

予ひずみを受けた切欠き材の塑性変形能力に関する2, 3の検討

Studies on Plastic Deformation Capacity of Notched Plates subjected to Tensile Prestrain

林健治*, 森脇良一**, 土屋弘***

Kenji Hayashi, Yoshikazu Moriwaki, Hiromu Tsuchiya

*工博 トピー工業(株) 鉄構事業部 技術開発部 (〒441-8510 愛知県豊橋市明海町1)

**工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

***トピー工業(株) 技術研究所 (〒441-8510 愛知県豊橋市明海町1)

The influences of tensile prestrain and strain-aging on plastic deformation capacity of notched plates were investigated in this paper. Tension tests of notched plates subjected to prestrain and strain-aging using JIS SM490A class steel plates were carried out, and also conventional Charpy impact tests of them conducted. The experimental results in plastic deformation capacity, energy absorption and Charpy absorbed energy showed larger deterioration with an increase in prestrain. The correlations between plastic deformation capacity and energy absorption at each loading step were examined, as a result, an excellent correspondence between both was verified. The predicted plastic deformation capacity almost agreed with the experimental results.

Key Words: prestrain, plastic deformation capacity, energy absorption, notched plate

キーワード: 予ひずみ, 塑性変形能力, エネルギー吸収能, 切欠き材

1. 緒言

兵庫県南部地震における土木鋼構造物の被害の一部に大きな塑性変形を伴った後、局部座屈等により損傷した事例¹⁾が見られたことから、鋼部材の非線形域における変形性能を考慮して耐震設計を実施することが道路橋示方書に規定されたことは記憶に新しい²⁾。

著者らは、引張部材の塑性域における変形性能を明らかにする観点から、切欠き材の延性破壊を対象として、その最大荷重時における塑性変形能力とエネルギー吸収能に着目し、鋼素材の降伏比、応力集中係数³⁾、板幅、板厚⁴⁾及び導入予ひずみ量⁵⁾が異なる引張試験体を製作してその引張試験を実施し、切欠き材の塑性変形能力が、鋼素材の降伏比、応力集中係数、幅厚比及び予ひずみに依存することを明らかにした。また、最大荷重時において塑性変形能力がエネルギー吸収能と一対一対応することを示した。さらに、切欠きを有する鋼素材及び溶接継手の引張試験を実施して、各荷重段階においても塑性変形能力とエネルギー吸収能の間には近似的に線形関係が成立することを示した⁶⁾。

予ひずみの影響⁵⁾については、鋼素材の降伏ひずみを基準に、その5倍から45倍(7.5%)に相当する引張予ひずみを導入した切欠き材を対象として吟味したが、予ひずみ導入後の部材の供用性を評価する上では、ひずみ時効の影響も併せて検討する必要がある。また、冷間曲

げ加工量の許容制限を最適化することにより、鋼構造物の設計・施工の合理化を計る上で有効な手段⁷⁾となることも考えられるので、上述の変形性能の観点から、10%~20%相当の引張予ひずみの影響も同様に検討する必要があるものと考えられる。

各荷重段階の塑性変形能力は、切欠き材が保有する変形性能を表し、破壊の対象は異なるものの、CTODを用いた設計曲線⁸⁾における負荷ひずみ(Overall strain)に相当する。したがって、大きな塑性ひずみを生じた後の鋼部材の延性破壊に対する設計・照査法を確立する上では、最大荷重時における塑性変形能力とエネルギー吸収能の関係を明らかにするばかりでなく、各荷重段階における両者の関係を明らかにすることが肝要である⁶⁾。

本研究では、以上の観点から、切欠きを有する予ひずみ材、時効処理材の引張試験等を実施し、切欠き材の塑性変形能力に及ぼす予ひずみ、ひずみ時効の影響、各荷重段階における切欠き材の塑性変形能力とエネルギー吸収能の対応を明らかにするとともに、塑性変形能力の簡便算定式⁹⁾の妥当性を併せて検証するものである。

2. 供試材と試験方法

2.1 供試材

供試材には板厚19mmのSM490A鋼板(記号:S19)を用いた。その化学成分と機械的性質を表-1に、公称応

表-1 供試材の化学成分と機械的性質

板厚 (mm)	試験片 記号	化学成分 (%)						降伏点 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)	降伏比 YR	全伸び δl (%)	一様伸び ϵ_u (%)	絞り q (%)	エネルギー 吸収能 E_u ^{1), 2)}
		C x100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	Ceq x100							
19	S19	16	35	143	16	9	41	368.6	507.7	0.726	32.7	20.8	65.1	147.5 (0.924)

注: 1) 最大荷重時までの仕事量を降伏点と降伏時伸びの積で除して無次元化したものである。
2) 括弧内の数値は仕事量を引張強度と一様伸びの積で除して無次元化したものである。

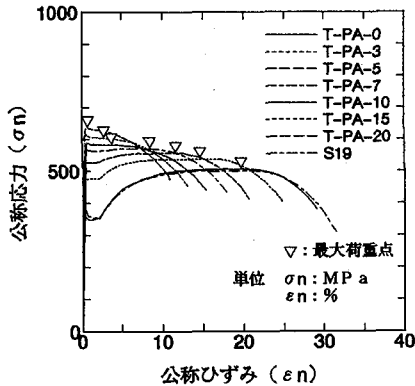


図-1 公称応力-公称ひずみ曲線

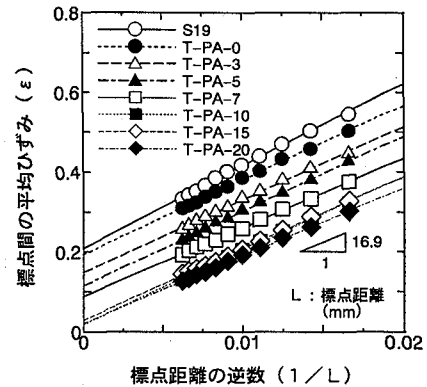


図-2 一様伸びの推定

応力-公称ひずみ曲線を図-1に示す。ここで、引張試験片はJIS14B号を採用し、板幅を40mm、標点距離を160mmとした。同図には、所定の予ひずみを導入した後、時効処理を行った材料(記号:T-PA、数値は導入予ひずみ量%)の引張試験結果も併記しているが、その詳細は後述する。

最大荷重時における鋼素材の変形性能を表す一様伸び ϵ_u は、無限遠標点距離に対応する伸びと定義して算定した。その結果を図-2に示す。ここで、回帰直線と縦軸の交点が一様伸びを与える。同図にはT-PAの算定結果も併記した。

鋼素材のエネルギー吸収能 E_u は、最大荷重時までの仕事量を降伏点と降伏時伸びの積で除し、無次元化した値として取り扱った。なお、引張試験は、200ton 万能試験機を用いて室温で実施したが、計測法は文献3)~6)と同様であるので、ここでは省略する。

2.2 試験方法

予ひずみを受けた切欠き材の変形性能を調べるために、鋼素材に予め冷間引張加工による予ひずみ(3%、5%、7.5%、10%、15%、20%)を導入し、切欠きなどの切削加工を行い、切欠き付き引張試験体(予ひずみ材: 記号PS、数値は導入予ひずみ量%)を製作した。

鋼素材PS-0、5%予ひずみ材PS-5、10%予ひずみ材PS-10、15%予ひずみ材PS-15については、引張予ひずみの導入方向と直交する向きに深さ2mmのVノッチを挿入したシャルピー衝撃試験片を製作し、試験温度-80~+40℃に関して、衝撃値を求めた。採取位置は $t/3$ (t : 板厚)である。その結果を図-3に示す。ここで、各試験片とともに各試験温度で3体ずつ試験を行ったが、ばらつきが大きいものもあったため、近接する2つのデータの平均値を採用した。

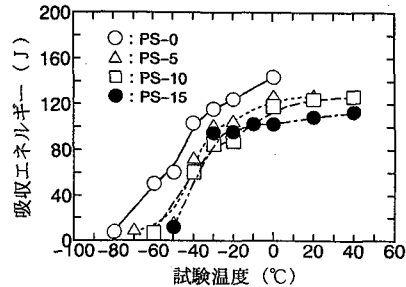


図-3 予ひずみ材のシャルピー衝撃特性

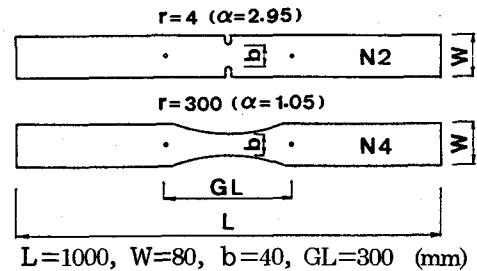


図-4 切欠き付き引張試験体の形状と寸法

引張予ひずみ導入後、一部の試験体には切欠き加工を行う前に、250℃・30分⁹⁾の時効促進処理を施した(時効処理材: 記号PA)。冷間引張加工を行った際の試験体の寸法は、板幅80mm、長さ1000mmであり、標点距離300mmとして予ひずみを導入した。

試験体の寸法と形状を図-4に示す。ここで、切欠き先端の曲率半径 r を4mmと300mmの2段階に変化させ、切欠き底の応力集中係数 α をそれぞれ2.95(記号:N2)と1.05(N4)とした。なお、両側切欠きの α は板幅 W 、リガメント長さ b 、切欠き半長 a および r を用いて次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\alpha = 1 + \{1/(1.55W/b - 1.3) \cdot a/r\}^N \quad (1)$$

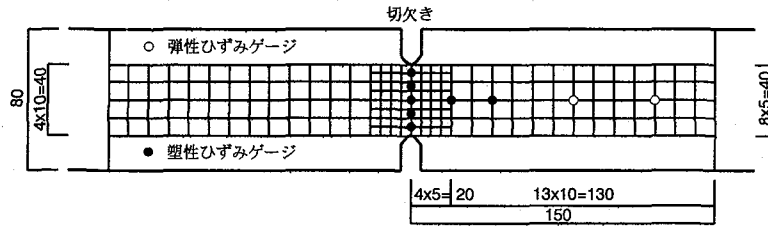


図-5 けがき線の挿入位置とひずみゲージの貼付位置

表-2 切欠きを有する予ひずみ材と時効処理材の引張試験結果

試験体 記号	予ひず み量 (%)	降伏応力 ¹⁾ σ_{ny} (MPa)	引張強度 ¹⁾ σ_{nu} (MPa)	一様伸び ¹⁾ ε_{nu} (%)	全伸び ¹⁾ δ_{nt} (%)	最大荷重時伸び ²⁾ δ^2 (mm)	絞り q (%)	エネルギー 吸収能 E_u (E_u^*) ^{3) 4)}	パラメータ $m^5)$
T-PA-0	0.00	349.3 (0.95)	505.7 (1.00)	19.2	30.7	31.44 (109.72, 0.947)	63.4	138.03 (0.864)	1.258 (0.912)
T-PA-3	2.98	474.7 (1.29)	536.9 (1.06)	14.7	25.6	23.28 (81.23, 0.701)	61.6	113.58 (0.711)	1.398 (1.001)
T-PA-5	5.00	525.8 (1.43)	555.0 (1.09)	11.3	22.8	18.44 (64.35, 0.555)	60.3	94.29 (0.591)	1.465 (1.065)
T-PA-7	7.59	561.8 (1.52)	570.0 (1.12)	8.6	19.2	13.41 (46.80, 0.404)	55.0	70.72 (0.443)	1.511 (1.097)
T-PA-10	10.09	577.2 (1.57)	582.6 (1.15)	1.7	13.1	4.01 (13.99, 0.121)	54.8	20.74 (0.130)	1.482 (1.074)
T-PA-15	15.19	598.2 (1.62)	603.8 (1.19)	2.8	14.3	4.32 (15.06, 0.130)	57.6	23.35 (0.146)	1.550 (1.123)
T-PA-20	19.03	626.3 (1.70)	636.3 (1.25)	2.0	12.5	1.13 (3.93, 0.034)	52.1	5.10 (0.032)	1.298 (0.941)
N4-PS-0	0.00	373.6 (1.01)	521.5 (1.03)	1.6	8.9	15.37 (28.61, 0.247)	59.0	36.66 (0.230)	1.281 (0.931)
N4-PS-3	3.01	453.3 (1.23)	535.0 (1.06)	0.3	7.8	9.58 (17.83, 0.154)	59.7	23.86 (0.149)	1.338 (0.968)
N4-PS-5	4.98	503.9 (1.37)	549.9 (1.08)	0.0	6.8	6.93 (12.89, 0.111)	57.4	17.75 (0.111)	1.377 (1.000)
N4-PS-7	7.60	531.4 (1.44)	555.7 (1.09)	0.2	6.4	5.03 (9.36, 0.081)	59.8	12.97 (0.081)	1.386 (1.000)
N4-PS-10	10.12	567.9 (1.54)	578.8 (1.14)	0.2	5.9	4.26 (7.92, 0.068)	55.3	11.27 (0.071)	1.423 (1.044)
N4-PS-15	15.16	598.3 (1.62)	599.8 (1.18)	0.2	5.3	3.89 (7.23, 0.062)	51.6	10.66 (0.068)	1.474 (1.097)
N4-PS-20	20.29	625.8 (1.70)	625.8 (1.23)	0.0	5.4	2.58 (4.80, 0.041)	51.9	6.89 (0.043)	1.435 (1.049)
N2-PS-0	0.00	464.9 (1.26)	601.2 (1.18)	0.1	3.6	6.89 (12.81, 0.111)	45.1	18.50 (0.116)	1.444 (1.045)
N2-PS-3	2.97	546.5 (1.48)	611.5 (1.20)	0.0	3.3	4.55 (8.47, 0.073)	45.3	12.62 (0.079)	1.490 (1.082)
N2-PS-5	4.95	601.2 (1.63)	637.3 (1.26)	0.1	3.1	3.71 (6.90, 0.059)	46.3	10.72 (0.067)	1.553 (1.136)
N2-PS-7	7.57	631.4 (1.71)	649.1 (1.28)	0.1	2.6	2.91 (5.41, 0.047)	41.8	8.38 (0.052)	1.549 (1.106)
N2-PS-10	10.07	657.8 (1.78)	667.3 (1.31)	0.1	2.4	2.40 (4.46, 0.038)	40.9	6.85 (0.043)	1.536 (1.132)
N2-PS-15	15.01	697.8 (1.89)	700.6 (1.38)	0.1	2.2	2.09 (3.89, 0.034)	36.0	6.24 (0.039)	1.604 (1.147)
N4-PS-20	18.65	728.7 (1.98)	730.2 (1.44)	0.1	2.3	1.46 (2.72, 0.023)	43.4	4.17 (0.026)	1.533 (1.130)
N4-PA-0	0.00	361.8 (0.98)	516.0 (1.02)	1.8	9.2	14.92 (27.76, 0.239)	58.2	34.47 (0.216)	1.242 (0.904)
N4-PA-3	2.99	490.2 (1.33)	548.5 (1.08)	0.3	7.4	7.89 (14.69, 0.127)	61.7	20.25 (0.127)	1.378 (1.000)
N4-PA-5	4.98	536.8 (1.46)	566.1 (1.12)	0.2	5.9	6.10 (11.35, 0.098)	54.9	16.31 (0.102)	1.437 (1.041)
N4-PA-7	7.61	564.3 (1.53)	569.7 (1.12)	0.1	6.2	4.82 (8.96, 0.077)	60.5	12.83 (0.080)	1.432 (1.039)
N4-PA-10	10.06	596.7 (1.62)	598.1 (1.18)	0.0	5.4	3.25 (6.05, 0.052)	55.7	8.81 (0.055)	1.456 (1.058)
N4-PA-15	15.29	630.5 (1.71)	630.5 (1.24)	0.0	5.1	1.38 (2.56, 0.022)	53.1	3.22 (0.020)	1.258 (0.909)
N4-PA-20	19.27	653.1 (1.77)	654.5 (1.29)	0.0	4.9	1.23 (2.28, 0.020)	51.9	2.98 (0.019)	1.307 (0.950)
N2-PA-0	0.00	466.0 (1.26)	595.4 (1.17)	0.0	3.9	6.57 (12.22, 0.105)	45.3	17.42 (0.109)	1.426 (1.038)
N2-PA-3	3.01	575.9 (1.56)	625.2 (1.23)	0.0	2.9	3.65 (6.79, 0.059)	44.2	10.22 (0.064)	1.505 (1.085)
N2-PA-5	5.01	633.2 (1.72)	657.2 (1.29)	0.0	2.5	2.84 (5.29, 0.046)	38.4	8.28 (0.052)	1.565 (1.130)
N2-PA-7	7.63	658.8 (1.79)	669.6 (1.32)	0.0	2.8	2.18 (4.06, 0.035)	44.5	6.26 (0.039)	1.542 (1.114)
N2-PA-10	10.24	694.3 (1.88)	699.7 (1.38)	0.0	2.5	1.69 (3.15, 0.027)	34.1	4.75 (0.030)	1.508 (1.111)
N2-PA-15	15.14	729.9 (1.98)	731.3 (1.44)	0.0	2.1	1.50 (2.78, 0.024)	29.7	4.30 (0.027)	1.547 (1.125)
N2-PA-20	19.23	753.2 (2.04)	754.6 (1.49)	0.0	2.3	1.32 (2.45, 0.021)	42.3	3.75 (0.023)	1.531 (1.095)

注：1)括弧内の数値は、素材の値で除して無次元化したものである。

2)括弧内の数値は、素材（平滑材）の降伏時伸びを一様伸びで除して無次元化した値を示す。

3)最大荷重時までの仕事量を素材の降伏時伸びと降伏点の積で除して無次元化したものである。

4)括弧内の数値は、素材（平滑材）の一様伸び（ δu ）と引張強度の積で除して無次元化した値を示す。

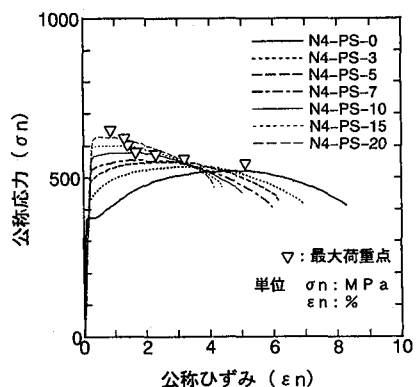
5) E_u と δ/δ_y の関係を表す。また、括弧内の数値は、 E_u^* と $\delta/\delta u$ の線形関係を表す比例定数である。

ここに、

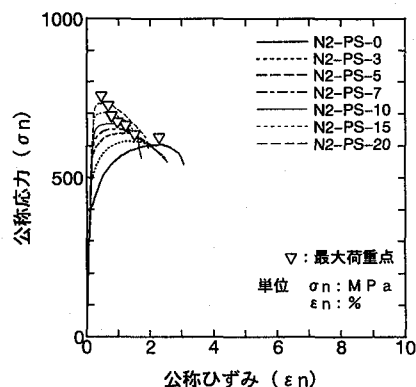
$$N = \{(W/b - 1) + 0.5(a/r)^{1/3}\} / \{(W/b - 1) + (a/r)^{1/3}\} \quad (2)$$

試験体の伸びの測定は、文献 3)～6)と同様に切欠きを挟む 300mm を仮の標点として、高精度の差動トランス型変位計を用いて行った。また、図-5に示すように、けがき線挿入し、破断後のけがき線間距離の変化から切欠き材の見かけ上の一様伸び（一様伸びは鋼素材固有の値であるため、このように呼ぶことにする）を求めた。さらに、○、●印の箇所にそれぞれ弾性及び弾塑性ひずみゲージを貼付して切欠き前縁（線状）及びその直交方向の軸方向ひずみ分布を調べた。

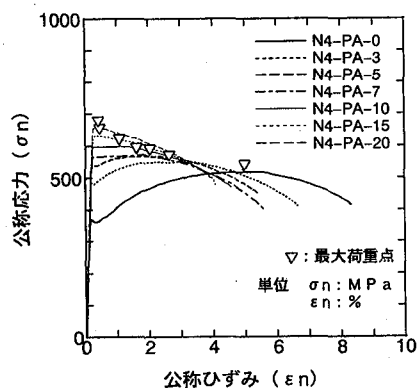
本研究では、切欠き材の各荷重段階における標点間の伸び δ を鋼素材の降伏時の伸び δ_y （素材の降伏ひずみに標点距離 300mm を掛けた値）で除して無次元化した値（ δ/δ_y ）を塑性変形能力と、ネット応力-伸び曲線下の面積（仕事量）を素材の降伏点と δ_y で除して無次元化した値（ E_u ）をエネルギー吸収能として取り扱った。なお、切欠き材の降伏応力は、素材の降伏点のように明確に決定できない場合には、座屈開始荷重を推定する方法として利用されているP- δ 法¹⁾を用いて算定した。また、 δ を鋼素材の一様伸び δu で除して無次元化した値（ $\delta/\delta u$ ）と、同様に仕事量を鋼素材の引張強度と δu で除して無次元化した値（ E_u^* ）も、それぞれ延性を表すパラメータと考えて整理した。



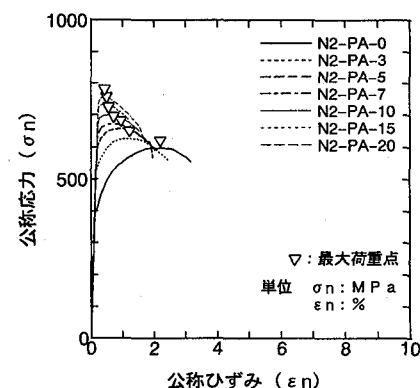
(a) N4-PS



(b) N2-PS

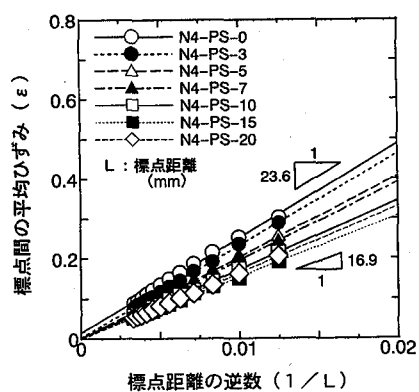


(c) N4-PA

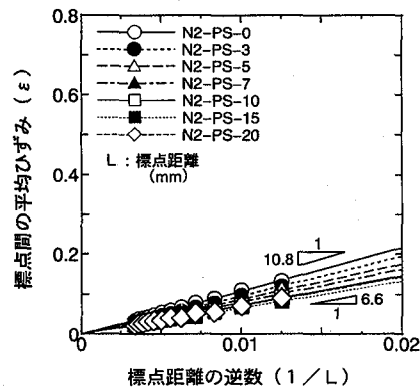


(d) N2-PA

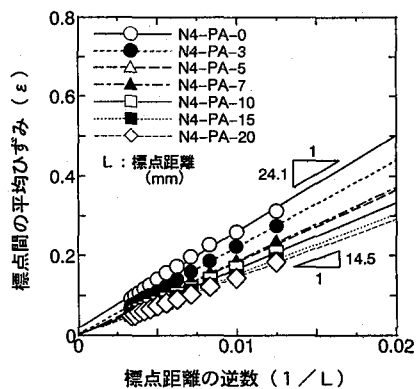
図-6 予ひずみ材と時効処理材の公称応力-公称ひずみ曲線



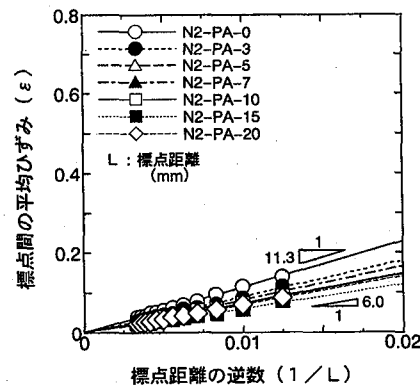
(a) N4-PS



(b) N2-PS



(c) N4-PA



(d) N2-PA

図-7 予ひずみ材と時効処理材の見かけ上の一様伸び

表-3 切欠きを有する予ひずみ材と時効処理材の引張試験結果 (推定原断面積による修正値)

試験体 記号	予ひずみ 量 (%)	加工後の 断面積 (mm ²)	推定原 断面積 ¹⁾ (mm ²)	硬化材料 の降伏点 (MPa) ²⁾	修正降伏応力 σ_{ny} ^{3), 4), 5)} (MPa)	修正引張強度 σ_{nu} ⁶⁾ (MPa)	見かけ上 の降伏比 YR ⁷⁾	変形能力 の推定値 $\delta/\delta y$ ⁸⁾
T-PA-0	0.00	740.09						
T-PA-3	2.98	729.44	751.18	387.04	461.0 (1.25, 1.19)	521.3 (1.03)	0.7623	
T-PA-5	5.00	726.44	762.76	439.25	500.8 (1.36, 1.14)	528.6 (1.04)	0.8652	
T-PA-7	7.59	710.75	764.70	475.32	522.2 (1.42, 1.10)	529.8 (1.04)	0.9362	
T-PA-10	10.09	710.26	781.93	490.40	524.3 (1.42, 1.07)	529.2 (1.04)	0.9659	
T-PA-15	15.19	694.93	800.49	499.03	519.3 (1.41, 1.04)	524.2 (1.03)	0.9829	
T-PA-20	19.03	673.07	801.15	501.55	526.1 (1.43, 1.05)	534.6 (1.05)	0.9879	
N4-PS-0	0.00	743.60						17.966
N4-PS-3	3.01	732.00	754.03	388.02	440.0 (1.19, 1.13)	519.4 (1.02)	0.7643	13.521
N4-PS-5	4.98	723.60	759.64	438.85	480.0 (1.30, 1.09)	524.4 (1.03)	0.8644	6.557
N4-PS-7	7.60	711.60	765.68	475.42	493.8 (1.34, 1.04)	516.5 (1.02)	0.9364	4.005
N4-PS-10	10.12	703.20	774.36	490.51	515.7 (1.40, 1.05)	525.7 (1.04)	0.9661	3.301
N4-PS-15	15.16	690.00	794.60	499.00	519.6 (1.41, 1.04)	522.0 (1.03)	0.9829	2.968
N4-PS-20	20.29	668.80	804.50	500.89	520.4 (1.41, 1.04)	520.4 (1.02)	0.9866	2.901
N2-PS-0	0.00	742.80						7.257
N2-PS-3	2.97	727.20	748.80	386.71	530.7 (1.44, 1.17)	593.8 (1.17)	0.7617	5.662
N2-PS-5	4.95	722.00	757.74	438.25	572.8 (1.55, 1.20)	607.2 (1.20)	0.8632	2.895
N2-PS-7	7.57	708.80	762.46	475.14	587.0 (1.59, 1.19)	603.4 (1.19)	0.9359	1.894
N2-PS-10	10.07	706.80	777.97	490.33	597.6 (1.62, 1.19)	606.3 (1.19)	0.9658	1.620
N2-PS-15	15.01	688.40	791.73	498.86	606.7 (1.65, 1.20)	609.2 (1.20)	0.9826	1.491
N4-PS-20	18.65	672.40	797.80	501.51	614.2 (1.67, 1.21)	615.4 (1.21)	0.9878	1.455
N4-PA-0	0.00	738.40						17.966
N4-PA-3	2.99	728.00	749.76	387.37	476.0 (1.29, 1.05)	532.6 (1.05)	0.7630	13.652
N4-PA-5	4.98	722.40	758.38	438.85	511.3 (1.39, 1.06)	539.3 (1.06)	0.8644	6.557
N4-PA-7	7.61	712.80	767.04	475.51	524.4 (1.42, 1.08)	549.5 (1.08)	0.9366	4.000
N4-PA-10	10.06	704.80	775.70	490.29	542.2 (1.47, 1.07)	543.4 (1.07)	0.9657	3.309
N4-PA-15	15.29	690.00	795.50	499.12	546.9 (1.48, 1.08)	546.9 (1.08)	0.9831	2.965
N4-PA-20	19.27	676.40	806.74	501.53	547.6 (1.49, 1.08)	548.8 (1.08)	0.9878	2.879
N2-PA-0	0.00	745.20						7.275
N2-PA-3	3.01	723.60	745.38	388.02	559.0 (1.52, 1.20)	606.9 (1.20)	0.7643	5.560
N2-PA-5	5.01	723.60	759.85	439.45	603.0 (1.64, 1.23)	625.8 (1.23)	0.8656	2.852
N2-PA-7	7.63	711.60	765.90	475.69	612.1 (1.66, 1.23)	622.1 (1.23)	0.9370	1.883
N2-PA-10	10.24	704.40	776.53	490.93	629.8 (1.71, 1.25)	634.7 (1.25)	0.9670	1.610
N2-PA-15	15.14	687.20	791.24	498.99	633.9 (1.72, 1.25)	635.1 (1.25)	0.9828	1.490
N2-PA-20	19.23	667.20	795.50	501.54	631.7 (1.71, 1.25)	632.9 (1.25)	0.9879	1.454

注：1) 予ひずみの影響を考慮して加工前の原断面積を体積不変則により算定した値である。
2) 鋼素材の公称応力-公称ひずみ曲線から予ひずみ量に相当する応力を最小自乗法を用いて推定した値である。ここで、加工硬化開始ひずみから一様伸びまでの曲線を四次式で近似した。
3) 推定原断面積を用いて切欠き材の降伏応力を算定した。
4) 括弧内の第一番目の数値は、修正降伏応力を鋼素材の降伏点で除した値である。
5) 括弧内の第二番目の数値は、修正降伏応力を硬化材料の降伏点で除した値である。
6) 3)と同様に推定原断面積を用いて切欠き材の引張強度を算定したものである。
7) 上記の硬化材料の降伏点と鋼素材の引張強度を用いて見かけ上のYRを算定したものである。
8) 塑性変形能力 $\delta/\delta y$ の簡便評価式に応力集中係数と7)の降伏比を代入して算定した値である。

$\delta/\delta y$ は、その値が標点距離に依存しない場合、負荷ひずみ ($\varepsilon/\varepsilon_y$: Overall strain) に対応する。き裂の場合では、き裂 (2c) を挟む十分長い標点距離 (L : $L/c \geq 5$) で測定・算出した平均ひずみは負荷ひずみに対応する¹²⁾と考えられているが、切欠きの場合は、き裂のように明確な定義がないので、平均ひずみが鋼素材の公称ひずみと一致するとき、換言すれば、その標点における軸方向のひずみ集中係数が1となると、平均ひずみは負荷ひずみに対応すると考えて差し支えない。

3. 結果と考察

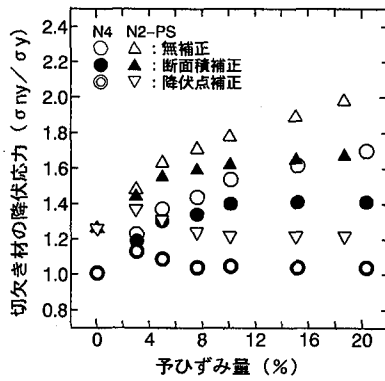
3.1 予ひずみ材と時効処理材の引張試験結果

予ひずみ材と時効処理材の引張試験結果を表-2に示す。ここで、予ひずみ量は、冷間引張加工により実際に導入された値を示し、予ひずみ材の降伏応力 σ_{ny} と引張強度 σ_{nu} は、加工後の断面積を用いてそれぞれ部材の降伏時荷重と最大荷重を最小断面部分 (ネット断面) における公称応力に換算した値を表す。全伸び δ_{nt} と絞り

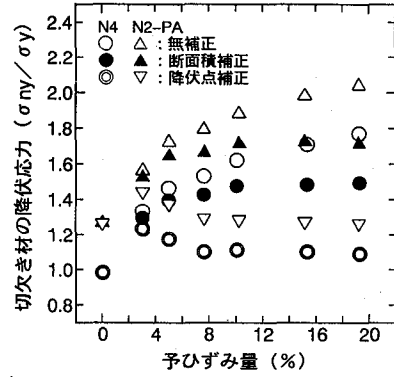
q は、鋼素材の場合と同様にして求め、一様伸び ε_{nu} は無限遠標点距離に対応するひずみとして算定した。

表-2には、最大荷重時の伸び δ を鋼素材 (平滑材) の降伏時伸び δ_y で除して無次元化した $\delta/\delta y$ の他に、鋼素材の一様伸び ε_u で除して無次元化した値 $\delta/\delta u$ も併記した。同様に、ネット応力-伸び曲線下の面積を鋼素材の降伏点と降伏時伸びの積で除して無次元化した E_u と引張強度と一様伸びの積で除して無次元化した値 E_u^* も併記した。ここで、パラメータ m は塑性変形能力とエネルギー吸収能を関連付ける指標であり、後述する。

さらに、表-2には、予ひずみ導入後に時効処理を行った平滑材 (T-PA) の引張試験結果も併記している。その公称応力-公称ひずみ曲線は図-1に示されており、予ひずみの増加とともに、伸びは低下し、強度は見かけ上高くなっている。また、図-2と表-2から明らかのように、予ひずみの増加により、T-PAの見かけ上の一様伸びも減少している。なお、表-2でT-PA-0の降伏応力の無次元量が1ではなく、0.95となっているのは、データのばらつきの影響と考えられる (図-1では、降

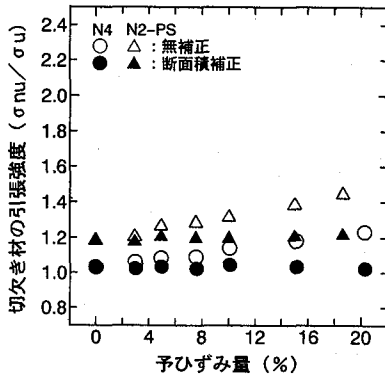


(a) PS 試験体

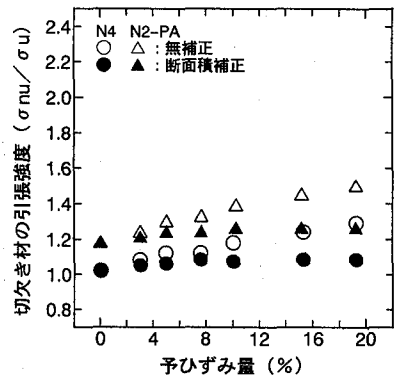


(b) PA 試験体

図-8 塑性拘束係数に及ぼす予ひずみの影響



(a) PS 試験体



(b) PA 試験体

図-9 強度上昇率に及ぼす予ひずみの影響

降伏応力の近傍を除いてT-PA-0と鋼素材のS-19が良好に一致していることから、このように推察される)。

予ひずみ材と時効処理材の公称応力-公称ひずみ曲線を図-6に示す。同図より明らかなように、予ひずみ量が増加すると、変形能力は低下し、強度は高くなっている。応力集中の高いN2では、その傾向が著しい。予ひずみ材と時効処理材の見かけ上の一様伸びの推定結果を図-7に示す。予ひずみ量が0のN4タイプの試験体を除いて、切欠き材では、一様な伸びを期待できない。

表-2と図-6、7から明らかなように、本研究の範囲内では、変形性能や強度に及ぼす時効処理の影響は非常に小さく、無視して差し支えないものと判断される。

3.2 切欠き材の強度と塑性拘束

予ひずみの導入により、切欠き材の降伏応力は増大するが、同一材料であるから、塑性変形の進行に伴う切欠き材の加工硬化特性はほぼ同一と考えて差し支えないので、予ひずみ導入後も塑性拘束係数や強度上昇率は変化しないものと推察される⁵⁾。表-2の塑性拘束係数や強度上昇率(それぞれ降伏応力と引張強度の括弧内の数値)と予ひずみの関係を整理したものが図-8、9である。

N2、N4試験体、何れの場合も、加工後の断面積を用いて整理した結果(無補正)では、上記の推定が妥当でない結果となっている。これは、予ひずみを受けた切欠

き材の強度特性を調べる場合、予ひずみ導入前の断面積によりデータを整理すべきであり、また、予ひずみ材の降伏点は導入後の硬化材料の降伏点を用いるべきである。

そこで、硬化材料の降伏点を表-3の注2)のようにして求め、予ひずみ導入前の原断面積を以下のようにして算定し、塑性拘束係数や強度上昇率を再整理した。

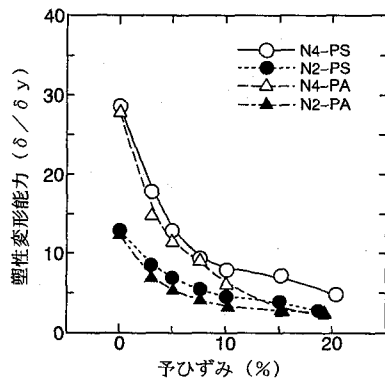
いま、原断面積を A_0 、標点距離を L_0 、加工後の断面積と標点距離を A 、 L とする。弾性変形を無視すると、体積不変則より $A_0 \cdot L_0 = A \cdot L$ となる。また、導入予ひずみ量を ε_{pre} とすると、 $L = L_0 \cdot (1 + \varepsilon_{pre})$ なる関係が成立するから、これを上式に代入して整理すると、次式を得る⁵⁾。

$$A_0 = A \cdot (1 + \varepsilon_{pre}) \quad (3)$$

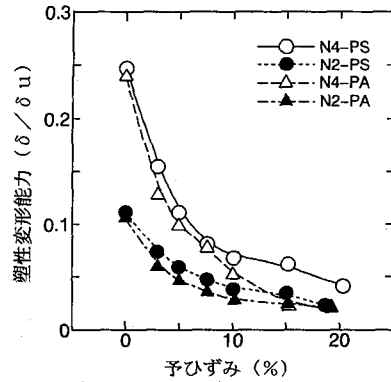
以上により、塑性拘束係数や強度上昇率を再整理した結果を表-3に示す。その結果を図-8、9にも併記した。当然のことではあるが、断面積補正により、強度上昇率は予ひずみや時効処理の影響を受けにくいことが確認された。また、塑性拘束係数は、さらに降伏点補正により、同様に予ひずみの影響を受けにくいことが確認された。

3.3 変形性能に及ぼす予ひずみの影響

予ひずみ材と時効処理材の最大荷重時における塑性変

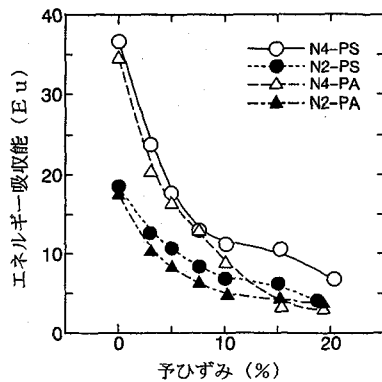


(a) δ/δ_y

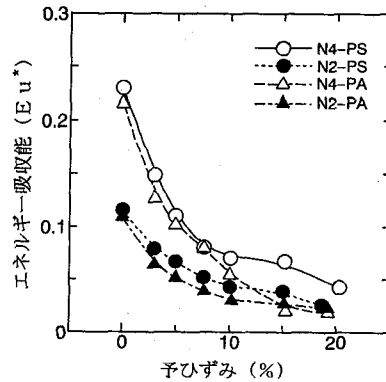


(b) δ/δ_u

図-10 塑性変形能力に及ぼす予ひずみの影響



(a) Eu



(b) Eu*

図-11 エネルギー吸収能に及ぼす予ひずみの影響

形能力 (δ/δ_y と δ/δ_u) とエネルギー吸収能 (Eu と Eu*) に及ぼす予ひずみの影響を調べたものが図-10 と図-11 である。予ひずみと時効処理の影響は、全てのパラメータでほぼ類似しており、良好な対応が認められる。

応力集中係数が小さい N4 タイプでは、予ひずみ量が 10%までは δ/δ_y 、 δ/δ_u 、Eu と Eu* は大きく低下するが、それ以降、鈍化の傾向が認められる。N2 タイプは、N4 タイプと比較してそれぞれの値は小さいものの、ほぼ同様の傾向が認められる。時効処理の影響は、顕著ではないが、全ての場合に確認されており、特に、N4 タイプにおいて、予ひずみ量が 10%を越えると、比較的大きく低下している。

つぎに、平滑材 (T-PA) の δ/δ_y に及ぼす予ひずみの影響を表-2から整理し、図-10 (a) の結果と合わせたものが図-12 である。同図には、0℃におけるシャルピー吸収エネルギー (図-3参照) の値も参考として併記した。平滑材でも、切欠き材と同様の傾向を示し、 δ/δ_y は予ひずみの増加とともに急激に低下し、予ひずみが 10%を越えると、低下量が小さくなる傾向が認められた。

なお、参考までに、シャルピー吸収エネルギーも予ひずみの増加とともにその値は減少するが、時効の影響については小さいようである。

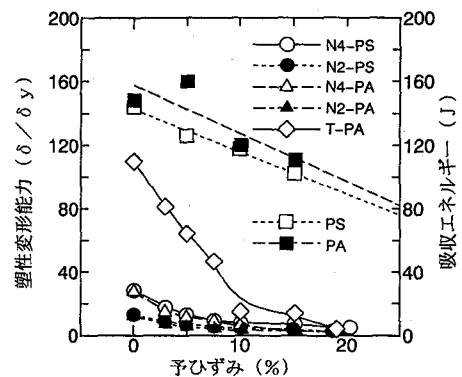
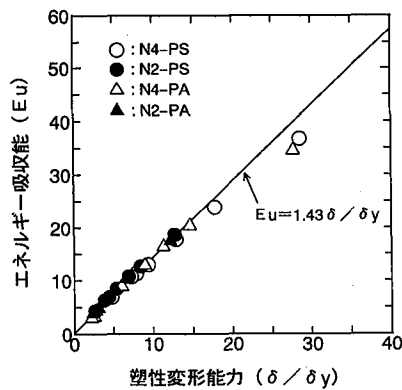


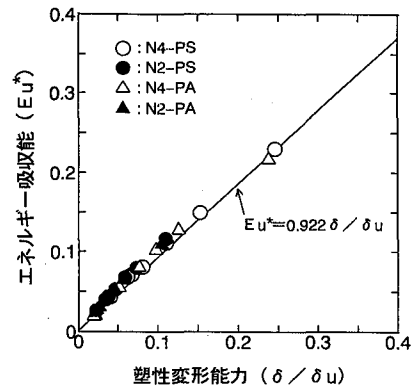
図-12 塑性変形能力に及ぼす予ひずみの影響

3.4 塑性変形能力とエネルギー吸収能の関係

図-13 は、予ひずみ材と時効処理材の最大荷重時における塑性変形能力 (δ/δ_y と δ/δ_u) とエネルギー吸収能 (Eu と Eu*) の関係を調べたものである。文献 3)では板厚 9mm の SM400A、SM570、HT780 材について δ/δ_y と Eu が一対一対応すること、文献 4)では板厚 9、19、36mm の SM490A 材について同様の関係が成立し、 δ/δ_u と Eu*の間にも線形関係が成り立つこと、文献 5)では板厚 19mm の SM490A 材に関して降伏ひずみの 5 倍~45 倍の予ひずみを導入した試験体についても、 δ/δ_y と Eu、 δ/δ_u と Eu*には線形関係

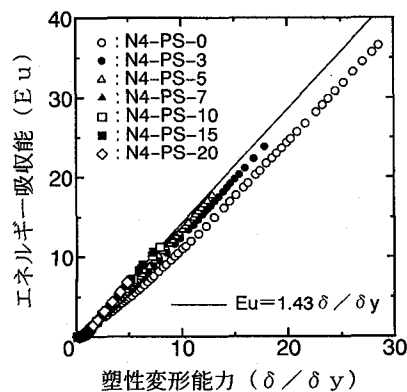


(a) $E_u - \delta / \delta y$

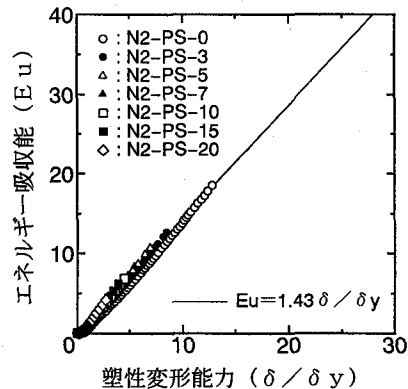


(b) $E_{u^*} - \delta / \delta u$

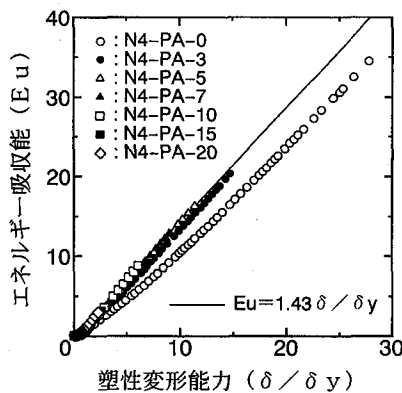
図-13 最大荷重時における塑性変形能力とエネルギー吸収能の対応



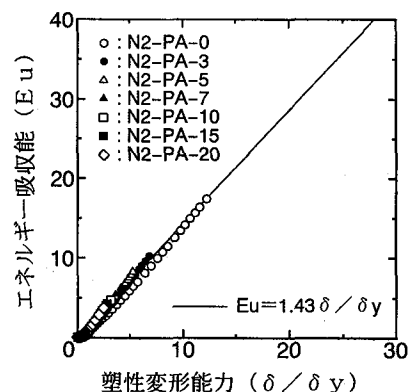
(a) N4-PS



(b) N2-PS



(c) N4-PA



(d) N2-PA

図-14 各荷重段階における塑性変形能力とエネルギー吸収能の対応

が成立することが明らかにされており、図-13 はこれらを肯定するものである。したがって、最大荷重時における塑性変形能力とエネルギー吸収能のこの関係は、本研究で取り扱っている引張部材の一つの特徴であると言えることができる。

一般に、材料が n 乗硬化則に従い、切欠きが十分に深く、塑性変形がリガメント部に限定される切欠き材では、 E_u と $\delta / \delta y$ は、一対一対応し、次式が近似的に成立する^{3)~6)}。

$$E_u = m \cdot (\delta / \delta y) \quad (4)$$

ここに、

$$m \equiv \frac{1}{1+n} \cdot \frac{\sigma / \sigma_u}{YR} \quad (5)$$

ここに、 σ は各荷重段階におけるネット応力、 σ_u は鋼素材の引張強度、 YR は降伏比を表す。

係数 m は、上式から明らかなように鋼素材の機械的性質に依存する値であるが、同一材料であれば、塑性変形が進行するにつれて、一定の値となることが予想される。文献3)~6)では $m \approx 1.43$ となり、ほぼ一定の値を示した。式(4)を用いて最大荷重時におけるパラメータ m の値を求めた結果を表-2に示す。 $m = 1.242 \sim 1.604$ とばら

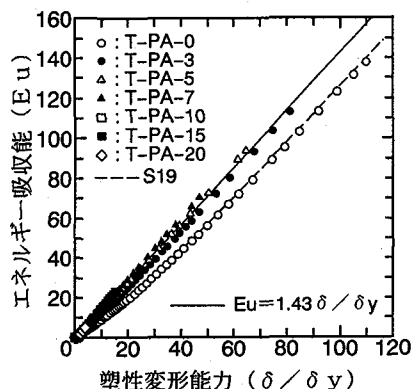


図-15 平滑材のEuと $\delta/\delta y$ の対応

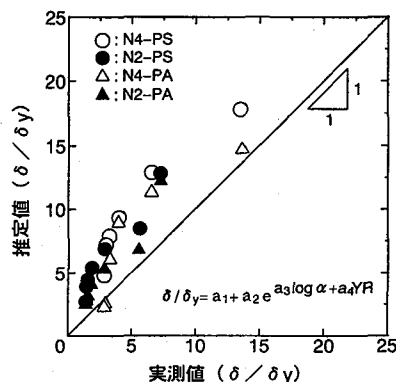


図-16 塑性変形能力の推定値と実測値の対応

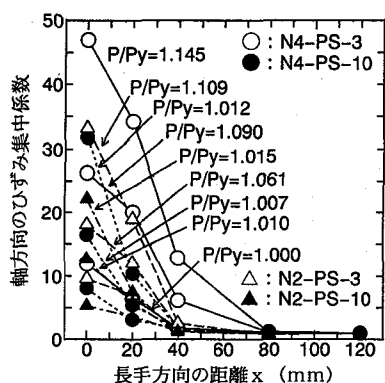


図-17 各荷重段階における軸方向ひずみの分布

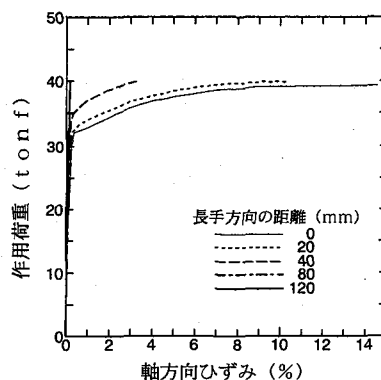


図-18 作用荷重と軸方向ひずみの関係

つきが比較的小さく、上式が成立するものと考えて差し支えない。

ところで、式(4)は塑性変形が十分に進行した場合に成立するものであるから、各荷重段階においても、同様な結果が得られるものと推察される。図-14は、予ひずみ材(PS)と時効処理材(PA)について、各荷重段階の $\delta/\delta y$ とEuの関係を調べたものであり、予ひずみが0の場合を除き、線形関係がほぼ成立している。また、予ひずみが0の場合でも、変形が十分大きくなると、その勾配が式(4)のmに漸近している。

つぎに、切欠き材ではなく、引張試験片のような平滑材について、式(4)が成立するか否かを調べたものが図-15であり、時効処理材(T-PA)について整理した。予ひずみが0(熱処理のみ)の場合と鋼素材では、図-14の場合と同様に式(4)のmとは一部対応しない箇所が認められるが、式(4)をほぼ満足する。

以上より、本研究の範囲内では、最大荷重時のみならず、各荷重段階においても、エネルギー吸収能Euと塑性変形能力 $\delta/\delta y$ は良好に対応する。

3.5 塑性変形能力の推定

著者らは、文献3)において塑性変形能力 $\delta/\delta y$ が応力集中係数 α と降伏比YRに依存することを明らかにし、非線形最小自乗法を用いて実験データを整理した結果から、 α とYRにより $\delta/\delta y$ を次式で概算できることを示した。

$$\delta/\delta y = a_1 + a_2 \cdot \exp(a_3 \log \alpha + a_4 \cdot YR) \quad (6)$$

ここに $a_1 \sim a_4$ は実験定数であり、それぞれ $a_1=0.560$ 、 $a_2=4873$ 、 $a_3=-0.922$ 、 $a_4=-7.699$ である。

式(6)を用いて $\delta/\delta y$ を算定する場合、応力集中係数 α とともに予ひずみ材の降伏比YRが必要となる。表-3のYRと式(2)から求められた α を式(6)に代入して、 $\delta/\delta y$ の推定値を求め、この値と実測値をN2、N4タイプの試験体について比較したものが図-16である。推定値は実測値よりも大きな値を与えるが、傾向はほぼ対応したものとなっている(例えば、N4-PSの実測値が18.0の場合、推定値は28.6であり、誤差が59%となっている)。したがって、本研究の範囲内では、予ひずみ材の塑性変形能力の概算値を与える実験式として、式(6)を用いても差し支えないものと判断される。

3.6 塑性変形能力と負荷ひずみ

図-5の切欠き線上中央から長手方向に貼付したひずみゲージの値を各荷重段階において整理した結果を図-17に示す。切欠きのタイプ、予ひずみ材及び時効処理材とは無関係に、何れの場合も距離xが80mm(標点距離が160mm)以上では、ひずみはほぼ一定の値を示す。また、xが80mm以上では、各荷重段階におけるひずみ集中係数も1となっている(別途整理した結果)。したがって、x=150mmにおける塑性変形能力 $\delta/\delta y$ は、試験体全体を代表し得る平均ひずみと見なすことができ

る。なお、図-18 は、作用荷重と軸方向ひずみの関係を示したものであり、長手方向の距離が80mm 以上の場合、各荷重段階で均一なひずみを与え、同様に平均ひずみと見なすことができる。

以上より、本試験で用いた標点距離間の平均ひずみ(塑性変形能力)は、負荷ひずみ(Overall strain)と対応し、工学上の設計ひずみとして取り扱うことができる¹²⁾。

4. 結言

本研究では、板厚 19mm の SM490A 材を対象とし、予ひずみ材及び時効処理材より製作された切欠き付き引張試験体を用いて引張試験を実施し、切欠き材の塑性変形能力に及ぼす予ひずみ、時効処理の影響を検討し、最大荷重時及び各荷重段階における塑性変形能力とエネルギー吸収能の関係を調べるとともに、塑性変形能力の推定を試みた。その結果を要約すると、次のとおりである。

- 1) 予ひずみの導入により、切欠き材の変形性能は低下し、強度は増大する。
- 2) 当然のことではあるが、予ひずみ材の強度は真応力で評価する必要がある。
- 3) 予ひずみの増加に伴い塑性変形能力 δ/δ_y は大きく低下する。エネルギー吸収能 E_u も類似の傾向を示す。但し、本試験の範囲内では、時効処理の影響は顕著でない。
- 4) 本実験の範囲内では、荷重レベル、応力集中、予ひずみ量、時効処理の有無とは無関係に、 δ/δ_y と E_u の間には線形関係が成立する。
- 5) 平滑材の δ/δ_y と E_u の間にも線形関係が成立し、荷重レベルや予ひずみ量の影響を受けない。何れの場合も、両者は対応し、引張部材の一つの特徴であると言える。
- 6) 著者らの推定式により、応力集中係数、降伏比及び予ひずみ量が既知であれば、 δ/δ_y の概算値を得ることができる。
- 7) 本研究で定義した塑性変形能力は、負荷ひずみに対応し、工学上の設計ひずみとして取り扱うことができる。
- 8) 本研究の結果から、塑性変形能力 δ/δ_y とエネルギー吸収能 E_u の相互関係が明らかとなり、引張部材の限界状態設計を行う上で一つの有益な知見が得られたものと考えられる。

本研究では、引張の予ひずみを対象として取り扱ったが、地震により繰返し導入される塑性ひずみの影響を考えた場合、圧縮の予ひずみの影響を検討する必要があるものと考えられる。今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 例えば、阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告(土木構造物の被害原因の分析)、土木学会、pp.135-150、1997
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、丸善、pp.1-12、1996
- 3) 森脇、林：切欠き材の塑性変形能力について、鋼構造論文集、Vol.2、No.8、pp.1-12、1995
- 4) 林、森脇：切欠き材の変形能力に及ぼす板厚・板幅の影響、JSSC 鋼構造年次論文報告集、Vol.5、pp.465-472、1997
- 5) 林、森脇：切欠き材の変形能力に及ぼす予ひずみの影響、JSSC 鋼構造年次論文報告集、Vol.6、pp.25-32、1998
- 6) 林、森脇：切欠き材の塑性変形能力とエネルギー吸収能の相互関係、JSSC 鋼構造年次論文報告集、Vol.7、pp.343-350、1999
- 7) 福岡、川尻、香川、近藤、杉村：滝下橋の工場製作・現場施工、橋梁と基礎、Vol.32、No.6、pp.17-23、1998
- 8) 吉成仁志：欠陥評価規格 WES2805 の改訂版について、溶接学会誌、Vol.67、No.7、pp.18-22、1998
- 9) 西川、木村、飯田ほか：橋梁用鋼材の冷間曲げ加工と要求じん性に関する検討、橋梁と基礎、Vol.30、No.11、pp.31-36、1996
- 10) 西田正孝：応力集中、森北出版、pp.558-560、1967
- 11) 森脇、林、後藤：溶接組立梁の局部座屈と塑性変形能力について、構造工学論文集、Vol.38A、pp.243-252、1992
- 12) F.M.Burdekin, D.E.W.Stone : The Crack Opening Displacement Approach to Fracture Mechanics in Yielding Materials, Journal of Strain Analysis, Vol.1, No.2, pp.145-153, 1966

(1999 年 9 月 17 日 受付)