

長大トラス橋の製作における品質確保

阪神高速道路公団

笹戸松二

河井章好

水元義久

石崎浩

1. まえがき

わが国における橋梁も設計技術の高度化とそれに応じて施工技術の進歩により、巨大化の傾向を増している。すなわち構造解析も平面的な取り扱いより立体的な取り扱いへと変化し、より実構造物に合致した合理的な解析が可能と

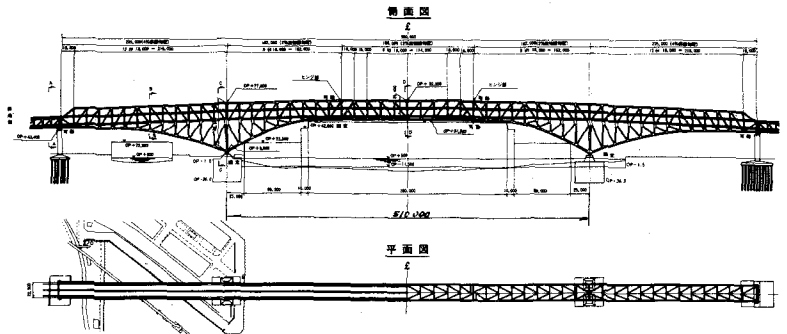


図-1 港大橋一般図

なった。このような橋梁の立体化に応じた構造解析の進歩の背景には電算機を利用した演算技術の活用に向うところが多い。

一方、橋梁の進歩に果して鋼材面の役割りも重要であり、わが国においても長大橋梁に $Y0$ 、 80 級調質高張力鋼（以下HT $Y0$ 、HT 80 ）も種々の有利性より使用されるに至った。

すなわち、鋼材の高張力化ならびに極厚化の要請は避けられない背景にある。一方、これらの鋼材を安全に使用するためには材料、設計、製作から維持管理に至るまで、あらゆる面に対し慎重な配慮が必要である。

本稿においてはこの長大橋梁における高張力化ならびに極厚化に対応し、いかに製作上対応すべきかの問題をマクロ的に触れる。また、橋梁における要求品質は安全性をいかに確保するかという問題とともに精度の問題がある。この二点に関して図-1に示す港大橋の具体例を扱って述べることにする。

2. 長大トラス橋と高張力鋼

2.1 高張力鋼の技術的な有利性

港大橋の建設にあつて、極厚高張力鋼（HT $Y0$ 、HT 80 ）を適用する場合の問題点を検討した。その結果を表-1に示す。

本表に示されるように高張力鋼の適用は計画、設計、解析面では有利である。一方、材料、製作における溶接われと溶接入熱による継手部のボンドぜい化に関連して種々の問題がありこれらを解決して初めて長大トラス橋の品質は確保できる。

長大トラス橋と高張力鋼の両者の問題を考え、建設という具体的な展開を行なう時、その方針設定で次のことが重要である。すなわち構造物の安全性、経済性および信頼性を表-1で示すどのレベルに、あるいはどの分野に、どの程度までを期待し、問題への解決をゆだねるかをいかにうまくキャリ

プレートするがである。
 その場合、下記のような長大トラス橋の背景と高張力鋼の特性を十分認識し、これらの諸特性をあわせ考える必要があるのである。

表-1 長大トラス橋へ高張力鋼を使用する効果

問題	計画	設計	解析	材料	製作	架設	維持管理
自然(土地)条件に応じた構造計画、南支ねの規格等への適合性の確認	外力の評価と耐荷力、設定、総工費に対する評価	2次応力の算定、応力集中の緩和、応力集中と5%の差、受圧スリット外力の5%差	2次応力の算定、応力集中の緩和、応力集中と5%の差	必要材料の性能、作業性に対する配慮、単材強度(板厚公差、平坦度)	安全、均一性、作破損検査の検出能力、管理手法	現場検査の問題、現場若手に対する配慮	運搬の対し、配慮
構造計画、設計における自由度、地震構造、死荷重の軽減	応力、歪みの明確化、単部材重量の均一化による架設工費の減、断面単純化による製作工費の減	橋梁構造の単純化、2次応力の軽減	橋梁構造の単純化、2次応力の軽減	単材強度(板厚公差、平坦度)	単材強度(板厚公差、平坦度)	単材強度(板厚公差、平坦度)	単材強度(板厚公差、平坦度)
未経験事項	4%の増力による耐荷力の低下、疲労、脆性破壊等、確率現象におけるリスクの大きい問題	4%の増力による耐荷力の低下、疲労、脆性破壊等、確率現象におけるリスクの大きい問題	4%の増力による耐荷力の低下、疲労、脆性破壊等、確率現象におけるリスクの大きい問題	製作時の作業性の悪化、高管理温度、要求、ボンドゼリ化	管理費の増大、予熱温度が高くなることによる作業性の低下、ボンドゼリ化の増大	部材取扱いに対する慎重さが要求される	腐食等による板厚減に対する鋭敏性、耐ノリ、耐火に対する問題
解決	何と重要な要因を把握し、対策を講ずる	4%の増力による耐荷力の低下、疲労、脆性破壊等、確率現象におけるリスクの大きい問題	4%の増力による耐荷力の低下、疲労、脆性破壊等、確率現象におけるリスクの大きい問題	適切な規格選択、HPSによる劣化防止、HPS、以下平坦度、入熱制限	適切なシステム、管理、予熱温度の明確化	太極ハット、ホース、治具、見直し、金工場取付け	重量表示の使用

(1) 長大トラス橋の背景
 ① 社会的な重要度と経済性が重視される。

- ② 死荷重・応力比が高く設計応力に実応力が接近する。
- ③ 中小橋梁と異なり風あるいは地震等の不規則現象により安全性が支配される傾向が高くなる。
- ④ 高張力化にともない構造物の破壊がぜい性破壊に支配される傾向が高くなる。このぜい性破壊は疲労破壊と同様に材料強度の不規則性が大きい。
- ⑤ 多数部材により構成され、誤差の影響が複雑化する。
- ⑥ 多数部材により構成されるが、一部材の破壊は全体の破壊に直結する。このことより各部材の均質性が特に重要となる。
- ⑦ 設計上の2次応力等の問題より使用鋼材は極厚化の傾向を有する。
- ⑧ 部材の大型化、重量化は避けられないので、この点に対する配慮が必要である。
- ⑨ 使用鋼種(鋼板、鋳鍛鋼、接合用材料)が多様化し破壊様相も複雑化する。
- ⑩ 大きいことによる不完全性(従来の経験則では安全でない要素)の可能性が大となる。
- ⑪ 中小橋梁の場合のような立体仮組みができない。

(2) 高張力鋼(HTR70, HTR80)の特性

- ① 降伏比が高く、一様伸びが低い。
- ② 切欠きに敏感である。
- ③ 炭素当量が高くなりわれ感受性が高くなる。
- ④ 溶接継手部のボンドゼリ化が問題である。
- ⑤ ひずみ時効に対する配慮が必要である。

2.2 高張力鋼の経済的有利性

種々の構造部材にどの程度の強度をもった鋼材を使用した場合に最大の効果が得られるかの解析をU.S. SteelのDr. G. Haaijerが行なっているが、こ

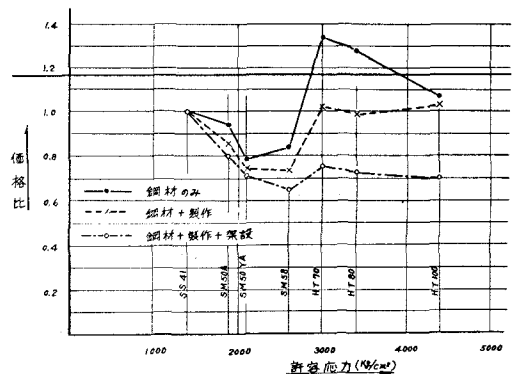


図-2 引張部材の許容応力と価格比(港大橋)

で港大橋の実績を勘案し製作架設を含め引張部材で換算した値を示すと表-2および図-2のとおりである。

前者のHaaizerの検討では鋼材価格のみについて検討がなされており、各構造別の高張力鋼の経済性は図-3のとおりである。

おのこの時点における単価比を図-4に示す。

これらより解るように高張力鋼使用の有利性は鋼材費のみで考える場合よりも、製作架設を含めて考える場合さらに有利となる。

図-2における比較は鋼材の降伏点の比率に1

次的に影響を及ぼす引張部材についてである。しかし長大トラス橋のように自重が支配的となる場合は図-3の自重を受けるはりの状態に近い。この場合、使用鋼材量の比率(R)は

$$R = (Y_M / Y_H)^{3/2}$$

にだし Y_M : 軟鋼の降伏点

Y_H : 高張力鋼の降伏点

の関係にある。これらにより、高張力鋼適用の経済的有利性は明確である。

3. 高張力鋼の安全確保

3.1 破壊との関連

長大トラス橋の要求品質は第1に溶接継手部の品質があげられる。HT80などの材料、製作においてはこの溶接継手の品質を重視し、その安全を確保するために図-5に示す流れにより溶接構造

表-2 引張強度で換算した部材の価格比と変形比(港大橋)

鋼種	① GPa	② 鋼材費 (円)	工場価格										架設費 (円)	合計				変形比 1/⑤
			鋼材 (t×25)		製作費		小計		架設費		合計							
			③ 鋼材費 (円)	④ 鋼材費 (円)	⑤ 製作費 (円)	⑥ 製作費 (円)	⑦ 小計 (円)	⑧ 小計 (円)	⑨ 架設費 (円)	⑩ 架設費 (円)	⑪ 合計 (円)	⑫ 合計 (円)						
SM41	1400	1.00	39.8	1.00	1.00	714	1.00	11.2	1.00	1.00	100	211.2	1.00	1.00	1.00			
SM41A	"	"	42.0	1.06	1.06	"	"	113.4	1.02	1.02	"	213.4	1.01	1.01	"			
B	"	"	45.0	1.13	1.13	"	"	116.4	1.05	1.05	"	216.4	1.02	1.02	"			
C	"	"	49.0	1.23	1.23	"	"	120.4	1.08	1.08	"	220.4	1.04	1.04	"			
SM50A	1900	0.937	50.5	1.27	0.94	77.1	1.11	129.6	1.17	0.86	"	229.6	1.09	0.80	1.36			
B	"	"	53.5	1.34	0.99	"	"	132.6	1.19	0.88	"	232.6	1.10	0.81	"			
C	"	"	56.5	1.42	1.05	"	"	135.6	1.22	0.90	"	235.6	1.12	0.83	"			
SM50YA	2100	0.667	44.5	1.17	0.98	"	"	124.4	1.13	0.75	"	224.4	1.07	0.71	1.50			
B	"	"	47.5	1.24	0.93	"	"	127.4	1.16	0.77	"	227.4	1.08	0.72	"			
SM53B	"	"	55.5	1.37	0.95	"	"	134.4	1.21	0.81	"	234.4	1.11	0.74	"			
C	"	"	58.5	1.49	0.98	"	"	137.4	1.24	0.83	"	237.4	1.13	0.75	"			
SM58	2600	0.538	42.5	1.57	0.84	91.2	1.28	153.7	1.38	0.74	"	253.7	1.20	0.65	1.86			
HT70	3000	0.467	114.0	2.86	1.34	128.5	1.80	242.5	2.12	1.02	"	342.5	1.62	0.76	2.14			
HT80	3400	0.412	123.5	3.10	1.28	143.6	2.01	267.1	2.40	0.97	"	367.1	1.94	0.72	2.43			
HT100	4400	0.318	135.0	3.37	1.08	230.0	3.22	365.0	3.28	1.04	"	465.0	2.20	0.70	3.14			

⑦・⑧は港大橋・実績を参照 ⑨・⑩は仮定 (港大橋46年最新価格)

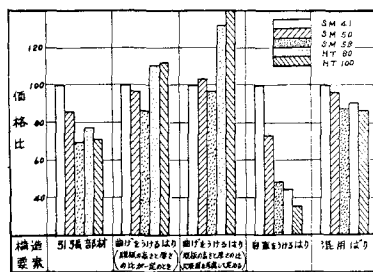


図-3 構造要素別の経済性の比較

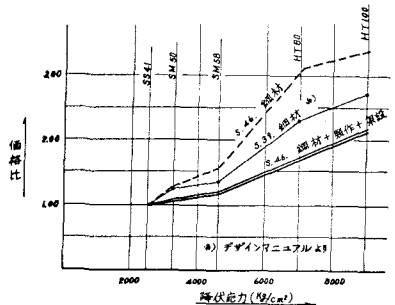


図-4 降伏応力と単価比

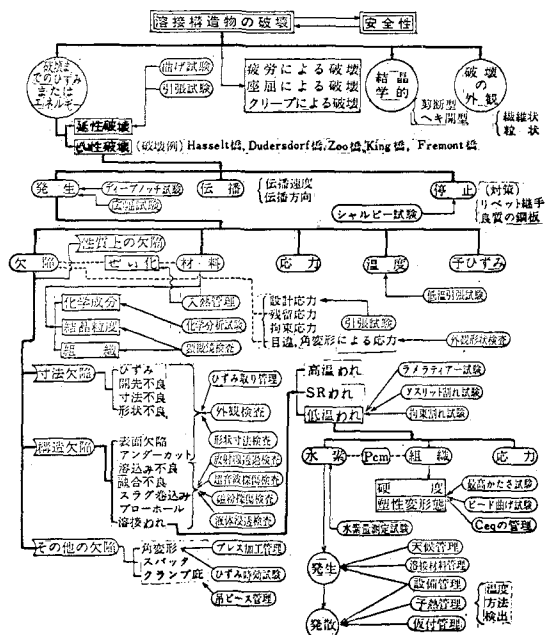


図-5 高張力鋼の破壊における欠陥と試験および検査

物の破壊を検討した。
すなわち、前述の高張力鋼の特性はいずれも溶接継手部に重畳し、最弱点部となる可能性が高い。この最弱点部が破壊する場合、この種の高張力鋼で問題となるぜい性破壊との関連を種々の欠陥と試験、検査ならびに管理と結びつけた。

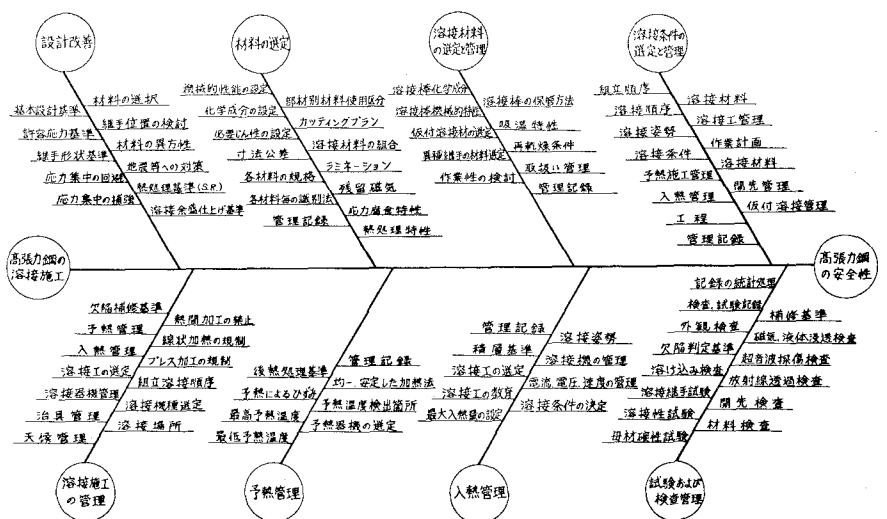


図-6 高張力鋼溶接施工の特性要因

本図に示されるように安全確保に重要な因子である溶接われ防止とじん性の問題は材料に負うところも多い。

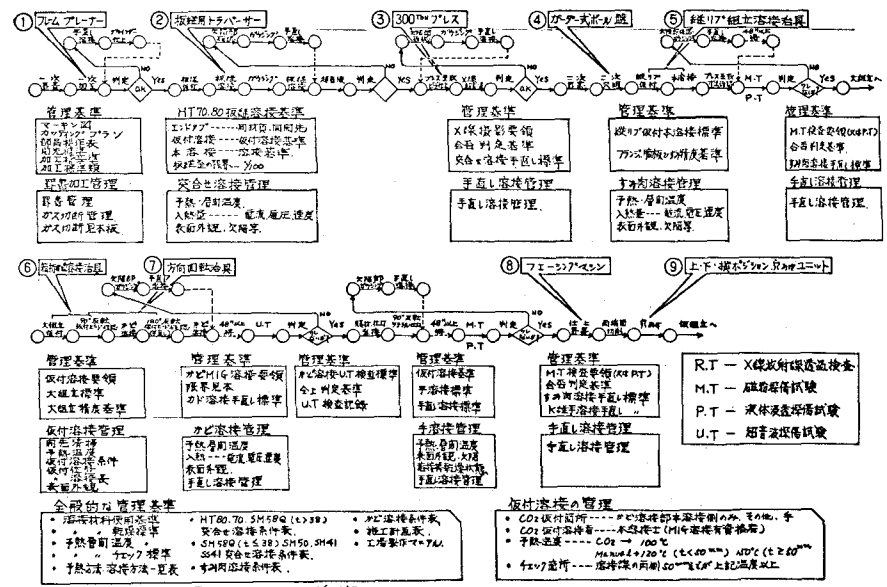


図-7 品質管理工程図

3.2 安全性確保の要因

港大橋ではこの点に対し、安全性確保の要請をできるだけ材料面に期待する方針で材料規格を設定した。そして、継手の

要求性能を十分満足し、かつ作業条件の改善ができ、能率を損わない材料の規格を設定した。次にHT80などで特に厳重さを必要とする製作管理の問題を図-6のような特性要因について検討した。

3.3 工程別の品質管理

具体的な部材製作においてはその作業工程にそって管理項目、管理基準の設定ならびに徹底が重要である。

港大橋のHT80などの使用された部材製作ではこの点を持に重視し、鋼材の確性試験をはじめ、数多くの施工試験の蓄積により得られて資料をもとに施工要領、条件そして基準、標準の徹底をはか、た。図-7に本橋の代表的部材であるHT80を使用した弦材の工程別管理基準を示す。

3.4 品質管理業務の運営

完全な製作要領書あるいは品質管理体系が確立されても、それが確実に機能を果たないと高張力鋼の安全は確保できない。港大橋における場合、工事としての未経験な事項も多くあり、管理基準などだけで完全に保証しきれない問題もあると判断された。そこで、図-8に示す体系により発注者側も加わり、施工者との

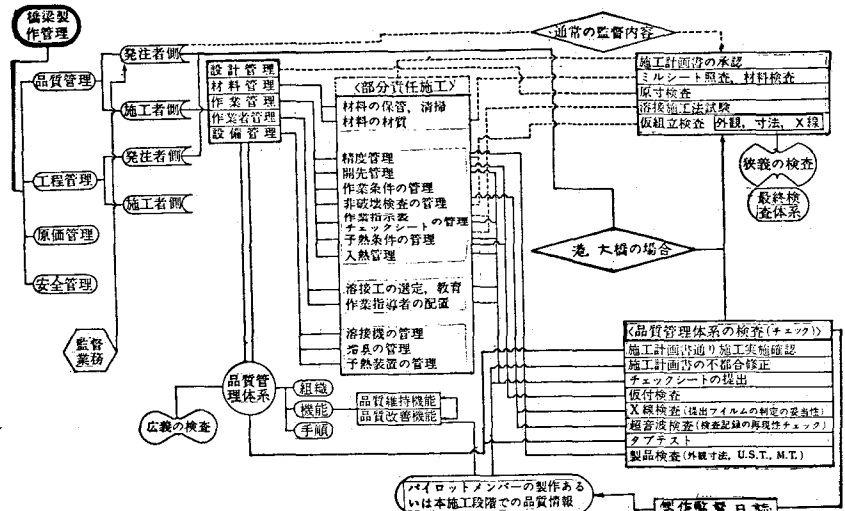


図-8 港大橋の製作管理体系

トータルシステムとして品質確保をはかるように試みた。これにより、1構造物を背景の異なる多数企業で施工する場合、各社間の品質管理レベルの判断における基準化、標準化しきれない多少の相違を発注者側の品質管理パトロールによってキャリブレートすることができた。また、このような体系と各社のこたわりない協力によって、おにびの壁を取り除き技術上の問題をオープン化し、各社の特長を発揮することができた。このことは構造物の均質化と品質向上をはかるうえで多くの効果があったと思われる。

4. 長大トラス橋の精度確保

長大トラス橋に要求される製作精度の品質レベルはどの程度にあるべきかは非常に重要である。しかしながら、明確でない点も多い。製作精度は最終的には橋梁として完成系における必要精度との関係を第1に考えるべきであろう。なぜなら、いくら製作精度を向上させても、これに対応して架設精度が向上しなければ意味がないと思われる。しかし、架設精度を向上させるための必要条件として製作精度は重要である。

製作精度が悪い場合、架設時に無理な内部応力を導入しなければ部材が設置できないことがある。この内部応力が場合によっては橋梁の破壊に結びつく事例は過去の橋梁事故よりも伺われる。

そこで、長大トラス橋の製作精度は構造物の機能、安全性にも結びつき、また、架設途上の作業能率に対しても大きな影響を与え重要であるといえる。

4.1 基本方針

橋梁の完成系での精度は図-9に示すように大きく素材、工場製作および架設時におけるおのおのの因子により影響を受ける。

本橋では精度確保の問題を現状における工場製作の精度確保レベルと架設時における測定等を含めた精度確保レベルとの両面をあわせて検討した。そして、工場製作における計測条件

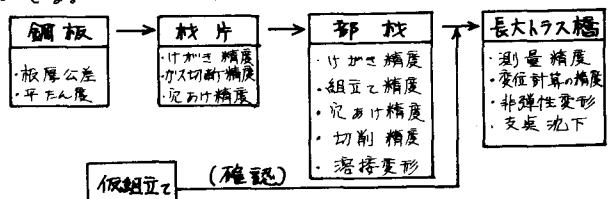


図-9 各段階での精度確保の要因

次に、高カボルトの穴精度は橋梁の完成系の精度と性能に重要である。

本橋では穴あけ加工は原則としてフルサイズの互換性工法を指定した。そして大幅な先穴工法を採用し省力化をはかった。穴精度は現行の道路橋ボカ書に比し厳しくしたにもかかわらず、非常に良好であった。この互換性工法と大幅な先穴工法との併用は製作工数の低減だけでなく、本橋のように多行多列の継手部の極限状態（摩擦接合から支圧接合）の耐荷力の向上にも大きな貢献があり、にと思える。

5. 製作の合理化

港大橋の製作を通じ、高張力鋼の安全、省力化に効果のあり、に思ふや、高張力鋼の製作の合理化を今後さらに進めるためにさらに検討しなければならない事項について述べる。

5.1 欠陥評価の明確化と設計改善

高張力鋼を使用した長大トラス橋では地震、風などの外力の不規則性とぜい性破壊における強度面での不規則との重畳によりその安全性が大きく支配される。そこで、これらの不規則性に含めたる適確な欠陥評価が必要である。そして、図-10に示すような破壊を前提とした材料、設計、製作および架設まで含めた安全性評価の調整という大きな意味での設計改善が必要であると思ふ。

そして、本橋ではこの問題を少しでも具体化するよう努めた。

にだし、材料強度ならびに欠陥に対する確率的な取り扱いまでには達しえないが現在の技術レベルであったに、今後、この種の資料の蓄積が材料ならびに施工面の進歩と歩調をあわせて行なわれることが期待される。

このような指向のもとに本橋ではディープノッチ試験、広幅試験などの多くの実験と検討を行なった。

そして、前述のように欠陥の防止対策の確立と、欠陥をぜい性破壊発生防止の観点より吟味検討を行ない、定量化をはかに、そして、許しうるわれ等の欠陥の大きさと、許しうる材料のぜい化の程度などについての工学的判断資料を得にのは、製作の合理化の基本条件として非常に有益であったと思われる。

5.2 極厚板使用の効果

極厚板の適用は製鋼上では調質上の問題、製作上ではわれ感受性の増大などの問題を有しているに、一方、製作面においては下記のような効果があり、省力化などに寄与したと思われる。

断面の単純化は製作工数の低減に結びついた。すなわち、溶接延長の減少、ハンドリングの容易化、格点構造の単純化により、図-11に示す

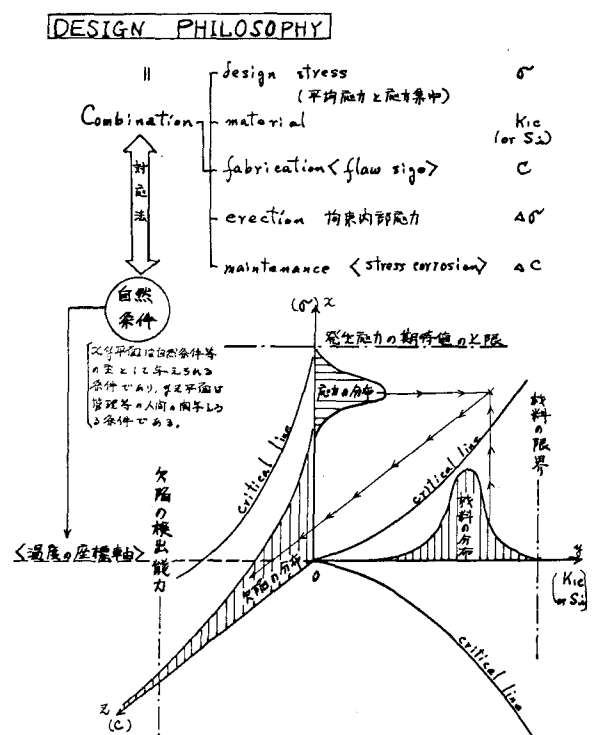


図-10 高張力鋼の安全評価概念図

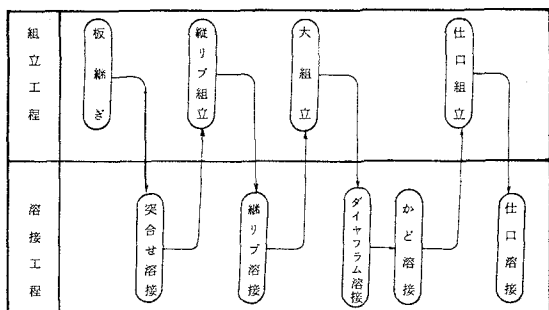
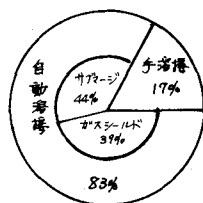
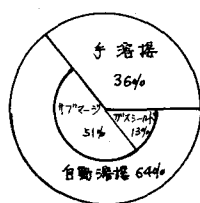


図-11 組立工程と溶接工程の同期化



HT70, HT80の自動化率



全鋼種の自動化率

図-12 港大橋における溶接の自動化率

ような組立工程と溶接工程との同期化が可能となった。そして溶接作業をステージ別に分離することができ、後述の自動化が促進された。これらは変形の減少、残留応力の軽減に効果があり品質面の改善へ結びつくと考えられる。

5.3 溶接の自動化

極厚板使用の効果とそれに対応して高い自動化率は本橋の溶接品質の向上と省力化を両立させる大きな因子である。従来の考え方の踏襲で設計された橋梁と異なり、本橋では極厚高張力鋼の使用という大胆な設計改善を行なったことにより、作業改善だけでは果しえない自動化をさらに拡大した。

図-12に本橋での実績を示す。

自動化率は生産条件あるいは労務単価等の社会条件により、最適比率は変化するものと思われる。

しかしながら、品質の均一化と高張力鋼使用に必要な管理密度の向上のためには極力自動化し、人為的作業のムラをなくし、管理しやすくする必要はある。

この点、図-12に示すような高い自動化率を果しえたことは品質管理を容易にし、本橋の信頼性を高めるに効果があったと思われる。

6. あとがき

港大橋はわが国における長大トラス橋の先兵であり、極厚の高張力鋼を多量に使用することによって、特に品質確保においては数多くの問題を解決しなければならない背景にあった。そこで本橋では、港大橋における品質確保の概念を非常に大まかに触れたが、具体的な手順の詳細は文献を参照されたい。

製作における合理化は安全と省力化の調和のうえに進めるべきであり、合理化が安全率の先喰いとなてはならない。そして、合理化の基本は必要なところに徹底して工数をかけ、不必要なところには工数をかけないことである。そのためには何が重要であり、何が不必要かという基礎的な事項を明確にする必要がある。これらは多分に設計者の理念に負うところも多いが、欠陥評価の明確化はこの基礎的な事項を明白にするうえに重要である。

港大橋の極厚板の効果と自動化の問題に触れ、製作の合理化においては設計改善の効果が大きくかつ重要なことと、それを進めるうえで設計者が材料、製作をとらし、自動化に対する広範囲の知識と理解の必要があることを述べたつもりである。

(参考文献)・八幡製鉄(株)；高張力鋼デザインマニュアル 共通編

・笹戸松二；長大トラス橋の溶接，溶接学会誌第43巻，第3号（1974）