

### 3. 高性能鋼

#### 3.1 高性能鋼の利用事例

高性能鋼とは、「従来汎用的に使用されている鋼種と比較して、強度、じん性、溶接・曲げ加工性、耐腐食性などにおいて、より優れた性能を有する鋼種・鋼材の総称」と定義される。今日では、製造技術の進歩によって、昔では考えられないような高い性能を持つ鋼材が開発され、実用化されてきている。表 3.1 に、鋼材とそれを利用した構造物の発展の歴史を簡単に示す。

鋼材の性能は含有する成分、製造法、熱処理やこれらの組み合わせによって決まる。例えば、表 3.2 に化学成分が鋼材の性能に及ぼす影響を簡単に示すが、鋼材は少量の元素を含有するだけでその性質が大きく変わることがわかる。近年は、研究開発の進展と製造法の進歩により、鋼材の成分、温度管理を含む製造法などを比較的自由にコントロールできるようになり、以前に比べてかなり自由に鋼材の性能を決めることができるようになってきた。図 3.1 は熱加工制御圧延プロセス (TMCP : Thermo Mechanical Control Process) のイメージを示したものである。このように、圧延時の温度、ならびにその後の冷却の速度を適切に制御することにより、結晶粒が著しく細かい、微細な組織となり、その結果、とくに降伏強度の上昇とじん性の大幅な向上が得られる。すなわち、TMCP を適用することにより、鋼板の組織が微細化され、通常の圧延鋼材と同じ成分でじん性が著しく向上した、より強度の高い鋼材が製造できる。

橋梁向けの高性能鋼の例を表 3.3 に示す。以下では、高性能鋼の性質、ならびにそれらの特性を生かした構造物への適用事例を述べる。

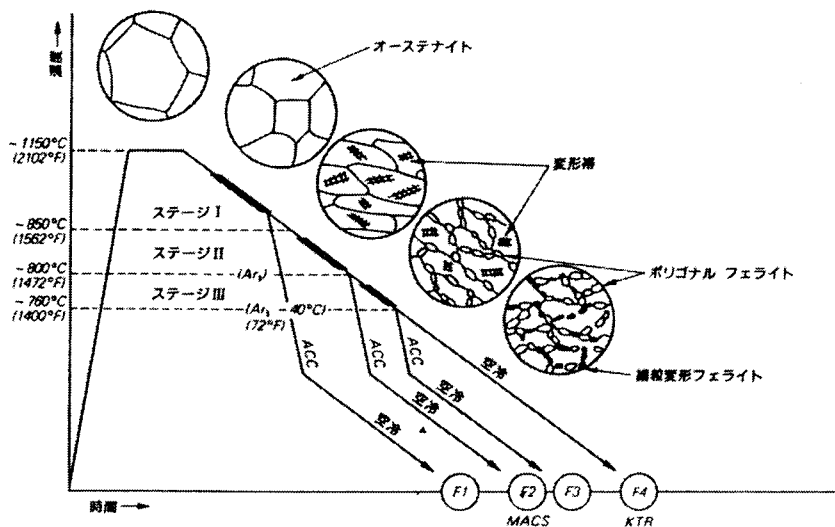


図 3.1 TMCP プロセスのイメージ図

表 3.1 橋梁用鋼材の高性能化の歴史

年代	基準における 構造用鋼材の変遷	適用例
1920	道路橋示方書 1925 改訂 ← St39	JES 第 20 号 「橋梁建築その他鋼材」1924(St39)
1930	1939 改訂 ← SS41(SS400)	JES 第 430 号 「一般構造用圧延鋼材」1938(SS41)
1950		JIS G 3101 「一般構造用圧延鋼材」1952(SS50) JIS G 3106 「溶接構造用圧延鋼材」1952(SM50)
1960	1964 改訂 ← SS50(SS490) SM50(SM490) 1967 追補 ← SM50Y(SM490Y) SM53(SM520) SM58(SM570)	相模橋 (500N/mm <sup>2</sup> 鋼の初適用)1955 西村橋, 平野橋(芦有道路) (600N/mm <sup>2</sup> 鋼の初適用)1960 花輪跨道橋(京葉道路) (800N/mm <sup>2</sup> 鋼の初適用)1964 知多 2 号橋 (耐候性鋼無塗装仕様初適用)1967
1970	1973 改訂 ← 耐候性鋼 (SMA400, SMA490, SMA570)	港大橋(阪神高速道路公団) (700N/mm <sup>2</sup> 鋼, 800N/mm <sup>2</sup> 鋼の大量採用)1974
1980	1980 改訂 ← SS50 削除 HT70, HT80 1978 設立 本州四国連絡橋公団規格	美和川橋梁(国鉄) (制振鋼板をウェブに使用)1976 第五厚内川橋梁(国鉄) (TMCP 鋼の使用)
1990	1990 改訂 1994 改訂 ← 鋼材記号の変更 (SI) 1996 改訂 ← 高性能鋼 厚鋼板 (板厚 100mm まで) 降伏点一定鋼 高じん性鋼 予熱低減鋼 耐ラメラテア鋼 TMCP 鋼	瀬戸大橋(本州四国連絡橋公団)1988 羽田エアサイドブリッジ (冷間成形による構造)1993 深沢川橋(日本道路公団) (LP 鋼板の使用)1995 滝下橋(日本道路公団) (冷間成形角鋼管を用いたトラス橋)1997 東京湾アクアライン (チタンクラッド鋼による防食)1997 東海大府高架橋(日本道路公団) (エレクトロスラグ溶接による現場溶接)1998 明石海峡大橋(本州四国連絡橋公団) (予熱低減型 800N/mm <sup>2</sup> 鋼, 1800N/mm <sup>2</sup> ワイヤ)1998
2000	2002 改訂 ← 性能設計への第一歩	

表 3.2 鋼中の化学成分の影響<sup>2)</sup>

元素	利点	欠点
炭素	鋼の強度を上げる	延性(伸び等)と衝撃特性を損なう 溶接性を悪くするので添加量が制限される
珪素(Si)	鋼の強度を上げる 脱酸作用がある	多量(0.5%以上)に添加すると、衝撃特性や延性が低下する
マンガン(Mn)	鋼の強度を上げる 延性、衝撃特性を上げる 脱酸作用がある 硫黄(S)の悪影響を抑える	多量(1.6%以上)に添加すると、衝撃特性や延性が低下する
燐(P)	多量(0.07%以上)の添加で鋼材の耐候性を高める	溶接性、冷間加工性、衝撃特性を劣化させる 凝固時に偏析しやすく、偏析による悪影響が大きい
硫黄(S)	切削性をよくする (機械構造用鋼の場合)	鋼中の Mn と結びついて MnS 系の非金属介在物を形成し、鋼の清浄度を悪化させる MnS は圧延により伸びて、衝撃特性や板厚方向の絞り特性を悪化させる ラメラテアの原因となる
銅(Cu)	強度を高める 耐食性を高める	熱間ぜい性を引き起こすので、含有量を制限する必要がある 溶接金属の高温割れを引き起こす
ニッケル(Ni)	添加によって鋼の衝撃特性を改善する	高価である
クロム(Cr)	焼入れ性と強度を高める 耐食性、耐酸化性、高温強度を高める	溶接熱影響部を硬化させ、溶接低温割れを起こしやすくする
モリブデン(Mo)	焼入れ性と強度を高める 高温での強度を高める効果大	溶接熱影響部を硬化させ、溶接低温割れを起こしやすくする
バナジウム(V)	焼入れ性と強度を高める	溶接熱影響部を硬化させ、溶接低温割れを起こしやすくする
ニオブ(Nb)	圧延時に結晶組織を微細化して強度と衝撃特性を高める	多量の添加により、溶接熱影響部を硬化させ、熱影響部の衝撃特性を悪化させる場合がある
チタン(Ti)	鋼中に TiN を形成して溶接熱影響部の衝撃特性を改善する	多量の添加により衝撃特性を劣化させる
ボロン(Bo)	0.001%程度の極微量で鋼の焼入れ性を高める	多量の添加により溶接割れ等が起こりやすくなる
カルシウム(Ca)	鋼中の S と結びついて CaS を形成し、S 系非金属介在物を球状化する	
アルミ(Al)	窒化アルミ(AlN)を形成し、鋼の組織を微細化して衝撃特性を高める	多量の添加により伸び特性を劣化させる
酸素(O)		鋼中で酸化物系非金属介在物を形成する
窒素(N)	窒化アルミ(AlN)を形成し、鋼の組織を微細化して衝撃特性を高める	添加量が多いと衝撃特性が悪化する。とくにひずみ時効硬化による衝撃特性の劣化を大きくする
水素(H)		鋼中の欠陥あるいはその周囲に集まり、水素割れあるいは水素脆化を起こす。また溶接時には溶接低温割れを起こす

表 3.3 高性能鋼（橋梁向け）の例<sup>1)</sup>

強度に関する高性能鋼	
名称	概要
高強度鋼	引張強さが 700N/mm <sup>2</sup> ,800N/mm <sup>2</sup> ,1000N/mm <sup>2</sup> 級の鋼板
降伏点一定鋼	板厚にかかわらず一定の保証降伏点を有する鋼材(板厚 40mm 以上)
狭降伏点レンジ鋼	降伏点の下限と上限を規定した鋼材
低降伏比鋼	600N/mm <sup>2</sup> ~800N/mm <sup>2</sup> の鋼材において、通常よりも降伏点を低く抑えた鋼材
極軟鋼	降伏点が低く、伸び性能に優れる鋼材
極厚鋼板	道路橋示方書の規定を超える板厚範囲において強度・じん性の優れた鋼板
じん性、溶接性に関する高性能鋼	
名称	概要
高じん性鋼	より小さな曲げ半径での冷間加工や寒冷地などの低温地域での使用が可能な鋼材
予熱低減鋼	溶接施工時の予熱温度の低減が可能な鋼材
大入熱溶接用鋼	溶接時の入熱制限を緩和する鋼材
耐ラメラテア鋼	板厚方向特性に優れた耐ラメラテア性を有する鋼材
耐腐食性、その他に関する高性能鋼	
名称	概要
耐候性鋼	① 従来の耐候性鋼材に比べ、飛来塩分、融雪材散布に強い鋼材 ② 鍍安定化に効果的な表面処理法
海浜・海岸耐候性鋼	従来の耐候性鋼に比べて塩分に強い耐候性鋼材
亜鉛めっき用鋼板	亜鉛めっき時のめっき焼け、めっき割れを抑止する鋼板
ステンレス鋼	Cr を 12%以上含み、耐食性に優れる鋼材
クラッド鋼	鋼にチタン、ステンレスなどの異種金属を層状に接合したもの
LP 鋼板	圧延方向に板厚が連続的に変化する鋼板
制振鋼板	2 枚の鋼板の間に粘弾性樹脂を挟み、振動の減衰性を高めた鋼板
橋梁用高強度ワイヤ	吊橋のケーブルに使用される高強度のワイヤ

### 3.1.1 高強度鋼<sup>3),4)</sup>

現在まで汎用的に用いられてきた鋼材よりも引張強さの大きいものは高強度鋼と呼ばれる。JIS 等では引張り強さが 500N/mm<sup>2</sup> 級以上の鋼材を高強度鋼として区分している。しかし、わが国においては引張り強さが 500N/mm<sup>2</sup> 級、600N/mm<sup>2</sup> 級の鋼材は日常的に使用されており、今日の実態から考えると、700N/mm<sup>2</sup> 級以上の鋼材がそれにあたると考えてよいだろう。

本四架橋に代表されるような構造物の大型化の過程においては、材料の高強度化が大きな課題であった。材料の高強度化によって、鋼構造物は全体に薄肉化、軽量化が可能となり、そのことがまた構造物のさらなる大型化を可能にしてきたといえる。その反面、薄肉化が剛性の低下や軽量化を招き、座屈、たわみ、振動、疲労など、構造物の使用性や寿命に関わる問題が生じるようになってきた。また、冶金的には、図 3.2 のように鋼材は強度が大きくなるほど降伏比が大きく、かつ伸びが小さくなる傾向にある。このような高強度鋼の性能をどのように評価し、高強度化に伴うデメリットを克服して性能を確保するのが高強度鋼利用の上での大きな課題であった。

わが国の土木分野において引張り強さが 700N/mm<sup>2</sup>、800N/mm<sup>2</sup> 級の鋼材が初めて本格的に使用されたのは阪神高速道路公団の港大橋（1974 年完成:ゲルバートラス橋）であるが、700N/mm<sup>2</sup>、800N/mm<sup>2</sup> 級の鋼材の使用にあたっては、様々な観点から材料の安全性に関する検討が加えられている。港大橋での高強度鋼に関する検討フローを図 3.3 に示す。

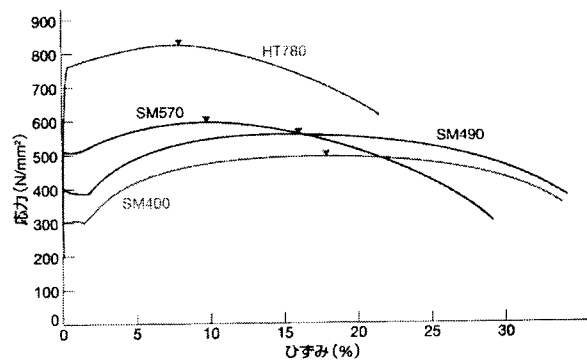


図 3.2 代表的鋼種の応力—ひずみ曲線



図 3.3 港大橋での高強度鋼に関する検討フロー

その後、港大橋での検討結果を参考に、道路橋示方書の考え方を基本として本州四国連絡橋公団規格 (HBS) で 700N/mm<sup>2</sup>, 800N/mm<sup>2</sup> 級の鋼板の許容応力度が決められている。そのうち、強度面の評価の考え方として、以下が示されている。

HT70 (700N/mm<sup>2</sup> 級鋼板) および HT80 (800N/mm<sup>2</sup> 級鋼板) に対する許容応力度は、道路橋示方書における許容応力度の設定の考え方にならって次のように定めた。

(中略)

58 キロ鋼以上の降伏比の高い鋼種に対しては降伏比に応じてその安全率を大きくとることが従来より考えられている、58 キロ鋼では降伏点で約 1.8 の安全率、引張り強さに対し約 2.2 の安全率がとられている。HT70 および HT80 についても、それと同様の考えからそれぞれの引張り強さに対し約 2.2(=1.7\*1.3)の安全率をとることとし、…

すなわち、高強度鋼についても、現在までに使用されてきた鋼材と同等の安全率が得られるように、許容応力度が決定されていることがわかる。各鋼種の許容軸方向引張応力度を表 3.4 に示す。表 3.4 より、道路橋における鋼材の許容軸方向引張応力度は、降伏及び引張り強さに対して、一定の安全率を確保するため、①降伏点/1.7、あるいは②引張り強さ/2.2、のいずれかで決定されていることがわかる。しかしながら、構造物の設計において、鋼材の活用が弾性域に止まり、供用期間中における最大荷重が設計荷重に比べてそれほど大きくない (降伏比の逆数以内) ような場合は、鋼材の強度は降伏点を基準とし、高強度鋼をもっと合理的に使用できる余地があるのではないかと考えられる。

北田ら<sup>6,7)</sup>は、普通鋼 (400N/mm<sup>2</sup> 級鋼) と高張力鋼 (800N/mm<sup>2</sup> 級鋼) で溶接等の製作時の残留応力に違いがあることに着目し、構造部材の初期不整を考慮した座屈強度を解析により検討している。対象としたのは自由突出板、補剛板、周辺単純支持板および補剛箱断面、無補剛箱断面であるが、検討の結果はいずれも高張力鋼を用いた場合の圧縮耐荷力曲線は普通鋼を用いた場合よりも上側に位置し、道路橋示方書に準拠した座屈耐荷力曲線よりも強度が高いことが確認されている。また、降伏棚を有しないことから、降伏強度を確保できる幅厚比の小さい範囲において、普通鋼に比べて強度上昇が大きいことが報告されている。そして、これらの結果から、合理的な座屈強度曲線を提案し、高張力鋼からなる圧縮部材の安全率は普通鋼と同じく 1.7 とするのが合理的であるとの結論を導いている。

表 3.4 許容軸方向引張応力度 (単位:N/mm<sup>2</sup>)

鋼種	降伏点 $\sigma_y$	引張り強さ $\sigma_B$	降伏比	$\sigma_y/1.7$	$\sigma_B/2.2$	許容応力度 $\sigma_{ta}$	$\sigma_y/\sigma_{ta}$	$\sigma_B/\sigma_{ta}$
SS400 SM400	235	400	0.585	138.2	181.8	135	1.74	2.96
SM490	315	490	0.640	185.3	222.7	185	1.70	2.65
SM490Y	355	490	0.720	208.8	222.7	205	1.73	2.39
SM570	450	570	0.793	264.7	259.1	255	1.76	2.24
HT690	590	690	0.857	347.1	313.6	315	1.87	2.19
HT780	685	780	0.875	402.9	354.5	355	1.93	2.20

橋梁分野以外に目を転じれば、より高強度の鋼材の使用例もある。高張力鋼の利用分野としては、水圧鉄管におけるペンストックの分岐管部分が挙げられる。この分野ではすでに HT780 クラスまで適用実績があり、更なる合理化に向けて HT950 が実用化され、ペンストックの分岐管などに適用することを念頭に起き、鋼材の開発、溶接仕様の検討<sup>8)</sup>などが行われている。

### 3.1.2 降伏点一定鋼

JIS等の基準では鋼材の保証降伏点は板厚が大きくなるほど低下している。これは、板厚によって圧延時の鋼材内部の冷え方が異なるため、圧延終了時の温度が一定とならないためであり、一般に板厚が厚くなるほど降伏点は低下する。降伏点一定鋼とは、図3.4に示すように、保証降伏点を板厚にかかわらず一定としたものである。

許容応力度設計の場合、強度の基準となるのは降伏点であり、降伏点が高く取れば板厚が削減でき、設計上有利である。

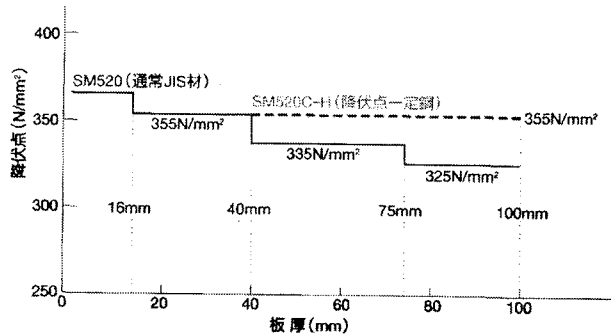


図3.4 降伏点一定鋼の例 (SM520) <sup>1)</sup>

### 3.1.3 高じん性鋼

鋼材の破壊じん性の評価指標には様々なものがあるが、通常、高じん性鋼とは、シャルピー衝撃吸収試験値の高い鋼材のことを指す。

鋼材のシャルピー吸収エネルギーは、図3.5に示すように、温度に依存し、温度が低くなるほど吸収エネルギーは小さくなっていく傾向が有る。破壊じん性の要求の規定方法には図中に示すように2つの方法がある。1つは設計上の最低使用温度で一定の吸収エネルギーを規定する方法、もう一つは要求する吸収エネルギーを一定とし、それを確かめる試験温度を与える方式である。

SM材では、試験温度 (SM400,490,490Yは0℃, SM570は5℃)を規定し、一定の要求エネルギー (27Jまたは47J)を規定する方法を採っている。もし、構造物が寒冷地などに建設され、使用温度がこれらを下回る場合は、低温でも必要なじん性が確保できる鋼材を使用しなければならない。

一方、冷間曲げ加工を行い、塑性ひずみの生じた部分の鋼材はじん性が低下する問題がある。図3.6は、道路橋示方書に示されている普通鋼材のひずみ時効試験の結果である。この結果によると、鋼材の吸収エネルギーは3%の予ひずみを与えただけでも相当低下するため、冷間曲げ加工を行う場合の許容値を、表面ひずみが約3%となる、内側の曲げ半径が板厚の15倍 (15t)以上とするように規定している。

しかしながら、最近では、シャルピー衝撃特性に優れた鋼材が製造されており、シャルピー衝撃特性に一定の条件が付加された場合に冷間曲げ加工が板厚の7倍または5倍以上にまで緩和されている<sup>9)</sup>。図3.7は、道路橋示方書に示されている、シャルピー吸収エネルギーが150J以上の鋼材のひずみ時効試験結果である。

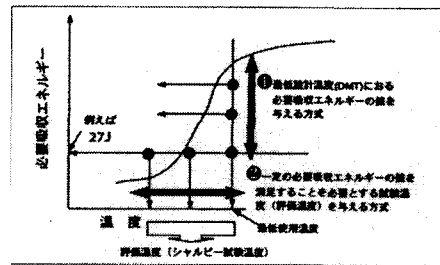


図3.5 シャルピー吸収エネルギーの考え方

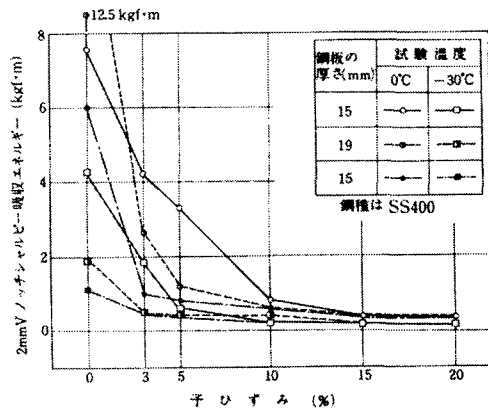


図3.6 ひずみ時効試験結果<sup>5)</sup>  
(250℃ 1時間時効処理)

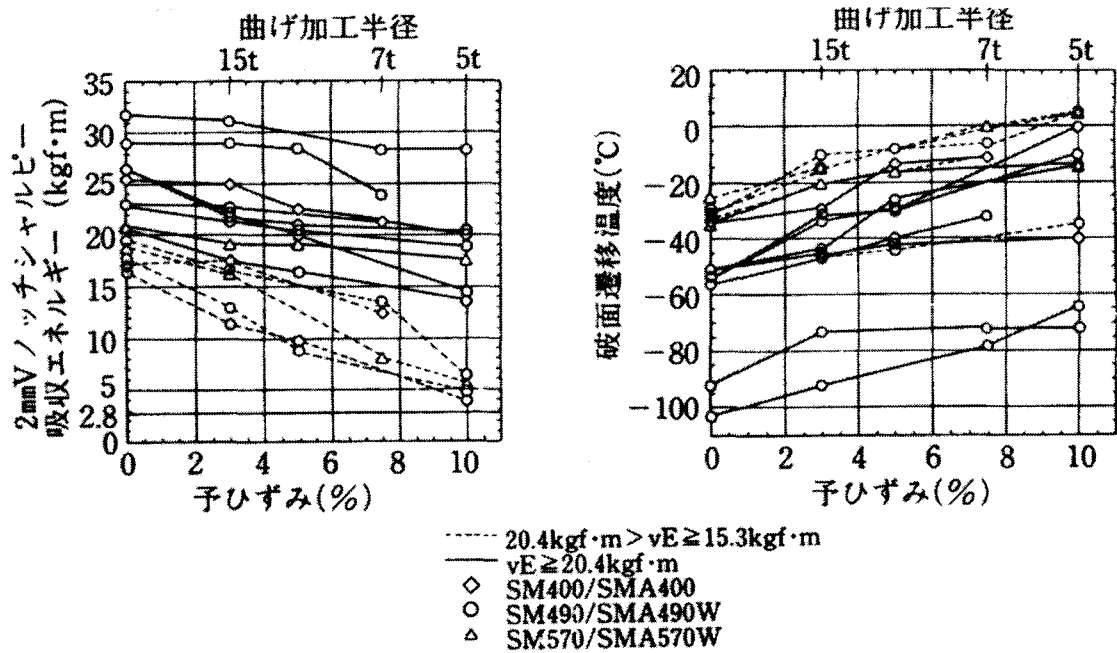


図 3.7 シャルピー吸収エネルギーが 150J 以上の鋼材のひずみ時効試験結果<sup>5)</sup>

ここでは、曲げ加工半径の許容値を決める目安として、曲げ加工半径に相当する予ひずみを与えた鋼材について、

- 1) シャルピー吸収エネルギーが 27J 以上であること
- 2) 破面遷移温度が 0°C 以下であること

を満足することを条件としている。また、鋼材中の多量の窒素がひずみ時効によるぜい化に影響を与えることから、窒素量を 0.006% 以下に制限している。

寒冷地における更に厳しい冷間曲げ加工した部材のじん性について検討した例<sup>10)</sup>を紹介する。本検討例は、角部の曲げ半径  $R=2.5t$  の角型鋼管を寒冷地で橋梁部材に使用することを念頭において検討したものである。鋼材はじん性の良好な TMCP 鋼 (シャルピー値 311J (0°C)) を用いて試験を行っている。図 3.8 は、試験の条件を示す。内側曲げ半径 2.5t では、表面のひずみが 17% となるため、曲

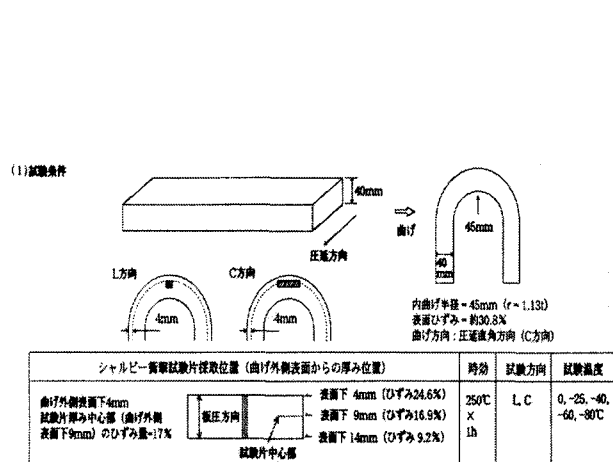


図 3.8 試験条件<sup>10)</sup>

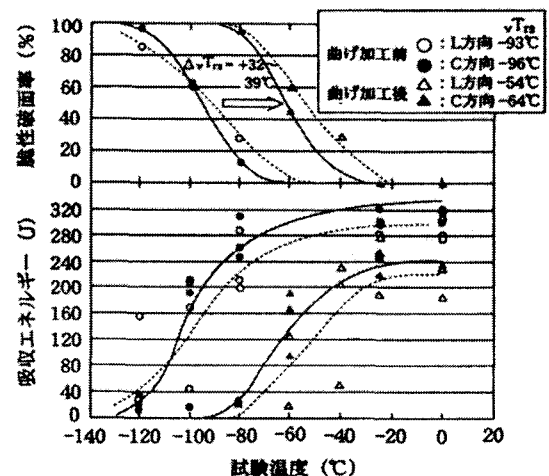


図 3.9 試験温度と吸収エネルギー、脆性破面率の関係<sup>10)</sup>



げ加工した鋼板から板厚中心の予ひずみが 17%となるように試験片を切出し、試験温度を変化させてシャルピー吸収エネルギー、脆性破面率を調査した。図 3.9 は、試験の結果得られた試験温度とシャルピー吸収エネルギー、脆性破面率の関係を示したものである。曲げ加工によってシャルピー吸収エネルギー、脆性破面率がともに右側へシフトし、同一温度で評価した場合、じん性が低下していることがわかる。また、脆性破面率が 50%の時の温度を表わす破面遷移温度は、曲げ半径 2.5t 相当の塑性ひずみ加工によって 32~39°C 上昇した。

これらのことから、冷間曲げ加工した鋼材のじん性を評価する際の一つ方法としては、最低使用温度を設定し、曲げ加工によって破面遷移温度が上昇すること（上記の場合は約 40°C）を考慮して、評価温度をその分だけ低く設定し、その温度において、①曲げ加工後のシャルピー吸収エネルギーが 27J 以上、②曲げ加工後の脆性破面率が 50%以上を満足するように鋼材の仕様を決めることになる。

### 3.1.4 大入熱溶接用鋼<sup>11)</sup>

溶接の入熱によって、鋼材の溶接部周辺に熱影響部（HAZ:Heat Affected Zone）が形成される。一般に入熱量が増加するほど HAZ 部のじん性は低下する。このため、鋼構造物の溶接施工においては、鋼材熱影響部のじん性劣化を防止する目的で入熱量の制限が行われている。例えば、道路橋の基準である道路橋示方書では、調質鋼（SM570Q）の溶接入熱量を 70,000J/cm に制限している。

大入熱溶接用鋼とは、溶接時に従来の入熱量制限を超える入熱量が加わる大入熱溶接法を適用しても、優れた溶接品質を確保できる鋼材のことを言う。入熱量の制限が緩和できることによって、高能率の溶接法が適用可能となり、溶接の能率が向上する。

近年では、現場溶接における施工能率の向上の一環として、大入熱溶接が適用される例がある。その代表的なものは、少数主桁橋梁における鋼 I 桁ウェブの突き合わせ溶接にエレクトロガス溶接（EGW）が採用された例である。少数主桁橋の場合、ウェブの板厚が 25~30mm 程度となるが、この溶接に用いられる EGW の入熱量は 150~200kJ/cm 程度になる。図 3.10 に、大入熱溶接を行った場合の鋼材溶接部のシャルピー吸収エネルギーと炭素当量（Ceq）との関係を模式的に示す。道路橋示方書では、溶接継手の強度、じん性も母材の規格値を確保することが要求されているが、一般の鋼材を用いて大入熱溶接を行うと、図 3.10 のように HAZ 部でのじん性低下が大きく、要求性能を満足できない場合がある。

大入熱溶接用鋼は、P、S 等の不純物の低減と低炭素当量化（あるいは低 P<sub>CM</sub> 化）を行い、これに加えて、結晶粒の粗大化を防止策を行い、微細な HAZ 組織を得ることによってじん性の確保を行っている。

文献 12)では、通常鋼材と高性能鋼材（TMCP 鋼）の 2 種類の鋼材に対し、入熱量を変化させた試験を実施し、通常鋼材では 70,000J/cm を超えるような大入熱の溶接では必要な性能が確保できないが、高性能鋼材を用いること

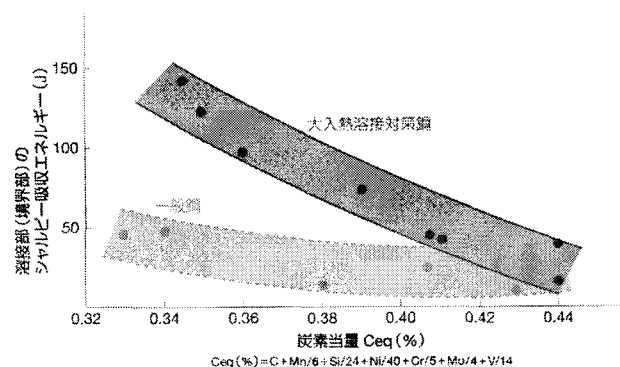


図 3.10 大入熱溶接による HAZ 部じん性のイメージ<sup>11)</sup>

で、120~150kJ/cm 程度のエレクトロガス溶接を適用しても、要求性能を満足できることが示されて

いる。

### 3.1.5 予熱低減鋼

鋼材を溶接する場合、一般に鋼材の合金元素量が多いほど、また、板厚が厚いほど溶接割れが生じやすくなるため、予熱が必要になる。しかし、高温の予熱作業は施工管理に各種の制約があるため、製作の省力化のためには、予熱温度の低減、省略が求められることになる。

道路橋示方書では、予熱温度の目安を、過去の研究成果<sup>13)</sup>をもとに、鋼材の溶接割れ感受性組成(成分パラメータ)  $P_{CM}$  と板厚に依存する拘束度、溶接により溶接部に進入する水素量をパラメータとして、以下の式で与えている。

$$\text{予熱温度算定式 } T_p(^{\circ}\text{C})=1440P_w-392$$

$$P_w=P_{CM}+(H_{GL}/60)+(K/400,000)$$

$P_{CM}$ :溶接割れ感受性組成

$$(P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B \quad (\%))$$

$H_{GL}$ :溶接金属の拡散性水素量

$K$ :溶接継手の拘束度

$$(K=200t \text{ N/mm}\cdot\text{mm} : t=\text{板厚, ただし, } t>50\text{mm のときは } t=50)$$

この式からわかるように、鋼材の板厚が大きくなるほど、合金元素が多くなるほど、予熱温度は上昇することがわかる。逆に、予熱温度の低減を図るには、成分パラメータである  $P_{CM}$  を低く抑えればよいことがわかる。

予熱低減鋼は、TMCP 技術などを用い、必要な強度を確保しつつ、鋼材中に含まれる合金元素の量を低くし、溶接割れ感受性組成 ( $P_{CM}$ ) を低くした鋼材で溶接時の予熱温度の低減が可能となる。明石海峡大橋では、予熱低減型の HT780 が適用され、予熱温度の大幅な低減がなされている。

ただし、実際の溶接作業において優れた耐割れ性能を得るためには、母材のみならず溶接金属の耐割れ性も十分なものでなくてはならない点に注意が必要である。文献 11)では、市販の溶接材料を用いた予熱低減型 SM570-TMC の溶接割れ試験結果を紹介しているが、市中の溶接材料を用いた場合でも、材料を適正に選択し、溶接条件の適正化をはかれば予熱温度の低減が可能であることが示されている。

### 3.1.6 LP 鋼板

LP (Longitudinally Profiled) 鋼板とは、板厚が長手方向に連続して変化する鋼板である。製鉄所での厚板の圧延工程において、圧延ローラの間隔を制御することにより、等厚以外の形状が製造できるようになった。ただし、製造可能寸法は圧延設備の能力に制限され、国内メーカーでは 1mあたりの最大板厚差は 4~5mm 程度となっている。これに対し、LP 鋼板の先進国である欧州のメーカーでは 8mm/m程度のもので製造されている<sup>14)</sup>。

日本国内での LP 鋼板の形状の例を図 3.11 に示す。

LP 鋼板では、板厚が連続的に変化するため、応力が急変する部分で使用すれば、板厚の削減、板厚変化点の板継溶接の削減などによって経済化に効果がある。中間支点付近の応力が急変する部分、斜張橋の主塔基部などに用いられた実績がある。文献 15)では、LP 鋼板を使用した橋梁の実績調査を行い、試設計を行った上で、どのような部位に LP 鋼板を用いればよいのかを提言している。

試算結果によれば、I 桁に適用する場合、図 3.12 に示すように、正負の応力が交番する部分、および断面力が急変する中間支点部に適用すれば、大きなメリットが得られるとしている。ただし、中間支点部では、フランジ幅圧比の制限より許容応力度の低減を受ける場合があるので、その場合にはフランジ幅を狭くして対処する必要があるとの注意がなされている。

形状種別コード	形状	板厚の大小関係	寸法の表示法 (W: 鋼板幅)
LP1		$(T_1 > T_2)$	$T_1/T_2 \times W \times L$
LP2		$(T_1 > T_2)$	$T_1/T_2 \times W \times L_1/L_2/L_3$
LP3		$(T_2 > T_1 \geq T_3)$	$T_1/T_2/T_3 \times W \times L_1/L_2/L_3$
LP4		$(T_2 > T_1 \geq T_3)$	$T_1/T_2/T_3 \times W \times L_1/L_2/L_3/L_4$
LP5		$(T_1 \geq T_2 > T_3)$	$T_1/T_2/T_3 \times W \times L_1/L_2/L_3$
LP6		$(T_1 \geq T_2 > T_3)$	$T_1/T_2/T_3 \times W \times L_1/L_2/L_3/L_4/L_5$

LP 鋼板の種類と寸法表示

製造可能寸法の概略

最大板厚差	25~30mm	テーパ量、形状に依存
最大テーパ勾配	0.004m/m程度	
最小板厚(薄部) LP1&2	10mm	板厚差、テーパ量に依存
LP3&4	15mm	
LP5&6	20mm	
最大板厚(厚部)	100mm	
最大全長長さ	10~25m	テーパ量に依存
最小全長長さ	6m	
製品幅	1~3.5m	板厚差、テーパ量に依存

図 3.11 LP 鋼板の形状・寸法<sup>15)</sup>

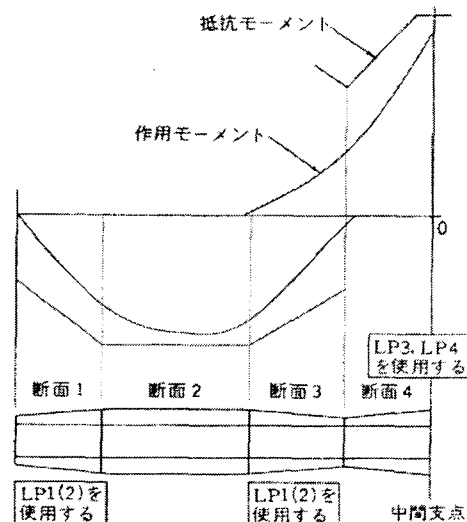


図 3.12 LP 鋼板を使用した I 桁の断面構成例<sup>15)</sup>

### 3.1.7 制振鋼板

制振鋼板とは、図 3.13 に示すように、2枚の鋼板の間に粘弾性樹脂をサンドイッチした鋼板である。鋼板の曲げ振動に伴う樹脂のせん断変形によって振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、振動の減衰効果が得られる。静粛性が求められる洗濯機、自動車のオイルパンなどに用いられているが、鉄道橋の騒音を低減するために用いられた例が有る。

図 3.14 は、模型試験線での騒音の測定例<sup>16)</sup>を示したものである。制振鋼板を腹板に使用することによって、3dB 程度の騒音低減効果が得られていることがわかる。

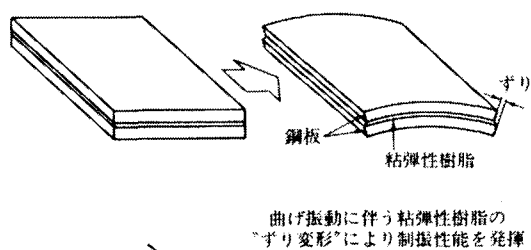


図 3.13 制振鋼板<sup>1)</sup>

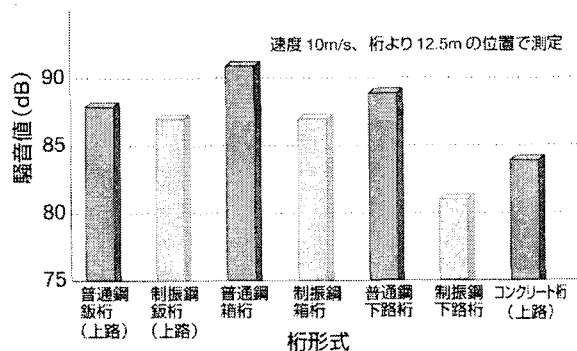


図 3.14 模型実験線での騒音測定結果<sup>16)</sup>

### 3.1.8 その他

以上に示したように、高性能鋼を単独で用いるだけでなく、異種の鋼材を組み合わせることによって、新しい効果を引き出すことも考えられる。

奈良ら<sup>17)</sup>は、ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線が軟鋼のそれとは異なること、縦補剛材の鋼材特性が圧縮補剛板の極限強度、変形性能およびエネルギー吸収能に大きな影響を与える点に着目し、ステンレス鋼を補剛材に利用することにより、補剛板の終局強度を向上させる試みを検討している。検討の結果、明確な降伏点を持たないラウンド型の応力-ひずみ関係を有する SUS304 のような鋼材を縦補剛材に用いると、幅厚比パラメータ  $R$  が 0.3 程度に小さく、かつ補剛材剛比  $\gamma/\gamma^*$  を 3 より大きくすることで、極限強度の上昇を抑え、変形性能およびエネルギー吸収能を大きく向上させることができるという結論を得ている。

## 3.2 他分野の動向

### 3.2.1 建築分野

建築分野では、土木分野と同様、近年まで SS400 材と SM490 材が構造用鋼材として主として用いられてきた。しかしながら、耐震設計基準の改正、不良鉄骨問題などが契機となって、建築分野で使用される鋼材に関する要求性能の見直しが行われた。

建築構造用の鋼材としての要求性能を以下のように定めている。

- (1)溶接性の保持
- (2)塑性変形能力の保持
- (3)板厚方向の集中引張力に対する性能の保持
- (4)公称断面の保持
- (5)強度が優先されるものと剛性が優先される使い勝手に対し明確な選択ができるものにする

規格としての具体的な数値を設定するにあたり、鋼材の降伏比が変形性能に与える影響<sup>10)</sup>、などが検討され、これらの成果をもとに、建築に特化した性能を有する鋼材として、

#### JIS G 3136 建築構造用圧延鋼材 (SN 鋼)

が制定された。この規格では、鋼材の使用部位により種類を A、B、C の 3 種類に区分している。

A 種：二次部材やトラスのように弾性範囲で使用し、溶接を行わない部材を主用途とする鋼種

B 種：塑性変形性能と溶接性の確保を意図したものであり、耐震上重要な構造部材を主用途とする鋼種

C 種：B 種の性能の上に板厚方向の特性を絞り値で規定するとともに、UT 検査が実施される。ボックス柱のスキンプレート等板厚方向の性能を重視するものを主用途とする。

SN 材と SS, SM 材の機械的性質の比較を表 3.5 に示す。B 種、C 種では、耐震性能を確保するため、降伏比の上限が規定され、溶接性を確保するために、化学成分が厳しく、シャルピー値が規定されている。また、C 種では、板厚方向の特性を保証するために、Z 方向（板厚方向）の絞り値と UT 検査が規定されている。

また、JIS に規定されている強度クラスは 400N/mm<sup>2</sup> 級、490N/mm<sup>2</sup> 級の 2 種類のみであるが、高層建築、超高層建築への適用を目指して、降伏比を制限した低降伏比高張力鋼として 570N/mm<sup>2</sup> 級鋼

(SA440) が鋼材倶楽部規格<sup>19)</sup>として制定されている。SA440 の機械的性質に関する規格を表 3.6 に示す。また、さらなる高強度化を目指して、降伏比を低くし、伸び性能を改善した 780N/mm<sup>2</sup> 級鋼についても検討が行われている<sup>20)</sup>。

表 3.5 SN 鋼と SM 鋼の比較<sup>2)</sup>

区分	JIS 規格	種類の 記号	厚さ mm 下限/ 上限	降伏点または耐力 N/mm <sup>2</sup> 下限/上限					引張強さ N/mm <sup>2</sup> 下限/ 上限	降伏比 % 上限				伸び % 下限			シャルピー 試験 吸収 エネルギー J 下限 [0℃]	Z 方向 引張 試験 絞り %		超音波 探傷 試験	
				厚さ 6mm 以上 12mm 未満	厚さ 12mm 以上 16mm 未満	厚さ 16mm	厚さ 16mm 超 40mm 以下	厚さ 40mm 超 100mm 以下		厚さ 6mm 以上 12mm 未満	厚さ 12mm 以上 16mm 未満	厚さ 16mm	厚さ 16mm 超	厚さ 6mm 以上 16mm 以下	厚さ 16mm 超 50mm 以下	厚さ 40mm 以下		3個の 平均値	個々の 試験値		
				1A号	1A号	4号															
400H	G 3101	SS400	—	245/					235/	215/	400/510	—	—	—	—	17	21	23	—	—	—
	G 3106	SM400A	/100	245/					235/	215/	400/510	—	—	—	—	18	22	24	—	—	適用 <sup>4)</sup>
		SM400B	/100	245/					235/	215/	400/510	—	—	—	—	18	22	24	27 <sup>3)</sup>	—	適用 <sup>4)</sup>
	鉄鋼	G 3136	SN400A	6/100	235/					215/	400/510	—	—	—	—	17	21	23	—	—	—
SN400B			6/100	235/	235/355 <sup>1)</sup>		235/355	215/335	400/510	—	80 <sup>2)</sup>	80 <sup>2)</sup>	80	18	22	24	27 <sup>3)</sup>	—	—	適用 <sup>4)</sup>	
SN400C			16/100	/	/	235/355 <sup>1)</sup>		235/355	215/335	400/510	/	/	80 <sup>2)</sup>	80	18	22	24	27 <sup>3)</sup>	25	15	適用 <sup>4)</sup>
490H	G 3106	SM490A	/100	325/					315/	295/	490/610	—	—	—	—	17	21	23	—	—	適用 <sup>4)</sup>
		SM490B	/100	325/					315/	295/	490/610	—	—	—	—	17	21	23	27 <sup>3)</sup>	—	適用 <sup>4)</sup>
	鉄鋼	G 3136	SN490B	6/100	325/	325/445 <sup>1)</sup>		325/445	295/415	490/610	—	80 <sup>2)</sup>	80 <sup>2)</sup>	80	17	21	23	27 <sup>3)</sup>	—	—	適用 <sup>4)</sup>
SN490C			16/100	/	/	325/445 <sup>1)</sup>		325/445	295/415	490/610	/	/	80 <sup>2)</sup>	80	17	21	23	27 <sup>3)</sup>	25	15	適用 <sup>4)</sup>

1) ウェブ厚が9mm以下のH形鋼は、降伏点または耐力の上限は適用しない。

2) ウェブ厚が9mm以下のH形鋼は、降伏比の上限を85%とする。

3) 厚さ12mmを超える鋼材に適用し、3個の試験片の平均値とする。

4) 厚さ13mm以上の鋼板、平鋼にオプションで適用する。

5) 鋼板、平鋼に適用する。

表 3.6 SA440 の機械的性質の規格<sup>16)</sup>

種類	板厚 t(mm)	引張試験*				シャルピー吸収エ ネルギー* (J)	厚さ方向 絞り* (%)
		降伏耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	降伏比 %	伸び (試験片) %		
SA440B	19 以上	440 以上	590 以上	80 以下	20 以上 (4号)	47 以上	—
SA440C	100 以下	540 以下	740 以下		26 以上 (5号)		25 以上

注記 \*降伏耐力は、降伏点または0.2%オフセット耐力とする

\*\*衝撃試験は0℃、L方向-t/4とする。

\*\*\*厚さ方向の絞り特性試験は、3個行い、個々の試験値が15%以上、かつ、3個の試験値の平均が25%以上を合格とする。

備考 1)C材は、JIS G 0901 による超音波探傷試験を実施し等級Yに合格するものとする。

### 3.2.2 米国における「High Performance Steel」の開発<sup>22)-25)</sup>

米国では、橋梁の設計において高強度鋼を用いれば合理化が可能であるとの研究成果があり、高強度鋼として 485W (保証降伏点 485N/mm<sup>2</sup>)が規格化されていたが、低強度の鋼材に比べて溶接の管理が煩雑であるなどの理由から高強度化のメリットがなく、あまり使用されていなかった。しかしながら、1990年代より、産・官・学が連携した開発プロジェクトとして「High Performance Steel」の開発が開始され、最近その成果が盛んに報告されている。開発された鋼材そのものの性能は日本の鋼材と大きく異なるものではないが、コスト削減などを盛り込んだ実プロジェクトへの適用を意識した、一連の開発プロジェクトの取り組みは参考になる。したがってここでは、米国における High Performance Steel の開発状況について調査した結果を報告する。

#### (1) 開発の目的

1990年頃から従来の橋梁用鋼材より優れた性能を有する High Performance Steel (HPS) とそれを活用した新たな橋梁設計を組み合わせるプロジェクトが、3者(米国連邦道路局 (FHWA), 米国鉄鋼協会 (AISC), 米国海軍 (U.S.Navy)) の共同研究によって発足し、近年、実橋への適用成果が多数報告されるようになってきている。

米国での HPS とは、「コストを低く抑えながら、強度、溶接性、じん性、耐候性、成形性などの性能を橋梁構造において、最適のバランスで、最大限発揮できる鋼材」と定義されている。HPS の開発においては、強度、耐候性などは従来鋼材と同等にして、溶接性とじん性の改善を検討している。

共同研究にあたっての、鋼材への主要な性能目標として、以下の項目が挙げられた。

- ・断面の軽量化を実現する、比較的安価な高強度鋼材 (輸送、架設に有利であり、より大きな荷重に耐えられるというメリットがある)
- ・予熱の低減、省略による溶接コストの低減 (作業環境の向上も期待できる)
- ・作用荷重やぜい性破壊に対するより高いじん性 (破壊じん性, 変形能)

その他、より長さの長い鋼板 (桁の製作長さを長くできる、突き合わせ溶接の数が減らせる : 米国では QT 設備の関係から長さが 50ft 以下に制限される), 切断面が良好であること, 耐候性, 冷間成形性, 現場接合の精度を上げるための寸法精度, 補修性などが求められた。

#### (2) 鋼種の設定

既存の鋼種をベースに、以下に示す2種類の鋼材の「高性能化」により高性能鋼の開発を進めることが決定された。

- ①HPS70W : 厚さが4インチ (約 100mm) までの保証降伏点が 70ksi (約 485MPa) の鋼材
- ②HPS100W : 厚さが2インチ (約 50mm) までの保証降伏点が 100ksi (約 690MPa) の鋼材

また、じん性の確保も重要であるとし、最低限の目標として、AASHTO の中でもっとも厳しい Zone3 の要求 (シャルピーVノッチ試験で-10°

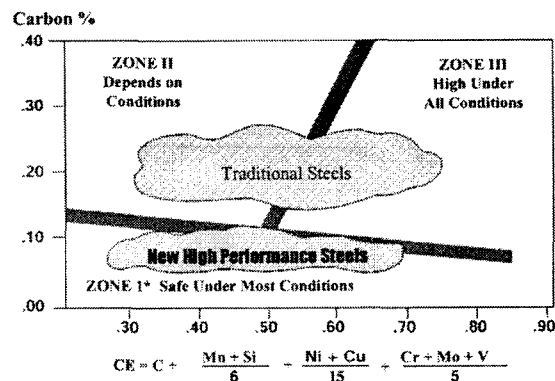


図 3.15 HPS の成分系イメージ図

F(-23.4℃), 30ft-lb(約 40.6J)) を満足するようにすることが決定された。

さらに、維持管理コストの低減という観点から、耐候性鋼とすることが決定された。

### (3) 鋼材の試作・試験

#### a) 鋼材の製作

製造プロセス (TMCP), 合金成分の両面から、様々な組み合わせが検討され、最適な組み合わせが選定されている。結局は既存の QT 鋼の成分改良であったが、最大の違いは炭素量が大幅に低減されていることである。また、じん性の改善の目的で硫黄(S)の含有量を 0.006%に抑えている。

HPS の成分系のイメージを図 3.15 に示す。炭素量を大幅に低減することで良好な溶接性と耐衝撃特性が得られている。また、HPS の化学成分の規定を表 3.7 に、また、機械的性質の比較を表 3.8 に示す。表 3.7, 表 3.8 には、日本の鋼材 (SM570, HT80) の規格値も示した。両者を比較すると、降伏点、化学成分等に若干の相違があり、完全に一致している訳ではないが、大きな違いは見られない。文献 11)によると、わが国における SM570, HT80 の製造実績では HPS の規格を十分に満たすものであり、わが国の鋼材と大きく異なるものではないとの指摘がなされている。

表 3.7 HPS と既存鋼の成分系の比較

	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	
A709-485W (旧)	0.19 max	0.80-1 .35	0.035 max	0.04 max	0.25-0 .65	0.20-0 .40	0.50 max	0.40-0 .70	—	0.02-0 .10	
HPS-70W	0.11 max	1.10-1 .35	0.020 max	0.006 max	0.30-0 .50	0.25-0 .40	0.25-0 .40	0.45-0 .70	0.02-0 .08	0.04-0 .08	Al:0.01-0.04 N:0.015max
SMA570W	0.18 max	1.40 max	0.035 max	0.035 max	0.15-0 .65	0.30-0 .50	0.05-0 .30	0.45-0 .75	—	—	
A709-100W (Type-F)	0.10-0 .20	0.60-1 .00	0.035 max	0.035 max	0.15-0 .35	0.15-0 .50	0.70-1 .00	0.40-0 .65	0.40-0 .60	0.03-0 .08	B: 0.005-0.006
HPS100W 候補 1	0.11	0.85	0.015	0.003	0.30	0.33	0.85	0.54	0.46	0.04	
HPS100W 候補 2	0.060	0.99	0.005	0.002	0.27	0.98	0.75	0.51	0.50	0.059	
HBS HT80	0.14 max	0.60-0 .15	0.015 max	0.015 max	0.15-0 .55	—	—	—	—	—	

表 3.8 機械的性質の比較

規格	板厚(mm)	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	vE(平均値)
HPS70W	≤65(Max.100)	≥485	585-760	≥19	≥30J at -23℃ <sup>1)</sup>
A709-100W	≤65(Max.100)	≥690	760-895	≥18	≥35J at -34℃ <sup>1)</sup>
SMA570W	40-75(Max.100)	≥450 <sup>2)</sup>	570-720	≥20	≥47J at -5℃
HBS-HT80	≤50(Max.75)	≥685	780-930	≥16	≥47J at -40℃

注) 1)A709 Zone3 の値 2)降伏点一定鋼仕様

#### b) 溶接試験

試作した鋼板を用いて、各種の溶接試験を実施し、その性能を確認している。

- Gapped Bead on Plate (主として溶接金属の割れに関する試験)
- y 開先溶接割れ試験 (主として HAZ 部と溶接金属の割れに関する試験)
- インプラント型溶接割れ試験 (HAZ 部の割れ試験)



試験の結果、低水素系の溶接棒を用いて適切に溶接すれば、HPS-70W の 2.5 インチ (63.5mm) の鋼板までは最低限の予熱で溶接でき、それ以上の板厚については従来型の 70W の鋼材より 100° F(約 50℃) 予熱温度を低減できることがわかったと報告されている。

#### c) 疲労・破壊試験

HPS の構造としての性能は一連の実物大桁実験により確かめられている。主な視点はじん性の向上により、疲労・破壊に対してどのような効果が期待できるか（疲労等級の向上など）ということである。また、桁試験により、HPS70W,100W とともに AASHTO のコンパクト断面に適用可能な結果が得られている。

(従来は降伏点 485MPa 以上の鋼材はコンパクト断面に使用できない)

#### d) 耐候性の検討

ASTM G101 の式 (ウェザリングインデックスと呼ばれている。成分インデックス。) により評価している。この式によると、HPS の成分系は高い耐候性を有するとの評価になる。

### (4) 橋梁設計における利点、注意点

HPS は、従来よりも高いじん性を有することが大きな特長であり、米国では疲労に対する耐久性の向上に関心が高いようである。例えば、

- ・高いじん性をもつ板は、より大きな疲労亀裂を許容できるか? → 点検、検査の簡易化
- ・構造物のリダンダンシーが高くなるので、2 主桁などは検討できないか (米国では補修の観点から、2 主桁には否定的)

という点が検討されている。

また、HPS をより経済的に使用するために、全部を HPS とするのではなく、連続桁の中間支点付近にのみ使用することが推奨されている。

さらに、HPS の性能をフルに活かすために、コンサルタントに対して HPS をどのように用いれば効果的になるかの構造面での検討が依頼され、色々なアイデアが出されている<sup>25)</sup>。

### (5) 実績

HPS-70W を使った最初の橋は、テネシー州とネブラスカ州に架けられた(1997)。当初はパイロット事業の位置付けで用いられた。初期の主な実績を表 3.9 に示す。

表 3.9 HPS の初期の主な実績 (完成したもの)

Martin Creek Bridge on State Route 53	Jackson County, TN
Snyder-South Bridge	Snyder, NE
Berkshire Thruway over Multzes Kill	Albany, NY
Dodge Street Bridge over Interstate 480	Omaha, NE
Clear Fork River Bridge on State Route 52	Fentress & Morgan Co., TN
Exit 54 Thruway Interchange at Route 400	Rochester, NY

他、2001 年 11 月現在、計画・設計中のもも含め、多数の実績がある。(完成 21 橋、製作・架設中 24 橋、設計・計画中 76 橋)

(実施例) <sup>25)</sup>State Route 53 Bridge over Martin Creek

1997年完成. 2径間連続合成鋼桁(支間72m, 幅員9.2m). インテグラルアバットメントを採用し, 高価でメンテナンス上問題となる伸縮継手を廃止.

HPS70Wの利用により, 従来形式と比べ, 鋼重24%削減, トータルコスト11%削減. 製作費(材工, 架設込み)約311千円/トン(従来約264千円/トン). トンあたりの製作費は高くなるが, 鋼材量が減るため, トータルでは安くなったと報告されている.

#### (6)まとめ

HPS橋梁の開発は, 官・産・学の模範的な協力の賜物であり, 橋梁建設においてより大きな効果を上げることができたとしている(AISIコメント).

これらの開発成果を反映して, HPS70Wは, ASTM規格のA709/A709M<sup>25)</sup>においてHPS70Wとして既に規格化されている. また, 最近ではHPS70Wの成功を受けて, 従来のもよりもじん性, 溶接性に優れる50キロ鋼クラスの鋼材についても開発がなされ, HPS50W(保証降伏点50ksi(345Mpa))として利用が可能になっている。<sup>22)</sup>

今後の課題としては,

- ・鋼材: HPS100Wの完成
- ・溶接: サブマージアーク溶接, ガスシールド溶接以外の溶接(ガスマタルアーク溶接, エレクトロスラグ溶接等)への適用.

HPS100W用の溶接材料の開発

- ・耐候性: ASTM G101の適用性検討
- ・設計: HPSの性能をフルに活かしかれる設計法の開発が挙げられている.

### 3.2.3 JIS 規格の ISO への対応

WTO（世界貿易機構）の TBT 協定（貿易の技術的障壁に関する協定）により、鋼材についても国際調達への対応が迫られる気運にある。

JIS においても、ISO との整合化を図るため、平成 7 年度から 9 年度にかけて整合化の調査、ならびに検討を行っている。JIS では基本的に ISO との整合化を図り、原則的に規格の統一を図る方向で検討しているが、JIS と ISO の規定の間に大きな差があり、両者の整合性を図ることが困難な場合は、ISO の規格を JIS 規格の付属書という形で規定している。例えば、土木分野での代表的な鋼材規格である JIS G 3106 とこれに相当する ISO 630 の比較<sup>26)</sup>を表 3.10 に示すが、両者には基本的な項目に相違があるため、国際規格を JIS 本体の中で整合化することを断念し、付属書に規定することとしたとしている。参考として、表 3.11 に ISO630 の機械的性質を示す。

国際社会にあつては、契約内容が重視され、責任範囲の明確化が必要である。国際調達にあたっては、製作性、耐久性などの必要な性能を確保するために、今まで以上に鋼材に要求される性能を明記しなくてはならないと考えられる。従来のように国産の鋼材を用いる限りにおいては、材料は製作性・加工性などの面で規格化されていない部分でも高い性能を有しており、その性能を前提として作り上げられている現状の工場製作、現場架設では特段問題は生じないと予想されるが、もし仮に JIS 規格などに基づいた輸入材を使用する場合には、規格に規定される性能だけで所要の性能が満足できるかどうか、言い換えれば現状のわが国における製作・施工水準であれば本当にどのような性能が材料（鋼材）に要求されるのかを検討しておく必要がある。その意味で、道路橋示方書も海外調達を念頭におき、材料に対して、「保証された性能以外はあてにしてはならない」という方向に改訂されてきており、今後、建設市場の国際化、性能設計の本格化に向けて、橋梁などの土木鋼構造物に使用する鋼材に対する要求性能の明確化は避けられない問題であり、今後の対応が望まれるところである。

表 3.10 JIS G 3106 と対応する国際比較との対比表<sup>27)</sup>

規定項目	JIS の規定内容		国際規格の規定内容		JIS と国際規格の相違点
1.適用範囲	○	用途：橋，船舶，車両，石油貯槽，容器その他 特徴：溶接性に優れている	○	用途：通常ボルト，リベット又は溶接による構造物	構造物という点では，同じであるが，用途別に見ると異なっている。
2.種類および記号	○	鋼種：SM400A,B,C SM490A,B,C SM490YA,YB SM570	○	鋼種：E184(Fe310) E235(Fe360) E275(Fe430) E355(Fe510)	JIS は T.S を基本とした鋼種名としているが，ISO のそれは，Y.P.を基本とした鋼種名であり，同じではない
3.化学成分	○	化学成分 5 元素 + 合金添加可	○	脱酸法規定 化学成分 5 元素	P,S ベースで ISO が緩い
4.機械的性質	○	降伏点または耐力，引張強さ，伸び及びシャルピー吸収エネルギーを規定	○	降伏点または耐力，引張強さ，伸び及びシャルピー吸収エネルギーを規定	シャルピー吸収エネルギーの温度レベルが異なる。機械的性質の各項目(ex.T.S,Y.P)規定値の決定の考え方(設計理念)が異なっている。
5.形状，寸法，質量の許容差	○	鋼材の種類別に形状，寸法，質量およびその許容差を定めた JIS を引用	×		ISO には規定がない。

表 3.11 ISO630 の機械的性質（板厚 100mm 以下を抜粋）<sup>27)</sup>

グレード	品質	降伏点 $R_{eH}$ 最小 N/mm <sup>2</sup>					引張強さ $R_m$ N/mm <sup>2</sup>	伸び A 最小( $L_0=5.65\sqrt{S_0}$ )%			衝撃試験 (V 切欠き) KV	
		厚さ mm						厚さ			試験温度 °C	エネルギー最小 J
		16 以下	16 超 40 以下	40 超 63 以下	63 超 80 以下	80 超 100 以下		40 以下	40 超 63 以下	63 超 100 以下		
E185 (Fe310)	0	185	175	—	—	—	300~540	18	—	—	—	—
E235 (Fe360)	A	235	225	215	215	215	340~470	26	25	24	—	—
	B	235	225	—	—	—	340~470	26	—	—	—	—
	B NF	235	225	215	215	215	340~470	26	25	24	+20	27
	C	235	225	215	215	215	340~470	26	25	24	0	27
	D	235	225	215	215	215	340~470	26	25	24	-20	27
E275 (Fe430)	A	275	265	255	245	235	410~540	22	21	20	—	—
	B	275	265	255	245	235	410~540	22	21	20	+20	27
	C	275	265	255	245	235	410~540	22	21	20	0	27
	D	275	265	255	245	235	410~540	22	21	20	-20	27
E355 (Fe510)	C	355	345	335	325	315	490~640	22	21	20	0	27
	D	355	345	335	325	315	490~640	22	21	20	-20	27

### 3.3 JIS での品質保証と道路橋示方書の要求性能

鋼材については今日に至るまでの経験の蓄積により、鋼材性能の保証方法が確立されてきていることから、各分野に共通の性能部分については JIS での規格化がなされている。

道路橋示方書に規定されている JIS を表 3.12 に示す。ただし、これらの JIS 規格は比較的幅広い用途への適用を意図して制定されたものであり、規定されている項目は比較的少ないことに注意する必要がある。例えば、構造用圧延鋼材 (SM) を規定した JIS G 3106 では、適用範囲として橋のほか、船舶、車両、石油貯槽、容器その他の構造物が挙げられており、これらの用途に共通する保証項目のみが規定されている。

したがって、道路橋示方書では、橋梁の設計、製作、施工の実態に合わせて、安全確保の上で問題のある部分に関しては、JIS 以上に厳しい要求を課している部分がある。例えば、寸法許容差については、安全性の問題上、公称断面を確保する観点から、道路橋示方書では JIS よりもマイナス側の寸法公差が厳しく規定されている。図 3.16 に、道路橋示方書に示されている JIS との寸法公差の比較を示す。道路橋示方書では、板厚の公差は基本的に JIS G 3193「熱間圧延鋼板と鋼帯の形状寸法および質量ならびにその許容差」によるものとしているが、あまり大きなマイナス側の公差を認めると構造物の安全度が低下するとして、マイナス側の公差を 5%としている。図 3.16 は道路橋示方書に記載されている板厚の寸法公差と実績調査結果を示したものである。図 3.16 の実線は JIS の公差を示しているが、JIS よりも道路橋示方書の方が厳しい公差となっていることがわかる (ただし、公差の範囲はその分上限にプラスされているため不変である)。また、工場製作に支障のないよう、道路橋示方書では鋼材の平坦度の目安を JIS の 2/3 としている。

このように、道路橋示方書の鋼材への要求性能には、JIS などの汎用的な規格と異なる部分もあり、橋梁独自の要求が盛り込まれているといえる。しかしながら、これらの要求性能の根拠については必ずしも明確に規定されているわけではなく、経験的な部分に負っている部分が大きいと言える。性能設計に見合った合理的な鋼材の選定基準を設けるためには、より一層、鋼材の要求性能の明確化に向けた努力が求められるところである。

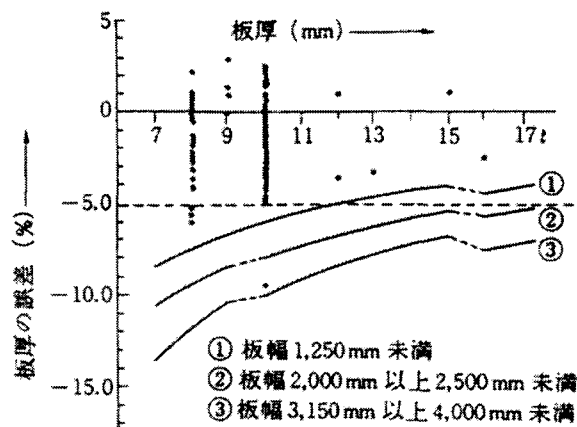


図 3.16 道路橋示方書と JIS の寸法公差の比較<sup>5)</sup>

表 3.12 道路橋示方書に規定されている JIS 鋼材

鋼材の種類	規格		鋼材記号
1.構造用鋼材	JIS G 3101	一般構造用圧延鋼材	SS400
	JIS G 3116	溶接構造用圧延鋼材	SM400,SM490,SM490Y, SM520,SM570
	JIS G 3114	溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材	SMA400W,SMA490W, SMA570W
2.鋼管	JIS G 3444	一般構造用炭素鋼管	STK400,STK490
	JIS A 5525	鋼管杭	SKK400,SKK490
	JIS A 5530	鋼管矢板	SKY400,SKY490
3.接合用鋼材	JIS B 1186	摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット	F8T,F10T
	JIS B 1180	六角ボルト	強度区分 4,6,8,8,10,9
	JIS B 1181	六角ナット	強度区分 4,8,10
4.溶接材料	JIS Z 3211	軟鋼用被覆アーク溶接棒	
	JIS Z 3212	高張力鋼用被覆アーク溶接棒	
	JIS Z 3214	耐候性鋼用被覆アーク溶接棒	
	JIS Z 3312	軟鋼および高張力鋼用マグ溶接ソリッドワイヤ	
	JIS Z 3313	軟鋼, 高張力鋼および低温鋼用アーク溶接フラックス入りワイヤ	
	JIS Z 3315	耐候性鋼用炭酸ガスアーク溶接ソリッドワイヤ	
	JIS Z 3320	耐候性鋼用炭酸ガスアーク溶接フラックス入りワイヤ	
	JIS Z 3351	炭素鋼および低合金鋼用サブマージアーク溶接ワイヤ	
	JIS Z 3352	炭素鋼および低合金鋼用サブマージアーク溶接フラックス	
5.鍛造品	JIS G 3201	炭素鋼鍛鋼品	SF490A,SF540A
	JIS G 5101	炭素鋼鋳鋼品	SC450
	JIS G 5102	溶接構造用鋳鋼品	SCW410,SCW480
	JIS G 5111	構造用高張力炭素鋼および低合金鋼鋳鋼品(低マンガン鋼鋳鋼品)	SCMn1A,SCMn2A
	JIS G 4051	機械構造用炭素鋼鋼材	S35CN,S45CN
	JIS G 5501	ねずみ鋳鉄品	FC250
	JIS G 5502	球状黒鉛鋳鉄品	FCD400,FCD450
	6.線材	JIS G 3502	ピアノ線材
JIS G 3506		硬鋼線材	SWRH
JIS G 3536		PC 鋼線および PC 鋼より線	SWPR1,SWPD1,SWPR2, SWPR7,SWPR19
7.棒鋼	JIS G 3112	鉄筋コンクリート用棒鋼	SR235,SD295A,SD295B, SD345
	JIS G 3109	PC 鋼棒	SBPR785/1030 SBPR930/1080 SBPR930/1180
8.その他	JIS B 1198	頭付きスタッド	呼び名 19,22

### 3.4 次世代鉄鋼材料の開発動向<sup>29)-35)</sup>

大型構造物用の高張力鋼の研究開発は各製鉄メーカーでも行われているが、最近では「STX-21」プロジェクト（文部科学省）、「スーパーメタル」プロジェクト（経済産業省）などの次世代鋼材の開発プロジェクトが産・官・学の連携のもと、国家規模での研究が進められている。金属材料は、最も大量に使用され、かつ多様な用途に対応しうる信頼性の高い材料であることから、その高性能化およびリサイクル性の大幅な向上が可能となれば、広範な分野での新規産業の創出や環境・安全調和型社会の構築に資する等、社会に与えるインパクトはきわめて大きいものがあるとして、精力的な取り組みがなされている。

近年の基礎的な研究により、鋼材は結晶粒径を微細化することによって、強度、じん性、耐候性等が大きく向上することが確認されている。このような背景のもと、「スーパーメタル」プロジェクトは、微細組織を極限まで制御するプロセス技術の開発することを目標に、大ひずみ加工や強磁場中加工などによって1 $\mu\text{m}$ 以下の結晶粒組織をもち、高強度・高じん性でかつ耐久性・信頼性・リサイクル性に優れたスーパーメタルの創製技術の確立を目指している。

一方、物質・材料研究機構（旧金属材料技術研究所）が中心となって進めているSTX-21プロジェクトでは、資源の有効活用・リサイクルの重要性、環境問題への取り組みが重要であるとの視点から、鉄鋼材料の「実用強度の2倍化、構造体寿命の2倍化、トータルコストの縮減、環境負担度の低減」の同時達成を目標に「超鉄鋼材料」の研究開発が進められている<sup>30)</sup>。

「超鉄鋼」材料の開発にあたっては、21世紀の「超鉄鋼」材料に求められる性能として、

- ①より一層の高強度化と高安全性確保
- ②より一層の高寿命化
- ③革新的な製造技術の開発（低コスト、省資源、省エネルギープロセスの開発）
- ④環境負担度の低減（スクラップリサイクル

ル、炭酸ガス排出量の削減など）

が挙げられ、この性能に合致する具体的な研究課題として、

- (a)溶接が容易で合金元素を使わない溶接構造用の超微細粒800MPa鋼の開発
- (b)ボルト継手への適用などを旨とした1500MPa超強鋼の開発
- (c)石炭火力発電の高効率化を可能にする耐熱鋼の開発
- (d)海でも錆びない鋼の開発

の4課題に対する取り組みが行われている。これらの開発目標を模式図に表したものを図3.17<sup>31)</sup>に示す。この中で、土木鋼構造物においてとくに注目されるのは、(a)800MPa鋼の開発、(b)1500MPa級高張力ボルトの開発ではないかと思われる。

超微細粒800MPa鋼の開発においては、

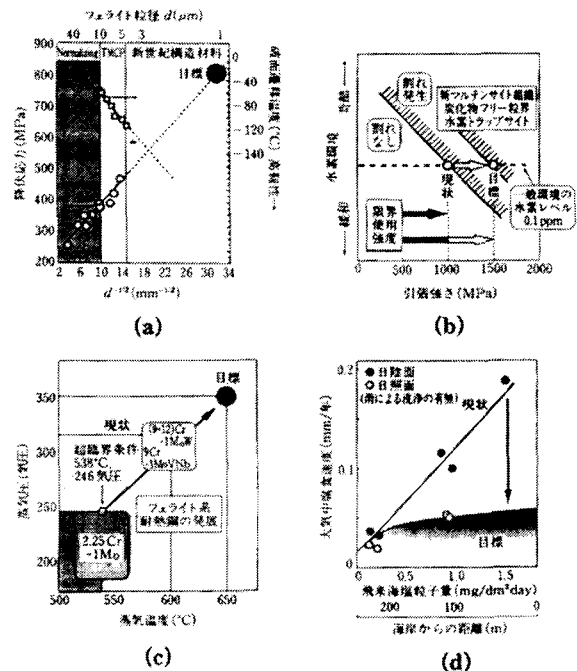


図 3.17 STX-21 課題の概要<sup>31)</sup>

400MPa 級鋼の組成を有する鋼材をもとに、結晶粒の微細化により、従来のように合金元素を添加せずに 2 倍の強度 (800MPa) を実現し、溶接しやすい、じん性に優れた鋼材を開発することを目標にしている。その創製手法としては、①変態法 (熱間圧延工程で鋼が変態する過程を利用して微細化する)、②再結晶法 (熱間圧延工程で加工再結晶化を利用して微細化する) が提案され、いずれの方法によっても鋼材の結晶粒径を  $1\mu\text{m}$  以下に超微細化できることができ、ラボレベルで十分な鋼材が製造できることが確認されている。また、微細粒鋼の最大の敵は、溶接熱による組織の破壊、結晶粒径粗大化であるが、これを解決する溶接法として、超狭開先 GMA 溶接法<sup>32)</sup>、ならびに CO<sub>2</sub> レーザー溶接法に<sup>30)</sup>も合わせて開発したことが報告されている。

1500MPa 級棒鋼の開発においては、①遅れ破壊特性および疲労特性を抜本的に向上させる技術と、②その性能を保証する評価技術の確立、をメインテーマに研究が行われ、粒界破壊である遅れ破壊の抑制には、粒界上に析出する炭化物を微細化することによって、遅れ破壊限界強度を上昇させる目処が立ったことが報告されている<sup>31)</sup>。

「スーパーメタル」も「超鉄鋼材料」も、いずれも材料の創製に目処が立ち、基礎研究の当初目標は達成されたと報告されている<sup>30),34),35)</sup>。研究開発成果はまだ実験室段階であるとされているものの、これらの成果を受け、現時点 (2002) ではこれらスーパーメタルの工業化・実機適用を視野に入れた基礎研究の段階がスタートし、利用技術への展開も開始されており、今後の研究の進展、実用化が期待される。

#### 参考文献

- 1) 鋼材倶楽部橋梁研究会：高性能鋼の概要 (橋梁向け)，1998.
- 2) 鋼材倶楽部編：新しい建築構造用鋼材，鋼構造出版，1998.
- 3) 坂井藤一：土木構造物における高張力鋼利用の現状，鋼構造論文集，第 1 巻第 1 号，pp13-24,1994.3.
- 4) 土木学会：鋼構造物の終局強度と設計，鋼構造シリーズ 6，1994.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説,2002.3.
- 6) 北田俊行，中井博，越智内士：高張力鋼を用いた圧縮板，圧縮補剛板の終局強度に関する研究，構造工学論文集 Vol.46A，2000.3.
- 7) 越智内士，北田俊行，向山寿孝：高張力鋼を用いた柱の終局強度および座屈設計法に関する研究，鋼構造論文集，第 8 巻第 31 号，2001.9.
- 8) ㈱クリモト鉄構事業部：最新の高張力鋼溶接技術—200mm 厚 HT950 鋼板の開発とペンストック分岐管への適用に関する研究一，クリモト技報，2000.3.
- 9) 本間宏二，三木千壽，征矢勇夫，笹尾英弥，奥村健人，原修一：冷間加工を受けた構造用鋼材のひずみ時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究，土木学会論文集, No.570/I-40, pp153-162.1997.7.
- 10) 坂田豊，鈴木昭信，藤井康盛，高木優任，西海健二，楠隆，都築岳史，宇佐見明：橋梁用途の新鋼材および新建材，新日鐵技報，第 368 号，1998.
- 11) 工藤純一：高性能鋼と橋梁への適用，第 2 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会鋼構造委員会幹事会，1999.8.
- 12) 本間宏二，三木千壽：鋼部材溶接熱影響部の靱性に溶接熱が与える影響に関する研究，土木学会論文集，Vol.689，No.57，2001.10.
- 13) 日本鋼構造協会技術委員会生産性分科会工作基準小委員会溶接割れ研究班：鋼構造物における溶接割れ防止のための予熱条件の選定について，JSSC Vol.8 No.80,1972.8.



- 14) Ralf Hubo, Falko Schroter: High-Performance Heavy Plates for European Bridges, Proceedings of the 2001 World Steel Bridge Symposium, Chicago,2001.10.
- 15) 堀田毅, 工藤純一, 谷俊寛, 西村宣男: 鋼橋への LP 鋼板の適用, 橋梁と基礎,2000.4.
- 16) 佐々木道夫, 安波博道, 市川篤司, 川原田亨, 小林潔, 赤堀裕: 鋼鉄道橋の走行模型実験による騒音測定, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, I-A333, 1997.9.
- 17) 奈良敬, 近藤真司: ハイブリッド圧縮補剛板の極限強度と変形性能, 鋼構造年次論文報告集, 第 6 巻, 1998.11.
- 18) 加藤勉: 建築用鋼材の降伏比について, 鉄と鋼,第 74 巻第 6 号, pp12-21.1988.
- 19) (社)鋼材倶楽部高性能鋼利用技術小委員会: 建築構造用高性能 590N/mm<sup>2</sup> 鋼材 (SA440) 設計・溶接施工指針, 1996.10.
- 20) 日本鋼構造協会: 高張力鋼 (780N/mm<sup>2</sup> 級鋼) の建築構造物への適用, JSSC テクニカルレポート No.43, 1998.
- 21) 日本工業標準調査会: 建築構造用圧延鋼材 JIS G 3136-1994 , 日本規格協会
- 22) U.S.Department of Transportation, Federal Highway Administration: High Performance Steel Design Guide, Second Edition,2002.4.
- 23) Alexander D. Wilson: Development of High Performance Steels for U.S.A. Bridges,14<sup>th</sup> US-Japan Bridge Workshop,1998.
- 24) AISI(American Iron and Steel Institute):High Performance Steel Bridge Overview, AISI ホームページ(<http://www.steel.org/infrastructure/bridges>),1999.10.
- 25) FHWA(Federal Highway Administration):High-Performance Steel Bridges – Tennessee State Route 53 Bridge Over Martin Creek, Jackson County, FHWA Publication No. FHWA-RD-98-112,1998.7.
- 26) AISI(American Iron and Steel Institute)パンフレット: High Performance Steel Bridge Concepts,1996.11.
- 27) ASTM(The American Society for Testing and Materials): Standard Specification for Carbon and High-Strength Low-Alloy Structural Steel Shapes, Plates, and Bars and Quenched-and-Tempered Alloy Structural Steel Plates for Bridges, Designation: A709/A709M, ASTM(The American Society for Testing and Materials),2001.
- 28) 日本工業標準調査会: 溶接構造用圧延鋼材 JIS G 3106:1999,日本規格協会
- 29) 佐藤彰: 新世紀構造材料 (超鉄鋼材料) 研究プロジェクト, 第 4 回超鉄鋼ワークショップ, 超鉄鋼材料: 世界の研究動向と実現への展望, 2000.1.
- 30) 萩原行人, 高橋稔彦: 超鉄鋼プロジェクトの目指すもの, 第 6 回超鉄鋼ワークショップ, 新構造用鋼と新構造への期待, 2002.5.
- 31) 谷野満, 鈴木茂: 鉄鋼材料の科学—鉄に凝縮されたテクノロジー, 内田老鶴圃, 2001.
- 32) 長井寿: 800MPa 級超微細フェライト粒組織鋼の創製と接合研究, 第 4 回超鉄鋼ワークショップ, 超鉄鋼材料: 世界の研究動向と実現への展望, 2000.1.
- 33) 松岡三郎: 1500MPa 級超高強度鋼の高性能化に関する研究, 第 4 回超鉄鋼ワークショップ, 超鉄鋼材料: 世界の研究動向と実現への展望, 2000.1.
- 34) 高橋稔彦: 超鉄鋼材料研究 4 年半の成果と次期構想, 新たな材料開発と鉄鋼<中>, 鉄鋼新聞, 2001.9.26.

35) 栗飯原周二：鉄系メゾスコピック制御抑制創製技術，新たな材料開発と鉄鋼<下>，鉄鋼新聞，2001.9.28.