

構造的な応力集中を受ける接合部の耐力について

東京大学工学部

奥村 敏恵

同

堀川 浩甫

○

同

大学院 星 塾 正明

1 序

近年、建造物の長大化高層化に伴い、従来から使用されてきた軟鋼よりも降伏点抗張力の大きい、いわゆる高降伏点高張力鋼が各種開発されている。このような材料を建造物に安全かつ有効に使用するには更に検討されるべき点は多い。筆者の研究室でも、建造物の破壊までの挙動に関係する降伏比および伸び能力など、材料の降伏後の特性に着目した一連の研究を行なっている¹⁾。一オ溶接建造物において重要な構造部分である柱梁接合部の耐力が応力集中などの影響によりかなり低下することがあるということが報告されている^{2),3)}。そこでここではこのような接合部の問題を取り上げて、その性状を検討すると共に、このような建造物で材料の降伏後の特性と建造物の破壊との関係を考察し、材料の構造部材としての性質を明らかにしようとした。

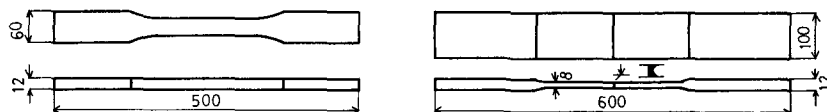
2. 実験

2.1 材料試験

接合部試験体の試験に先立ち、材料の機械的性質をみるために材料試験を行なった。使用鋼材は80キロ級高張力鋼HT80、および40キロ級軟鋼SM41の2種類であった。材料試験として行なったのは、素材の引張試験、溶接継手引張試験、シャルピー衝撃値試験の3種類であった。図2-1に試験片の形状及び寸法を示す。試験は原則として同一のものについて3本行なった。結果を表2-1に示す。また素材の引張試験から得られた応力-歪曲線の代表例を図2-2に示す。これらの結果から明らかのように、HT80はSM41に比べ降伏応力の増加の割には破断応力が増加しない、すなわち歪硬化の度合いが小さい、また一様伸びがはるかに小さいなどという性質を有する。

2.2 接合部引張試験

試験体の形状及び寸法を図2-3に示す。これは柱梁接合部を模型化した



シャルピー衝撃値 試験 16℃ kgm/cm ²	
HT 80	14.9
SM 41	7.2

図 2-1 材料試験片

	素材引張試験							溶接継手引張試験	
	降伏応力 kg/mm ²	破断応力 kg/mm ²	降伏比 %	全伸び %	一様伸び %	局部伸び %	絞り率 %	降伏応力 kg/mm ²	破断応力 kg/mm ²
HT 80	75.7	83.9	90.2	13.3	7.4	5.9	48.1	—	87.4
SM 41	28.5	47.7	59.7	27.0	19.9	7.1	56.5	29.9	49.7

表 2-1 材料引張試験結果

ものであって、H型の柱に梁フランジに相当する板を溶接したものである。溶接の余盛りは板厚と同じ面になるように仕上げ、初期変形の影響もないように努めた。このような試験体をHT80とSM41の両方について、柱フランジ板厚 t_c を6mm、8mm、10mmに変化させ製作した。試験体は一種類につき3体づつであった。試験は梁フランジにはうれたストレインゲージを測定しながら破壊まで行なった。

2.3 実験結果

実験結果をまとめて表2-2に示す。ここで継手効率とは破断荷重と梁フランジの板強度との比である。梁フランジの板強度は、素材の引張試験から得られた破断応力に梁フランジ断面積をかけることによって得られる。破断状況はHT80の一部に生じた脆性破壊を除いてほぼ同一であった。その進行過程は梁フランジ、柱フランジ、柱ウェブの合一点での裂開に始まる梁フランジと柱フランジの接合線及び柱フランジと柱ウェブの接合線に沿うものであった(図2-4)。破断の進行は大変ゆっくりとしたもので、荷重を調節することにより制御することができた。一方脆性破壊したものは、一瞬に破断が生じたものもあり、破面はきらきらした脆性破面をしていた。

実験結果を分かり易いものにするためにプロットしたものが図2-5である。図の横軸には、柱フランジ板厚 t_c を、縦軸には接合部の継手効率をとってある。この図から延性破壊したものについては次のこと

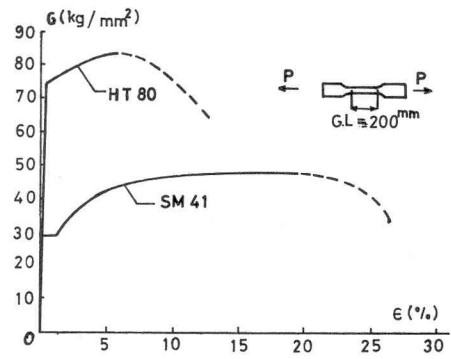


図 2-2 材料の応力-歪曲線

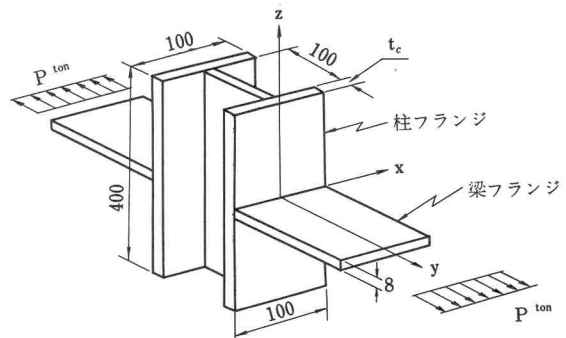


図 2-3 試験体の形状及寸法

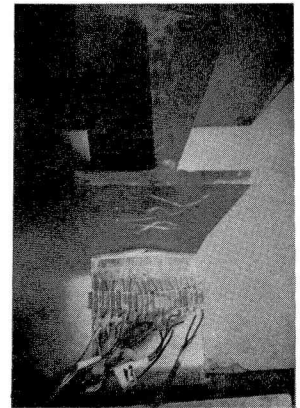


図 2-4 破断状況

表 2-2 破断強度

t_c		6mm			8mm			10mm		
HT 80	破断荷重 P_{ton}	32.8	34.5	36.0	33.5*	45.7	46.7	45.4*	55.7	50.0*
	継手効率 %	48.9	51.4	53.6	49.9	68.2	69.6	67.6	83.0	74.5
SM 41	破断荷重 P_{ton}	17.5	17.3	18.0	25.0	24.8	23.5	34.1	30.5	30.0
	継手効率 %	45.9	45.9	47.2	65.5	65.0	61.5	89.3	79.9	78.6

* 脆性破壊したもの

が認められる：i) 形状による継手効率の違いは顕著で柱フランジ板厚 t_c が大きい程継手効率は高くなっている、ii) 鋼種による継手効率の違いについては僅かながら HT80 の方が高くなっているという程度である。脆性破壊したものは一般に延性破壊したものに比べ低い継手効率を有している。

3. 理論解析

実験結果の詳しい検討及び考察のため⁴⁾に、有限要素法による弾塑性解析を行なった。

3.1 解析上の仮定

解析するにあたって設けた仮定は次の通りである：

- ① 梁フランジは接合部より十分離れた断面で面内等分布荷重を受ける板 (Scheibe) と考える。
- ② 柱フランジについては、柱ウェブで固定された片持無限平板と考え (Pillatten)、更に接合部での変位に対してできるだけ等価となるような片持梁で置き換える。このような置き換えは片持無限平板についての Jaramillo の弾性解と片持梁についての弾性解とを比較することにより⁵⁾達せられた。その結果片持梁の仮想的な巾を柱フランジの巾と同じ大きさにとった。結局このような取り扱いをすることにより、①の仮定と共に、柱梁接合部の解析は平面応力問題として進めることができるわけである。
- ③ 降伏条件には von Mises の条件を使う。二次元の場合の von Mises の条件は

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} = \sigma_y$$

$\bar{\sigma}$: 相当応力 σ_y : 降伏応力

である。

- ④ 応力と歪の関係は弾性域では Hook の式により、塑性域では Reuss の式により表わされるものとする。

Reuss の式による応力増分と歪増分の関係式は^{6),7)}以下の通りである：

$$\begin{pmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{1}{Q} \begin{pmatrix} H' + t^2 G + ES_y^2 & \nu(t^2 G + H') - ES_x S_y & -Gt(S_x + \nu S_y) \\ \text{SYM.} & H' + t^2 G + ES_x^2 & -Gt(\nu S_x + S_y) \\ \text{SYM.} & \text{SYM.} & \frac{1-\nu^2}{E} H' G + G(S_x^2 + 2\nu S_x S_y + S_y^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \epsilon_x \\ \Delta \epsilon_y \\ \Delta \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

$$S_x = \frac{3\sigma'_x}{2\sigma'_y} \quad S_y = \frac{3\sigma'_y}{2\sigma'_x} \quad t = 3 \frac{\tau_{xy}}{\sigma'_y} \quad H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\epsilon_p}$$

$$Q = S_x^2 + S_y^2 + 2\nu S_x S_y + \frac{1-\nu^2}{E} (H' + t^2 G)$$

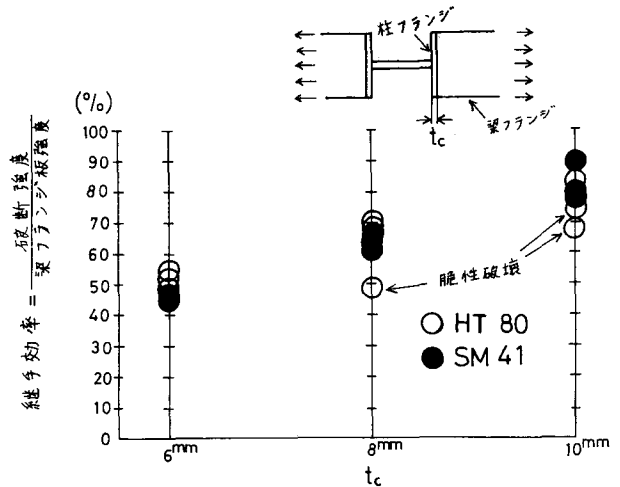


図 2-5 破断強度と鋼種・形状の関係

以上①②③④の仮定を設けて柱梁接合部の解析を行なった。

3.2 計算手順

有限要素法による弾塑性解析の手順は次の通りである；

- ① 単位荷重に対し弾性計算を行ない、一番最初に降伏する要素及びそのときの荷重 P_0 を求めておく
- ② 荷重 P_0 に対して弾性計算を行なう
- ③ 降伏した要素に対して力-歪関係式を塑性用に書き換える
- ④ 荷重増分 ΔP に対して計算を行ない応力増分 $\Delta\sigma$ 、歪増分 $\Delta\epsilon$ を求め前段階での応力及び歪に加える
- ⑤ 新たに降伏した要素をみつける
- ⑥ 知りたい要素の応力、歪などを打ち出させる
- ⑦ ③④⑤⑥を繰り返す行なう

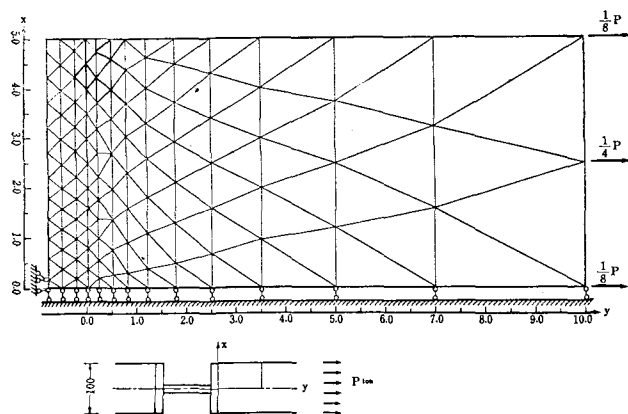


図 3-1 計算モデル

以上のような荷重漸増法を用いている。使用計算機は東京大学大型計算機センター HITAC 5020 である。

3.3 計算モデル

柱フランジ、梁フランジを図 3-1 に示すように要素に分割して解析を行なった。支持条件及び荷重条件も図中に示した。分布荷重は集中荷重で置き換えた。対称性を考慮して解析は梁フランジの半分に対して行なった。

素材の引張試験から得られた力-歪曲線の歪硬化部分については $\sigma = k\epsilon^n$ の如く理想化して計算に用いた。

4. 考察

4.1 実験結果と計算結果との比較

解析結果を考察に用いる前に実験結果と計算結果とを比較しよう。

SM41 の柱フランジ板厚 t_c が 6 mm のものと及び HT80 の t_c が 10 mm のものを例にとりあげて実験結果と計算結果とを比較する。そのために図 4-1、4-2 を描いた。図の縦軸には荷重 P を横軸には荷重方向の歪 ϵ_y をとっている。実験と理論との比較が目的ではないので誤差についての議論は省略した。また実験結果と計算結果とは割と良く一致しているということを述べるに留めておく。

4.2 破壊と材料の伸び能力との関係について

図 4-1、4-2 にはまた梁フランジで一番大きな歪が生じている接合部中央での歪もプロットされている。HT80、 $t_c = 10$ mm の場合、破壊が一様伸びで規定されたとすると計算では破壊強度が 50^{ton} 位にな

る。延性破壊したものについては実験では 55.7ton になっている。SM41, $t_c=6\text{mm}$ の場合には、計算は破壊まで追えていないが、他の場合について考え合えると、延性破壊したものについては、一様伸びでないにしても、とに角伸びで破壊が規定されるとしても大きな違いはないと考えられる。

しかし、図 4-1, 4-2 から分るように、いまの場合、最大歪についての $P-\epsilon_y$ 曲線(図で ①)は歪が 2~3% 位からかなり平らになってきている。このことは歪が増加しても、荷重がほとんど増加しないことを意味しており、これ以上の歪の大小は破断強度に大きな影響は与えないということと言える。

4.3 歪分布と鋼種形状などとの関係について

柱フランジとの接合線上での梁フランジの歪分布の変化をみるために図 4-3(a), 4-4(a), 4-5(a) を描いた。図の縦軸には梁フランジの Y 方向平均歪で無次元化した値をとった。これらの図から分るように、歪の中央への集中は、荷重が大きくなる程、即ち降伏が進むに従って、増々激しくなる。形状による歪分布の違いとしては、柱フランジ板厚を大きくする程広がった分布となり中央への集中は緩かになる。鋼種の違いによる歪分布の違いは、これは歪分布が形状にかなり支配されること、SM41 には歪硬化の始まる前に塑性流れがあること、及び接合部では横方向(X方向)の拘束があるためだと考えられる。

4.4 応力分布と鋼種形状などとの関係について

接合線上での応力分布の変化をみるために図 4-3b, 4-4b, 4-5b を描いた。図の縦軸には梁フランジの Y 方向平均応力 σ_y で無次元化した値をとっている。歪分布の場合とは逆に、降伏が進むにつれて、応力の集中度は緩和されていくゆえに、応力の再分布が行なわれている。形状による変化は歪分布の場合と同じである。次に鋼種による応力分布の違いについては、HT80 では応力の再分布が段々進行しそのまま平らな形になるが、一方 SM41 では最初のうちはやはり中央の山が平らになり、行く行く、ある程度進めると再び中央に山が生じ、これがまた横に分布していくというような過程をとる。この中央に山が再び生

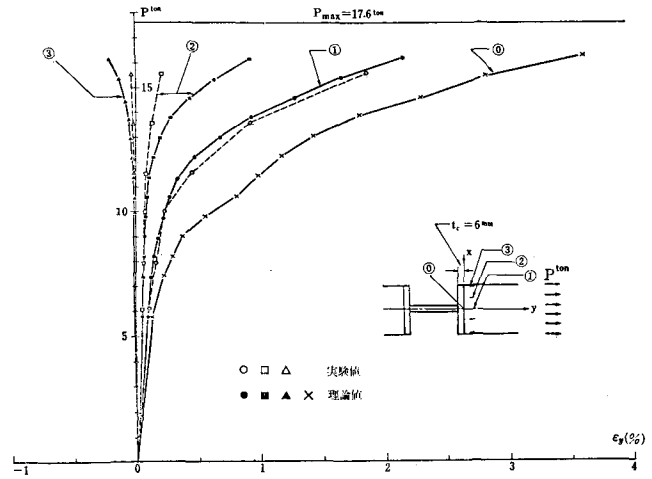


図 4-1 荷重-歪曲線(SM41, $t_c=6\text{mm}$)

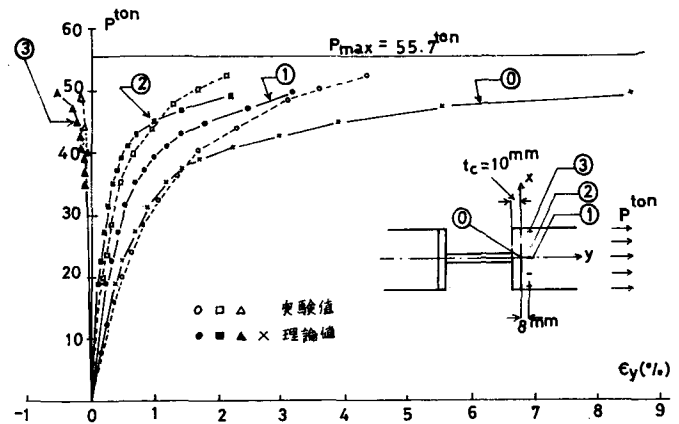


図 4-2 荷重-歪曲線(HT 80, $t_c=10\text{mm}$)

いる時期は材料に歪硬化が生じ始める時期と一致している。このために SM41 では HT80 のようには、うまく応力の再分布が行われまいと考えられる。従って歪硬化の大きいことは応力の再分布に対して不利な要素となる。このことは歪硬化の大きい場合の極限として、弾性を考えれば理解し易い。

4.5 降伏域の拡がりについて

伸び能力が小さいということは、破断までの降伏域の拡がりを小さくする。また降伏応力、従って降伏歪が大きいということは、降伏域が拡がるのにより大きな伸びを必要とする。従って HT80 の破断までの降伏域の拡がり、SM41 に比べかなり小さなものとなる。

4.6 接合部での二軸性について

柱フランジと梁フランジの接合部では y 方向の応力の他に x 方向の応力も存在する。 z 方向の応力も当然存在するであろうが、これを無視する。接合部中央では主応力は σ_x と σ_y に一致する。この σ_x と σ_y がどのような関係を保ちながら、降伏後動いて行くかを示したのが図4-6である。図4-6は柱フランジ板厚 t_c が 10mm のものについて描いてある。HT80の場合降伏は、 σ_x が僅かに圧縮応力になっていところで起り、降伏が進むにつれて σ_x は引張応力に転じ、それと共に σ_y は増加する。一方 SM41の場合降伏はやはり同じ位置で起り、最初のうち σ_x はやはり引張り側へ動いて行くが、ある程度行くとまた圧

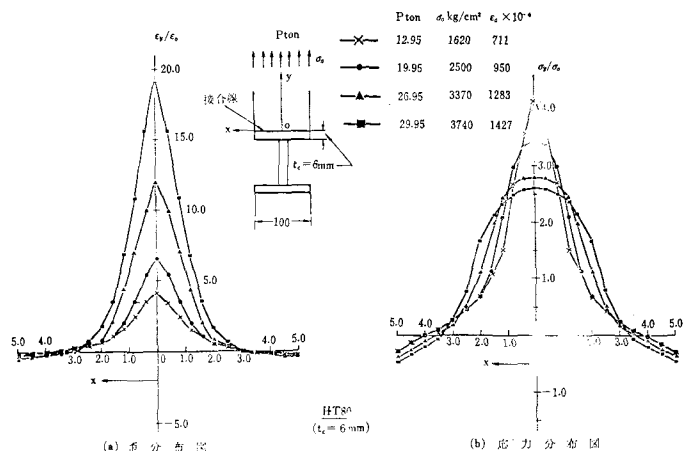


図 4-3 接合線上の歪、応力分布図

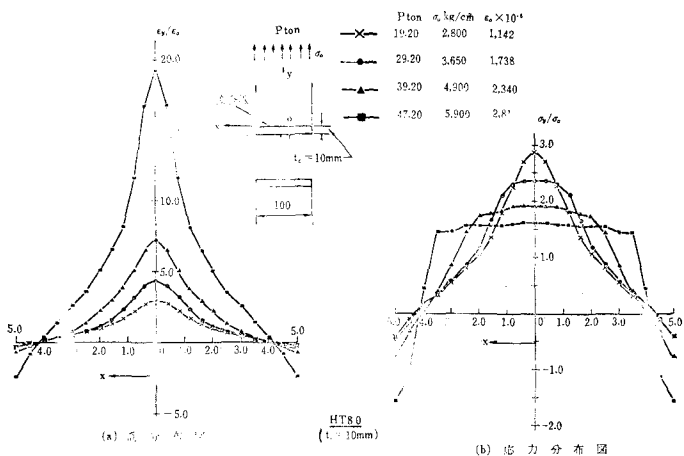


図 4-4 接合線上の歪、応力分布図

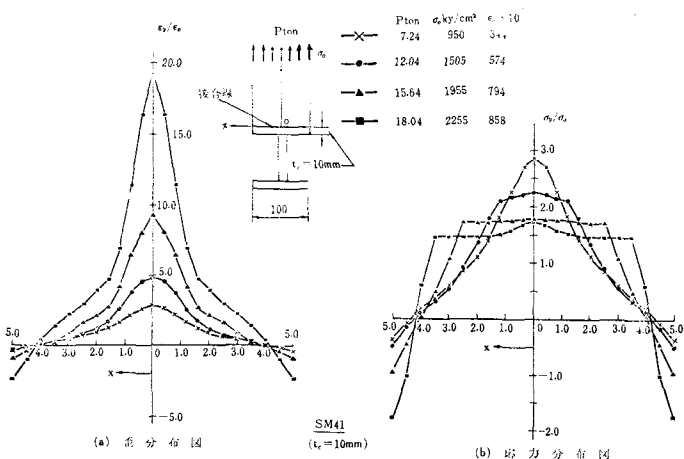


図 4-5 接合線上の歪、応力分布図

よとは延性破壊したもののついでであるが、HT80の一部には脆性破壊も生じていた。脆性破壊したものは延性破壊したもののより低い耐力を有していた。また計算結果からHT80の方が歪硬化の小さいために二軸性が強くなり、脆性破壊の危険性をもつということが得られた。

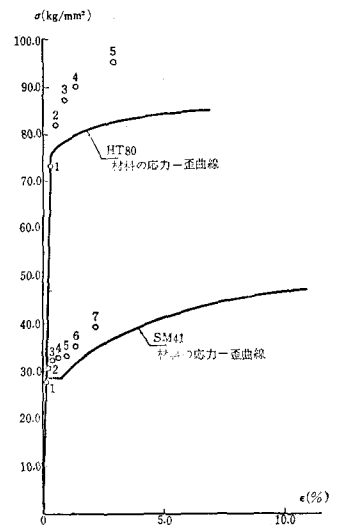


図 4-7 接合部中央 ($\begin{smallmatrix} x=0 \\ y=0 \end{smallmatrix}$) での y 方向応力 σ_y と歪 ϵ_y ($t_s=10\text{ mm}$)

参 考 文 献

- 1) 堀川浩市: 高張力鋼の構造部材としての力学的特性に関する研究
学位論文 東京大学工学部土木工学科 1967
- 2) 三木三省, 大庭 浩: 鉄骨構造の強度に関する研究
川崎重工業技術資料 1964
- 3) 仲 威雄, 斎藤 光: 全溶接鉄骨構造の強度に関する研究
日本建築学会論文報告集 第60号 1958
- 4) O.C. ZIENKIEWICZ, Y.K. CHEUNG: The Finite Element Method in Structural and
Continuum Mechanics, McGRAW-HILL 1967
- 5) T.J. JARAMIRO: Deflections and Moments due to a Concentrated Load on
Cantilever Plate of Infinite Length, Journal of Applied Mechanics Vol.17 1950
- 6) 山田嘉昭: 塑性力学 日刊工業新聞社 1965
- 7) 吉村信敏, 桜井達美, 山田嘉昭: マトリックス法による弾塑性解析について
日本鋼構造協会構造解析委員会資料 1967