

鋼部材のエネルギー吸収能力遷移温度に及ぼす マクロ形状の影響

松本由香¹, 秋山宏², 山田哲³, 小川信行⁴

¹博士(工学) 横浜国立大学助手 工学部建設学科(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²工博 日本大学教授 総合科学研究所(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

³博士(工学) 東京工業大学助教授 建築物理研究センター(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

⁴工博 防災科学技術研究所 防災総合研究部(〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

It is effective to use the tough material in order to prevent the brittle fracture of steel members with some stress concentration points. In this study, FTP is defined as the necessary temperature to reduce the sensitivity to stress concentration and ensure the energy absorption capacity of the member. The aim of this study is to examine the influence of geometrical condition on FTP. For this purpose, specimens with side grooves and notches were manufactured and monotonic tensile loading tests were performed under the several different temperatures. As the result, the rise in FTP according to the sudden change of section area was observed.

Key Words: energy absorption capacity, FTP, geometrical condition

1. 序

ノースリッジ地震, 兵庫県南部地震において, 鉄骨建築物の柱梁接合部に破壊による被害が顕在化した^{1),2)}. 建築構造物の終局耐震性を確保する上では, 接合部のエネルギー吸収能力を保証することが重要であり, 鋼部材の破壊条件の解明, 破壊に対する設計規範の確立が緊急の課題となっている。

破壊設計規範を確立する上での大きな課題が脆性破壊の扱いである。脆性破壊が早期に発生する場合, 鋼部材は設計時に想定したエネルギー吸収能力を発揮できない可能性がある。特に使用温度が低く材料靱性が乏しい場合, 脆性破壊は僅かな応力集中の差異によって発生時期が大きく変動する傾向があり, 部材性能の予測と保証を困難にしている。これに対し, 使用温度が高い場合は破壊モードが延性的になり, 鋼部材は応力集中源の有無に関わらず一定の強度レベルまで歪硬化できる。この点に着目すると, 破壊設計規範として鋼部材の使用温度を条件づける方法が考えられる。Pellini らは塑性設計時の限界温度として FTP (Fracture Transition, Plastic) を提唱した³⁾。建築鋼構造物の一般的な柱梁接合部においては, 亀裂や溶接欠陥などの応力集中源が存在することが多い。応力集中源に対する感受性が十分低くなるように使用条件を制御することができれば, 部材性能の再現性及び予

測値の信頼性が高くなることが期待できる。

構造物に組み込まれた実大部材においては, 微小な亀裂を起点として脆性破壊が発生する恐れがある。一方, 素材引張試験片やこれに準じた小型試験片においては, 塑性変形の過程において延性亀裂が形成されても脆性破壊に転化することは少ない。このことから, 亀裂感受性は部材寸法, 断面積変化率等のマクロな幾何学的条件に依存すると予想される。近年, 改良型接合部等が提案されており⁴⁾, 鋼部材の形態が多様化する中で, マクロな形状が亀裂感受性と必要温度条件に及ぼす影響を解明することは, 破壊に対する安全性を高める上で有効である。

本研究では, サイドグループ及び切欠きを設けた平板引張試験片を製作し, 複数の温度下で準静的単調引張試験を行った。亀裂感受性が十分低下することによってエネルギー吸収能力が上限に達する温度として FTP を定義し, 試験片形状が亀裂感受性と FTP に及ぼす影響を調査した。

2. 実験方法

(1) 試験片の計画

使用鋼板は板厚 25mm の SM490 材である。JIS5 号試験片による準静的引張試験から得られた降伏強度 $Y.P.$, 引張

強度 $T.S$ 及び一様伸び ϵ_u について、試験温度との関係を図-1及び図-2に示す。シャルピー衝撃試験から得られた吸収エネルギー E_v 及び脆性破面率 Cry について、遷移曲線を図-3に示す。

図-4に試験片形状を示す。鋼構造柱梁接合部においては、梁フランジダイアフラム溶接継ぎ目など、急激に断面積が変化する部位がある。このような部位における応力状態を再現するため、試験片にはサイドグループを設けた。また、溶接止端部や予亀裂など、接合部に生じる幾何学的ノッチ効果を再現するため、試験片両面に切欠きを設けた。切欠きは機械加工とし、切欠き角度は 45° 、切欠き先端の曲率半径は 0.1mm とした。

(2) パラメータ

パラメータはサイドグループ半径 R 、切欠き深さ d 及び試験温度である。 R の影響を検討するため、 d を 2mm に統一し、 R を $1, 5, 12.5\text{mm}$ と変化させた試験片シリーズ（以下 R シリーズと表記）を設定した。同様に、 R を 12.5mm に統一し、 d を $1, 2, 4\text{mm}$ と変化させた試験片シリーズ（以下 d シリーズと表記）を設定した。各々の試験片形状について、 -50°C ～常温の範囲で試験温度を設定した。これは、シャルピー衝撃試験から得られた遷移曲線において、下部棚から上部棚にまたがる範囲である（図-3参照）。

表-1に試験片リストを示す。本論文の試験片名称は、 R 及び d の値、高温側から順に付けたアルファベットからなる。

(3) 荷重計測計画

図-5に試験片セットアップを示す。治具を介して試験片両端をアムスラー試験機にセットし、切欠き部が破断するまで準静的に単調引張荷重した。荷重中は荷重及びクロスヘッド間変位を連続的に計測した。又、切欠き近傍の試験片表面に熱電対2点を貼付し、試験片温度を計測した。常温試験片以外は図-5中に示すように液槽を設置し、冷却液を投入して試験片を冷却した。荷重中は試験片が所定の温度を保つように温度管理を行った。荷重開始時から破断するまでの試験片温度の変動は $\pm 2\sim 3^\circ\text{C}$ 程度である。荷重後は試験片の破面を目視観察し、亀裂の発生状況、破壊モードを確認した。

表-1 試験片リスト

	R=1mm	R=5mm	R=12.5mm
d=1mm	—	—	R125d1a~g
d=2mm	R1d2a~g	R5d2a~g	R125d2a~g
d=4mm	—	—	R125d4a~g

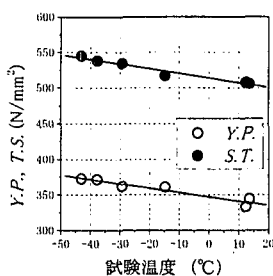


図-1 鋼材の強度

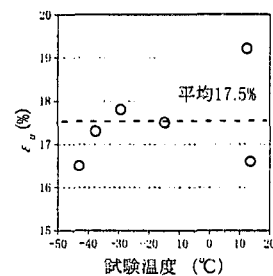
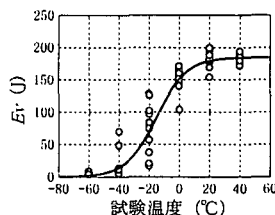
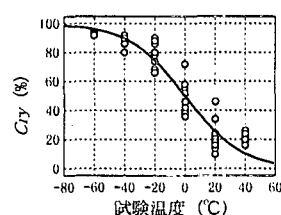


図-2 鋼材の一様伸び

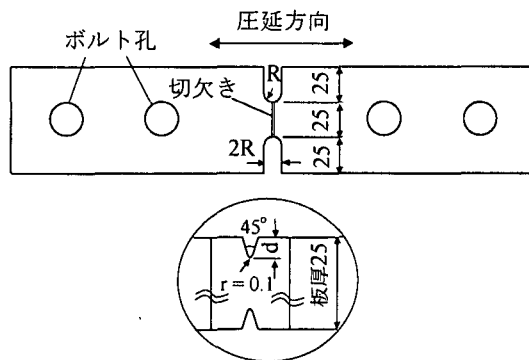


(a) 吸収エネルギー



(b) 脆性破面率

図-3 シャルピー衝撃試験結果



切欠き部詳細

図-4 試験片形状

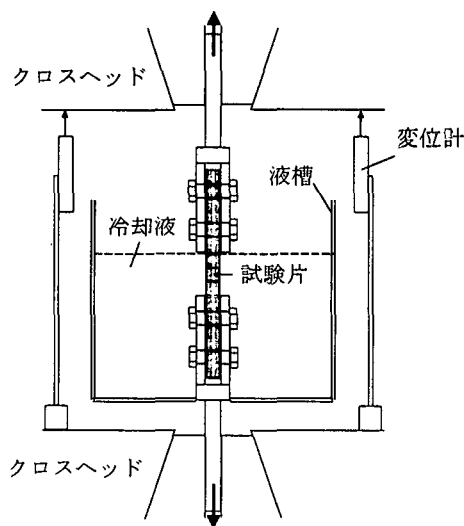


図-5 試験片セットアップ

3. 実験結果

(1) 荷重変形関係と破壊状況

いずれの試験片においても、切欠き底から延性亀裂が発生し、切欠き部断面が破壊した。荷重変形関係には以下の2タイプが見られた。

Type1: 最大耐力点以降、断面のくびれや延性亀裂の進展による緩やかな耐力劣化を示した後に破壊した。これらの試験片の破断面には、切欠き底より約2mm以上の深さに亘って延性破面が見られた。試験片 R125d4a を例に採り、荷重変形関係を図-6に、破面を写真-1に示す。

Type2: 耐力が上昇する過程で破壊が生じ、急激に耐力を喪失した。これらの試験片の破断面はほぼ全面脆性破面である。試験片 R125d2g を例に採り、荷重変形関係を図-7に、破面を写真-2に示す。

表2～表6に、実験結果概要を形状毎にまとめる。表中の記号は以下の通りである。

- T : 試験温度
- σ_y : 降伏応力
- σ_{max} : 最大応力
- σ_f : 破断時応力
- W_p : 破壊するまでに吸収した塑性歪エネルギー
- dc : 延性亀裂深さ

T は、載荷中の試験片に貼付した熱電対計測値について、載荷開始から試験片が破断するまでの平均値を求めたものである。表中の応力は、いずれも軸力を試験片初期断面積で除した公称値である。 σ_y は、荷重変形関係の接線剛性が弾性剛性の1/3まで低下した時点の応力として求めた。このときの弾性剛性は実験値であり、降伏点を越えるまで載荷した後に除荷することによって求めた。これは、載荷開始時から降伏点付近までは、変位計測値に含まれるボルト孔クリアランス等の誤差が大きいためである。 W_p を求める際にも計測誤差を考慮し、降伏点までの荷重変形関係は前述の方法で求めた弾性勾配をもつ直線と仮定した。 dc は脆性破壊の起点となった位置における延性亀裂深さを計測した値であり、計測精度は0.1mm程度である。全面延性破面となった試験片の dc は、便宜上切欠き部断面厚さの1/2とし、表中に*を付している。以下の考察においては、 dc を脆性破壊が発生するまでに許容できる亀裂寸法と解釈し、亀裂抵抗性を表わす指標として扱う。R1d2試験片については切欠き底に発生した亀裂深さが不均一であり、切欠き中央よりサイドグループ近傍での延性亀裂が深くなったが、脆性破壊の起点となったのは切欠き中央付近の亀裂である。

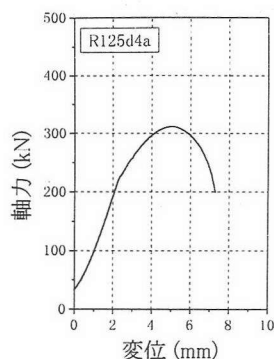


図-6 荷重変形関係 (R125d4a)

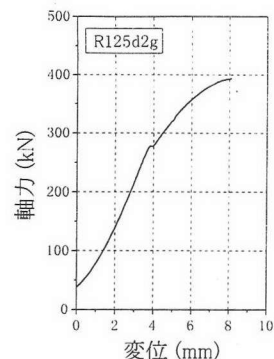


図-7 荷重変形関係 (R125d2g)

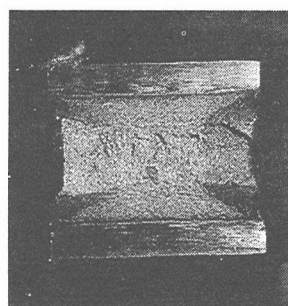


写真-1 R125d4a 破面

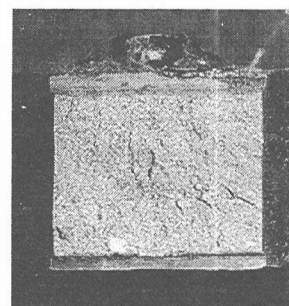


写真-2 R125d2g 破面

表-2 R1d2 試験片の実験結果

試験片	T (°C)	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_f (N/mm ²)	W_p (J)	dc (mm)
R1d2a	23.5	500	738	605	1972	2.0
R1d2b	4.0	498	744	643	1990	1.5
R1d2c	-2.5	508	741	680	1865	1.1
R1d2d	-12.8	526	772	746	1739	0.9
R1d2e	-11.1	509	755	678	2046	1.2
R1d2f	-32.3	510	776	746	1853	0.5
R1d2g	-50.0	553	809	809	1456	0.1

表-3 R5d2 試験片の実験結果

試験片	T (°C)	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_f (N/mm ²)	W_p (J)	dc (mm)
R5d2a	23.3	459	688	561	2163	3.5
R5d2b	3.5	469	708	549	2292	4.1
R5d2c	-12.6	487	723	621	2162	3.5
R5d2d	-22.7	494	750	728	1828	0.8
R5d2e	-29.7	515	753	729	1844	1.0
R5d2f	-32.3	495	738	698	1919	2.0
R5d2g	-53.3	527	762	762	1249	0.2

表-4 R125d2 試験片の実験結果

試験片	T (°C)	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_f (N/mm ²)	W_p (J)	dc (mm)
R125d2a	22.7	—	658	374	—	10.5*
R125d2b	2.5	453	666	567	2159	3.3
R125d2c	-22.2	479	700	696	1587	1.0
R125d2d	-32.3	489	711	643	2101	2.3
R125d2e	-30.9	484	712	697	1710	1.3
R125d2f	-39.7	495	717	717	1403	0.4
R125d2g	-58.6	509	735	735	1450	0.5

表-5 R125d1 試験片の実験結果

試験片	T (°C)	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_f (N/mm ²)	W_p (J)	dc (mm)
R125d1a	17.0	425	648	408	3000	11.5*
R125d1b	4.0	409	634	399	3045	11.5*
R125d1c	-23.2	419	655	534	2811	2.5
R125d1d	-33.0	425	668	611	2595	1.5
R125d1e	-41.8	444	670	625	2512	1.6
R125d1f	-54.5	448	688	684	1995	0.5
R125d1g	-53.3	463	688	655	2418	1.3

表-6 R125d4 試験片の実験結果

試験片	T (°C)	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_f (N/mm ²)	W_p (J)	dc (mm)
R125d4a	17.2	520	726	464	1412	5.0
R125d4b	1.6	500	704	664	1086	1.8
R125d4c	-0.2	509	707	619	1218	2.5
R125d4d	-12.1	504	711	622	1209	2.0
R125d4e	-20.6	552	732	724	905	1.0
R125d4f	-34.0	519	736	736	764	0.7
R125d4g	-52.3	542	755	754	731	0.1

(2) 温度及び形状が強度に及ぼす影響

形状が強度に及ぼす影響について検討するため、素材試験片に対する降伏応力上昇率 R_{yp} 、最大応力上昇率 R_{ts} を下式のように定義する。

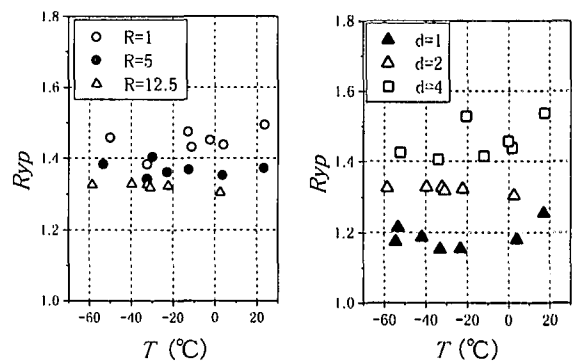
$$R_{yp} = \sigma_y / Y.P. \quad (1)$$

$$R_{ts} = \sigma_{max} / T.S. \quad (2)$$

素材試験片の降伏強度 $Y.P.$ 及び引張強度 $T.S.$ は、いずれも試験温度 T に対応する値を採用した。

図-8(a) (b)に、 R_{yp} と T の関係を形状シリーズ毎に示す。Rシリーズ、dシリーズともに、 R_{yp} には T に対する依存性は認められず、形状が同一であれば R_{yp} はほぼ一定の値となる。いずれの形状についても R_{yp} は 1.0 以上を示しており、破壊断面が多軸応力状態となるために降伏応力が上昇していることが確認できる。また、Rシリーズよりもdシリーズの方が試験片形状による R_{yp} の差が大きい。これは、dシリーズは形状によって断面積が異なり、多軸応力の影響を受ける領域の全断面積に対する割合が異なることが一因と考えられる。

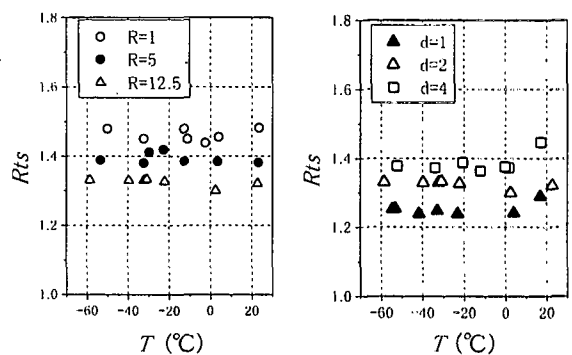
図-9(a) (b)に R_{ts} と T の関係を形状シリーズ毎に示す。いずれのシリーズについても、形状が同一であれば R_{ts} は T に関わらず一定であり、1.0 以上の値を示している。前述のように、低温においては耐力が上昇する過程で脆性破壊する試験片が見られたが、これらの試験片も高い歪硬化レベルに到達していたと判断できる。 R_{ts} が破壊モードに関わらず高い値を示した原因として、多軸応力状態の為に強度が上昇したこと、切欠き底に丸みが設けられているため、脆性破壊の起点となりうる延性亀裂が形成されるまでに大きな塑性変形が可能であったこと等が考えられる。従って、 R_{ts} が 1.0 以上の値を示している



(a) R シリーズ

(b) d シリーズ

図-8 素材試験片に対する降伏応力の上昇率



(a) R シリーズ

(b) d シリーズ

図-9 素材試験片に対する最大応力の上昇率

温度であっても、予亀裂があれば早期に脆性破壊が生じた可能性があり、亀裂抵抗性が高いと結論付けることはできない。

R_{yp} に対しては R よりも d の影響が大きく現れたが、 R_{ts} については d による差が小さくなっている。R1d2 と R125d4 を例に比較すると、 R_{yp} は R125d4 の方が高いのに対し、 R_{ts} は R1d2 の方が高くなる傾向が見られる。形状が強度に及ぼす影響は塑性変形の程度によって異なり、降伏応力の大小関係と最大応力の大小関係が逆転する場合もある。

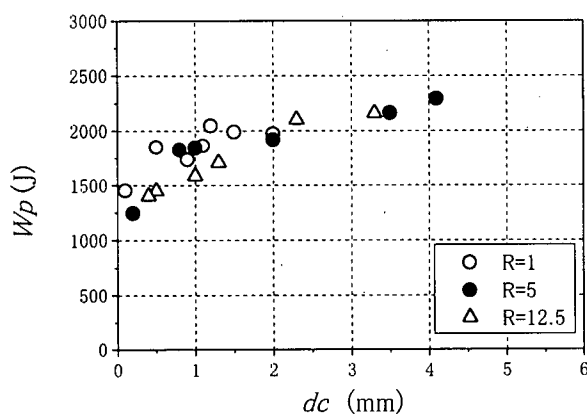
(2) エネルギー吸収能力と亀裂抵抗性の関係

図-10(a) (b)に、試験片が吸収した塑性歪エネルギー W_p と延性亀裂深さ dc の関係を示す。 dc が 0~1.5mm の範囲では W_p が dc に対して比例的に上昇するが、1.5~2.0 mm 以上になると W_p は概ね横ばいとなっている。これは、試験片耐力が劣化し始めると、破壊断面以外の部分は弾

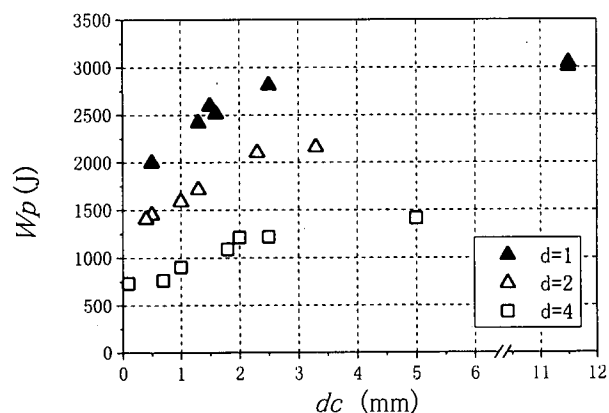
性除荷されるため、破壊断面における亀裂と歪の許容量が高くなっても、試験片全体の変形能力は向上しないことが原因と考えられる。つまり、脆性破壊に起因するエネルギー吸収能力の低下を防ぐためには、全面延性破壊となるよう制御する必要はなく、ある寸法以下の亀裂に対して脆性破壊が発生しなければ十分であると考えられる。本研究の試験片については、 dc が試験片板厚の 1/2 に対して 15%前後に達することができれば、 W_p は飽和すると判断できる。

(3) 温度及び形状が亀裂抵抗性に及ぼす影響

図-11(a) (b)に、延性亀裂深さ dc と試験温度 T の関係を形状毎に示す。いずれの形状においても、 dc は T と共に上昇しており、高温になるほど亀裂抵抗性が高くなっている。又、 R が小さく d が大きいものは dc の値が低くなる傾向があり、温度のみならず形状も亀裂抵抗性に影響を及ぼしていることが確認できる。

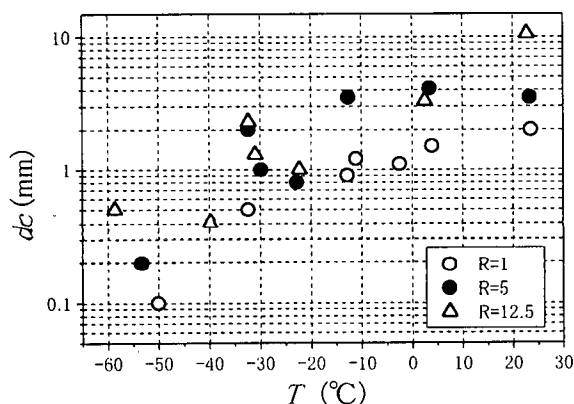


(a) Rシリーズ

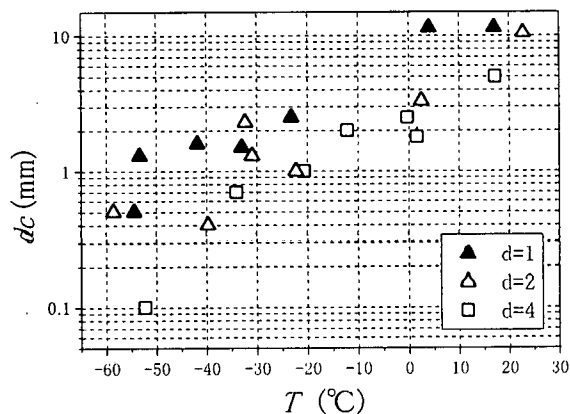


(b) dシリーズ

図-10 吸収された塑性歪エネルギーと延性亀裂深さの関係



(a) Rシリーズ



(b) dシリーズ

図-11 延性亀裂深さと試験温度の関係

ここで、エネルギー吸収能力を低下させないために必要な亀裂抵抗性を確保する、という観点から、 d_c が1.5~2.0 mmに到達できる最低温度としてFTPを定義する。図-11より形状毎にFTPを読み取った結果を表-7にまとめる。Rが小さくdが大きい試験片、つまり断面積を急変させた試験片のFTPが高く、エネルギー吸収能力を低下させないためには高い温度（材料靱性）が要求される。特にR1d2とR5d2との間でFTPの差が大きく、dが小さいものでもFTPが高くなる場合がある。

表-7 各試験片形状のFTP

	R=1mm	R=5mm	R=12.5mm
d=1mm	—	—	-40~-30°C
d=2mm	0~10°C	-30~-20°C	-30~-20°C
d=4mm	—	—	-10~0°C

4. 結論

建築鋼構造物の脆性破壊による被害を防ぐためには、鋼部材が亀裂等の存在に関わらず安定的に歪硬化し、期待されるエネルギー吸収能力を発揮できることが重要である。本研究では、この条件を保証できる最低温度としてFTPを定義し、単調引張試験によって試験片形状がFTPに及ぼす影響について検討した。亀裂抵抗性は試験温度のみならず形状によっても変化することが確認された。サイドグループや切欠きによって断面積を急変させた試験片においてはFTPが高くなり、脆性破壊を防ぐためには高い温度（材料靱性）が要求される。

謝辞：鋼板の製作に当り、大竹章夫氏（住友金属工業）の協力を得た。実験の実施、データ処理に当り、井出匡俊君をはじめとして横浜国立大学学生諸君の協力を得た。

参考文献

- 1) Miller, D. K.: Lessons learned from the Northridge earthquake, *Engineering Structures*, Vol.20, Nos 4-6, pp.246~260, 1998
- 2) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震鉄骨造建築物被害調査報告書，1995.5
- 3) Peillni, W. S., Puzak, P. P.: Practical Considerations in Applying Laboratory Fracture Test Criteria to the Fracture-Safe Design of Pressure Vessels, *Trans. ASME, J. Eng., Power*, pp.429~443, 1964.10
- 4) 高橋康彦, 杉本浩一, 後閑章吉：改良梁端仕口形式を用いた角形鋼管柱-H形梁接合部の静的載荷試験，—その1, 2—, 日本建築学会学術講演梗概集, c-1, pp.359~362, 1998.9