

解 説

UDC 669.14.018.295 : 624.014.2

各種高張力鋼の土木用鋼構造への利用\*

堀 川 浩 甫\*\*

The Use of High Strength Steel for Civil Engineering Structures

Kohsuke HORIKAWA

本稿では、土木の分野における構造物への高張力鋼の利用の現状について述べ、その中で本特集号の主題の非調質高張力鋼の利用の可能性についてもふれることにしたい。また対象とする構造物は橋梁および水圧鉄管に限らせていただく。

まず道路橋における鋼材の使用区分に示方書（日本道路協会 1971 年 12 月制定道路橋示方書鋼橋編）によつて表 1 のように定められている。これまで SM 58 を超える鋼材の使用は、京葉道路の花輪跨道橋に約 10 t が実験的に使用されたにすぎなかつたが、現在施工中の阪神高速道路公団の南港連絡橋（図 1）においては、最大板厚 75 mm の極厚 80 キロ鋼を含めて約 5 300 t の 70 キロ鋼、80 キロ鋼を使用している。

鉄道橋においては列車荷重による応力が自重による応力に対して相当の大きさとなり、設計応力が疲労に対する許容応力に支配される場合が多いが、平滑に仕上げた試験片の場合とは異なつて、応力集中のある実際の構造部材の疲労強度は高張力鋼を使用した場合でも軟鋼を使用した場合のそれと大差なく、疲労に対する許容応力も区別していない（表 2、図 2）ので、高強度の材料を使用してもメリットが少ない。したがつて鋼材の使用区分も 50 キロ鋼（SM 53 を含む）までで表 3 のようになっている。（国鉄、建造物設計標準（鋼鉄道橋）1970 年 5 月による。）

道路、鉄道併用の本州四国連絡橋においてはその一部に 50 mm を超える板厚の 80 キロ鋼を使用する必要があるものとみられている。

水圧鉄管でも技術基準（水門鉄管協会昭和 43 年 9 月制定水門鉄管技術基準）では SM 58 までを規定し、70 キロ鋼、80 キロ鋼は特認事項としている。水圧鉄管々胴の板厚は

$$t = \frac{P \times r}{\sigma_a}$$

表 1 道路橋における鋼材の使用区分

鋼種	板厚 (mm)	8	16	22	25	32	38	50
SS41								
SM41A								
SM41B								
SM41C								
SS50								
SM50A								
SM50B								
SM50C								
SM50YA								
SM50YB					1)			
SM53B								
SM53C								
SM58								
SMA41A								
SMA41B								
SMA41C								
SMA50A								
SMA50B								
SMA50C								
SMA58								

- 注：1) 板厚25mmをこえ32mm以下のSM50YBは、とくにキルド鋼塊として製造させるものとする。
- 2) 気温がいちじるしく低下する地方では特別な考慮をほらわなければならない。
- 3) SS50 は溶接構造に用いないものとする。

- t : 鉄管々胴の板厚 (mm)
- P : 設計水圧 (kg/mm<sup>2</sup>)
- r : 鉄管の内半径 (mm)
- σ<sub>a</sub> : 許容応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

で概算される。設計水頭と内径の積  $P \times D$  (m × m) は水圧鉄管の規模を表わす指標としてよく用いられるが、図 3 にみられるようにきわめて大きくなつてきている。黒部川第四発電所では軟鋼の管胴に高張力鍛鉄の補剛環を焼ばめするバンデッドパイプが用いられ、下滝、沼原両発電所では 70 キロ鋼が用いられたが、大平、南原、奥清津各発電所では 80 キロ鋼を使用することが計画されている。80キロ鋼を使用する水圧鉄管の計画の一例を

\* 昭和 47 年 3 月 6 日 受付 (依頼解説)  
 \*\* 東京都立大学 工博

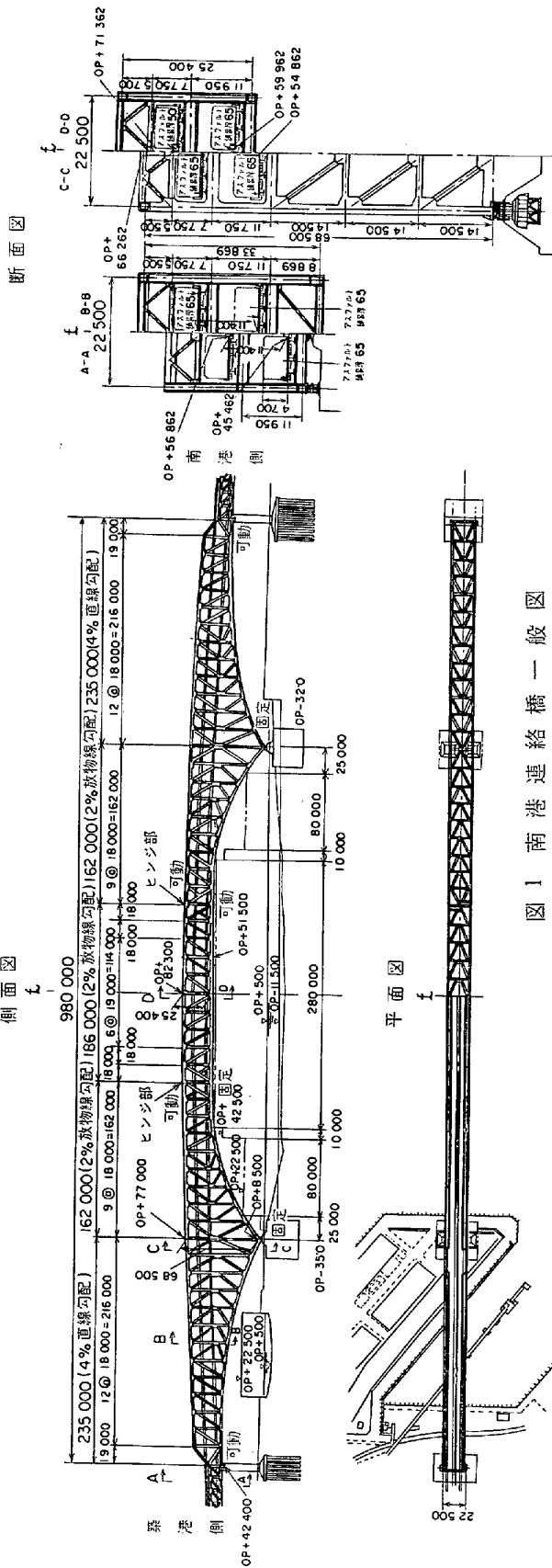


図1 南港連絡橋一般図

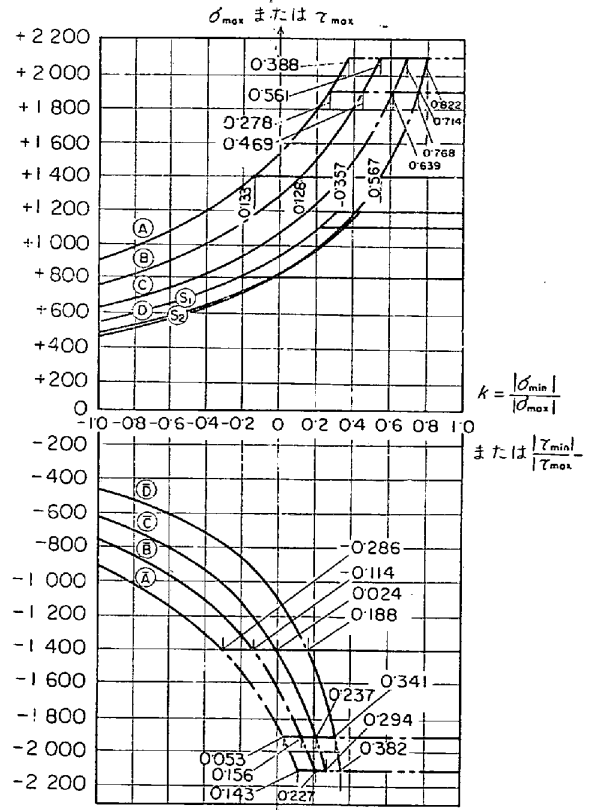


図2 疲労を考慮した鋼鉄道橋の許容応力 (表2を図示したもの)

図4に示す。

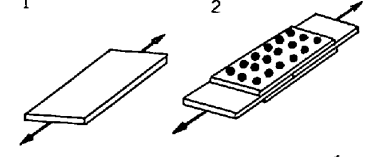
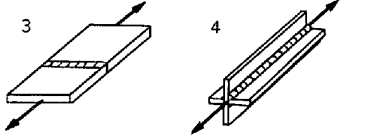
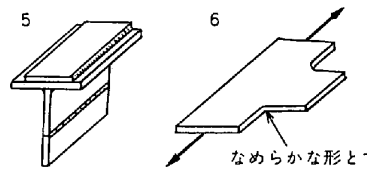
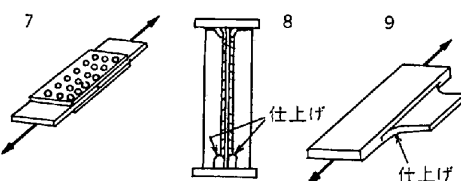

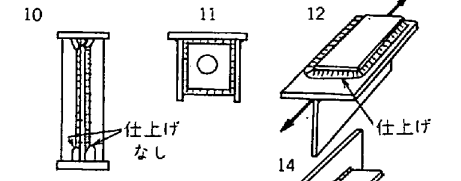
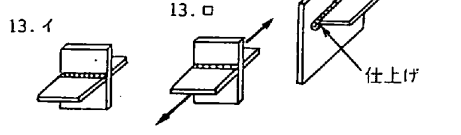
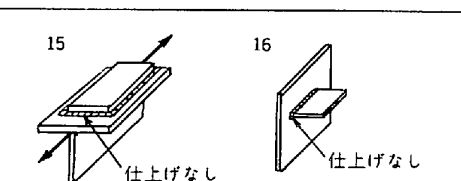
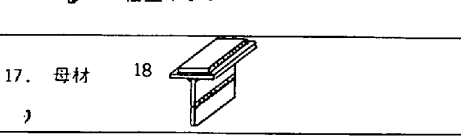
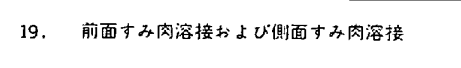
ところで前記の式を変形した

$$T = t \cdot \sigma_a = P \times r$$

は鋼材の単位幅当たりの許容耐荷力で、一般に外力が与えられたときの鋼種と板厚の関係は図5のようになる。すなわち SM 41 の 50 mm 材は幅 1m 当たり 700 t の許容耐荷力を有するが、これは SM 53 を使用した場合の 33 mm 材、SM 58 を使用した場合の 27 mm 材に相当するわけである。ここにおいて板厚 50 mm の SM 41 C材を用いるか、板厚 33 mm の SM 53 B材を用いるか、あるいは板厚 27 mm の SM 58 材を用いるかは設計者の判断にゆだねられる。その構造物が主として軟鋼だけで作られるか、あるいは高張力鋼を多量に使用しているかなどによっても異なつてはくるが、多くの場合には溶接の難易さ、材料および施工を含めた工費などから SM 41 材で板厚が 38 mm を超えると鋼種を一段あげて 50 キロ鋼を使用する。この場合 50 キロ鋼の板厚は 25 mm 前後となる。さらに作用応力が大きくなつて 50 キロ鋼を用いても板厚が 38 mm 超となると SM 58 へと再び鋼種を切り替えている。

50キロ鋼には SM 50, SM 50 Y, SM 53 などの種類があるがいずれも非調質 (As rolled) の材料で、一方

表 2 疲労を考慮した鋼鉄道橋の許容応力

		許 容 応 力 度			
		応力の種類	SM41 SMA41	SM50	SM50Y SM53 SMA50
	引張		$\frac{1530}{1-0.7k}$		A
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	引張		$\frac{1800}{1-k}$		A
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	圧縮		$\frac{1275}{1-0.7k}$		B
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	引張		$\frac{1575}{1-1.1k}$		B
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	圧縮		$\frac{1050}{1-0.7k}$		C
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	引張		$\frac{1360}{1-1.2k}$		C
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	圧縮		$\frac{805}{1-0.75k}$		D
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	圧縮		$\frac{1060}{1-1.3k}$		D
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	引張		$\frac{920}{1-0.7k}$		S <sub>1</sub>
		ただし 1400 以下	ただし 1900 以下	ただし 2100 以下	
	引張		$\frac{820}{1-0.7k}$		S <sub>2</sub>
		ただし 800 以下	ただし 1100 以下	ただし 1200 以下	
19. 前面すみ肉溶接および側面すみ肉溶接			$\frac{820}{1-0.7k}$		S <sub>2</sub>

SM 58 は調質高張力鋼が多い。したがって、とくに非調質高張力鋼の利用の可能性を論ずる場合には、強度は 60キロ以上、板厚は 25 mm 以上のものが考察の対象となりうるものと考えられる。

最近の構造物の大型化の流れの中にあつて、鋼構造に利用する鋼材の板厚も大きくなり、前述のいくつかの水圧鉄管では 80 キロ鋼で 40~50 mm、南港連絡橋では同じく 80 キロ鋼で 75 mm の極厚板を必要としている。

このような極厚 80 キロ鋼には表 4 のような成分系の調質高張力鋼が用いられているが、その溶接はきわめてむずかしく、調質、非調質を問わず新しい鋼種の開発がのぞまれるところである。しかし、これらの部材を High Ni 系は別として現状考えられている非調質の最高強度である 60 キロ鋼で考えた場合には、板厚はそれぞれ 55 mm, 70 mm および 110 mm 前後となり、60キロの強度を非調質で確保するには相当の困難を乗り越える必要を感じざるを得ない。

表 3 鉄道橋における鋼材の使用区分

部 材	材 料	厚さ $t$ (mm)
溶接主要部材	SM 41 SMA 41	A B C $t \leq 16$ $16 < t \leq 25$ $25 < t \leq 50$
	SM 50	B C $t \leq 25$ $25 < t \leq 50$
	SM 50 Y SMA 50	B $t \leq 25$
	SM 53 SMA 50	C $25 < t \leq 50$
溶接 2 次部材 およびリベット または高力ボルト 結合部材	SS 41 SMA 41 A SM 50 A SM 50 YA SMA 50 A	$t \leq 50$

注：SM 41 C, SM 50 C, SM 53 C に対する厚さは、形鋼にも準用する。

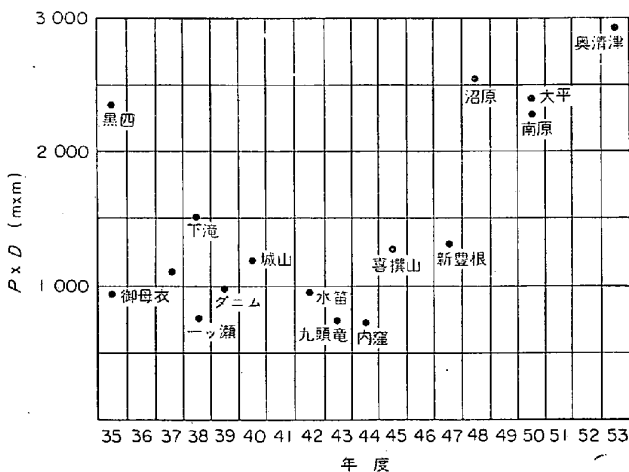


図 3 水圧鉄管の規模の推移

橋梁および水圧鉄管の溶接は主として被覆棒アーク溶接（手溶接）およびサブマージアーク溶接で、一部は MIG, CO<sub>2</sub> ガスあるいはノーガス溶接（半自動溶接）で行なわれている。半自動溶接は手溶接とくらべて入熱が大きく MIG, CO<sub>2</sub> ガス溶接はフラックスを用いないのでフラックスからの水素の侵入がなく拡散性水素を減ずることができ、溶接われ防止の立場からは好ましいものではあるが、作業性その他の理由により限られた個所でしか用いられていない。

構造物の溶接において冶金的に重要な問題は、われを防止するために必要な最小予熱温度と熱影響部の脆化を防止するために設けられている最大入熱量の制限の二つを緩和することである。

表 5 は最小予熱温度の一例で南港連絡橋の施工計画書に記載されたものである。ここに 40°C とあるのは溶接に先行して開先面を手持ちのバーナーで軽くあぶる程度（道路橋示方書解説による）で、溶接後の冷却速度を緩和させるという予熱本来の働きよりも flame cleansing としての効果が期待されているようである。予熱温度が 100°C くらいまでは手持ちあるいは定置式のガスバーナーで溶接開始まで加熱し、溶接が開始されたならばガスバーナーを消火することが多い。予熱温度が 100°C 程度を越えると溶接中も加熱を継続する必要を生じ、このような場合にはガスバーナーによつて加熱することも多いが、赤外線ヒーターやストリップヒーターなど電気抵抗熱を利用した温度の自動管理の可能な装置を導入した現場も出てきている。

なお、70 キロ鋼、80 キロ鋼においてサブマージアーク溶接の予熱温度が被覆棒アーク溶接の場合よりも高くなっているのは、溶着金属のわれ（横われ）を考慮したものである。

SM 58 と 50 キロ級各鋼 (SM 50, SM 50 Y, SM 53) の成分を広く調査した結果によると（詳細は JSSC 誌に発表予定）炭素当量  $C_{eq}$ , われ感受性指数  $P_{CM}$  で比べた場合、SM 58 には  $C_{eq} 0.44$  以下の JIS の規定があるためもあるのだろうが、SM 58 よりも 50 キロ鋼の方が  $C_{eq}$ ,  $P_{CM}$  が大きいので 50 キロ鋼の方が予熱温度を高くする必要があると考える。

つぎに溶接入熱については SM 41~SM 53 には特別

表 4 橋梁および水圧鉄管向け 80 キロ鋼の成分の一例

(%)

t	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	$C_{eq}$
34	0.10	0.25	0.87	0.006	0.005	0.23	1.04	0.51	0.37	0.03	0.001	0.48
50	0.12	0.24	0.84	0.018	0.005	0.24	1.00	0.51	0.43	0.04	0.001	0.51
75	0.13	0.26	0.85	0.007	0.006	0.26	1.20	0.53	0.43	0.04	0.001	0.53

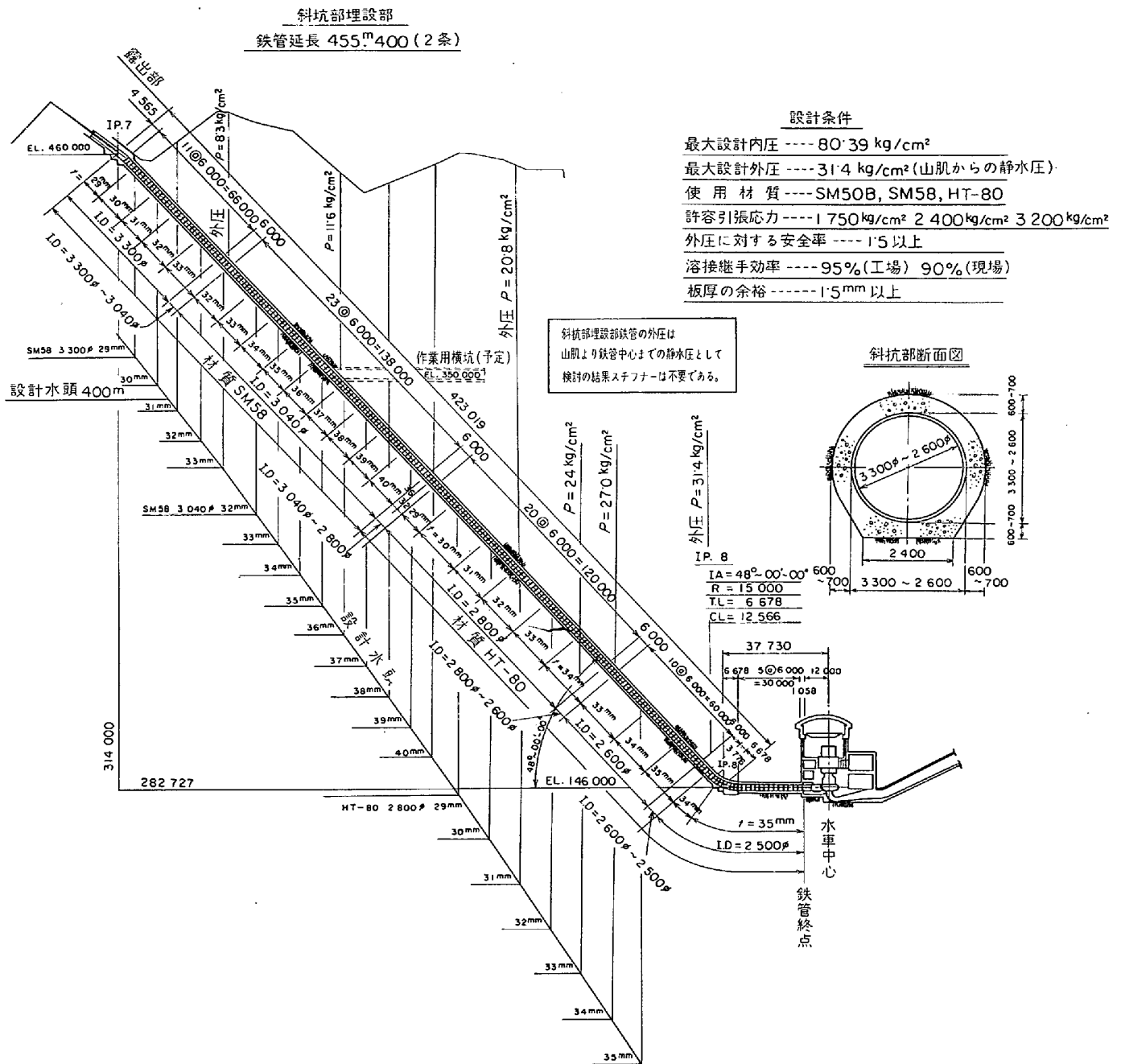


図 4 80キロ鋼を使用する水圧鉄管の計画の一例

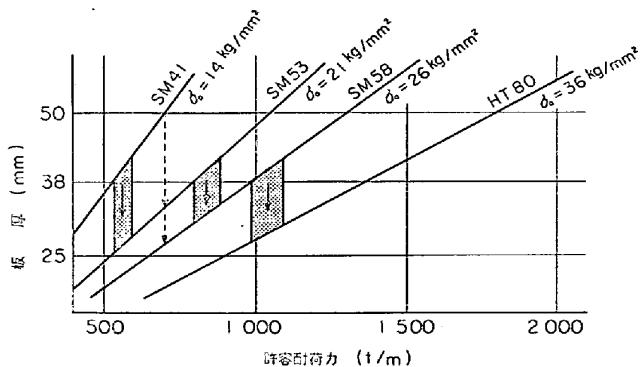


図 5 鋼種による板厚の比較

の制限はなく、一部では片面自動溶接などで 10 数万 j/cm といった大入熱が加えられることもあるが、SM 58 については道路橋の示方書で 7 万 j/cm を越えるときは施工法承認試験を行なつて継手性能の確認を義務づけており、70 キロ鋼、80 キロ鋼については橋梁、水圧鉄管とも一つの継手の平均入熱量の最大値を 4 万 5 千 j/cm 以下におさえている。国産の 80 キロ鋼は製鋼各社の努力の結果、T-1 鋼についてレコメンドされている 3 万 j/cm よりずつとゆるやかな制限値とはなつてはいるが、施工能率の向上のためには一層の努力が望まれるところである。

表 5 最 小 予 熱 温 度 (°C)

(南港連絡橋委員会資料)

溶接法 鋼種 継手 板厚 (mm)	被覆アー ク溶接		ガスシール ドアー ク溶接 サブマージ アー ク溶接		被覆アー ク溶接		ガスシール ドアー ク溶接		サブマージアー ク溶接	
	SM 50		SM 58		HT 70		HT 80			
	突合せ, すみ肉, 角継手		突合せ, すみ肉, 角継手		突合せ, すみ肉, 角継手		突合せ		すみ肉	
$t \leq 25$	—	—	40	—						
$25 < t \leq 38$	40	—	80	40*	100	80	100	100	80	80
$38 < t \leq 50$	80	角継手 40*	80	60	100	80	100	100	100	80
$t > 50$	100	80	100	80**	120	100	150	150	150	100**

- (注) 1. HT 70, HT 80 材における最高予熱および層間温度は 200°C ( $t \leq 50$ mm), 230°C ( $t > 50$ mm) 以下とする。(AASHO, 70)  
 2. 太線内は溶示 18 条に準じ, 破線内は本橋製作委員会における鋼材メーカー報告による。  
 3. \* 溶示 18 条の「ガスバーナーで軽くあぶる程度」に準じる。 \*\* 溶接施工法試験にて確認する。  
 4. 予熱範囲は溶接線両側 100mm 以上の範囲を均一な温度で保持する。  
 5. 予熱および層間温度の計測は表面温度計(温度チョークなど)で溶接線より 50mm はなれた位置で計測する。

しかし橋梁においてはその構造上, 板継ぎ(突合わせ)に比べて, T継手, かど継手の溶接線延長が圧倒的に長くその大部分はすみ肉溶接によることが多いので, 中程度の入熱に対して安定した品質であつてほしい。またエレクトロガス溶接とかエレクトロスラグ溶接といった立向自動の大入熱溶接は現状ではほとんど用いられていない。

これまで述べたように現在構造物に使用している高張力鋼(調質材)はベストとはいえ改善すべき点も多いが, 3.5 Ni とか 5 Ni とといった High Ni 系の材料を別とすれば, われ感受性などを考え炭素当量に上限値を設けて成分元素の添加量をおさえられた場合には, 鋼材の強度は冷却速度に依存し, as rolled, control cooling, quench and temper の順に強度が高くなることはよく

知られているとおりである。また板厚が厚くなると圧延後の冷却速度はおそくなる傾向にあるので, 冷却速度を向上させる手段を施す必要がある。

したがつて, quench and temper の調質によらず, より効果をあげるためには, なんらかの新機軸が期待される。

最後に価格についてふれると, 25 mm の SM 58 を主体とした構造物は t 当たり 20 万円前後, 50 mm の 80 キロ鋼を主体とした構造物は t 当たり 40~50 万円で, その中にしめる鋼材費はおおよそ 3 分の 1 である。したがつて, 新しい鋼材を考える場合に施工費の節減を考慮するにしても, 上述の価格からかけはなれたものであつてはその採用は躊躇されることにならざるを得ないであろう。