

斜張ケーブルの現状

成井 信*
渡部 篤**

1. はじめに

プレストレストコンクリート斜張橋（以下 PC 斜張橋と記す）は、一般には、プレストレストコンクリートの主桁、鉄筋コンクリートの塔、高強度ケーブルの斜材から成っており、近年、従来の PC 桁橋の最長支間記録 270 m をはるかに超える長大 PC 斜張橋が欧米各国で続々と建設され注目を集めている。我が国においても、これまでに 17 橋が完成しており、現在 4 橋が施工中である。この中には中央支間 250 m の呼子大橋も含まれており、我が国の PC 斜張橋の建設も試験的段階から実用的段階へ移行しつつあることが伺われる。

周知のごとく、斜張橋では、斜材の高強度ケーブル（以下斜張ケーブルと記す）を緊張して、斜張ケーブルに調整力を与え、主桁や塔に生ずる応力を低減している。斜張ケーブルの破断は、主桁や塔の破損を引き起こす可能性もあり、斜張橋にとって斜張ケーブルは“生命”とも言うべきものである。また、この斜張ケーブルは通常のコンクリート桁内部に配置される PC ケーブルに比べ活荷重による大きな変動応力を受け厳しい疲労条件下に置かれるとともに、火災や車の衝突のような不慮の事故による損傷の危険にも晒される。したがって斜張ケーブルの設計に際しては、斜張橋特有のこれらの条件を十分に考慮する必要がある。

本文では最初に国内外での斜張ケーブルの使用実績調

査結果について述べ、続いてこれらの調査結果をもとに通常用いられている斜張ケーブルの特性および定着工法について概要を述べ、最後に設計上の問題点についても若干触れてある。

2. 使用実績

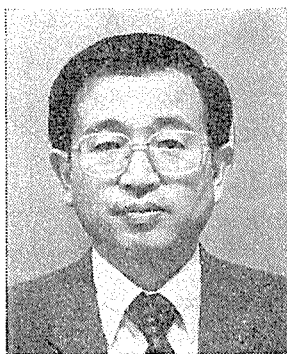
斜張ケーブルの配置形式、定着方式、使用鋼材、防錆方法について国内外の PC 斜張橋を対象に実績調査を行った。表—1 は国外の実績表であり、表—2 は国内の実績表である。国外の実績は道路橋、鉄道橋およびこれらの併用橋に関するものであり、国内の実績は完成あるいは工事中のすべての PC 斜張橋に関するものである。

表—1、表—2 より斜張ケーブルの配置形式は、支間 150 m を超える長大橋においては、2 面 1 段の PC 斜材から 2 面ハープ型あるいはファン型のマルチケーブルタイプへの移行が伺われる。これは長大橋の場合、主桁を張出し架設工法によることが多いことを考えると、当然の結果であろう。

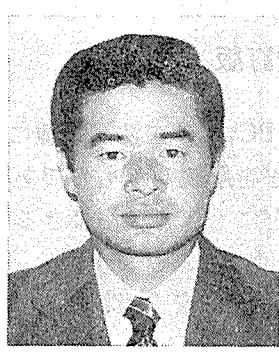
しかしながら国内では支間 150 m 以下の場合でもこの形式が採用されている。西ドイツの Metten 橋や Fl-öber 橋では、近年においてもなお 1 段の PC 斜材を採用しており、支間が小さい場合、経済性、疲労、景観のうでマルチケーブルタイプが有利であるとは一概に言えない。

定着方式は、斜張ケーブルへの調整力の導入が確実で、再緊張・微調整が可能なネジ式が最も多く利用されている。クサビ式も次に多いが、この場合、PC 鋼より線を 1 本ずつクサビで止め、微調整を全体で行うことができる。ボタンヘッド式 (HiAm) はアメリカの Pasco-Kennewick 橋をはじめとして各国で採用されている。

使用鋼材は PC 鋼材 (PC 鋼より線、PC 鋼線、PC 鋼棒) が最も多く採用されている。特に国内の最近の PC 斜張橋はすべて PC 鋼材を採用している。これは国内の鋼斜張橋では L.C.R. (Locked Coil Rope) や P.W.S. (Parallel Wire Strand, $\phi 5$ mm の亜鉛メッキされた素線を使った平行線ストランド) が多用されているのとは比べ好対照をなしている。国内では PC 鋼棒が 5 橋に採用されているが、これは支間が小さく、荷重も小さいため



* Shin NARUI
本州四国連絡橋公団第二建設局坂出工事事務所第五工
事長, Dr.- Ing.



** Atsushi WATANABE
オリエンタルコンクリート
(株) 本社技術部主任研究
員

表-1 国外の斜張ケーブル

橋名	所在国 完成年	最大 支間長 (m)	幅員 (m)	橋種	斜張ケーブル			
					配置形式	定着方式	鋼材	防錆方法
Maracaibo	ベネズエラ 1962	235.0	15.6	道路	2面1段	ソケットシム式	ロックドコイル 16-φ74	亜鉛メッキ装 塗
Kiev	ソ連 1963	144.0	10.0	道路	2面3段 放射型	ハイテンボルト 圧着方式	4-φ70 4-φ55 2-φ70	塗装
Polcevera	イタリア 1966	210.0	10.0	道路	2面1段		PC鋼より線 16-16T12.7他	コンクリート被覆
Magliana	イタリア 1967	145.0	20.5	道路	2面1段		PC鋼より線 76-12T12.7他	コンクリート被覆
Wadi-kuf	リビア 1971	202.0	13.0	道路	2面1段	ネジ式	PC鋼より線	コンクリート被覆
Main II	西ドイツ 1972	148.2	30.95	併用	2面3段 ハープ型	ネジ式 (ディビダーク)	PC鋼棒 25-φ16	鋼セメントモルタル 管
Tiel	オランダ 1973	267.0	17.8	道路	2面2段 放射型	クサビ式	PC鋼より線 12T16	コンクリート被覆
Chaco- Corrientes	アルゼンチン 1973	245.0	11.9	道路	2面2段 ファン型	ネジ式	ロックドコイル 80-φ92	亜鉛メッキ装 塗
Rio- Magdalena	コロンビア 1974	140.0	12.5	道路	2面1段		PC鋼より線 15-16T12.7	コンクリート被覆
Donau 運河橋	オーストリー 1975	119.0	15.8	道路	2面1段	ネジ式	ロックドコイル 8-φ72	亜鉛メッキ装 塗
Carpineto	イタリア 1977	181.0	9.5	道路	2面1段		PC鋼より線 15-16T12.7	コンクリート被覆
Brotonne	フランス 1977	320.0	19.2	道路	1面21段 ファン型	クサビ式 (フレシネー)	PC鋼より線 39~60-T15.7	鋼セメントモルタル 管
光復大橋	台湾 1977	134.0	20.0	道路	2面2段 放射型	クサビ式 (フレシネー)	PC鋼より線 12T12.7	鋼セメントモルタル 管
Pasco- Kennewick	アメリカ 1978	299.0	24.3	道路	2面18段 放射型	ボタンヘッド式 HiAm (BBRV)	PC鋼線 283-φ6.35	ポリエチレン管 セメントミルク
Ganter	スイス 1979	174.0	10.0	道路	2面1段	クサビ式 (VSL)	PC鋼より線 16~22-T12.4	コンクリート斜 被覆
Lyne	イギリス 1979	55.0	11.56	鉄道	2面2段 放射型	ボタンヘッド式 DINA (BBRV)	PC鋼線 79-φ7	ポリエチレン管 セメントミルク
Rio-Ebro	スペイン 1980	146.2	28.4	道路	2面35段 ファン型	(ストロングホールド)	ロックドコイル	亜鉛メッキ装 塗
Donau Metten	西ドイツ 1980	145.0	26.0	道路	1面1段	クサビ式 (ディビダーク)	PC鋼より線 56~19T15.2	コンクリート被覆
紅水河橋	中国 1980	96.0	5.6	鉄道	2面3段	クサビ式	PC鋼より線 6×10-7φ5	ガラス繊維織布 エポキシ樹脂塗布
上海浜港大橋	中国 1981	200.0	12.0	道路	2面11段 ハープ型	ボタンヘッド式 HiAm (BBRV)	PC鋼線 73~147-φ5	ガラス繊維織布 エポキシ樹脂塗布
Barrios de Luna	スペイン 1984	440.0	22.5	道路	2面27段 ファン型	クサビ式 (ストロングホールド)	PC鋼より線 31~80T15.2	ポリエチレン管 セメントミルク
Diepoldsau	スイス 1985	97.0	12.0	道路	2面7段 ファン型	ボタンヘッド式 DINA (BBRV)	PC鋼線 33~77-φ7	ポリエチレン管 セメントミルク
Penang	マレーシア 1985	225.0	24.0	道路	2面12段 ハープ型	ネジ式 (ディビダーク)	PC鋼棒 10-φ32, φ36	鋼セメントミルク 管
East- Huntington	アメリカ 1986	274.0	9.14	道路	2面16段 ファン型	ボタンヘッド式 HiAm (BBRV)	PC鋼線 85~307-φ6.35	ポリエチレン管 セメントミルク
Coatzacoalcos	メキシコ 1986	288.0	14.0	道路	2面17段 ファン型	クサビ式 (フレシネー)	PC鋼より線 33~61T15.7	鋼セメントミルク 管
Flößer	西ドイツ 1986	106.5	23.0	道路	2面1段	クサビ式 (ディビダーク)	PC鋼より線 18-19T15.2	コンクリート被覆
Alcoy	スペイン 1986	110.0	17.4	道路	2面10段 ファン型	クサビ式 (ストロングホールド)	PC鋼より線 T15.2	ポリエチレン管 セメントミルク
Posados- Encarnation	アルゼンチン 工事中	330.0	17.4	併用	2面16段 ファン型	ボタンヘッド式 HiAm (BBRV)	PC鋼線	ポリエチレン管
Sunshine- Skyway	アメリカ 工事中	365.8	29.0	道路	1面21段 ファン型	クサビ式 (VSL)	PC鋼より線	鋼セメントミルク 管
Jacksonville	アメリカ 工事中	396.0	32.3	道路	2面21段 ハープ型	ネジ式 (ディビダーク)	PC鋼棒 φ32	鋼セメントミルク 管

表—2 国内の斜張ケーブル

橋名	所在地 完成年	最大 支間長 (m)	幅員 (m)	橋種	斜張ケーブル			
					配置形式	定着方式	鋼材	防錆方法
島田橋	岐阜県 1963	39.7	4.3	道路	2面1段	ネジ式	PC鋼より線 37-φ3.4	コンクリート被覆
万博東歩道橋	大阪府 1969	37.8	12.6	歩道	1面2段 ハープ型	クサビ式 (フレジナー)	PC鋼より線 4~12T12.4	ステンレス管 セメントモルタル
嶮山中央歩道橋	神奈川県 1974	40.0	6.5	歩道	1面3段 ハープ型	亜鉛鍍込み式	PWS 2×127-φ5	テープに樹脂 処
並木大橋	茨木県 1978	40.0	7.0	歩道	1面4段 ハープ型	ネジ式 (ディビターク)	PC鋼棒 6-φ32	アルミ管 セメントモルタル
松ヶ山橋	神奈川県 1978	96.0	4.2	道路	2面4段 ファン型	ネジ式 (ディビターク)	PC鋼棒 3~8-φ32	アルミ管 セメントモルタル
多摩132号線 歩道橋	東京都 1978	35.5	7.9	歩道	1面5段 ハープ型	ネジ式 (ディビターク)	PC鋼棒 6-φ32	アルミ管 セメントモルタル
小本川橋	岩手県 1979	85.0	7.3	鉄道	2面2段 ハープ型	ネジ式 (SEEE)	PC鋼より線 8-F200	コンクリート被覆
宇部カントリー 歩道橋	山口県 1980	38.0	3.0	歩道	2面4段 ファン型	ネジ式	PC鋼より線 T21.8, T17.8	ポリエチレン被覆 (アンボンド加工)
勝本ダム大橋	長崎県 1980	27.0	4.0	道路	2面4段 ファン型	ネジ式 (SEEE)	PC鋼より線 F200, F100	ポリエチレン被覆 (タイプル)
自然休養村 やすらぎ橋	富山県 1981	63.9	3.0	道路	2面4段 ファン型	ボタンヘッド式 HiAm (BBRV)	PC鋼線 37~55-φ7	ポリエチレン管 セメントミルク
一本杉公園 連絡橋	東京都 1982	56.5	5.0	歩道	2面5段 放射型	ネジ式 (SEEE)	PC鋼より線 F100~F270	ポリエチレン被覆 (タイプル)
錦ヶ丘 第3跨道橋	北海道 1982	52.0	10.5	道路	1面3段 ハープ型	クサビ式 (フレジナー)	PC鋼より線 27T15	鋼(セメントミルク)管
豊後橋	福岡県 1983	37.5	16.0	道路	2面3段 ハープ型	ネジ式 (SEEE)	PC鋼より線 8-F100	ポリエチレン被覆 (タイプル)
堀越学園 明館橋	東京都 1984	67.0	8.0	道路	2面8段 ファン型	クサビ式 (VSL)	PC鋼より線 5~25T15.2	ポリエチレン管 セメントミルク
小滝橋	兵庫県 1984	44.4	5.0	道路	2面3段 ファン型	ネジ式 (ディビターク)	PC鋼棒 5-φ32	鋼セメントミルク管
守口2号橋	大阪府 1985	38.0	4.76	歩道	1面4段 ファン型	ネジ式 (SEEE)	PC鋼より線 F270	ポリエチレン管 (タイプル)
衡原大橋	兵庫県 1986	56.3	4.0	道路	2面11段 ファン型	ボタンヘッド式 HiAm (BBRV)	PC鋼より線 22~30T15.2	ポリエチレン管 (ロングラウト方式)
新門司2号橋	福岡県 工事中	74.4	23.0	道路	2面7段 ファン型	ネジ式 (SEEE)	PC鋼より線 F310~F360	ポリエチレン管 (タイプル)
呼子大橋	佐賀県 工事中	250.0	7.5	道路	2面17段 ファン型	ネジ式 (SEEE)	PC鋼より線 F270~F360	ポリエチレン管 (タイプル)
新丹波大橋	兵庫県 工事中	110.0	6.75	道路	2面5段 ファン型	ネジ式 (ディビターク)	PC鋼棒	ポリエチレン管 セメントミルク
高の原橋	奈良県 工事中	34.9	15.0	歩道	2面2段 ファン型	ボタンヘッド式 DINA (BBRV)	PC鋼線 127, 109-φ7	ポリエチレン管 セメントミルク

に、ケーブルやケーブル定着部に高い疲労強度が要求されなかったことによるものと思われる。

防錆方法はPC斜材を除いては、ポリエチレン管あるいは鋼管内に鋼材を挿入した後、セメントミルクを注入する方法が最も多く採用されている。これはPC鋼材が最も多く採用されていることと関係している。

3. ケーブルの種類と特性

PC斜張橋の斜張ケーブルの種類を表—1、表—2から使用実績の多い順に挙げると次のようになる。

- ・PC鋼より線 (29件)
- ・PC鋼線 (8件)

- ・PC鋼棒 (8件)
- ・L.C.R. (4件)
- ・P.W.S. (1件)

斜張ケーブルの選定においては、ケーブル自体の特性のみを比較検討するだけでなく、それと同時に定着工法の検討も合わせ行う必要がある。

PC斜張橋に使用されるケーブルおよび定着工法に要求される条件として次のようなものがある。

- ・引張強さが大きいこと
- ・ヤング係数が高く安定していること
- ・疲労強度が高いこと
- ・緊張、定着が容易で確実なこと

- ・再緊張、微調整が可能なこと
- ・取扱いが容易で架設しやすいこと
- ・防錆処理が容易で耐久性があること
- ・取替えが可能なこと
- ・安価であること

以上の事項に沿って各ケーブルの特徴を述べることにする。

3.1 PC 鋼より線

ケーブルの中では最も引張強さが大きく、斜張ケーブルに使用されるものは $\sigma_{pu}=190 \text{ kg/mm}^2$ である。ヤング係数は $E_p=2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ であるが、ケーブルとして使用した場合は低くなる傾向にある。定着部の疲労強度は定着工法によってかなり差があるが、 $15 \sim 26 \text{ kg/mm}^2$ ぐらいが設計上の目安となる（以下も同様に 200 万回繰返しに対する設計上の目安）。

緊張方法は、定着工法によって異なり、ケーブル 1 本単位で緊張する方法と PC 鋼より線各 1 本単位で緊張する方法とがある。定着方式はクサビ式、ネジ式、ボタンヘッド式およびこれらの組み合わせ方式がある。通常、PC 鋼より線を平行に束ねてケーブルを構成するが、より合わせる場合もある。

ケーブルの架設は、予めセットされたケーブルの保護管内にプッシングマシンで PC 鋼より線を本ずつ挿入する方法と、工場で保護管内に挿入、またはポリエチレンコーティングしたケーブルを現場に搬入し、クレーン等で吊り上げる方法とがある。

防錆方法は保護管内にセメントミルクを注入するだけのものが一般的で、P.W.S. および L.C.R. に比べ簡単で確実である。

3.2 PC 鋼線

$\sigma_{pu}=165 \text{ kg/mm}^2$, $E_p=2.05 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 。PC 鋼より線に比べ引張強さはやや小さいがヤング係数が高い。疲労強度は定着方法により異なるが、 $20 \sim 30 \text{ kg/mm}^2$ 程度である。

PC 鋼線を平行に束ねてケーブルとなし、したがって緊張もケーブル単位で行われ、緊張力の調整は 2 つ割りシムあるいはネジで行われる。定着方式としてはボタンヘッド式 (HiAm) あるいは亜鉛鍍込み式がある。

保護管内への PC 鋼線の挿入、定着体のケーブルへの取付けはすべて工場で行われる。保護管はポリエチレン製のものを使用しており、架設時のハンドリングが容易である。防錆方法は他の PC 鋼材と同様である。

3.3 PC 鋼棒

$\sigma_{pu}=120 \text{ kg/mm}^2$, $E_p=2.05 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 。ケーブル材料の中では引張強さが最も小さいが、ヤング係数は PC 鋼線程度である。疲労強度は $8 \sim 15 \text{ kg/mm}^2$ でケーブル

の中で最も小さい。

ケーブルとして使用する場合、束ねず、スペーサを用いて一定の間隔を保ち、平行状態で使用するので保護管の直径が大きくなる。また通常、横締めで使用されているアンカープレートに定着すると定着部の寸法も大きくなり、ケーブル 1 本当りの引張荷重が限定される。

架設は一般にケーブル下に支保工を組み立て、その上で一定の長さの保護管と PC 鋼棒を下から順次接続する。緊張は PC 鋼棒を数段階に分けて行い、ネジ、ナットで定着するので時間を要する。

防錆方法は保護管内にセメントモルタルあるいはセメントミルクを注入する。

3.4 L.C.R.

$\sigma_{pu}=130 \sim 150 \text{ kg/mm}^2$, $E_p=1.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 。引張強さは PC 鋼棒よりも大きい、ヤング係数が最も小さい。疲労強度は $15 \sim 25 \text{ kg/mm}^2$ 程度である。

ケーブルの定着方式は通常、ソケット内に亜鉛銅合金を約 460°C で鋳込む、亜鉛鋳込み方式である。

ケーブルの架設は比較的容易である。

防錆方法としては表層 (Z 層) には亜鉛メッキが施され、さらに表面塗装が行われるが、塗替えが必要となる。

3.5 P.W.S.

$\sigma_{pu}=160 \text{ kg/mm}^2$, $E_p=2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 。引張強さおよびヤング係数は PC 鋼より線、PC 鋼線よりも亜鉛メッキ処理のためやや低くなる。疲労強度は $20 \sim 25 \text{ kg/mm}^2$ 程度である。

ケーブルは、亜鉛メッキ鋼線を平行に束ね、六角形に集束するので、設計張力に合わせて鋼線数を増減することができない。定着方式は L.C.R. と同様である。

ケーブルの架設は、ケーブルの剛性度が大きいため面倒で時間がかかる。

防錆方法はプレハブラッピングによる場合、ケーブル下に総足場が必要となり、費用がかさむ。

4. ケーブル定着工法

活荷重による変動応力が大きく、また風により振動する斜張ケーブルを定着するためには、疲労強度が大きく制振効果の大きな定着構造が要求される。これらの要求を満たすべく開発されたケーブル定着工法の構造と特徴を以下に述べる。

(1) フレシネー工法

フレシネー工法には、斜張ケーブルの定着工法として H システムと HC システムがあり、ケーブルは PC 鋼より線 $\phi 15.2 \text{ mm}$ で構成される。

H システムはトランペット状の補助鋼管によって応力

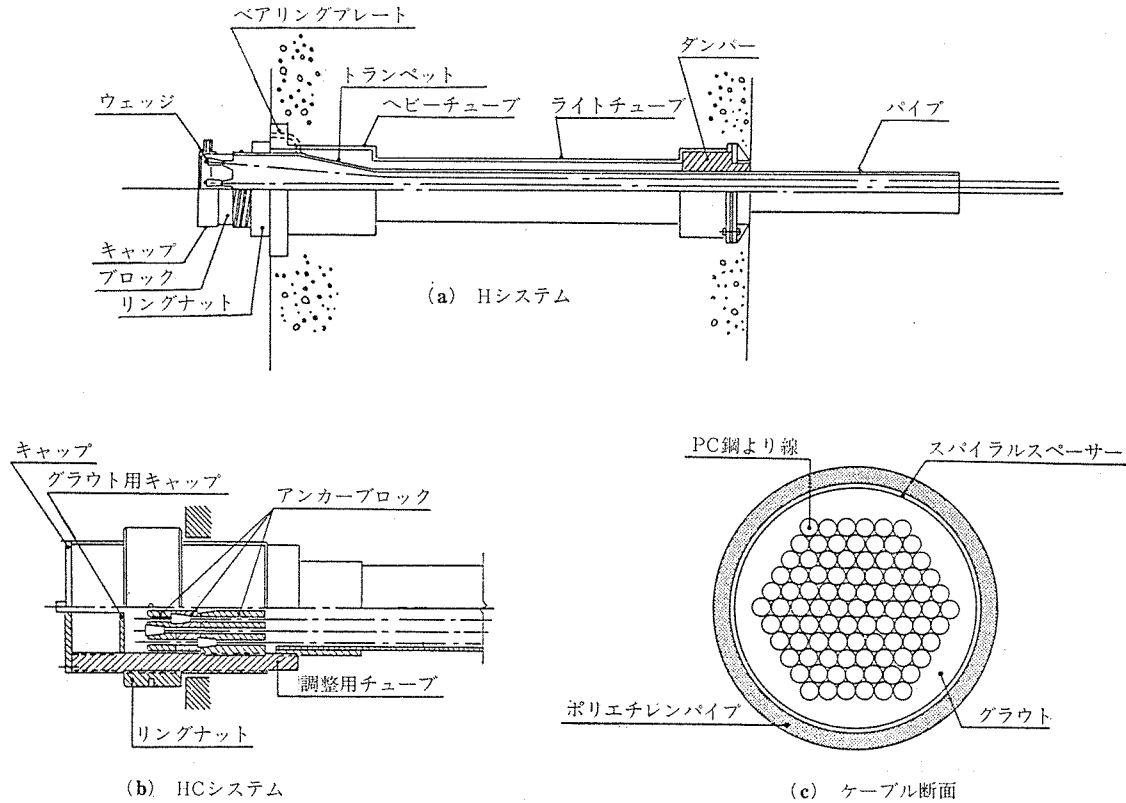


図-1 フレシネー工法

緩衝区間を設け、さらに定着体内部にグラウト注入を施しPC鋼より線クサビ定着端での応力変動を減少させることによって疲労強度を改善している(図-1(a)参照)。

HCシステムは、Hシステムが大型となるとき定着具全体寸法が大きくなるため、これを防ぐような定着構造としている(図-1(b)参照)。PC鋼より線は直線状に配置したままアンカーブロックに定着できるように、三枚重ねのアンカーブロックに分散定着されている。

定着用クサビの材質、形状に特長があり、グラウトなしでも斜張ケーブル本体の疲労強度と同程度の疲労強度が発揮できる。

斜張ケーブルの防食は、鋼管またはポリエチレン管内にケーブルを挿入後、セメントミルク、その他の防錆材を注入する(図-1(c)参照)。

定着部の疲労強度は引張強さの45%上限応力度で200万回繰返しに対し、約26 kg/mm²である。

(2) ディビダーク工法

斜張ケーブルとしてDW鋼棒φ32mmおよびφ36mmおよびPC鋼より線φ15.2mmを使用する。

DW鋼棒の場合には保護管の中間部を2重管構造とし、この区間には多数のリベットを打ちつけており、グラウト注入後はこれによって、活荷重等による変動応力を周囲のコンクリートに伝達する。したがって定着具に

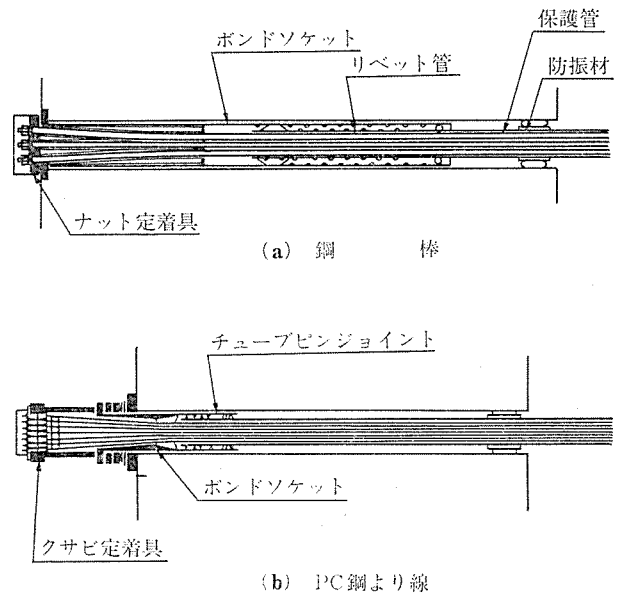
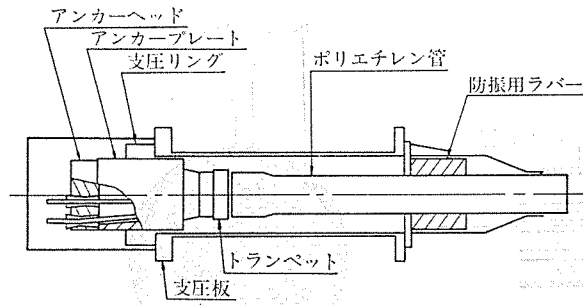


図-2 ディビダーク工法

はそれ以前に作用する死荷重による応力が作用するだけである(図-2(a)参照)。

PC鋼より線の場合にはボンドソケットが変動応力を受け、ケーブル軸と直角方向の力としてグラウトを介してコンクリートに伝達する(図-2(b)参照)。

定着部の疲労強度は引張強さの45%上限応力度で200万回繰返しに対し、DW鋼棒で12 kg/mm²、PC鋼



図—3 ストロングホールド工法

より線で 16.5 kg/mm² 程度である。

(3) ストロングホールド工法

斜張ケーブルの定着工法として開発されたものは、Bタイプアンカーと呼ばれ、ケーブルはPC鋼より線φ15.2mmで構成され、緊張側はクサビ方式で定着される(図—3参照)。

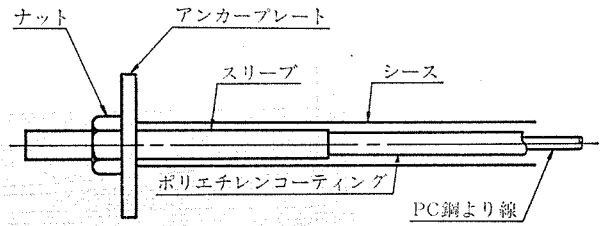
定着部の疲労強度を向上させるためにソケット内部にレジンコンパウンドが注入される。このレジンコンパウンドは、斜張ケーブルの緊張完了後、現場でバイブレータを用いて注入される。レジンコンパウンドに作用する応力は、主桁完成後の荷重増加によるものだけである。レジンコンパウンドは、エポキシ樹脂、硬化剤、鋼球、亜鉛粉末で構成されている。

上限応力度 72 kg/mm²、下限応力度 54 kg/mm²、応力振幅 18 kg/mm² で疲労試験が行われ、ケーブルおよび定着体とも何ら異状のないことが確かめられている。

(4) SEEE 工法

斜張ケーブルの定着工法として、従来のF型ケーブルの定着具に改良を加え、疲労強度を高めたF-H型ケーブルがある。ケーブルはPC鋼より線φ8.1mm~φ12.7mmで構成され、平行または多重鋼より線に加工して使用する。

PC鋼より線束をマンションに圧着し、マンションの外周に加工されたネジとナットによって定着される(図—4参照)。マンションの一部に特殊エポキシ樹脂が注入された疲労強度を高めている。



図—4 SEEE 工法

ケーブルは工場で直接ポリエチレンをコーティングし、PC鋼より線間には防錆油がアンダーコーティングされている。

定着部の疲労強度は引張強さの40%上限応力度で200万回の繰返しに対し、15 kg/mm²~17.5 kg/mm²である。

(5) VSL 工法

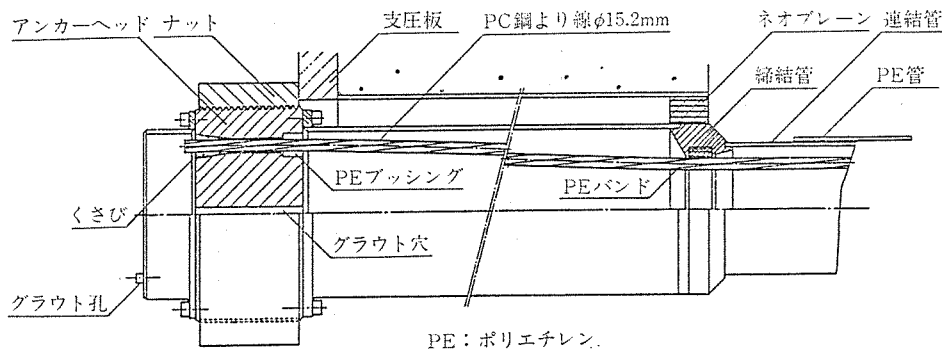
斜張ケーブルの定着工法としてステイクケーブルシステムがあり、ケーブルはPC鋼より線φ15.2mmで構成される。

定着部は、従来のVSL工法と同様にアンカーヘッドにクサビ定着するが、耐疲労性を向上させるために、アンカーヘッドのクサビ定着と反対側の面にポリエチレン性のブッシングを使用している。また、PC鋼より線束をPE管の内径にまで絞るための締結部にはポリエチレン製のリングを配置することでPC鋼より線をアンカーヘッドの穴の中心に固定するようにし、腹圧力の緩和および角変化に対する摩擦係数を減じている(図—5参照)。

定着部の疲労強度は引張強さの40%上限応力度で200万回繰返しに対し、約20 kg/mm²である。

(6) HiAm アンカーケーブル工法

平行に束ねたPC鋼線あるいはPC鋼より線をスペーサープレートに規則的に並べてボタンヘッドディングを施して定着する。PC鋼線はφ7mm、PC鋼より線はφ12.7mmおよびφ15.2mmを使用している。鋼製ソケットとPC鋼材の空隙には鋼球、亜鉛粉末、エポキシ



図—5 VSL 工法

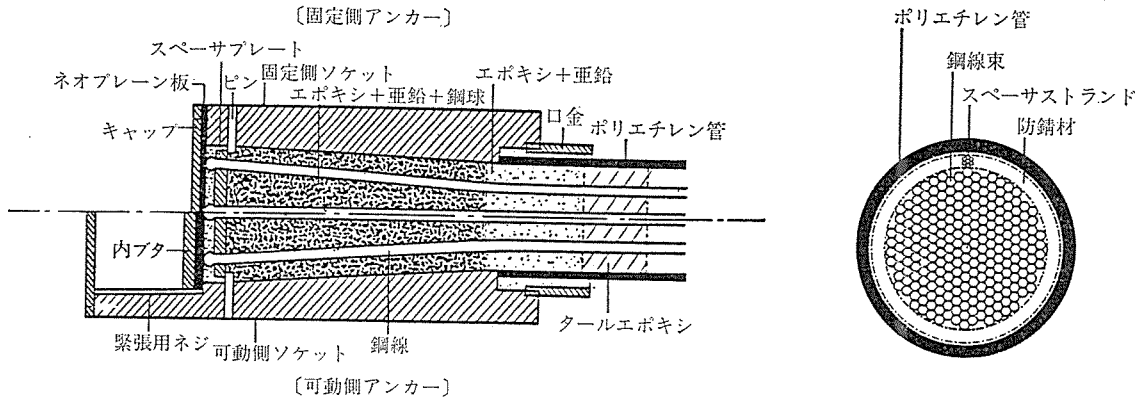


図-6 HiAm アンカーシステム

樹脂を常温で鑄込むことにより、疲労強度や抜け出しを改善している（図-6 参照）。張力調整は適当な厚さの2つ割りシムを増減して行う。ケーブルの加工およびアンカーの取付けはすべて工場で行われる。防錆にはポリエチレン管を用いセメントミルクを注入するが、PC 鋼材に亜鉛メッキを施したノングラウトタイプもある。

定着部の疲労強度は引張強さの45% 上限応力度で200万回の繰返しに対し、約25 kg/mm² である。

5. 設計上の問題点

5.1 ケーブルの許容応力度

PC 斜張橋の斜張ケーブルの許容応力度について、我が国では、目下のところ示方書による明確な規定はな

く、各国の基準を参考にしたり、支間200m以下の橋を対象とした（社）日本道路協会「道路橋示方書Ⅱ鋼橋編」の14.5ロープおよび平行線ストランド（PWS）の許容値あるいは、支間200m以上の橋を対象とした（財）海洋架橋調査会「PC斜張橋上部工設計指針（案）」を準用している。ちなみに上記道示では引張強さに対し安全率を3.0、指針（案）では2.5をとって許容値としている。

支間200m以上のPC斜張橋の場合には、上記指針（案）を採用しているのが現状であるが、支間200m以下の場合には上記道示を準用すべきか指針（案）を準用すべきかは議論の余地がある。

斜張ケーブルの許容応力度は、ケーブルの強度あるい

表-3 ケーブルの設計法に関する各国の規準（平行線ケーブル）

分類 項目	道路橋示方書 (1980)	ASCE Recommendation (1977)	本州四国連絡橋 公団基準案 (1978)	DIN 1073 (1974)	PC斜張橋上 部工設計指針 (案)	
引張強さ	ワイヤ (索線)	160 kg/mm ² 以上 (平均 165 kg/mm ² 以上)	—	160 kg/mm ² 以下 180 kg/mm ² 以下	公称引張強度 (β_N) は 160 kg/mm ² を超えないこと	—
	ストランド	(ワイヤの) 引張強度) × 0.95	—	—	—	—
弾性係数	2.0×10^5 kg/cm ²	1.97×10^6 kg/cm ² ~ 2.00×10^6 kg/cm ²	2.0×10^5 kg/cm ²	2.0×10^5 kg/cm ²	—	
許容応力度	保証破断力の $\frac{1}{3}$	保証破断力の38%~40% (61~64 kg/mm ²) HiAm アンカーを用いた場合は、保証破断力の45% (=74 kg/mm ²)	$\sigma_a = 64$ kg/mm ²	$\sigma_H = 0.45 \beta_N$ または $\sigma_H = 0.67 \beta_{0.2}$ $\sigma_{HZ} = 0.50 \beta_N$ または $\sigma_{HZ} = 0.75 \beta_{0.2}$ H=主荷重 ; Zは従荷重 $\beta_{0.2}$: ワイヤの0.2% 伸び限界強度 $\sigma_a = 72$ kg/mm ²	$\sigma_a = 0.4 \sigma_u$ σ_u : 引張強さ	
安全率	3	2.6~2.5 (≠22 HiAm の場合)	2.5	≒2.2	2.5	
疲労に対する照査	—	—	ワイヤの場合 $\sigma_{fa I} = \frac{30}{1-k}$ ケーブル定着部の場合 $\sigma_{fa II} = \frac{15}{1-k}$ ただし許容応力度以下 $k = \frac{\text{最小応力}}{\text{最大応力}}$	$k < 1.18 - \frac{62.09}{\beta_N}$ のとき $\sigma_{fa} = \frac{25}{1-0.895k}$ $k \geq 1.18 - \frac{62.09}{\beta_N}$ のとき $\sigma_{fa} = 0.45 \beta_N = 72$ kg/mm ² $k = \frac{\text{最小応力}}{\text{最大応力}}$ $\sigma_a = \text{許容応力度}$	—	

は素線の強度が基準になるが、これに加えて、定着方法、ケーブルに生ずる2次応力等を考慮する必要がある。

許容応力度を下げることにより、ケーブルの所要断面積が増加した結果として、ケーブルの自重が増加し、サグが大きくなり、その結果、換算ヤング率が低下する。サグの変化が大きいことはケーブルに良い影響を与えない。ケーブルは定着部でサグの変化によりこじられることになる。斜張ケーブルの安全率を上げると死荷重時におけるヤング率の変動幅は大きくなる。許容応力度を下げることにより、斜張ケーブルの非線形性が大きくなり、橋全体の動きも非線形性が大きくなる。これはただ単に構造解析に非線形性をとり入れれば良いというものではなく、ケーブルの許容応力度を下げるに従って、ケーブルに生ずる2次応力の影響が大きくなる傾向にある。

参考に各国の斜張橋で適用されているケーブルの許容応力度および安全率を表—3に示す。平行線ケーブルの許容応力度は米国のASCEで約61~64 kg/mm²、ただしHiAmケーブルを用いた場合は74 kg/mm²、DIN 1073では許容応力度の上限として72 kg/mm²となっている。

以上より言えることは、斜張ケーブルの許容応力度は斜張橋の全体剛性を高める意味でも許容応力度は高い方が望ましく、ケーブルの引張強さ、定着方法、2次応力等を考慮した総合判断により決定すべきであろう。

5.2 ケーブルの疲労設計

斜張ケーブルの疲労に対する照査においては、そのケーブルの疲労強度がいくらか、ということは大きな問題であるが、ケーブル自体の疲労強度よりも定着部の疲労強度の方が幾分小さいことが知られている。したがってケーブルの疲労に対する照査においては、ケーブルに定着具を取り付けた状態での疲労強度が明らかにされなければならない。しかるにケーブルのこのような状態の疲労試験に対する国内の規定はない。

疲労試験における問題は次のとおりである。

- ① 繰返し数 200 万回は、その橋の支間、荷重、交通量に対し妥当か。
- ② 応力振幅として最大変動応力度をそのまま採用するか低減した値を採用するか(例えば DIN 1073では自動車荷重に対し 50% を低減している)。
- ③ 疲労強度の評価において、断線率何%をもってそのケーブルの疲労強度とするか(非破壊確率 95%の強度を疲労強度とする一般の鋼材の例に準じて 5%断線をケーブルの疲労強度とする考えもある)。
- ④ 疲労試験機の能力不足で、大型ケーブルの試験を

小型ケーブルで代用する場合、どのように大型ケーブルの疲労強度を推定するか。

以上のような問題は、PC 桁内に配置されるケーブルについても起こり得るものがあるが、斜張ケーブルの場合には特に疲労の影響が大きいので、十分な検討が必要である。

5.3 ケーブルの耐風設計

風による斜張ケーブルの振動としては主としてカルマン渦による渦励振が問題となる。この振動は比較的低風速下で発生し、振幅も小さく直ちにケーブルを破断へと導くものではないが、度々繰り返されるとケーブルおよびケーブル定着部の疲労破壊の原因となる。

一般に渦励振発生時の限界風速 V_{cri} は次式で求められる。

$$V_{cri} = \frac{f_i d}{S_h}$$

ここで、

V_{cri} : i 次の振動モードに対する限界風速 (m/sec)

f_i : i 次の振動モードに対する固有振動数 (Hz)

d : 保護パイプの直径 (m)

S_h : ストローハル数 (パイプに対し 0.2)

上記の式で求められる限界風速は、流れの状態、レイノルズ数、風向き、構造減衰等がある条件のもとで起こり得るもので、必ずその風速で発生するものではないことに注意する必要がある。

ケーブルの渦励振の発生事例として Brotonne 橋を挙げることができる。

完成直前の 1976 年 10 月の暴風時に、風速 15 m/sec の風(風向は橋軸線に対し 20~30°)によって全ケーブルが同時に振動し、その振幅は ±30 cm にも達したが、風速の増加とともに振動は減衰し、風速が増加するとケーブルは再び振動を始め、振動は約 30 分続いた。

関係者は、この現象を解明するために縮尺 200 分の 1 の風向に対し回転可能な半橋模型を作って風洞実験を行い、実橋での振動を再現した。

実験の結果から、計算によって求めた限界風速は 0.51 m/sec~5.04 m/sec であるが、実際に渦励振が生じた風速は 15 m/sec あるいはそれ以上であり、計算値と実験値に大きな差があることが明らかにされた。

以上の事例からも明らかなように、特にマルチケーブル方式の斜張橋では風による斜張ケーブルの振動の発生を計算によって推定することは困難であり、風洞実験が必要である。

渦励振に対する制振方法としては、Brotonne 橋のようにケーブル定着部近傍に水圧式ダンパを取り付ける方法、あるいはケーブル定着部近傍の保護管内にゴム製の

ダンパを用いる方法が知られているが、前者は2面吊りの場合、地覆幅を拡げなければならず、塔側のケーブル端に同様のダンパを取り付けることが困難であり、美観上も問題があろう。

5.4 防錆方法

斜張ケーブルの防錆方法は、PC 鋼材から成るケーブルでは鋼管またはポリエチレン管内にセメントミルクやセメントモルタルを注入する方法が最も一般的であるがフランスでは防錆材としてパラフィン注入の研究を行い、第10回 FIP 国際会議において興味ある報告²⁾を行っているので、その概要を以下に述べる。

PC 鋼材を挿入したポリエチレン管内にパラフィンを充填することはセメントミルクの場合に比べて鋼材との

付着は期待できないが、特殊な防護層を形成する。また鋼材間のフレッチング疲労の心配もなくなり、さらにパラフィンの粘性によってケーブルの減衰率の向上が期待できる。

パラフィンは比重が小さく、わずかの隙にも注入することができるため、軽量化やポリエチレン管を細くすることができる。

パラフィンを注入した場合の課題は、ケーブルの角変化による応力の緩衝方法であるが、これについては図-7に示すように、ソケットの結合部を鋼管で補強し樹脂を注入する方法や、GRP (Glass Reinforced Plastic) 管を用いる方法を提案している。

6. おわりに

現在施工中あるいは計画中の長大 PC 斜張橋については個々に技術検討委員会が編成され、設計基準や施工管理基準の整備、問題点の検討等がなされている。これらの研究成果や施工での経験を示方書として集約することにより、国内における PC 斜張橋の発展に寄与することを願うものである。

最後に、特に定着工法に関する資料を提供していただいた関係各位に紙上を借りて感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Wianecki, J. : Cables wind Excited Vibrations of Cable-Sayed Bridge.
- 2) Chauvin, A. : Developments in the Technoloty of Bridge Stays, '86 FIP 10-TH International Congress.

【1986年10月17日受付】

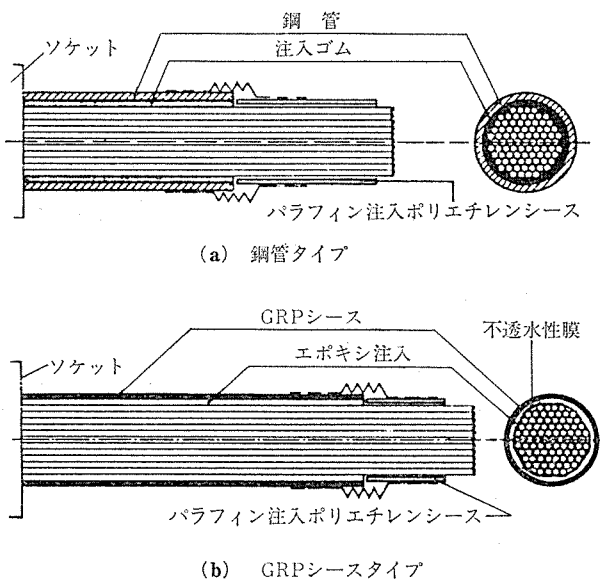


図-7 パラフィングラウトケーブルの定着部補強

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート構造物設計図集 (第2集)

本書は協会設立 20 周年行事の一環として、前回発行した設計図集の様式にならい編集した、その第2集です。協会誌第10巻より21巻に亘る巻末折込付図を主体とし、写真ならびに説明を付し、その他参考になる PC 構造物についてとりまとめた設計図集で、PC 技術者の座右に備え付けべき格好の資料と考えます。

希望者は代金 (現金為替または郵便振替 東京 7-62774) を添え、下記宛お申し込みください。

体 裁 : B4判 224 頁

定 価 : 9,000 円 (会員特価 7,000 円) 送 料 : 1,000 円

内 容 : PC 橋梁 (道路および鉄道) 74 件, PC 建築構造物 25 件, その他タンクおよび舗装等 10 件

申 込 先 : (社) プレストレストコンクリート技術協会

〒102 東京都千代田区麹町 1-10-15 (紀の国やビル) 電話 03 (261) 9151

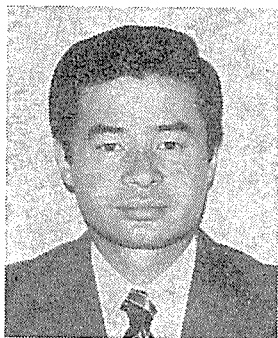
訂正のお願いとお詫び

本誌第 29 巻第 1 号 (PC 斜張橋特集) において、下記の誤りがありました。

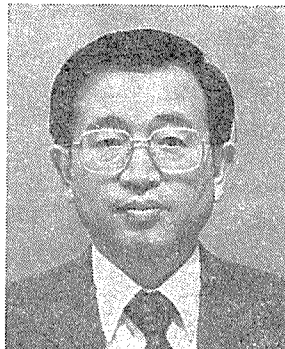
深謝申し上げますとともに、訂正をお願いいたします。

- 報告「斜張ケーブルの現状」(成井 信, 渡部 篤著), 20 頁, 脚注, 顔写真を以下のように訂正します (成井氏と渡部氏の顔写真を入れ替えます)。

(正)



* Shin NARUI
本州四国連絡橋公団第二建設局坂出工事事務所第五工
事長, Dr.-Ing.



** Atsushi WATANABE
オリエンタルコンクリート
(株) 本社 技術部 主任研究
員