

橋梁製作に用いられた鋼材の機械的性質に関する調査研究

鈴木 博 之*

Research on Mechanical Properties of Structural Steels

Hiroyuki SUZUKI

In this study, yield point, tensile strength, elongation, a kind of coupon test, charpy absorbed energy, yield ratio, plate thickness and so on of about 2,500 structural steels are inputted in a personal computer and the data are analyzed statistically. Dependence of yield point, tensile strength, elongation and yield ratio on plate thickness, and relation between yield point and tensile strength are discussed on the basis of the analytical results.

1. はじめに

構造物の耐荷力、変形能は、当然のことながら、その構造物に使用されている材料の強度、変形能に依存する。したがって、構造物の安全度を把握するためには、その構造物に使用されている材料の機械的性質を的確に知る必要がある。

溶接構造用圧延鋼材の機械的性質について、日本工業規格（JIS）においては、降伏点は下限だけが規定されており、その下限を鋼材の厚さの増加に伴い低減させている。一方、引張強さは上限と下限が設けられているが、その値を鋼材の厚さによって変化させていない。また、伸びは鋼材の厚さごとに異なる下限が与えられている¹⁾。

最近では変厚鋼板の使用も始まっており、この点からも鋼材の機械的性質と板厚の関係を調べておく必要がある²⁾。

鋼材の機械的性質に関して、JSSC Vol. 5, No. 38 (1969) に鋼材のミルシート記載値（M値）とチェックテスト値（C値）との対応関係、あるいは相関関係に重点をおいて、昭和42年1月以降1年間に鋼材の使用者側でチェックテストされた鋼材の機械的性質の調査結果が報告されている³⁾。また、この続報がJSSC Vol. 5, No. 48 (1969) に報告されている⁴⁾。この続報においては、機械的性質のばらつきに関する資料を得ることを目的として、各鋼種ごと

* 建設工学科 土木工学専攻

に機械的性質のばらつきを中心に検討し直されている。福本は板厚と鋼種の影響を含んだ降伏点と引張強さの変動係数，ならびにSM490の降伏点と板厚の関係の調査結果を示している⁶⁾。また，青木らは昭和53年から56年までのミルシートを収集し，鋼材の機械的性質の分布性状を検討している⁶⁾。しかしながら，最近の構造用鋼材の様々な鋼種について機械的性質を調査した報告は筆者の知る限り見当たらない。また，長期にわたって構造用鋼材の機械的性質を調査した報告も見当たらない。

本稿では，実橋に使用された溶接構造用圧延鋼材（SM400～SM570）の引張試験および衝撃試験結果を約20年分収集し，降伏点，引張強さ，伸び，降伏比，シャルピー吸収エネルギーなどについて調査，分析した結果について報告する。

2. 分析方法

今回収集したデータは，橋梁製作工場で1970年から1992年までに行われた静的引張試験および衝撃試験の結果であり，データ数は約2,500である。分析手順を以下に示す。

（1）まず，収集したデータをデータベースに登録した。登録したデータの内容は次に示す12項目である。

- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1) 鋼材の種類 | 2) 製造メーカー名 |
| 3) 原板の板幅 (mm) | 4) 原板の長さ (mm) |
| 5) 原板の板厚 (mm) | 6) 引張試験片の種類 |
| 7) 降伏点 (N/mm ²) | 8) 引張強さ (N/mm ²) |
| 9) 伸び (%) | 10) シャルピー吸収エネルギー (J) |
| 11) 降伏比 | |

1) は試験に供された鋼材の種類の見出しである。なお，本報告では溶接構造用圧延鋼材（SM400～SM570）を対象とした。一般構造用圧延鋼材，溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材，高張力鋼材については別の機会に報告したい。7)，8)，9) は静的引張試験より得られたデータであり，7)，8) において，kgf/mm²で表示されていたものはN/mm²に変換して登録した。10) はシャルピー衝撃試験により得られたデータであり，kgf・mで表示されていたものはJに変換して登録した。11) は7) を8) で割った値である。

（2）これらのデータを鋼材の種類ごと（SM400，SM490，SM490Y，SM520，SM570）に分類し，さらに原板の板厚ごとに分類した。また，降伏点，引張強さ，伸びの値をJISの規格値と比較した。この際，板厚ごとのデータ数が1個あるいは2個しかない場合あるいは特異なデータが認められた場合には，ミルシートと照合し，入力洩れ，入力ミス等の人為的ミスがあるかどうかの確認を行った。人為的ミスがなく，データ数が1個あるいは2個しかない場合には，その板厚における一般性を反映出来ないで，このデータを分析には使用しないことにした。

（3）原板の板厚毎に降伏点，引張強さ，伸び，降伏比およびシャルピー吸収エネルギーの最大値，平均値，最小値を求めた。

3. 分析結果および考察

3. 1 降伏点と板厚の関係

降伏点と板厚の関係を図1～5に示す。これらの図には板厚毎にそれぞれの最大値、平均値、最小値および平均値から最小二乗法で求めた一次回帰線とJISの規格値を示した。図3、4には参考までにテーパプレート²⁾のデータもプロットした。図1、2、4および5において、降伏点は板厚の増加に伴い減少の傾向を示しており、SM400、SM490、SM520、SM570の降伏点には板厚依存性が存在することがわかる。SM490Yにおいては、図3に示すように一次回帰線に板厚の増加に伴う変動が認められないので板厚依存性は存在しないように判断されるかもしれないが、これはSM490Yのデータが6mm～32mmの範囲に集中しているためであると考えられる。また、図3にはJISの規格値を若干下回るデータがあるが、これは旧JISにおける重力単位(kgf/mm²)を新JIS用のSI単位(N/mm²)に換算したためである。

JISには降伏点の上限が定められておらず、図1～5には極めて高い降伏点(図1では380N/mm²、図2では390N/mm²、図3、4では520N/mm²、図5では700N/mm²)を示している鋼材がある。これは板厚の薄いものだけに限られたことではなく、50mmを超えるものにも認められる。一般に、このように降伏点が高いと降伏比が大きくなり(これについては後述する)、降伏比が大きくなると一様伸びが減少し、一様伸びが減少すると鋼材の粘りが低下するとされているので、降伏点が高すぎるのは変形性能の点からは好ましくない。

3. 2 引張強さと板厚および降伏点の関係

引張強さと板厚の関係を図6～10に示す。JISには引張強さに対して上限と下限が与えられている。JISを制定あるいは改正するときには、必要に応じて実状の鋼材の機械的性質について調査し、その結果を規格に反映させたはずである。また、一旦規格が制定されると、今度はその規格を満たすように製品は造られる。したがって、図6～10には規格下限値ぎりぎりのものがいくつかあるが、当然のことながらJISの引張強さの範囲内に収まっている。

つぎに、図11に引張強さと降伏点の関係を示す。図にはSM400～SM570のすべての鋼種が含まれている。図中の

$$\sigma_u = 0.671 \times \sigma_y + 273.9 \quad \text{----- (1)}$$

は全データの一次回帰線である。SM400は式(1)の回帰線より若干低いようであるが、全体的には引張強さと降伏点には線形関係があるものと判断される。

3. 3 伸びと板厚の関係

伸びと板厚の関係を図12～16に示す。なお、伸びの規格値は引張試験片の種類毎に規定されているので、図には示していない。これらの図より、伸びは板厚が厚くなるにしたがって、増加の傾向を示していることがわかる。

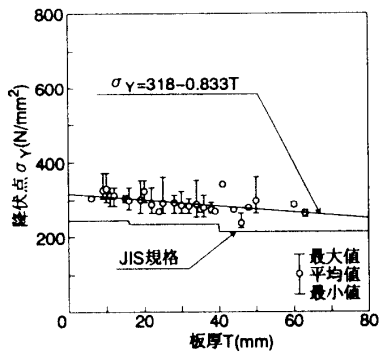


図1 降伏点と板厚の関係(SM400)

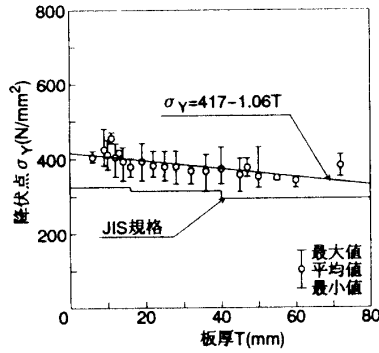


図2 降伏点と板厚の関係(SM490)

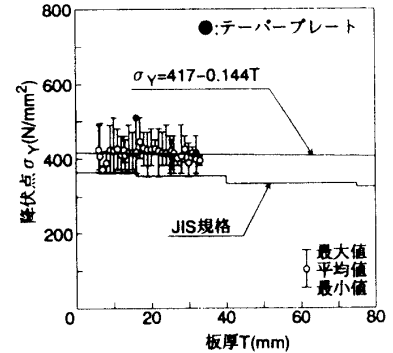


図3 降伏点と板厚の関係(SM490Y)

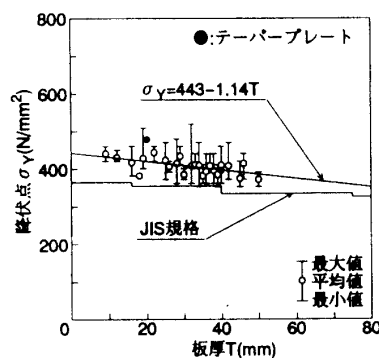


図4 降伏点と板厚の関係(SM520)

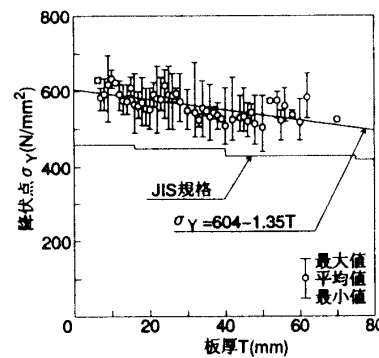


図5 降伏点と板厚の関係(SM570)

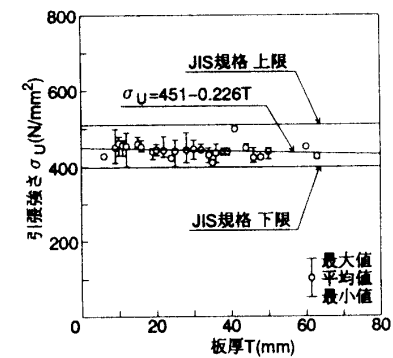


図6 引張強さと板厚の関係(SM400)

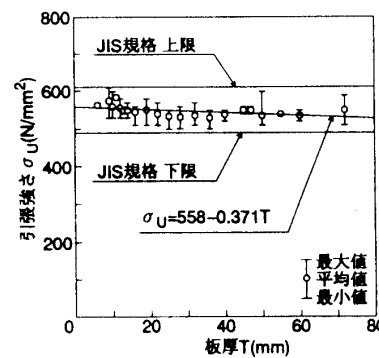


図7 引張強さと板厚の関係(SM490)

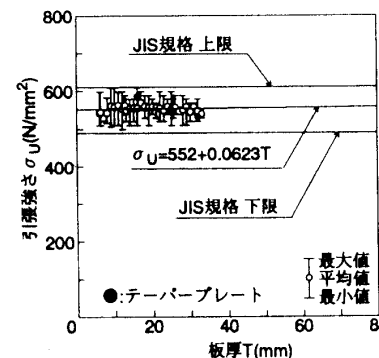


図8 引張強さと板厚の関係(SM490Y)

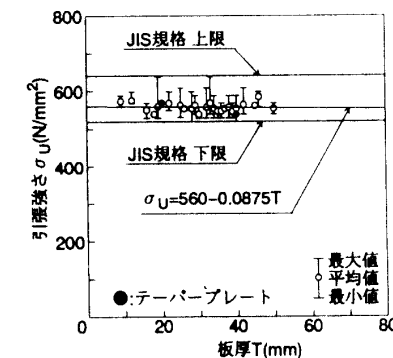


図9 引張強さと板厚の関係(SM520)

ところで、SM570の伸びは図16に示すように板厚20mmを境に大きく異なる分布を示していた。このため、一次回帰線を2本とした。このような分布を示した原因はJISの引張試験片の違いによるものと考えられたので、SM570の伸びのデータを引張試験片の種類毎に分類した。結果を図17に示す。図には板厚毎の伸びの平均値と一次回帰線だけを示した。

$$\varepsilon = 21.0 + 0.783T \quad \text{-----} \quad (2)$$

はJIS 5号試験片、

$$\varepsilon = 25.0 + 0.0751T \quad \text{-----} \quad (3)$$

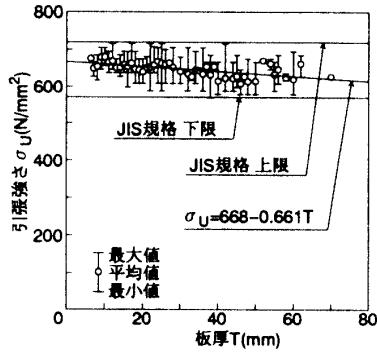


図10 引張強さと板厚の関係(SM570)

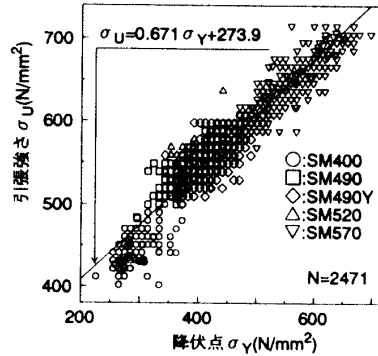


図11 引張強さと降伏点の関係

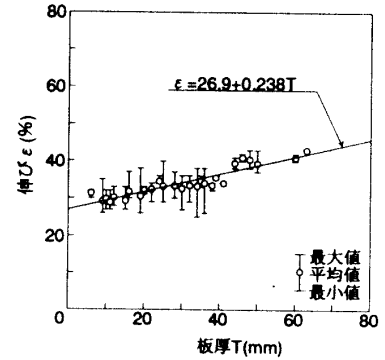


図12 伸びと板厚の関係(SM400)

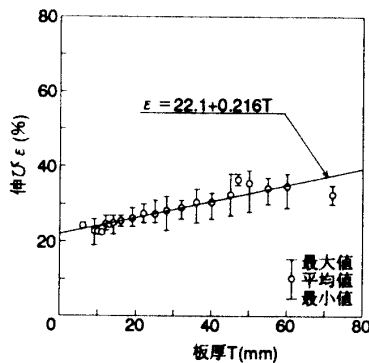


図13 伸びと板厚の関係(SM490)

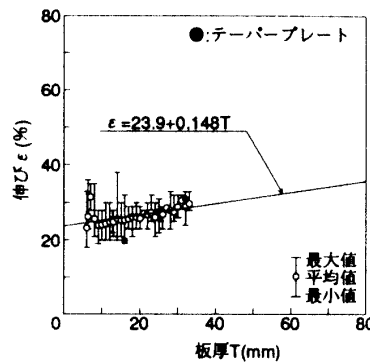


図14 伸びと板厚の関係(SM490Y)

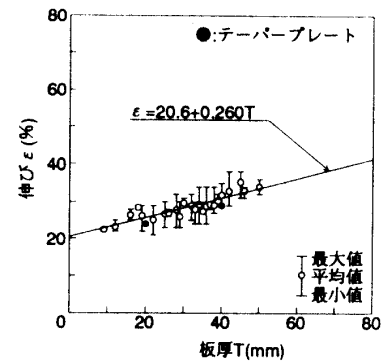


図15 伸びと板厚の関係(SM520)

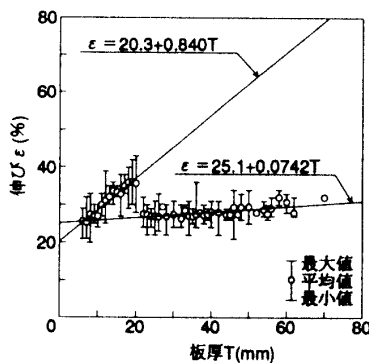


図16 伸びと板厚の関係(SM570)

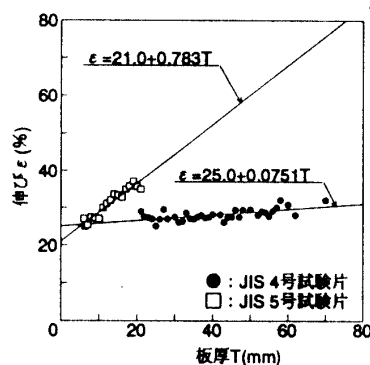


図17 伸びと板厚の関係(SM570)

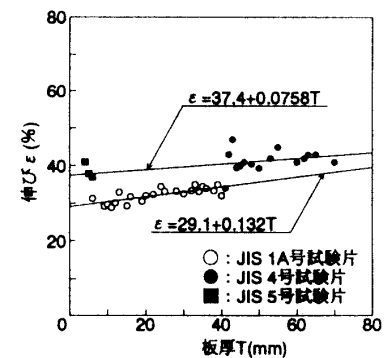


図18 伸びと板厚の関係(SM400)

は J I S 4 号試験片の一次回帰線である。この図から、伸びのデータが2つのグループに分かれる原因は引張試験片の種類の違いによることが明らかである。また、引張試験片の種類毎に伸びに板厚依存性が存在することがわかる。特に、J I S 5 号試験片において板厚依存性が顕著である。J I S 4 号試験片は直径 1 4 mm で断面積一定の試験片であるにもかかわらず、図 1 7 においては、板厚が増加するにつれて、わずかながら伸びが増加する傾向が認められ、これが試験片形状に左右されない伸びの板厚依存性を表している。

このように、SM570の伸びは試験片の種類によって大きく異なることが明らかになったので、

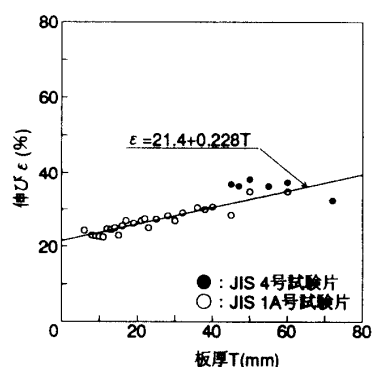


図19 伸びと板厚の関係(SM490)

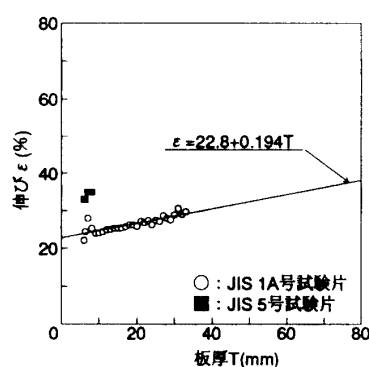


図20 伸びと板厚の関係(SM490Y)

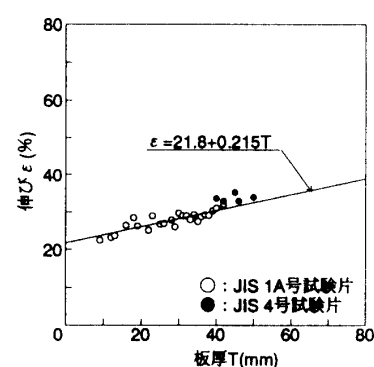


図21 伸びと板厚の関係(SM520)

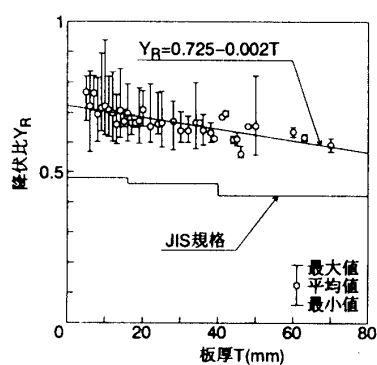


図22 降伏比と板厚の関係(SM400)

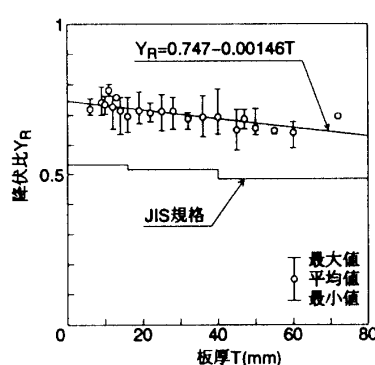


図23 降伏比と板厚の関係(SM490)

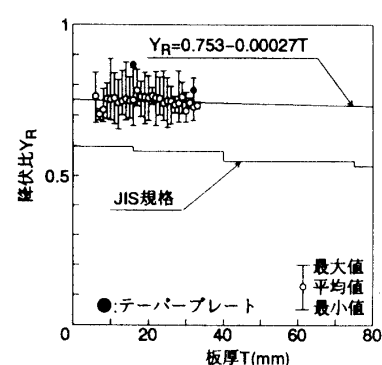


図24 降伏比と板厚の関係(SM490Y)

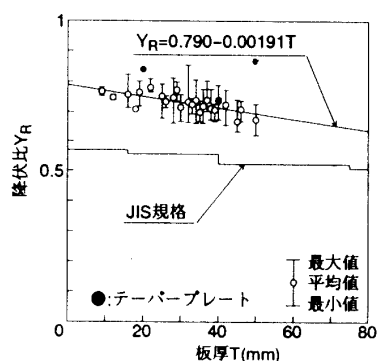


図25 降伏比と板厚の関係(SM520)

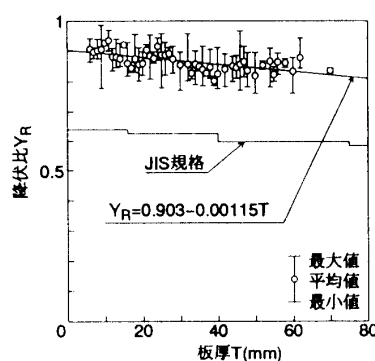


図26 降伏比と板厚の関係(SM570)

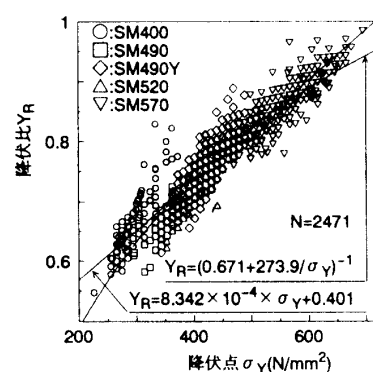


図27 降伏比と降伏点の関係

他の鋼種の伸びについても再度分析した。結果を図18～21に示す。図18より、SM400にも試験片による差異があることがわかる。なお、図中の

$$\varepsilon = 37.4 + 0.0758T$$

----- (4)

はJIS 4号試験片,

$$\varepsilon = 29.1 + 0.132T$$

----- (5)

はJIS 1A号試験片の一次回帰線を示しており、JIS 5号試験片についてはデータが少数であったため一次回帰線は示していない。残りの鋼種 (SM490, SM490Y, SM520) の引張試験片の

多くは J I S 1 A 号試験片であったため、図 19～21 においては、試験片による差異が SM570 の場合ほど明瞭ではない。これらの図中の一次回帰線は J I S 1 A 号試験片に関するものである。

以上より、伸びには引張試験片の違いを除いても板厚依存性が存在することがわかる。

3. 4 降伏点、引張強さに及ぼす試験片形状の影響

試験片の種類によって伸びに著しい違いが認められたので、降伏点ならびに引張強さについても試験片の種類ごとに分析し直したが、降伏点ならびに引張強さに試験片形状の違いによる差異はなかった。

3. 5 降伏比と板厚および降伏点の関係

降伏比と板厚の関係を図 22～26 に示す。図中の階段状の線は、J I S の降伏点の規格値を引張強さの規格上限値で割ったもので、降伏比の下限を示している。これらの図より、板厚が厚くなると降伏比が低下すること、ならびに実状の鋼材の降伏比は規格下限値を大きく超えていることがわかる。

降伏点と板厚の関係のところでも述べたように、降伏比が大きくなると鋼材の変形能が低下するので、降伏比の大きい鋼材で構成された構造物は地震などの過大な荷重で損傷や破壊を起こす可能性が高くなる。したがって、本報告における実状の鋼材の調査範囲から判断すると、J I S には定められていないが、鋼材の降伏比の上限を定める必要があるように思われる。

つぎに、降伏比と降伏点の関係を図 27 に示す。この図より、降伏点が高くなると降伏比が大きくなることが良くわかる。さらに、図 1～5 において降伏点の高かった鋼材は降伏比も大きいことがこの図から明らかである。図中の直線

$$Y R = 8.342 \times 10^{-4} \times \sigma_Y + 0.401 \quad \text{----- (6)}$$

は SM400～SM570 までの全データの一次回帰線である。また、曲線

$$Y R = \frac{1}{0.671 + 273.9 / \sigma_Y} \quad \text{----- (7)}$$

は、図 11 に示す引張強さ σ_u と降伏点 σ_Y の関係を表す一次回帰線から求めたものである。本報告のデータにおいては (6) 式で表される一次回帰線の方がフィットしている。

4. まとめ

本調査の主な結果は以下のとおりである。

(1) 降伏点の上限は J I S では定められておらず、SM400では380N/mm²、SM490では390N/mm²、SM490Y、SM520では520N/mm²、SM570では700N/mm²に達する鋼材があった。これらの鋼材は降伏比も大きかった。したがって、鋼材の変形能を確保するためには鋼材の降伏比の上限を定める必要があると判断された。なお、降伏比にも板厚依存性が存在した。

(2) 引張強さ σ_u と降伏点 σ_y の間には

$$\sigma_u = 0.671 \times \sigma_y + 273.9$$

の線形関係があった。

(3) SM400とSM570の伸びには引張試験片による差異があった。また、断面積が一定である J I S 4号試験片を用いた引張試験結果においても、原板の板厚が増加するにつれて伸びの増加が認められた。一方、降伏点と引張強さには引張試験片による違いはなかった。

(4) 降伏比 Y R と降伏点 σ_y の間には

$$Y R = 8.342 \times 10^{-4} \times \sigma_y + 0.401$$

で表される線形関係が認められた。

【参考文献】

- 1) J I S G 3106 ; 溶接構造用圧延鋼材
- 2) 谷俊寛, 西前博一, 岡村公司 ; テーパープレートをつランジ材に用いた I 桁の施工試験,
高田機工技報, No. 11, pp. 16~21, 1995.
- 3) 西村昭 ; ミルシート値とチェックテスト値との関係について, J S S C, Vol. 5, No. 38, 1969.
- 4) 西村昭 ; 鋼材の機械的性質のばらつきについて, J S S C, Vol. 5, No. 48, pp. 68~74, 1969.
- 5) Yuhshi FUKUMOTO ; New constructional steels and structural stability,
Proceedings of 50th Anniversary Conference of SSRC, pp. 211~225, 1994.
- 6) 青木博文, 村田耕司 ; 鋼材の降伏点, 引張強さおよび降伏比に関する統計的調査,
建築学会論文報告集, No. 335, 1986-1.
- 7) J I S G 3193 ; 熱間圧延鋼板及び鋼帯の形状, 寸法, 質量及びその許容差
- 8) J I S Z 2201 ; 金属材料引張試験片

(平成8年12月9日受理)