結果を比較する。どちらの試験結果も C~E 等級に集中しており、熱影響による強度の違いは見られない。

図 10 に十字溶接継手状試験片の疲労強度曲線を示す。図中の①の応力は公称応力範囲を示し、図中の②の応力は古材中央の応力を示す。荷重伝達型十字状試験片の強度は通常、JSSC-E 等級に相当し、本試験においても同等級を満足した。円孔を有した十字溶接継手状試験片の疲労試験結果も同様な疲労強度を示した。

4.2 破壊特性

4.2.1 平板状試験片

平板状試験片と円孔を有した平板状試験片の疲労試験結果について、図 11 に疲労試験後の破断状況、図 12 に破面観察結果を示す。

平板状試験片では、古材部を破断起点として直線状で進展・破断し、 ϕ_z のランクにかかわらず同じ破壊特性を示した。破面は凹凸の小さい破面が多くみられた。

4.2.2 円孔を有した平板状試験片

円孔位置が中央の試験結果では、円孔を破断起点として凹凸の線状で進展・破断するケースが多くみられた。破面は起点初期に疲労破面模様がみられ、その後脆性的な破面に移行する。これは、 ϕ_z が低いほどほとんど脆性的な破面となる傾向がある。また、 ϕ_z のランクにかかわらず凹凸の大きい破面がみられた。さらに、円孔位置が中央の試験片の 3分の1 が円孔外から破断し、その内 8 体中 5 体が ϕ_z 低ランクであった。

円孔位置が HAZ の試験結果では、円孔を破断起点として直線状で進展・破断するケースが ϕ_z のランクにかかわらず多くみられた。破面は、起点初期に疲労破面模様がみられ脆性的な破面に移行する。これは、 ϕ_z が低いほどほとんど脆性的な破面となる傾向がある。また、 ϕ_z のランクにかかわらず凹凸が小さい破面がみられた。

また、円孔以外から破断するケースもみられ、合計 11 体あった。その内 ϕ_z 低ランクが 7 体と多くみ

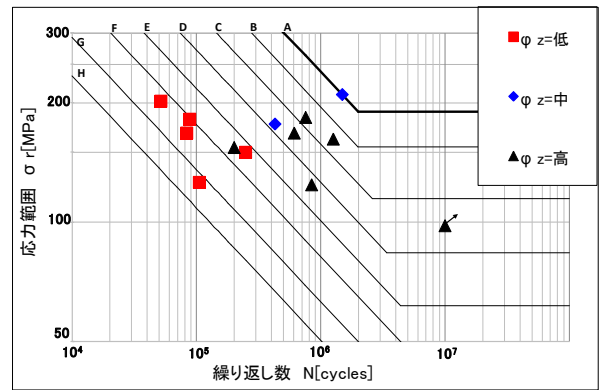


図 8 疲労強度曲線[平板状試験片]

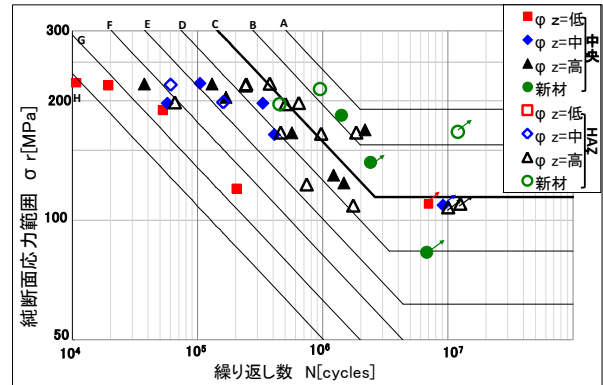


図 9 疲労強度曲線[円孔を有した平板状試験片]

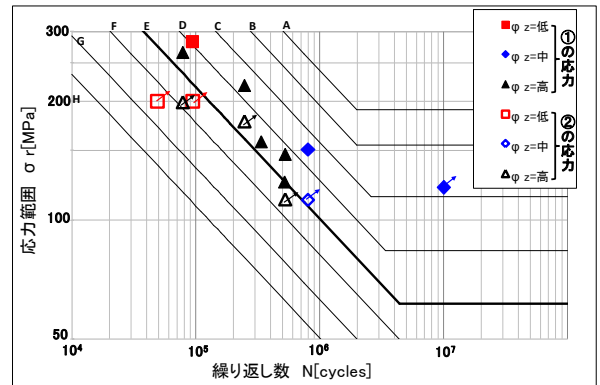


図 10 疲労強度曲線[十字溶接継手状試験片]

られた。円孔以外から破断する場合、古材部を起点とし直線状で進展・破断するケースが多くみられた。このような円孔以外から破断した理由として、図 8 に示す古材部表面を起点とする疲労等級と図 9 に示す円孔を起点とする疲労等級がほぼ同等級(低ランク：H 等級、高ランク：E 等級)にまで低下していることが要因の一つとして考えられる。

4.2.3 十字溶接継手状試験片

図 13 に十字溶接状試験片の破面を示す。全ての試験片は溶接止端を起点として破断した。起点部は疲労破面模様が呈し、破断最終では延性破面状で破断する。

図 14 に十字溶接継手を斜め方向に引張った状態で行った疲労試験の破断状況を示す。起点は全て古

材側溶接止端であった。φz 低ランクの場合、古材の板厚方向と鉛直に進展した。φz 高ランクの場合、古材の板厚方向と平行に進展した。破面は起点部の溶接部で疲労破面模様がみられるが、古材部に亀裂が進展すると脆性的な破面がみられた。φz が低いほど古材部で凹凸の大きい脆性的な破面がみられる。

5. 結論

(1) 静的引張強度特性

- φz ランクにかかわらず降伏強度を満足するが、φz 低ランクの場合、降伏後に急激に破断する。

(2) 静的破壊特性

- 古材は φz ランクにかかわらず絞り及び伸びはみられず、一般的な延性破面形態がみられない。

(3) 疲労強度特性

- φz が低いほど疲労強度は低下する。特に φz 低ランクの疲労強度は著しく低下する。

- 溶接熱影響による疲労強度の違いは見られない。
- 円孔を設けても円孔外から破断するケースがみられる。これは φz 低ランクに多くみられる。

- 十字溶接継手は、全て疲労強度 E 等級を満足した。

(4) 疲労破壊特性

- 平板状試験片では、φz 低ランクのほうが脆い傾向がみられる。
- 円孔を古材中央に設けた場合、φz のランクにかかわらず凹凸の大きい破面がみられた。一方、円孔を HAZ に設けた場合、φz のランクにかかわらず凹凸が小さい破面がみられた。

- 十字溶接継手は、全て溶接止端破壊を示した。
- 荷重偏心载荷の場合、φz で亀裂進展形状に違いがみられる。

参考文献

1) 三木千尋・富永知徳・柳沼安俊・下里哲弘：既設鋼製橋脚の補修溶接におけるラメラティアの発生の可能性の検討，土木学会論文集，No759/I-67, pp69-77,2004.4

2) 日本道路協会：鋼道路橋に疲労設計指針,H14

3) 三木千尋・Fauri FAHIMUDDIN・穴見健吾・大橋治一・町田文孝：鋼材十字溶接継手の板厚方向鋼材強度特性に関する研究，土木学会論文集，No598/I-44, pp65-73,1998.7

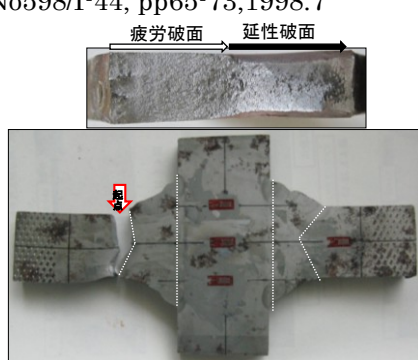


図 13 十字溶接継手試験後状況

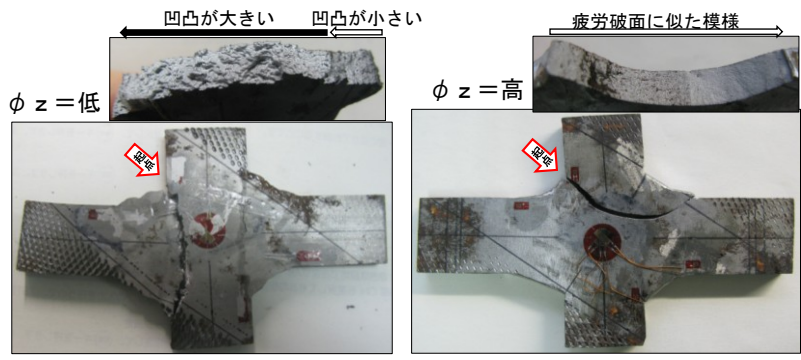


図 14 斜め十字溶接継手試験後状況

試験片形状	○ 破断起点位置	
	φz = 低	φz = 高
平板状試験片		
円孔を有した平板状試験片 円孔位置：中央		
円孔の外から破断したケース 円孔位置：中央		
円孔を有した平板状試験片 円孔位置：HAZ		
円孔の外から破断したケース 円孔位置：HAZ		

図 11 疲労試験による破断状況

試験片形状	φz = 低	φz = 高
	平板状試験片	凹凸が若干大きい
円孔位置：中央	凹凸が大きい	凹凸が大きい
円孔位置：HAZ	凹凸が小さい	凹凸が小さい

○ 破断起点位置 ⇨ 疲労破面に似た模様 ■ 脆性的な破面

図 12 破面観察