

構造用鋼板の選定とその設計施工

—HT 70, HT 80 キロ鋼を含む—

総括執筆者(司会) 笹 戸 松 二*
 話題提供者 中 野 昭 郎**
 同 財 前 孝***
 同 明 石 重 雄****

まえがき

いまから 20 年ほど前の鋼橋は大部分 SS 41 材で、リベットで部材を集積していたが、その後の溶接技術の進歩と改良、溶接に適合した材料の開発などが行なわれた結果、今では構造物の 100% 近くのもの溶接によって部材の集積がなされている。さらに、鋼材の種類も非常に多くなり、現在 20 種類に及んでいる。とくに高張力鋼 SM 58 材の利用は、一般橋梁に深く定着している。この傾向は経済性のみでなく、最近では輸送、架設設備の大型化等が高張力鋼の発達を刺激していると思われる。その一つの現象として、阪神高速道路公団の南港連絡橋(ゲルバートラス、橋長 980 m、中央支間 510 m)では HT 80 材で最大板厚 75 mm、一部分には 100 mm の材料を使って現在施工中であり、また、本州四国連絡橋においてもいろいろ研究開発がなされている。しかし、このような高張力鋼の問題だけでなく、従来から使われている SM 50 材、ニオブ(Nb)やバナジウム(V)を入れた SM 50 Y 材および耐候性鋼材などの材料についても、種々の問題点がある。このような点に対する設計・施工を中心に話題点を提供することにした。話題提供者の課題は次のとおりである。

- 設計と鋼材の選択(設計面から) (中野)
- 鋼材の選択とその設計施工(材料面から) (財前)
- 鋼材の選択とその設計施工(施工面から) (明石)

* 正会員 阪神高速道路公団 南港連絡橋建設部長
 ** 正会員 国鉄構造物設計事務所
 *** 新日本製鉄(株)
 **** 正会員 横河橋梁製作所

2. 設計面からの問題点

最近、鋼材の種類が非常に多くなり、設計者はどの鋼材を使うべきか非常に迷うことが多い。たとえば、比較的強度の鋼材を使って比較的大きな断面も設計できるし、高強度の鋼材を使って小さな断面も設計できる。この場合、設計者が鋼材を選択するにあたって、鋼材の性質、価格および施工上の問題点についての広範囲な知識が必要とされるが、ここでは設計上鋼材を選ぶときの問題点について二、三述べる。

現在、示方書に取り上げられている鋼材は 図-1 のごとく、41 キロ級から 58 キロ級までである。同程度の強

鋼種	板厚 (mm)							
	8	9	16	22	25	32	38	50
SS41								
SM41A								
SM41B								
SM41C								
SM50A								
SM50B								
SM50C								
SM50YA								
SM50YB								
SM53B								
SM53C								
SM58								
SMA41A								
SMA41B								
SMA41C								
SMA50A								
SMA50B								
SMA50C								
SMA58								

—— 鋼道路橋設計示方書(1971年) ----- 鋼鉄道橋設計標準(1970年)

図-1 溶接鋼橋主要部材に用いる鋼種と板厚

表—1 引張強度で換算した各鋼種の工場価格比較

(阪神高速道路公団調べ)

項目 鋼種	引張許容応力度 (kg/cm ²) と応力度比	鋼材製作					鋼材と製作			
		トンあたり 鋼材費	単価比	価格比	トンあたり 製作費	単価比 (価格比)	トンあたり 合計単価	単価比	価格比	
SS 41	1.400	39.8	1.00	1.00		1.00	111.2	1.00	1.00	
SM 41	1.400 (1.000)	A	42.0	1.06	1.06	71.4	1.00	113.4	1.02	1.02
		B	45.0	1.13	1.13		1.00	116.4	1.05	1.05
		C	49.0	1.23	1.23		(1.00)	120.4	1.08	1.08
SM 50	1.900 (0.737)	A	50.5	1.27	0.94	79.1	1.11	129.6	1.17	0.86
		B	53.5	1.34	0.99		(0.82)	132.6	1.19	0.88
		C	56.5	1.42	1.05		1.11	135.6	1.22	0.90
SM50Y	2.100 (0.667)	A	46.5	1.17	0.78	79.1	1.11	125.6	1.13	0.75
		B	49.5	1.24	0.83		(0.74)	128.6	1.16	0.77
SM 53	2.100 (0.667)	B	55.5	1.39	0.93	79.1	1.11	134.6	1.21	0.81
		C	58.5	1.47	0.98		(0.74)	137.6	1.24	0.83
SM 58	2.600 (0.538)	62.5	1.57	0.84	91.2	1.28 (0.69)	153.7	1.38	0.74	
HT 70	3.000 (0.467)	114.0	2.86	1.34	144.7	2.03 (0.95)	258.7	2.33	1.09	
HT 80	3.400 (0.412)	123.5	3.10	1.28	163.0	2.28 (0.94)	286.5	2.58	1.06	

注：価格比=応力度比×単価比。

度のもので、板厚の違いによって A, B, C のように変えるのは板厚が増すにつれて溶接性のよいものを用いる必要があるからである。このほかに、接合用の材料関係ではリベット材には、SV 34 と SV 41 が、高力ボルトでは F 8 T, F 10 T, F 11 T と分れているので、それぞれに適合した組合せで設計の必要がある。

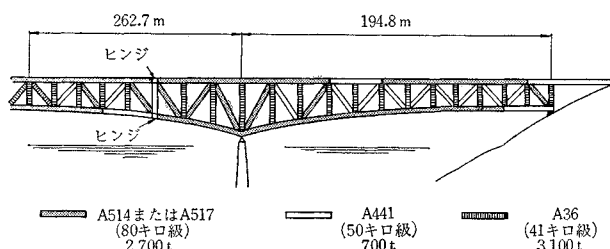
一方、北海道などの寒冷地では、低温でもじん性のよい鋼材を使うとか、また、環境条件により耐候性鋼材を用いる場合も生じてくる。

このように、各種各様の鋼材間の関係は、表—1 のとおりである。これは、板厚 25 mm で引張許容応力度を 1 つのスケールにして示したものであり、運搬、架設はこれに含まれていない。一番右端は SS 41 を 1 としたときの価格比を示している。SM 58, SM 50 Y の鋼材が経済的になることがわかる。

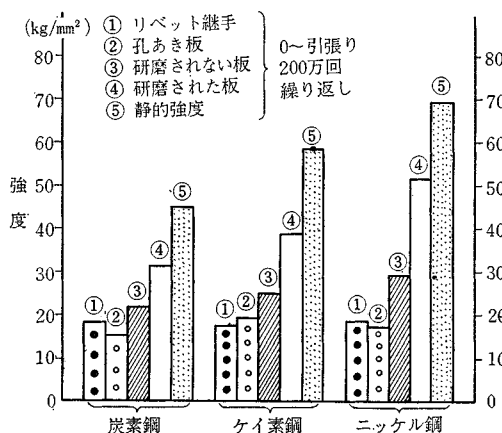
以上のごとく、本文では経済上の利点を有する高張力鋼の長所と欠点を設計に関連あるものについて述べる。長所としては

① 高張力鋼の使用は部材を非常に軽量化できる。長大橋のように活荷重に比べて死荷重の占める割合が高い場合、非常に効果的である。これにより、運搬、架設が容易になり、また地震の影響に対しても好ましい。

② 部材が単純化される。たとえば、板厚を薄く、板幅を小さく、またカバープレートが不要となって現場接合や溶接が有利となる。部材幅の縮少は二次応力を少なくし、また長大橋の場合は風の影響を減少させることになる。高張力鋼を使った例を図—2 に示す。トラスを設計する場合は、部材ごとに異種の鋼材を適材適所に使い分けて全体としてバランスのとれた設計が可能である。南港連絡橋では 80 キロ級までの 5 種類の鋼材を使い分



図—2 Auburn-Forest Hill 橋 (アメリカ合衆国) の鋼種



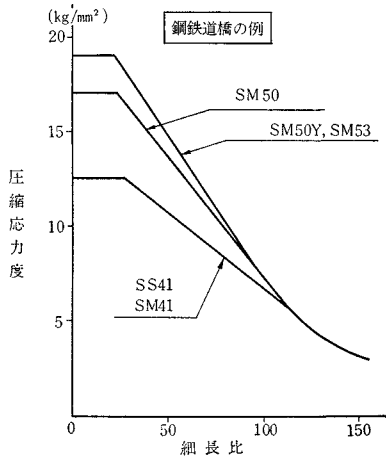
図—3 3種の鋼板についての疲労強度比較図

けている。

さて、高張力鋼を使った場合の欠点および効果のあがない点について述べる、

① 剛度が小さくなる。これは弾性係数は強度に無関係なので断面が小さくなるとたわみが大きくなり、振動し易くなる。このため鉄道橋のように、たわみ制限がきびしい場合には使いにくいケースも生じる。

② 疲労強度が静的強度に比較して高くない。図



図—4 許容軸方向圧縮応力度

—3 に鋼材の疲労強度の一例を示した。このように、応力集中が高い形状、あるいは繰返し回数が多い場合、応力振幅が-1 に近い場合は、静的強度の比ほど高張力鋼は有利でない場合が出てくる。

③ 座屈の問題において、部材の細長比が大きくなると鋼材の差がなくなってくる(図—4)。

④ 局部座屈の問題に関連して、板厚を薄くすると圧縮部材では板幅と板厚の関係で補剛材を付けねばならない。

⑤ 腐食の問題において、高張力鋼を使って板厚を薄くした場合、もし表面から同じ厚さ分がさびると、腐食による減少率が高くなりそれだけ不利になる。しかし、70 キロとか 80 キロ鋼においては、合金元素が耐腐食性を増すとされている。

⑥ 施工に関しては、材料を間違えて使うことを防ぐために、品質管理が非常に重要になってくる。溶接、加工、仕上げなどの施工上の不注意が、部材の強度劣化を起こすので、十分な施工管理が必要である。また、70 キロ、80 キロ級の調質の超高張力鋼においては、溶接、加熱調整の問題が、低強度のものより非常に大切になってくる。

このようにいろいろな鋼材を有利に使う方法として、トラスは部材ごとに強度を変える。また、プレートガーダーにおいてはフランジに強度の高い鋼材を使い、ウェブは低強度の鋼材を使う、いわゆるハイブリットガーダーのような形式もある。この場合においても、種々の問題点があげられる。

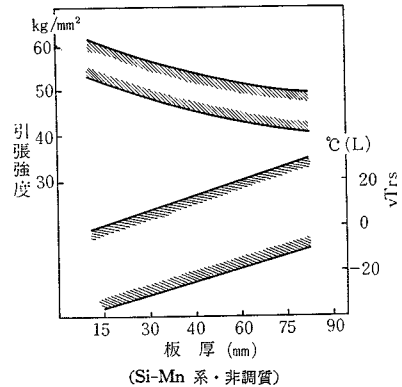
たとえば、許容応力度の考え方や溶接と高力ボルトを併用した場合の共働作用、強度の異なる鋼材を突合せ溶接した場合の溶接棒の強度等の問題点の解決が、高張力度の採用をいちだんと容易にすると考える。

2. 材料面からの問題点

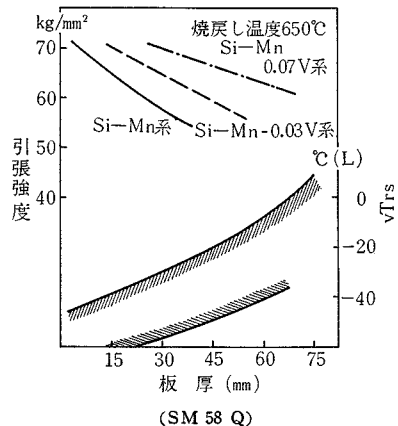
材料の面からの最近の傾向は、普通鋼から 80 キロ鋼へと鋼材の高張力化と厚板化、省力化という立場から耐候性鋼材および高張力鋼の使用がふえてきた点があげられる。

(1) 構造用鋼板の厚板化

構造物の大型化に伴い使用鋼板の板厚が増加し高張力化に拍車がかかっている。41 キロから 80 キロ鋼のいずれの鋼種においても、板厚の増大は、製造上、設計上、施工上に多くの問題点を含んでいる。現在は図—1 にあるように、41 キロから 58 キロ鋼に関しては板厚 50 mm を最大限としているが、南港連絡橋においては 80 キロ鋼で 75 mm の板が使用されている。一般に、構造用鋼板で板厚の増大につれて冷却速度が上がり強度の低下、およびじん性の劣化が生じる。このため、同一強度材料の製造にあたっては、板厚が増加すると添加剤を加えたり、熱処理を行なって強度を保持している。このようにして製造した圧延鋼材を溶接施工する場合、板厚の増加



図—5 同一成分における板厚と機械的性質



図—6 同一成分、熱処理における板厚と機械的性質の関係

がそのまま溶接後の冷却速度の上昇となり、また鋼板の炭素当量の増加に結びつくため、溶接割れ、とくに冷間割れの問題で予熱等を十分に行なう必要が生じてくる。

図-5 は非調質の 41 キロ鋼, 50 キロ鋼に関する板厚とその母材特性との関連を示したものである。図-6

溶接性 印(級別)	予熱温度(℃)	応力除去	焼なし	ピーニング
○ A	不要	不要	不要	不要
● B	40~100 以上	-10以上	不要	不要
● C	150 以上	40~100 以上	望ましい	不要
× D	150~200以上	100 以上	必要	望ましい

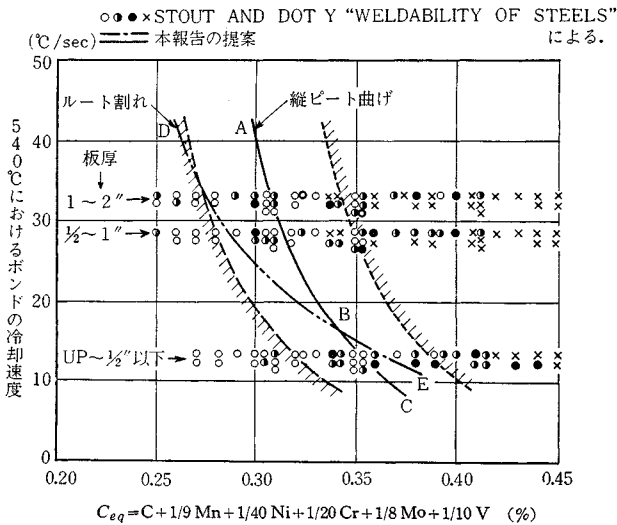


図-7 高張力鋼の被覆アーク溶接条件の予測曲線 (AC: 縦ビード曲げ合格, DE: ルート割れ予防) とアメリカ合衆国の経験値との比較 (鈴木)

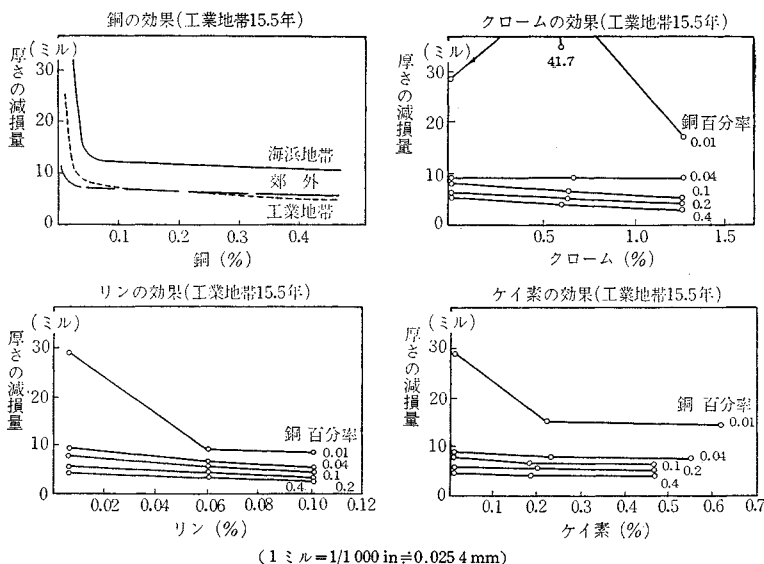


図-8 耐候性に対する各種合金成分の効果

は調質鋼に関する同種のデータであるが、調質鋼の場合には上記の傾向がさらに顕著に現われており、焼入れ硬度と、焼戻し後の強度およびじん性との間に明瞭な相関が認められる。すなわち、調質鋼においては、板厚増加に伴う添加元素の考え方として、焼入れ硬度の変化を採用

することができる。一方、溶接性については図-7 で板厚の増加と、溶接割れ性との関係と、炭の増加に炭素当量との関連について示した。図-7 から板厚に伴う強度、じん性の低下を同一炭素当量の成分変動に押えても、その溶接割れ性は、板厚の増加に伴い鋭敏化していることがわかる。このように、板厚の増加については種々の解決すべき問題が残されているが、鋼板製造面のみならず、設計・施工面での調和のとれたアプローチが必要である。

(2) 耐候性構造用鋼の溶接性の問題点

耐候性構造用鋼板の橋梁に対する適用は一昨年においては全体の約1%であるが、維持管理の点から今後増大するものと思われる。

耐候性構造用鋼は図-1でも認められているがなお多くの改善点が残されている。その一つには

① この種の鋼板が現状では、塗装周期の延長をはかる目的のみで使用されている点である。アメリカ合衆国においては完全な無塗装使用の例がある。図-8 はいろいろな添加元素の耐候性に対してどのような効果を示すかを示したもので銅、クローム、リン、ケイ素が効果を示している。現在市販されている耐候性鋼材は無塗装で十分使用

可能であるが、腐食環境が多様で非常に微妙なので、必ずしも満足すべき解決を得ていない。しかし、表面処理技術が進んで、近い将来は必ず耐候性鋼板の無塗装使用が可能と思われる。さらにまた

② 耐候性鋼材の溶接性については、SM 50 (Si-Mn系) に比べて Cu, Cr その他の元素が含まれているため炭素当量が増加し、溶接割れに対して敏感なので炭素当量の低いものを製造する必要がある。図-9 は割れ停止温度と C_{eq} の関係を SMA 50 材と SM 50 材で斜 Y 形溶接割れ試験で行なったものである。図-9 から明らかのように、SM 50 材と SMA 50 とは2つのグループに分かれ、

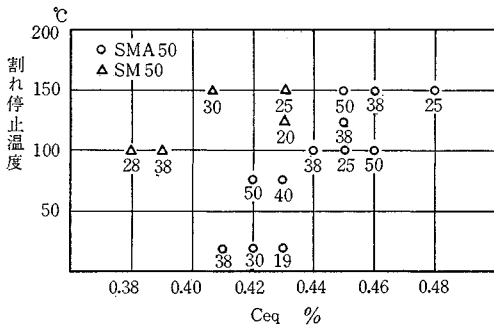


図-9 C_{eq} -割れ停止予熱温度と板厚の関係
(図中の数字は板厚を示す)

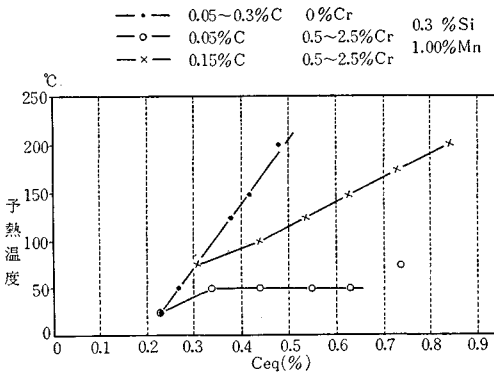


図-10 C_{eq} 値と予熱温度の関係

C_{eq} だけで割れ性を評価することは、問題があることがわかる。図-10 は同様な関係を Cr 量の多少によって分類したものである。この場合も C 量が低い Cr の入った耐候性鋼に関しては従来の C_{eq} 式が適用できないことが明らかで、少し補正した式を用いる必要がある。

以上のことから、耐候性鋼の溶接性については独自の割れ感受性に関する尺度が必要であり、また、この鋼材に最も適した溶接法が開発されるべきであると考えられる。

4. 施工面からの問題点

最近の構造用鋼材は 20 数種類あり、材料の多様化時代を迎え、設計上での鋼材の選択と、これに伴い各種性質の違う鋼材に応じた最適の施工法の選定が非常に重要な問題となる。これの良し悪しが直接、構造物の品質に、あるいは経済性に影響してくるといえる。たとえば、80 キロ鋼を使っている南港連絡橋の箱断面の角継手は、母材の強度よりも低強度溶接材料を使って施工しているがこれは第一に溶接割れの発生が軽減されるということ、第二には溶接材料そのものも高級な合金を使わないので安くできることによる。このように、材料が非常に多くある場合、施工前に適切な条件をみつけるということで施工試験が行なわれているが、道路橋の示方書（昭和

48 年 2 月）では、ある条件の場合には、必ず施工試験を行なうことになった。それは、次の 5 つの条件である（道路橋示方書 15,3,3,(3)）。

- ① SMA 41, SM 50, SM 53, SM 58 の板厚が 38 mm を越える場合
- ② SMA 50, SMA 58 の板厚が 25 mm を越える場合
- ③ SM 58, SMA 58 において、1 パスの入熱量が 70 000 joule/cm を越える場合。
- ④ 被覆棒アーク溶接法（手溶接のみ）、サブマー法アーク溶接法を用いる場合
- ⑤ 現場溶接を行なう場合

このうち、あとの 3 項目は純然たる施工上の問題であり、普及度が低く、従って信頼性が薄いと考えられる工法について、その適性を確認しようとするものである。これに対し、前 2 項目の場合は、施工法の妥当性と同時に、鋼材自身の溶接性についても確認を行ない、材料特性に対応した安全な施工条件を見いだすことを目的としている。

鋼材規格に強度的性能と同様、溶接性、とくに耐割れ性に関する基準が示され、またこれが製造メーカーで保証されると、溶接条件はかなり明確になり、施工試験を単に工法確認だけの性格をもつようにすることができるが、現実には非常にむずかしいことである。したがって、一部の材料について施工者が溶接性確認を行なうことは現状では最も妥当な方法と考えられる。

溶接性というのは主として溶接割れに関する問題であろうが、表-2 は鋼構造協会の溶接割れ研究班で調べた資料である。これによると、K 継手、十字継手は非常に多くの割れの発生があり、たとえば、前者はパイプの中にダイヤモンドをつけるとか箱断面のダイヤモンドをつける継手、後者は鋼床板の縦リブと横リブの接点、あるいは格子桁の場合のウェブを貫通する部材、あるいはラーメンの隅角部というようなところで、スリットを切って差し込んで溶接する継手である。このように、拘束が強いということは割れに非常に関係がある。そこで、拘束の強い試験片をつくって溶接性の確認を、斜め Y 形割れ試験で行なっている。しかし、これによって出てくるのは鋼材あるいは溶接材料の良否の解答であり、与えら

表-2 溶接割れ実例調査結果 (JSS C 6 巻 60号)

継手形状 割れ形式	かど継手		十字継手	斜め継手	突合せ継手	計
	継手	継手				
縦割れ	3	7	6	2	1	19
横割れ	0	1	0	0	0	1
ルート割れ	0	7	10	1	3	21
止端割れ	0	7	13	1	1	22
マイクロ割れ	0	0	0	1	0	1
開裂	4	0	2	1	1	8
計	7	22	31	6	6	72

表-4 現在の道路橋示方書における鋼種と板厚(左)と改訂案(右)

鋼種	許容引張 応力度 kg/cm^2	板厚 (mm)					鋼種	許容引張 応力度 kg/cm^2	板厚 (mm)									
		8	16	22	25	32			38	50	8	16	22	25	32	38	50	75
SS41 SM41A SM41B SM41C	1400							SS41 SM41A SM41B SM41C	1400									
SM50A SM50B SM50C	1900							SM50YA SM50YB SM50C	2100									
SM50YA SM50YB SM53B SM53C	2100																	
SM58	2600							SM58	2600									

Y, SM 53 系列で 2100 kg/cm^2 , SM 58 で 2600 kg/cm^2 となっているが, SM 50, SM 50 Y, SM 53 を整理統合し 3 段階の強度レベルにすべきであろう。そして, ほぼ表-4 のようにまとめられるが, 表-4 の改訂案において, SM 50 C は便宜上の名称で, 現在の SM 53 C に近い材質である。また, 22~38 mm における鋼材には, 使用鋼塊および成分系について, 多少の注釈を付すべきであろう。

② 道路橋示方書においては, 使用板厚の上限は 50 mm とされているが, 部材断面のコンパクト化, 溶接における変形の問題を考えると, 50 mm 以上にも板厚を許容したほうが得策ではないだろうか。

③ 耐候性鋼材の使用基準をもう少し考え直す必要がある。

④ SM 58 には炭素当量の規定があるが, 溶接割れの問題を考えると, SM 50, SM 50 Y および耐候性鋼材にも炭素当量の規定を与えるべきであろう。たとえば, SM 50 Y であれば, 0.42% ぐらいにし, 耐候性鋼材は 0.04% ぐらい上げればよいだろう。

⑤ JIS 規格における鋼材の公差はゆるいので考え直す必要がある。たとえば, 継手部において高力ボルトだ

と 1 mm の板厚公差で疲労の問題がクローズアップしてくる。

⑥ 70, 80 キロ鋼の仮付け予熱温度は, 本溶接予熱温度より 40°C 程度高い予熱温度とすべきである。

⑦ 溶接割れに関して, 道路橋示方書では鋼材の溶接性を考慮した, 合理的で柔軟性をもった予熱規定をしているが, 拘束度を導入するに至っていない。今後の研究によって拘束度を考慮した予熱規定を確立することが必要である。

ここに提示されたいくつかの論点は, この分野における今後の研究の方向づけになるものと思われる。

参考文献

- 1) Toprac, A.A. : Fatigue Strength of Hybrid Plate Girders ASCE, Proc., April, 1971.
- 2) 中村・明石: 摩擦接合と突合せ溶接の併用継手に関する研究, 土木学会第 22 回年次学術講演会。
- 3) 嶋田・堀川: 低強度溶接材料による高張力鋼溶接継手の力学的特性, 土木学会第 26 回年次学術講演会。
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書, 昭和 48 年 2 月。
- 5) 伊藤・別所: 高張力鋼の溶接割れ感受性指数について, 溶接学会誌, 38 巻 10 号。
- 6) 明石・夏目: 拘束継手における溶接割れの研究, 溶接学会誌, 41 巻 6 号。

講演会, シンポジウム資料の頒布について

1. 構造物の耐風性に関する第 2 回シンポジウム論文集
(1972 年 12 月 4 日・5 日, 電気・土木・気象・建築, 鋼構造の 5 学協会が共催)
内容: 30 編の論文および特別講演 3 編を収録
頒価: B 5・252 ページ・2000 円 (〒 140)
2. 現場における岩盤計測と設計・施工への応用 (第 2 回岩の力学講演会講演集)
(1973 年 2 月 16 日, 学術会議主催, 土質・土木・材料・鉱業の 4 学会が共催)
内容: ダム, 橋梁, 地下発電所などの応用例 6 編を収録
頒価: A 4・128 ページ 2000 円 (〒 140)
3. 第 17 回水理講演会講演集
(1973 年 2 月 16, 17 日, 土木学会水理委員会主催)
内容: 20 編の講演概要および昭和 47 年度水理学研究の現況を収録。
頒価: B 5・134 ページ 1300 円 (〒 140)