最近の建設用ワイヤ材料について†

小 林 剛*

Recent Trend of Wire Structural Materials

by

Takeshi KOBAYASHI*

1 はじめに

建設用としてワイヤ材料が用いられるのは、大別すると、構造材と架設材とに分けられるであろう。当然の事ながら、前者は構造部材または構造材料として建造物の一部を構成するものであり、後者は建造物の建設時等に短期的に用いられるものであり、材料分類としてワイヤロープが主となる。ここでは、前者の構造部材または材料用として用いられるワイヤ材料に限定して、最近の動向を述べてみたいと思う。

構造材としてワイヤが用いられるのはその特性上、引張力を分担する役割、換言すると、引張力を受けた状態で使用される、いわゆるテンション・メンバーが大部分である。したがって、その目的から高強度材である必要があり、現在のところ、高炭素鋼線製品が中心に使用されている。

鋼線製品を用いた、いわゆるテンション・メンバーを用途上、中分類的に分けると PC 鋼材と吊材に大別できる。前者には、製品として PC 鋼線とか PC 鋼より線が含まれ、後者には、(1) 本四架橋のつり橋のメイン・ケーブルワイヤや、(2) 最近、多数建設されている斜張橋の吊材に用いられる平行線ケーブル、(3) また、つり橋のハンガーロープとか吊屋根のケーブルに用いられるワイヤロープが製品群として含まれる。

また、これらの製品の使用上の要求特性としては、(1) 高強度化、(2) 耐久性向上、(3) 耐食性向上等があげられるであろう。

以下、これらワイヤ構造材の最近の動きについて、その分類および特性上の諸問題を中心に概説し、最後に、最近、また注目された鋼線以外のテンションメンバーである非金属緊張材についての動向を一部加えて本稿を構成したい。

2 ワイヤ構造材の分類

2・1 PC 鋼材

プレストレスコンクリートは 1930 年頃ヨーロッパで実用化が計られ、第 2 次大戦後アメリカ、ヨーロッパを中心として急速に広まり、日本においても、1950 年代以降その使用が拡大し今日に至っている。プレストレスコンクリートの発達と同時にそれに用いる PC 鋼材の発達でもあり、細径、低強度のものから太径、高強度のものへと発達してきている。現在、図 1 に示す種類の PC 鋼線および PC 鋼より線が製造されている。また、JIS G3536 では、PC 鋼線の場合、線径は 2.9 mm から 9 mm まで、強度は 145 kg/mm² から 195 kg/mm² まで規定しており、PC 鋼より線の場合、2 本より、3 本より、7 本よりおよび 19 本よりの 4 種類で、強度は、2、3 本より線が 195 kg/mm²、7 本より線が 175 kg/mm² と 190 kg/mm² の 2 グレード、19 本より線の場合、サイズにより 185 kg/mm² と 190 kg/mm² に分かれている。特に、最後の 19 本より線は日本独自のものであり、ストランド径が 21.8 mm で、強度は 185 kg/mm² と結果的にかなりの太径・高強度化が計られている。このように日本では、1980 年代以降あらゆる PC 鋼材が製造可能となっており、PC 鋼材自体の改良開発は、一部、更に高強度化する方向とか最近の非金属緊張材の開発などを除くと、少なくなり、むしろ開発の方向は応用技術の開発の方向へ向かっている。それらの一部を以下に紹介する。

プレストレスコンクリートは周知のとおりプレテンション工法とポストテンション工法に大別できる。プレテンション工法の場合、部材が大型化してきているため、使用する PC 鋼より線も太径化してきているが、基本的にはそれほど変化はない。一方、ポストテンション工法の場合は従来より、緊張後ダクト内にグラウトすることによるボンド工法が主であるが、ア

† 原稿受理 昭和63年11月4日 Received Nov. 4, 1988

* 神鋼鋼線工業(株) 尼崎市浜町, Shinko Wire Company Ltd., Nakahama-cho, Amagasaki

図1 PC鋼線およびPC鋼より線の分類¹⁾

アメリカで主として建築のスラブのプレストレス導入方法として発達したPC鋼より線にあらかじめ工場でグリースを塗布しその上をプラスチックでカバーした、いわゆるシーストPC鋼より線を用いるアンボンド工法もある。最近、日本でも大型コンクリート建築物のスラブにさかんに使用されるようになってきた。

アンボンド工法の場合、PC鋼より線とコンクリートはグリースで隔たれているため、字義どおり付着が生じていない。このため、アンボンド工法はボンド工法に比較して、施工性は大変良いが、構造的に問題が発生する場合もある。この点をカバーすべく、アンボンド工法のグリースの代りに常温硬化型の樹脂を用いて、施工時はアンボンドで使用時はボンドという工法も、最近、開発されようとしている。²⁾

また、最近、主として橋梁において、プレストレス力を更に有効に活用しようという目的で、ボックスけたのウェブ部の面積を小さくしてけた重量の軽減を計り、PC鋼材をコンクリート外に出したアウトケーブル方式が注目をあびている。いずれにせよ、各々の新しい工法に適したPC鋼材の選択もしくは、要すれば、開発が必要となってくるであろう。

2・2 吊材

2・2・1 メインケーブルワイヤ 本年4月に開通した本四架橋児島一坂ルートは各種構造の長大橋が瀬戸内の多島海美とマッチし、内外に有名になったのは周知のとおりである。このルートにも吊橋が下津井瀬戸大橋、南北備讃瀬戸大橋と三橋建設されたが、現代の技術で長大スパンを架橋する橋梁型式として吊橋の右に出るものはない。この吊橋の長大スパンをささえているものが左右のメインケーブルであり、このメインケーブルは直径約5mmの亜鉛めっき鋼線を何万

本と平行に束ねたものである。亜鉛めっき鋼線としては、通常、引張強さが160 kg/mm²級のものが使用されている。

世界の長大吊橋の主径間の長さをリストアップしたものを表1に示すが、これより分かれるとおり、瀬戸大橋の場合は、いずれの吊橋とも主径間は約1000mである。現在、基礎工事のすすんでいる明石海峡大橋の場合、主径間は瀬戸大橋の2倍の約2000mとなる。これはイギリスのハンバー橋の約1400mをはるかに超す世界一の長大吊橋となる。

また、海外では明石海峡大橋より更に長大スパンのイタリア本土とシシリー島をつなぐメッシナ海峡大橋とか、ジブラルタル海峡を渡る吊橋とか、鋼線製メインケーブルによる吊橋の限界と言われている主径間4000m級に近づく吊橋が計画されているといわれている。

2・2・2 平行線ケーブル 平行線ケーブルとは、長大橋のメインケーブルほど多本数ではないが、高々400～500本のワイヤを工場にて平行に束ねてケーブルとし、テンションメンバーとして橋梁等に使用するものである。平行線ケーブルの鋼材としては5～7mmの鋼線が主として使用されるが、一部PC鋼より線も使用される。

最近、国内外で中央径間400～500m程度の橋梁に構造的優位性および審美的理由等により斜張橋型式が多数採用されているが、前述の児島一坂ルートにも櫃石島橋、岩黒島橋と二橋採用されている。⁴⁾この斜張橋の斜吊材にもこの平行線ケーブルが多く使用されている。

斜張橋に使用されるケーブルとしては、特に活荷重の変動がケーブルに影響する度合いが大きいので、ケー

表 I 世界長大吊橋の順位³⁾

順位	橋 梁 名	中央支間長 (m)	国 名	完 成 年
①	明 石 海 峡 大 橋	1990	日 本	1998(予定)
2	ハ ン バ ー 橋	1410	イ ギ リ ス	1981
3	ベ ラ ザ ノ ・ ナ ロ ウ ズ 橋	1298	ア メ リ カ	1964
4	ゴ ー ル デ ン ・ ゲ ー ト 橋	1280	ア メ リ カ	1937
5	マ キ ノ 橋	1158	ア メ リ カ	1957
⑥	南 備 讃 瀬 戸 大 橋	1100	日 本	1988
7	第 2 ボ ス ボ ラ ス 橋	1090	ト ル コ	1988
8	ボ ス ボ ラ ス 橋	1074	ト ル コ	1973
9	ジ ョ ー ジ ・ ワ シ ン ト ン 橋	1067	ア メ リ カ	1931
10	4 月 25 日 橋	1013	ポ ル ト ガ ル	1966
11	フ ォ ー ス 道 路 橋	1006	イ ギ リ ス	1964
⑫	来 島 第 3 大 橋	1000	日 本	未定
⑬	北 備 讃 瀬 戸 大 橋	990	日 本	1988
14	セ バ ー ン 橋	988	イ ギ リ ス	1966
⑮	下 津 井 瀬 戸 大 橋	940	日 本	1988
⑯	多 々 羅 大 橋	890	日 本	未定
⑰	大 鳴 門 橋	876	日 本	1985
⑱	来 島 第 1 大 橋	860	日 本	未定
19	ニ ュ ー ・ タ コ マ ・ ナ ロ ウ ズ 橋	853	ア メ リ カ	1950
⑳	因 島 大 橋	770	日 本	1983

○: 本四連絡橋

ブルとしての疲労特性, すなわち, ワイヤはもちろんケーブルのアンカー部の疲労特性に優れていることが要求されている。現在は主として, 従来の亜鉛合金による定着に比べて疲労強度が高いといわれる樹脂定着の方法が多く採用されている。

また, 吊橋の場合, 海上等の環境のきびしい雰囲気で使用されるケースが多いため, ケーブルの防食方法は環境に応じて種々の方法がとられている。

最近, 平行線ケーブルの施工性, 運搬性を改善する方法として, 平行線ケーブルに若干ツイストを加え, 防食のため防錆剤を塗布し, その上から高密度ポリエチレンを押出加工して被覆した, いわゆるセミパラレルワイヤストランドが使われはじめている。

2・2・3 ワイヤロープ ワイヤロープはワイヤ製品のなかでは一番古いテンションメンバー用材料であり, 当然のことながら, 架設材だけでなく各種構造用引張部材に使用されている。それらの代表的な例としては, (1) ロープの柔軟性を兼ねそなえたものの例として, 吊橋のハンガーロープ, (2) ケーブル構造物の吊材等に使用されるストランドロープやスパイラルロープ, また, (3) ニールセン橋の吊材や, 特にドイツ等で多数の斜張橋の吊材に使用されている特殊なロックドコイルロープ等がある。

防食方法としては, 鋼線に亜鉛めっきをすることをベースとし, ペンキ塗装等の重防食方法を採用しているのが一般的である。前述の平行線ケーブルの防食方法と比較して防食性能は低い, 使用雰囲気と用途に応じて使い分けされるべきであろう。

3 ワイヤ構造材の特性

3・1 高強度化

ワイヤ構造材の要求特性はいろいろあるが, テンションメンバーである以上, 何といたっても高強度であることが一番重要なことである。これまでのワイヤ製品の開発の歴史は, 換言すると, 高強度化の歴史であると言える。

まず, PC 鋼材を例にとると, 初期の 19 世紀後半の PC 鋼材は引張強さが 35 kg/mm^2 程度の軟鋼材料であったが, その後, 1928 年に $53 \sim 60 \text{ kg/mm}^2$ の材料が用いられ, 1930 年代に入って引張強度が 95 kg/mm^2 程度の硬鋼線がフランスで, また, さらにドイツで 160 kg/mm^2 以上のピアノ線が用いられるようになりプレストレストコンクリートが普及しだした。すなわち, ワイヤの高強度化によりプレストレストコンクリート技術が確立したとも言える。その後, 1960 年代にアメリカで PC 鋼より線で 270 K グレード, すなわち 190 kg/mm^2 級のものが開発された。日本

表Ⅱ メーン・ケーブル・ワイヤの成分例

グレード	C	Si	Mn	P	S	Al
180 kgf/mm ² 級	0.80	0.93	0.75	0.009	0.011	0.026
160 kgf/mm ² 級	0.77	0.24	0.77	0.010	0.012	0.35

でも 1971 年に JIS G3536 SWPR7B として規定され広く普及し、現在、世界的に最も多く使用されている PC 鋼材となった。

現在、PC 鋼材の更なる高強度化の要求は少ないが、ワイヤ製造技術上では 270 K グレードのもうひとつ上の 300 K グレード (210 kg/mm²) の PC 鋼より線の製作が可能となっており、アメリカの一部 PC ストランド・メーカーは 300 K ストランドとして PR をはじめている。⁵⁾

つぎに、吊材の方に眼をむけてみると、明石海峡大橋のメインケーブルに使用されるめっき鋼線の引張強さは従来の 160 kg/mm² より 20 kg/mm² 高い 180 kg/mm² のものを使おうという考えがある。これは表Ⅱに示すように従来の成分に比較して Si 量をコントロールした成分系とし、更にこれまで開発蓄積された高度の製線技術を駆使することにより高強度化が計られたものである。高強度めっき線の特性を表Ⅲに示す。これより、20 kg/mm² の強度アップにもかかわらず、じん性その他の特性は従来材と何ら変わらないことがわかる。^{6)~8)}

また、構造用ワイヤロープ等でも同成分系を用いて更に高強度化が計られようとしている。⁹⁾

3・2 耐久性の向上

ワイヤ構造材は張力のかかった状態で長時間使用されるため、耐久性のあることも重要な要求特性のひとつとなる。ワイヤ材料に耐久性があるということは具体的に各種項目が考えられるが、主なものをあげると次のとおりとなる。

- (1) リラクゼーションやクリープ特性に優れていること。
- (2) 疲労特性が良いこと。
- (3) 遅れ破壊をおこさぬこと。

(1) のリラクゼーションやクリープが少ないことについては、現在、PC 鋼材関係では、製造の最終工程でスタビライズ処理、いわゆるホットストレッチ処理がされた低リラクゼーション鋼材が世界的に広く使用されるようになった。低リラクゼーション材とは例え

図2 ワイヤの部分片振疲労試験結果例⁹⁾
(供試材: PC鋼線 7φ mm, 平均応力=50 kg/mm²)

ば、現在審議中の ISO 規格案では、初荷重が実際破断荷重の 70% で 1000 時間後のリラクゼーション値が普通材の 8.0% に対して 2.5% 以下と規定されているものである。

(2) の疲労特性が良いことについては、前述のとおり吊材関係では特に重要な要求特性となる。テンションメンバーの場合、設計上のある一定緊張力をうけた状態で変動応力が加わることとなるため、いわゆる部分片振疲労特性の良いたことが要求される。ワイヤの部分片振疲労試験の結果例を図 2 に示す。¹⁰⁾

(3) の遅れ破壊をおこさぬことについては、元来、鋼線自体はよほどのことがないかぎり遅れ破壊をおこさない材料といわれている。これは、鋼線の製造上、鋼線の金属組織が鋼線の長さ方向に繊維状(ファイバー状)になっているため、鋼線の断面方向のクラック発達に対して抵抗力が強いためと考えられている。しかし、鋼線が腐食雰囲気にとさらされて緊張使用された場合、いわゆる応力腐食により破断することもある。使用する環境にあった防食設計が鋼線の場合も必要不可欠といえる(次項参照)

3・3 耐食性の向上

鋼線製品はたいへん優れた工業材料のひとつであるが、数少ない欠点のひとつは錆びやすいということである。したがって、ワイヤ構造材を使用する時は環境にあった防食設計を必要とすることは前述のとおりである。

まず、PC 鋼材の場合であるが、PC 鋼材はもともと防食性の高いコンクリート中で使用されているため特別な防食設計は必要としないのが一般である。とこ

表Ⅲ メーン・ケーブル・ワイヤの特性例

グレード	線径 (mm ²)	耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び(%) GL=250 mm	弾性係数 (kgf/mm ²)	ねじり 回 値 (回)	部分片振引張疲労 強度 (kgf/mm ²) σ _{min} =50 kgf/mm ²	巻付性 3d×8	亜鉛付着量 (g/m ²)
180 kgf/mm ² 級	5.0	164.5	189.5	6.5	20500	24	55.0	良	330
160 kgf/mm ² 級	5.12	145.8	166.9	6.8	20500	23	38.0	良	320

ろが、最近、下記のような各種問題が発生している。

- (1) コンクリートかぶり厚不足等の理由による飛沫帯でのコンクリート中鋼材腐食の問題
- (2) コンクリート骨材不足による海砂使用等によるコンクリート中塩分量の問題
- (3) 外国の例では、融氷剤散布による橋梁上床版部鋼材腐食の問題
- (4) 海洋構造物等特別腐食雰囲気の激しい状態で使用するケースの増加

これらの場合、コンクリート側の防食設計を見直すのが第一であるが、特別な場合、PC 鋼材側の防食法も見直す必要がある場合がある。その一例として、アメリカにおいて、エポキシ・コーティングした PC ストランドを使用する提案がある。

つぎに、吊材の場合であるが、吊材はテンション・メンバーとしてそれぞれ使用環境に適した防食設計を施されて使用されている。例えば、児島-坂出ルートの斜張橋の2橋ではケーブルに2重のポリエチレン管をかぶせ、内部に有機防錆材が注入されている。その他一重のポリエチレン管で内部にセメントミルクをグラウトする方法や、現場施工でケーブルにアルミ等の金属管をかぶせる方法など各種採用されている。

しかし、多くの場合、鋼線に亜鉛めっきをし、更にそれに何らかの重防食による組合せ防食法が採用されている。

最近、建設材料ではないが、通信線の架線関係を中心として、亜鉛めっきの代りに亜鉛-アルミめっき線の採用の動きがある。将来、建設材料関係へ波及しないとも限らないので参考までに言及しておく。

亜鉛-アルミめっき法は従来よりアメリカ、ヨーロッパ等では実用化が計られており、防食性、特に海洋、または海岸雰囲気に対して亜鉛めっき線より格段

に優れているといわれてきたものである。図3に亜鉛めっきと亜鉛-アルミめっきの塩水噴霧試験の結果例を示している¹¹⁾。亜鉛-アルミめっきの方が数倍すぐれていることがわかる。

4 非金属緊張材

これまで、ワイヤのテンション・メンバーとしては金属、それも鋼線がほとんどを占めてきた。

最近になり、アラミド繊維に代表される有機繊維の高強度化、また、炭素繊維に代表される無機繊維の台頭等、これまでの鋼種でなく、これら非金属繊維をテンション・メンバーに使用しようという機運が高まってきた。鋼線のテンション・メンバーに比較して非金属緊張材の場合の特長はつぎの点があげられる。

- (1) 引張強度が鋼線に遜色なく、むしろ高い。
- (2) 比重が小さく、比強度が高い。
- (3) 耐食性がたいへん優れている。
- (4) 非磁性である。

一方、欠点としてはつぎの点がいわれている。

- (1) じん性（せん断、伸び）が悪い。
- (2) 耐熱性が鋼線に比較して悪い。
- (3) 現在のところたいへん高価である。

以下、若干、非金属繊維による緊張材の特性を述べてみる。

4・1 強度

超高強度繊維（いわゆるスーパー繊維）は、一般に¹²⁾つぎの2つを同時に満足するものといわれている。

強度：20 g/D 以上、もしくは2.5 GPa 以上

弾性率：500 g/D 以上、もしくは55 GPa 以上

実際に使用する状態の複合材料となった場合、繊維の占有率の問題より強度は低下するのは当然であるが、繊維単体としては大変強度の高いものと言える。図4に各種金属繊維の引張強度を示す。

4・2 比重

非金属繊維は軽いことが特長のひとつであるが、鋼

図3 スーパー・ガルバ（亜鉛・アルミめっき）の塩水噴霧試験結果例¹⁰⁾

（供試材：SS-41，50°×100°×3°）

図4 各種高強度繊維の引張強度

表Ⅳ 各種超高強度繊維の比重

超高強度繊維の種類	比 重
アラミド繊維	1.4~1.5
超高強度ポリエチレン繊維	1.0
高強度ポリオキシメチレン繊維	1.45
炭素繊維	1.8~2.1
ボロン繊維	2.6
スチール繊維	7.8

と比較して、各種材料の比重の例を表Ⅳに示す。

比重が小さいことは、テンションメンバーとして使用する場合は特に有利で、鋼のテンション・メンバーでは自重のため切断してしまうようなロング・スパンの場合でも非金属繊維は使用可能ということになる。

強度を比重で除した比強度は鉄鋼の場合約 $2 \sim 3 \times 10^6 \text{ cm}$ であるのに対し、非金属繊維の場合その 10 倍以上のものが多く。

4・3 じん性（せん断、伸び）

鉄鋼の場合、せん断強度は引張強度の 60% 程度あるが、非金属繊維の場合極端に小さい。したがって、純引張力がかかっている場合はよいが、横圧等の合成応力がかかった場合問題となる。このため、定着方法等特別な注意を払う必要がある。

また、非金属繊維は引張試験の時、金属のような降伏現象が表われず、直線域で突然切れるものが多い。したがって、破断時伸びも 2% 前後と小さなものが多い。プレストレスト・コンクリートの緊張材にこのような伸びの小さな材料を用いるのは、破壊予知ができなく危険であるという意見もあるが、一方、非金属繊維の場合弾性係数が小さく、そのため部材たわみ量が大きく出るので、たわみより破壊予知ができるという意見もある。図 5 にアラミド製緊張材を用いた PRC けたの曲げ試験結果例を示す。この図より、クラック発生荷重はプレストレス力の増加と共に高くなっており、クラック発生後はたわみの増加と共に荷重が直線的に増加しているのが分かる。

図 5 アラミド緊張材を用いた PRC けたの荷重-たわみ曲線

4・4 その他

非金属繊維による複合材の独得の現象として、繊維と結合材の間のボンド破壊に起因するストレス・ラプチャー現象とか、疲労強度が応力幅により決まり、平均応力の大きさに関係無いとかの現象もあり、実際使用にあたっては、充分特性の検討が必要であろう。

しかし、耐食性が鋼線と比較して格段に優れていること等より、海洋構造物への適用例が出はじめており、また、非磁性である特性を利用した応用例も検討されているようである。このような特殊用途への適用例が今後増加してくるものと思える。

5 ま と め

建設材料として用いられるワイヤ材料、そのなかでも緊張材として用いられるものについて、最近の動向を紹介してきたが、本文でものべたとおり、ワイヤ材料の改良・発達は独自に行なわれてきただけではなく、建造物の使用目的を達するための要求品質の多様化、高度化と共に進歩してきたものとも思える。そのなかで常に改良・改善の目標となったものは、ワイヤ材料の宿命ともいえる、高強度化と耐食性（耐久性も含めて）の改善という二大テーマであったと言える。

非金属繊維による緊張材というニューフェイスが登場しつつある現在であるが、建造物の質的高度化にあわせるべく、永遠のテーマである高強度化と耐食性向上を追いつづけていくことになるう。

参 考 文 献

- 1) 土井 明, コンクリート工学, **18**, 12, 52 (1980).
- 2) 鈴木計夫, 倉内 実, 南 敏和, 白濱昭二, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.1261 (1988).
- 3) 溝口 忠, 橋梁, **23**, 10, 11 (1987).
- 4) 篠原洋二, 橋梁と基礎, **21**, 1, 11 (1987).
- 5) 坪野秀良, 倉内 実, 小林 剛, 山岡幸男, プレストレストコンクリート, **26**, 3, 5 (1984).
- 6) 森山 彰, 本四技報, **13**, 50 (1989).
- 7) 川端義則, 坪野秀良, 山岡幸男, 浜田和一, 川口康信, 高橋宏幸, 鉄と鋼, **71**, 13, S1524 (1985).
- 8) Y. Yamaoka, K. Hamada, H. Tsubono, H. Kawakami, Y. Oki and Y. Kawaguchi, Trans. ISIJ, **26**, 1059 (1986).
- 9) 早崎清志, 福田喜久夫, 玉井鬼子雄, 資源・素材 '88 (熊本), p.1~4 (1988).
- 10) 牧野文雄, 小松定夫, 田中義人, 原口俊男, 土木学会論文集, 374/I-6, 477 (1986).
- 11) 杉本正威, 鉛と亜鉛, **122**, 9 (1984).
- 12) 本宮達也, “ニュー繊維の世界”, 第一章 (1988) 日刊工業新聞社.
- 13) M. Tanigaki, T. Okamoto, T. Tamura, S. Matsubara and S. Nomura, IABSE 13th CONGRESS PREREPORT, p. 19 (1988).