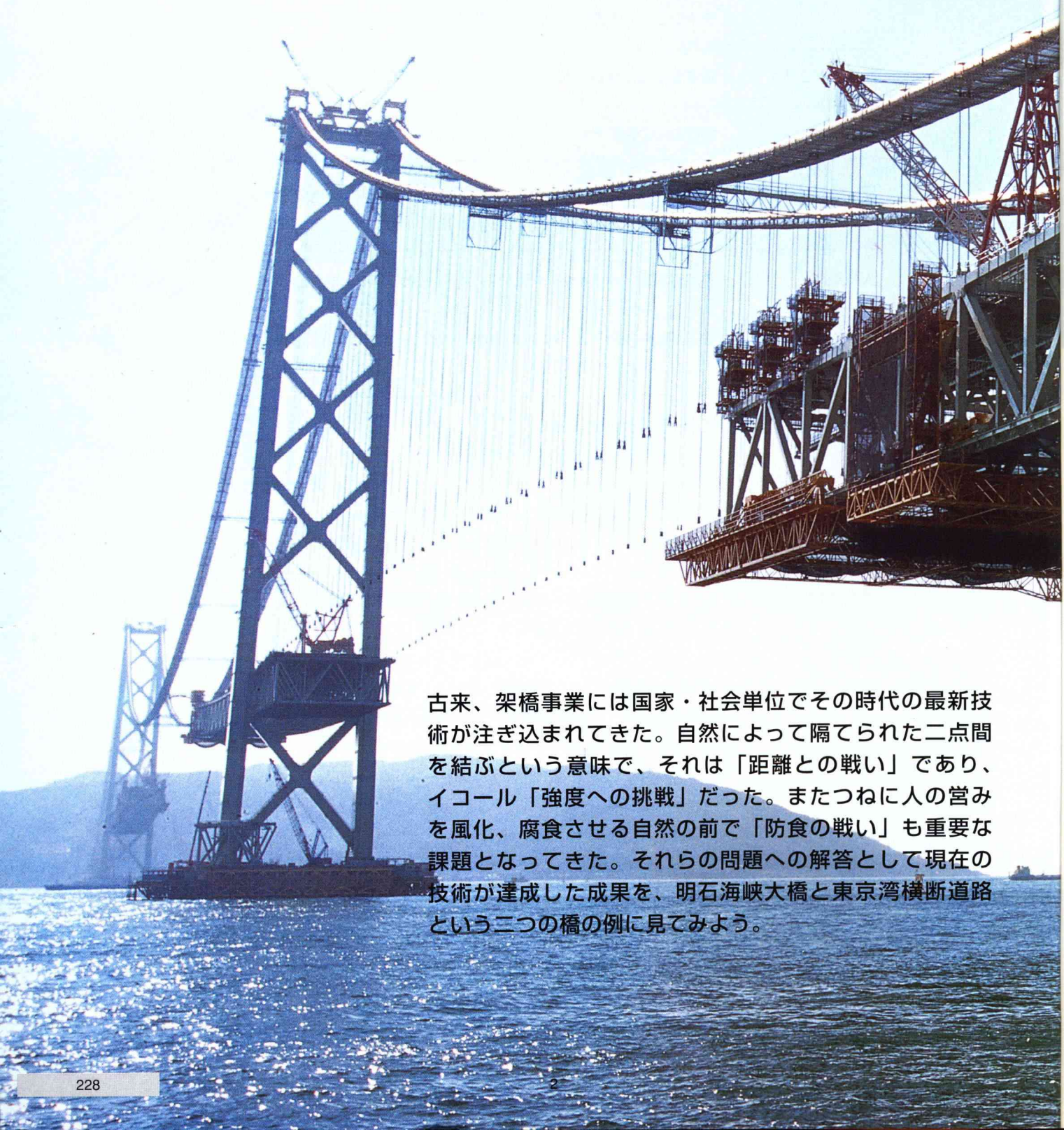


IRON & STEEL

長大橋に挑む



古来、架橋事業には国家・社会単位でその時代の最新技術が注ぎ込まれてきた。自然によって隔てられた二点間を結ぶという意味で、それは「距離との戦い」であり、イコール「強度への挑戦」だった。またつねに人の営みを風化、腐食させる自然の前で「防食の戦い」も重要な課題となってきた。それらの問題への解答として現在の技術が達成した成果を、明石海峡大橋と東京湾横断道路という二つの橋の例に見てみよう。

世界一の長大橋建設を支える鋼材の高強度化技術

震災をこえて建設が進む明石海峡大橋

全長約4km (3,910m)、中央支間長約2km (1,990m)。神戸市と淡路島とをつなぐ明石海峡大橋は、完成すれば英国のハンバー橋を抜いて世界最大の吊り橋となる。そのすぐ足元を平成7年1月、マグニチュード7.2の兵庫県南部地震、別名阪神・淡路大地震が直撃した。調査の結果、明石海峡大橋を支えている地盤が動いていることがわかった。しかし橋の構造そのものには、大きな支障はなく、地盤が動いた分、橋の長さを約1.1m延長するという全体規模から見ればわずかな修正だけで、その後の進捗には影響が出ていないという。使用鋼材量約20万トン。今回は、平成9年度の完成に向けて工事が進むこの巨大な「鉄の芸術品」にスポットを当ててみる。

M7.2の衝撃にも揺らがなかった明石海峡大橋

「ああ、大丈夫だった、しっかりと立っていた……関係者の誰もがそう思ったのと違いますか」

本州四国連絡橋公団（以下本四公団）計画課長代理・塚本氏は、震災直後、無事に立っている明石海峡大橋を見た時のことをふりかえって語る。「(自宅では) 筆筒も冷蔵庫もみんな倒れてきよって、目茶目茶になりましたよ。明石海峡大橋は紀伊半島沖でマグニチュード8.5の大地震が起きた場合にも大丈夫のように設計されてはいましたが、正直なところ、現実にあれほどの地震が来るなど考えてもおらんかったですからねえ」

平成7年1月17日早朝、神戸で大地震発生とのニュースが日本中を震撼させたことはまだ記憶に新しい。震度7、マグニチュード7.2という大都市直下型地震。明石海峡付近の深さ10～20kmあたりが震源だという。

兵庫県南部地震は、まさに建設が進む明石海峡大橋の真下で起こったのだ。

震災当時、明石海峡大橋の進捗状況は、二本の主塔を経て

兩岸の着力点にケーブルがつながれた状態だった。主塔は全高約282.8m。東京タワーの高さが333mだから、そのアンテナのてっぺんから50mほど下の高さを直径1m 13cmほどのケーブルが2本走っている様を想像していただければ、イメージとしては近いだろう。ビルならば102階建てに匹敵する高さである。

「補剛桁の架設が始まっていなかったことが、幸いといえば、幸いだったかもしれません」(本四公団・帆足設計課長)。完成していればともかく、仮置部材・完全定着前の部材・架設機械などがあり、何らかの被害が出ていたかもしれないというわけだ。実際には、「震災対処に人員や機械類が総動員されて工事が約1カ月ほど停止したのと、地盤が動いて距離がわずかに伸びた分のサイズ修正のみで、遅れた分はその後の努力で十分取り戻すことができました」(前出・塚本課長代理) という。

日本が誇る世界一の橋は、マグニチュード7.2の地震が直撃しても揺らがなかったのである。



コンピュータグラフィックスによる完成予想図（完成予定は1998年）

■長大吊橋 世界ランキング

	中央支間長 (m)	国名	完成年
1 明石海峡大橋	1,990	日本	1998 (予定)
2 グレートベルト東道路橋	1,624	デンマーク	1998 (予定)
3 ハンバー橋	1,410	イギリス	1981
4 江陰長江公路大橋	1,385	中国	1997 (予定)
5 ツイン・マダ橋 *	1,377	香港	1997 (予定)
6 ベラザノ・ナローズ橋	1,298	アメリカ	1964
7 ゴールデン・ゲート橋	1,280	アメリカ	1937
8 ホグステン橋	1,210	スウェーデン	1998 (予定)
9 マキノ橋	1,158	アメリカ	1957
10 南備讃瀬戸大橋 *	1,100	日本	1988

*は道路鉄道併用橋

*強度は本来SI単位で表記すべきだが、橋梁用線材に関しては現在でも、たとえば「180キロ級」というように呼称されているので、文中では kgf/mm^2 の単位としている。



180 kgf/mm^2 の高張力ケーブル素材が、この壮大な計画を支えている（神戸側より撮影）

吊橋の要—ケーブル強度の飛躍的進歩

全長4km、スパン2kmという長大橋を可能にするためには、数々の技術的達成が必要とされたことはいまでもない。鋼材という視点から見た場合、新たな高強度鋼の開発が求められることになった。こうした巨大建造物では、強度と靱性の双方を兼ね備え、できるだけ軽い構造で大きな荷重を支えられる鋼材が求められるのである。

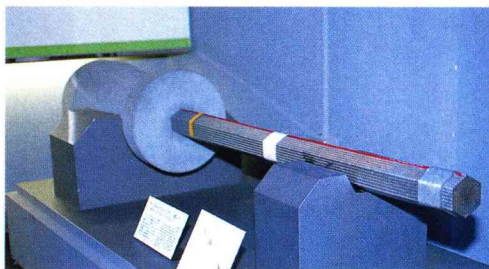
なかでも第一に特筆すべきは、高張力ケーブル素材の開発であろう。現状、明石海峡大橋は直径約1m 13cmのケーブル2本によって吊られているが、もし新たな高張力のケーブル素材が開発されていなければ、ケーブルは4本になっているはずだった。工期面からもコスト面からも、新たな高張力ケーブル素材の成功は、大きな意味があったのだ。

最終的に明石海峡大橋のケーブルに採用されたのは、180 kgf/mm^2 *の線材である。実はつい最近の瀬戸大橋までは160 kgf/mm^2 の線材が使われていた。しかし南備讃瀬戸大橋の8万6,000トン（上部構鋼材量）に比して、明石海峡大橋では20万トンと、ケタ違いの荷重がかかってくる。同じ強度のケーブル用鋼材を使えば、明石の場合、ケーブルは2本では足りなくなってしまうことが計算の結果、明らかになっていた。そこで公団では160 kgf/mm^2 のもので設計を検討する

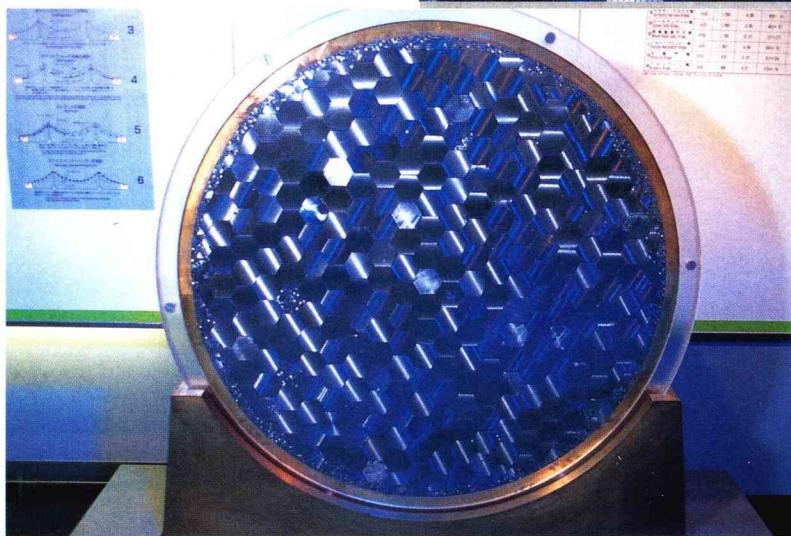
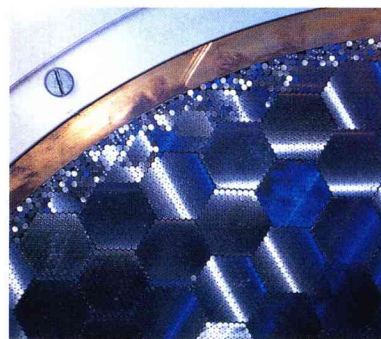
とともに、関係各社に依頼して180 kgf/mm^2 の線材の開発にも取り組むことになった。

「橋の長大化にともなって、死荷重も大きくなっていくという問題があります。つまり橋が大きくなればなるほど、自分自身を支えるために使われる力が増加する。従来のものを使用するとすれば、ケーブル断面寸法的な面からケーブルは4本にせざるをえなかったんです。しかし180 kgf/mm^2 のものができれば、2本でいける。工期からいっても、コストからいっても、2本にできればメリットが大きいわけです」（本四公団・平野設計課長）。

世界で初めてストレートワイヤー（よじりを与えていない真っ直ぐな鋼線を束ねたもの）をケーブルに使ったのは1883年のブルックリン橋（米）で、ワイヤー強度は112 kgf/mm^2 だった。その後、1903年のウィリアムズ・バーグ橋（米）では141 kgf/mm^2 、1909年のマンハッタン橋では148 kgf/mm^2 というように向上しているが、1931年にジョージ・ワシントン橋に155 kgf/mm^2 というケーブルが採用されて以来、50年以上にわたって大きな変化はなかった。88年に完成した瀬戸大橋の160 kgf/mm^2 もその延長上にある。ワイヤー強度の向上は、過去約100年間で48 kgf/mm^2 を向上させるのがやっとだったのである。



ストランドの実物大モデル／この六角の束290本でケーブル1本が構成される。実物は長さ約4km



ケーブル断面を見ると六角形のストランドと1本ずつの素線とがよくわかる。使われた素線は総延長で約30万km、地球7周半分に相当する長さである

本州四国連絡橋プロジェクト

本州と四国を橋で結ぼうという計画は現在3ルートからのアプローチがなされている。広島県と愛媛県を結ぶ「尾道・今治ルート」、6つの瀬戸大橋で知られる「児島・坂出ルート」、うず潮と淡路島をこえて明石海峡をひとまたぎにする「神戸・鳴門ルート」である。このうちすでに「児島・坂出」ルートは1988年に開通、本州・四国が陸続きになった。「神戸・鳴門ルート」も1998年（平成9年度）に明石海峡大橋の完成とともに開通する。残る「尾道・今治ルート」も平成10年度には開通予定。

それが瀬戸大橋から10年後の明石海峡大橋で一足飛びに20kgf/mm²も強くしようというのだから、それに相当する技術革新がなくてはならない。

開発に当たっては、これまでの高強度鋼開発のノウハウが総動員された。

1%のケイ素添加が高強度化を達成

高強度化のポイントのひとつは「冷間伸線加工」にある。吊橋用ワイヤーの場合、基本的にはダイスを通したいわゆる低温伸線によってフェライト（鉄全体）／セメンタイト（鉄の炭化物）組織の微細化を図るとともに結晶の方向をそろえることで強度を上げる。最初の丸棒の強度は110kgf/mm²、これを焼き入れして135kgf/mm²まで強化する。それを順次細くしながら強度を上げてゆき、素線にする。むろん引き抜きの回数が多いほどセメンタイト層の間隔は小さくなり、強度は上がってゆく。ただし元の材料からの減面率（断面積の減少率）は80%くらいが限度だから、12mmの丸棒から約5mmのワイヤーへと段階を追って伸線していくのがせいぜいである。またここまでの工程はすでに従来からの当たり前の技術であって、これだけでは180kgf/mm²は達成できない。そこでふたつめとして「材料の成分調整」によって原材料そ

のもののセメンタイト層の間隔を小さくすることやフェライトの強度を上げることが検討された。合金設計原理の応用から、この目的にはケイ素の添加が効果的であることがわかり、これを採用した。同時にこのようにして得られた金属組織の特性をできるかぎり生かすために、製鋼の工程で不純物の結晶を5～10ミクロン以下に抑える技術も開発された。

しかしこうして強化が図られた素線用鋼材にも、もうひとつクリアすべき課題があった。素線に溶融亜鉛メッキをほどこす際に発生する強度低下の問題である。

亜鉛メッキは防食には不可欠な工程である。だが溶かした亜鉛プールに鋼材をくぐらせる際、層状に分布しているセメンタイトが分断されてしまい、強度が大きく低下してしまうことがわかっていった。ようやく得られた強度が、メッキのために失われるのは惜しい。しかし亜鉛メッキを省略すると耐食性が低下する。

この問題は研究の結果、さらにケイ素を加えることでセメンタイトの分断が起きにくくなることを見出だされ、解決した。その結果をふまえ明石海峡大橋の素線ではケイ素の添加量を1%（瀬戸大橋では0.2%）にまで引き上げたのである。

数々の課題をクリアすることでようやく180kgf/mm²という世界最強の吊橋用ワイヤー素線が誕生した。明石海峡を



主塔を上から見下ろす。左右は吊り下げられたハンガーロープ

用途別に見た鋼材の強度

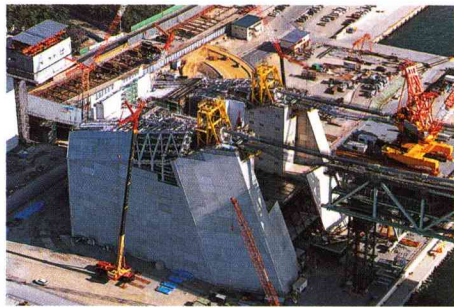
	(kgf/mm ²)
明石海峡大橋のケーブル素線	180
一般建築・土木用	30～60
自動車・船舶用	35～60
原子炉圧力容器用	50～90
深海用耐圧殻用	100～170
ロケット・航空機用脚用	130～270



290本のストランドを圧縮して丸い断面に仕上げるスクイジング・マシン。大震災が襲ったのは、この工程に入った時だった



1本にまとめられたケーブル。さらに被覆と塗装による防食が施されて完成する。下にみえる木の部分はキャット・ウォークと呼ばれる足場



ケーブルによって引っ張りに変えられた橋の重量を陸上でしっかりと支えるアンカレッジ。ケーブルは290本のストランド単位で固定されている



本四公団 第一建設局
設計課長
帆足 博明氏



本四公団 第一建設局
建設第一課長
平野 茂氏

ひとまたぎにする全長4kmの巨大構造物を、ミクロの技術が支えたのである。

こうして開発されたハイテン・ワイヤー（直径5.23mm）は、127本を束にまとめたストランドとよばれる単位で施工にまわされた。ブルックリン橋以来、吊橋のワイヤー張り渡しはリールを使って1本ずつ渡していくエア・スピニング（AS）工法が多く採用されてきたが、これはとんでもなく時間と人手を要する作業である。そこで日本では風に対する強さや施工スピード、人員が少なくすむことなどを考慮し、大規模な吊橋としては国内初の関門橋以来、ストランド単位での施工方法が採用されてきたという経緯がある。この方法は素線を工場であらかじめ束にまとめておくところからプレハブ・ストランド（PS）工法と呼ばれる。

ストランドの素線数は橋の規模によって異なるが、明石海峡大橋の場合は127本。数が半端なのは断面を正六角形にするためだ。この六角を290ストランドに集めて最終的に直径約1.3mの丸く太い断面にまとめあげ、スクイジングマシンと呼ばれる機械で圧力をかけてしっかりとした左右各1本のケーブルに仕立てていく。ハイテンワイヤーのおかげで2本におさまったケーブルだが、素線数にして約37,000本、1本ずつつないでいけば地球を7周半するほどの鋼線が使われている。

ワイヤーは、それぞれのストランドごとにアンカーレイジとよばれる兩岸の土台に固定する。橋の全荷重がケーブルを伝わって「引っ張り」に変えられ、アンカーレイジがその張力を支えることで、この巨大な鉄の塊が宙に吊り上げられているのである。

強度と溶接性の高度な両立が求められた桁用鋼材

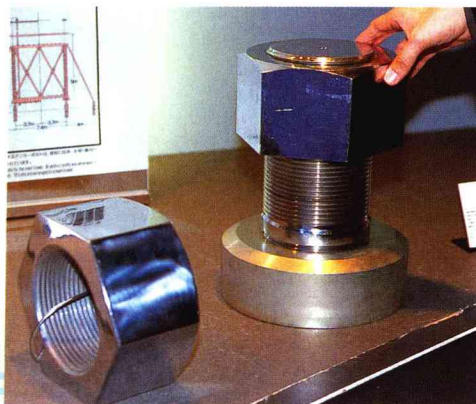
死荷重を軽減するうえで、ケーブルに次いで重要なのが補剛桁用の鋼材である。吊り橋に用いられる桁は、橋に剛性を持たせる役割を担っているため補剛桁と呼ばれる。吊橋だからといってこれほどの長大橋で、車が通ったり多少の風が吹いたくらいでゆらゆらと揺れるというようなことはあってはならないわけで、そのための安定した剛性が補剛桁によって確保されているのである。

ケーブル同様に軽く強くという要請からここでも高張力鋼が使用された。補剛桁の形式は施工性、耐風安定性などを考慮検討した結果、伝統的なトラス式が採用された。溶接で箱断面に組立てた部材を三角形の骨組みでつないでいくおなじみの方法である。

このトラス式補剛桁にはSM490YやSM570（数字はMPa（SI単位）で表した強度）といった高張力鋼が主として使われた。のみならず、主構上下弦材の一部にはHT

長大橋に吊橋形式が採用される理由

たとえば、1本のストローを手にとって両方から押してみると簡単に折れ曲がってしまうはずだ。これが鋼材という「座屈」に当たる。逆に同じストローを引っ張ってみると、引き伸ばしたり、引き切ったりするには相当な力が必要になる。引っ張りでは「座屈」という構造上の不安定要素は現れず、材料の持つ本来の強度を十分に生かすことができる。つまり軽く強く作りたい構造物では引張力を生かすことが有効というわけだ。この引張力によって重量を支える構造が吊橋である。



主塔に使われる高力ボルト。さすがに大きい



主塔にもSM570、SM490Y、SM400といった高強度鋼材が使用されている。鋼材の重ね面どうしはメタルタッチ（金属面どうしがピッタリと接触している状態で、本四公団の基準では隙間0.04mm以下）が94%以上という高度な加工技術によって仕上げられている。また揺れを緩和するため主塔のところどころには特殊な制振装置が組み込まれている

（ハイテン）690、HT780といった高強度の予熱低減型鋼が採用されている。これらはJIS規格にはない新開発の鋼材だ。瀬戸大橋ではSM580が使用されたが、明石海峡大橋では、さらに既存のスペックの枠をこえた高度な溶接用鋼材の開発が求められたのである。

開発に際して求められたのは、可能な極限まで溶接割れ感受性を下げるとともに、溶接時の予熱を下げるということだった。

「一般に強度を出すためには炭素を混ぜればいいわけですが、炭素が多くなると靱性が落ち、溶接割れが起きやすくなる。強度も出せて、溶接性も確保するにはどうすればいいのかが課題になったわけです。

従来は溶接の時に100～120℃という高い温度で鋼材の予熱をしなければなりませんでした。しかしそれだけ高い温度で予熱するということは、作業性が悪くなり、温度による変形も大きく、品質管理も難しくなる。せめて予熱を50℃程度に抑えられないかということで検討を進めました」（前出・平野課長）

この課題を解決するために研究を進めた結果、2通りの方法が見出だされた。

ひとつは1%弱程度の銅を添加する方法によって、炭素の替りに銅で鋼材の強度を出そうというものである。

「従来、鋼材の中に溶け込んだ銅というのは耐候性の向上への効果以外は悪い影響をおよぼすと考えられてきたんですが、それが逆に強度と溶接性を両立するのに効果があることがわかったわけです」（前出・帆足課長）

また、もうひとつの方法として、添加成分をコントロールするとともに適切な焼き入れをする方法も見いだされた。これは添加するボロン、チッ素、炭素、ニッケルの量を調整して靱性を確保する一方、軟化を抑えるためにニオブ、バナジウムを添加し、高強度と溶接性を両立させたものだ。こうした高強度鋼の開発が、世界一の長大橋建設を陰から支えているのである。

阪神・淡路大震災によって、耐震設計の建築物や高速道路が倒れ、東海道・山陽新幹線の路線が崩れた。だがそうした現実をかたくなに拒絶するかのように、明石海峡大橋は敢然としてそびえ立っている。完成まであと約2年。復興を遂げようとする神戸の街とともに、世界一の長大橋は、もうすぐ産声を上げようとしている。

〔取材協力：（社）本州四国連絡橋公団〕