

# PC橋における外ケーブル取替えに関する試験と検討

佐藤 靖<sup>\*1</sup>・関井 勝己<sup>\*2</sup>・大浦 隆<sup>\*3</sup>

## 1. はじめに

最近、PC橋において、省力化および耐久性の向上を目的とした外ケーブルシステムが注目されてきている。外ケーブルは内ケーブルに比較して、①コンクリート打設やグラウト注入の改善、②構造物の軽量化と強度の改善、③ケーブル取替えの可能性、④管理、点検の容易さ等いくつかの利点を持っており、将来的には広く普及するものと予想される。

新潟県で施工される新開橋は波形鋼板ウェブ PC 橋で下床版コンクリート内の内ケーブルのほかに曲げ上げケーブルとして外ケーブルが使用されている（図-1、2 参照）。そしてこの外ケーブルは万一の場合を考慮して取替え可能としている。すでに外ケーブルの普及が定着

しているヨーロッパ、とくにフランスでは取替え可能な外ケーブルシステムが一般的であるが、取替え方法およびその理論等についての詳細は報告されていない<sup>1)</sup>。

新開橋では施工に先立って、採用予定の外ケーブルが実際に取替えが可能であることを検証するための試験を行った。本報告書はこの試験概要および取替えに対して行った理論的検討について述べたものである。

## 2. 外ケーブル取替え方法

### 2.1 取替え方法

外ケーブルの取替え方法としては次の3つが考えられる。

#### ① 加熱方式

ある区間露出させた PC 鋼材を加熱し、焼き鈍して

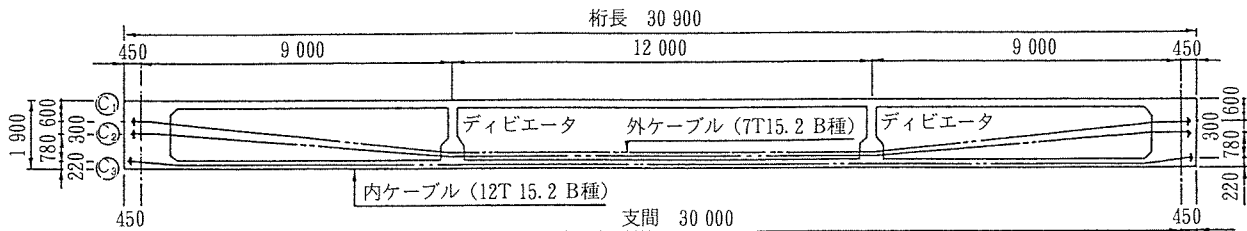


図-1 新開橋ケーブル配置図

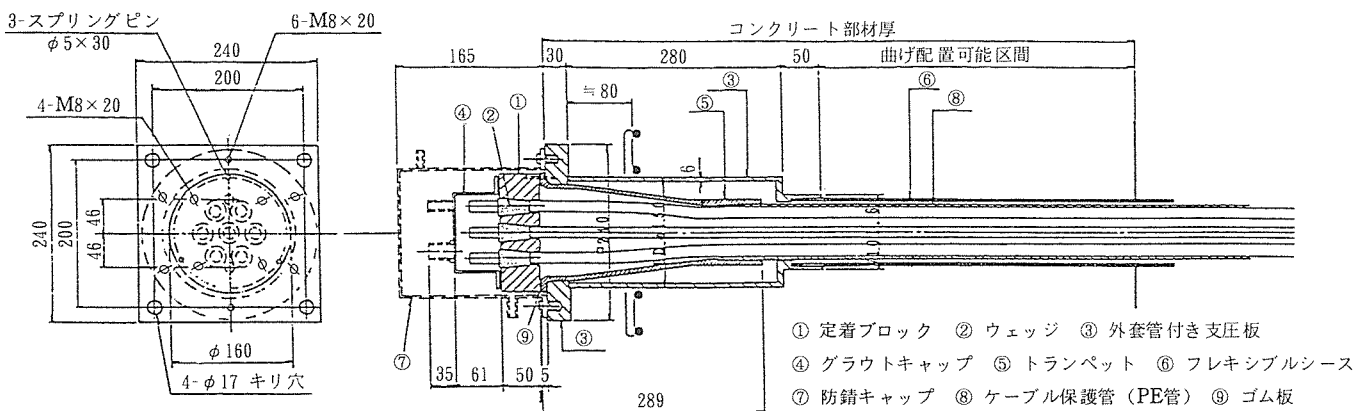


図-2 定着部の詳細図 (FKK フレシネー外ケーブルシステム 7 E 15)

\*1 Yasushi SATO : 新潟県 港湾空港局振興課

\*2 Katsumi SEKII : (株) ピー・エス 本社技術部

\*3 Takashi OHURA : (株) ピー・エス 本社技術部

鋼材応力を解放し、切断する。

② 特殊クランピング方式

ケーブルのある区間の両端を特殊クランプでつかみ、そのクランプに別の鋼材をセットし緊張することにより、その区間のPCケーブルの応力を解放し、切断する方法。

③ 緊張ジャッキによる再緊張方式

セメントグラウトを使用した場合はナット式やシム式などの定着についてのみ可能で、導入されている緊張力以上にジャッキで再緊張しナットをゆるめ、その後ジャッキで緊張力を下げて鋼材応力を解放し切断する方法。

新開橋の外ケーブルの定着方式はクサビ方式であるため、①と②が考えられるが、クランピング方式の場合、作業手順が複雑であること、緊張力の大きいケーブルでは信頼性に欠けると考えられること等から①の加熱方法を対象に検討および試験を行った。

2.2 加熱方法

加熱方法にはプロパンガスやアセチレンガス等によるガスバーナーによる方法と電熱線を配した電気炉による方法が考えられる。

① ガスバーナーによる方法

使用できるガスの種類としては表-1のものが考えられる。PC鋼材の降伏強度が零に近くなるのは500℃~600℃なので非常に高い燃焼温度を持つガスは急激にPC鋼材を熱し、急激な破断をもたらす恐れがあり適当でないと考えられる。プロパンガスは燃焼温度が他のガスと比べて比較的低温であり、また市場性もあるので、ガスバーナーによる方法としては好ましいと思われる。

表-1 ガスの燃焼温度

ガスの種類	温度(℃)
ロウソク	1 400
アルコール(エチル)	1 700
ブゼン(空気を十分入れて)	1 800
プロパン	1 800
水素	1 900
アセチレン	2 500
一酸化炭素および酸素	2 600
水素および酸素(酸水素炎)	2 800
アセチレンおよび酸素	3 800

表-2 炎の色と温度

色	温度(℃)
初期の赤熱	500
暗赤熱	700
桜赤熱	900
鮮明なる桜赤熱	1 000
橙黄熱	1 100
鮮明なる橙黄熱	1 200
白熱	1 300
眩い白熱	>1 500

(理科年表より)

この方法は特殊な装置が不要で、安価で簡単な方法であるが、加熱作業がケーブルから至近距離となり万一の危険性がある。また主桁が箱桁断面のような閉断面の場合は換気の必要がある。

② 電気炉による方法

本試験で用いた電気炉は加熱するケーブルの周りにニクロム線を配し、熱が外に逃げないように断熱材を入れた2つ割りの鉄製の筒状ケーシングである。ま

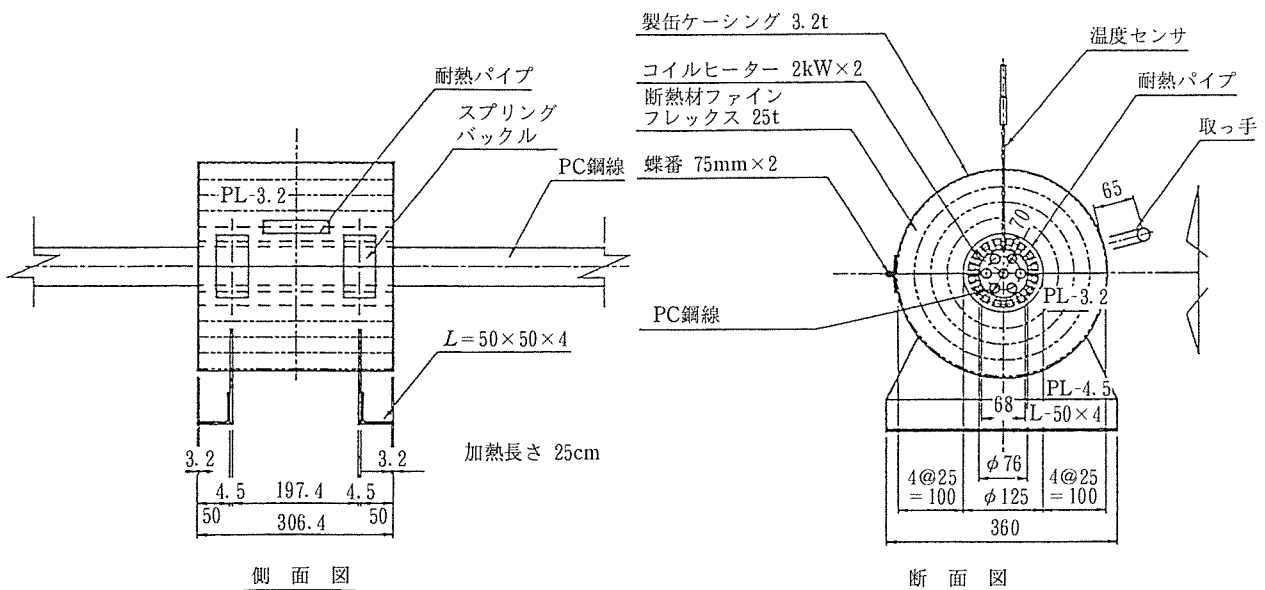


図-3 電気炉

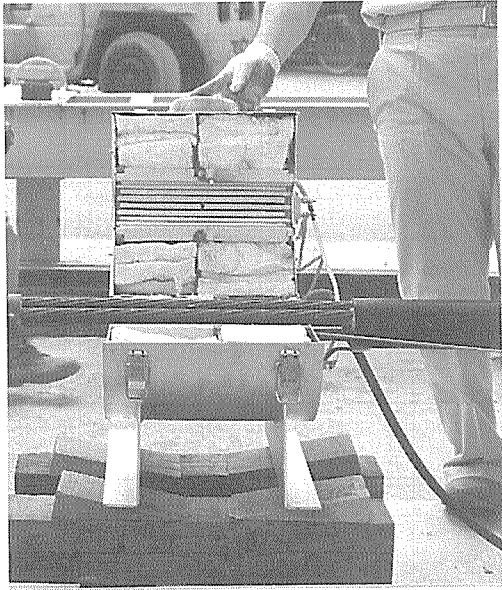


写真-1 電気炉

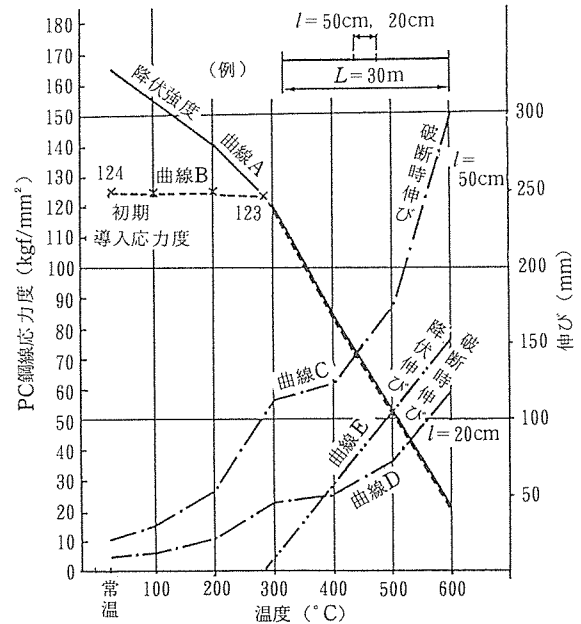


図-4 加熱温度と鋼材応力度 (PC 鋼より線)

た、電気炉を制御する温度センサーとコントローラーが付属している。製作にあたっては次の仕様を満足するように考慮した。

- 炉内温度を 500°C～700°C に保てる。
- ヒーター容量をコントロールできる。
- 加熱処理後人力で解体できる。
- PC 鋼材がヒーターに触れても漏電等の危険がない。

電気炉による方法は加熱温度を制御でき、ケーブルをむらなく一様に加熱することができ確実性も高い。

### 3. 緊張解放の原理

安全に張力を解放するのに焼き鈍しの原理を応用する。急に加熱温度を上げたり、加熱区間長が適切でないとき加熱中に鋼材が破断する。

図-4 は過去の試験データ<sup>2)</sup>から求めた加熱温度と鋼材応力度、降伏強度、破断時の伸びの関係を示している。PC 鋼材の降伏強度は曲線 A で示すように温度が上昇すると下降する。引張強度  $\sigma_{pu}=190 \text{ kgf/mm}^2$  の PC 鋼材に初期導入応力を  $124 \text{ kgf/mm}^2$  として、温度が上昇すると当初熱膨張によってわずかに応力度が低下するものの、曲線 B で示すようにほぼ一定である。さらに温度を上げて鋼材応力度が曲線 A で示す降伏強度に到達すると PC 鋼材は降伏し、以後温度上昇とともに降伏強度曲線 A に沿って応力度が低下していく。

一方破断時の伸びは温度上昇とともに大きくなり常温で 6% であったものが 600°C では 60% 程度となる。例えばケーブル長を 30 m として、長さ 50 cm の区間を加熱すると PC 鋼材は曲線 C のような破断時伸びを示

す。同様に加熱部分が長さ 20 cm の場合は曲線 D となる。これに対して加熱部分の降伏後の伸び量 (降伏伸びと称す) を求め、そしてこの伸び量と上記破断時の伸びを比較する。すなわち降伏伸びが破断時伸びを上回ると鋼材が破断することになる。この降伏伸びは、緊張力変化による全長  $L$  の伸びとして現れるので、次式により計算できる。

$$\Delta L = (\Delta \sigma_p / E_p) \times L$$

$\Delta L$  : 降伏伸び量

$E_p$  : 鋼材のヤング係数 ( $20\,000 \text{ kgf/mm}^2$ )

$\Delta \sigma_p$  : 張力減少量

$L$  : ケーブルの全長

前式には以下の仮定がなされている。

- 加熱区間の温度膨張はケーブル長に比べて小さく、全体に与える影響が小さいので考慮しないものとする。
- 張力変化は全長  $L$  にわたって同一とする。グラウトによる拘束は考慮しないものとする。
- 加熱区間の鋼材のヤング係数の減少は全体に与える影響が小さいので考慮しないものとする。

この降伏伸びの曲線は曲線 E で表され、曲線 B が曲線 A と交わったところを真下に落とした点から始まる。

ケーブルの全長を 30 m と仮定した図-4 で見ると、加熱長が 50 cm の場合は加熱中に鋼材が破断することはないが、加熱長が 20 cm の場合は 400°C の手前で降伏伸びが破断時の伸びより大きくなり、その時点で鋼材は破断することになる。

安全な張力解放は、①徐々に温度を上げていくこと、②適当な加熱長さを有すること、③加熱長にわたって全鋼線の温度分布が均一であること、によって可能となる。適当な加熱長さ  $l$  とは、鋼材の種類や導入緊張力  $\sigma_p$  と全長  $L$  により決定されるものであるが、PC 鋼より線 (B 種) で、導入張力  $\sigma_p$  が  $0.6 \times \sigma_{pu}$  (引張強度) 程度であれば安全を考慮して以下の計算により次頁の式を満足させる加熱長さ  $l$  が必要であるといえる。

600℃に熱した場合の破断時の伸びは加熱長さの 60% 程度より

$$\Delta l = 0.6 \times l$$

$\Delta l$  : 破断時の伸び

$l$  : 加熱長さ

600℃の降伏伸び (600℃で PC 鋼材の張力が 0 kgf/mm<sup>2</sup> になると仮定する)

$$\begin{aligned} \Delta L &= (\Delta \sigma_p / E_p) \times L \\ &= (0.6 \times \sigma_{pu} / E_p) \times L \\ &= 0.0057 \times L \end{aligned}$$

$\Delta L$  : 降伏伸び量

$E_p$  : 鋼材のヤング係数 (20 000 kgf/mm<sup>2</sup>)

$\Delta \sigma_p$  : 張力減少量

$\sigma_{pu}$  : 引張強度 (190 kgf/mm<sup>2</sup>)

$L$  : ケーブルの全長

破断しない条件

$$\Delta l \geq \Delta L$$

$$0.6 \times l \geq 0.0057 \times L$$

$$l \geq 0.0095 \times L \approx 0.01 \times L$$

## 4. 試験概要

### 4.1 試験ベッド

試験ベッドは全長 5.4 m、高さ 1.7 m、定着部のコンクリート厚は実橋に合わせて 1.2 m とした。上部にはストラットとして H 鋼を配している (図-5 参照)。

### 4.2 外ケーブルの試験供試体

試験供試体は新開橋で使用される外ケーブルシステム (FKK フレシナー外ケーブルシステム 7 E 15)<sup>3</sup> と同じ

表-3 ケーブル材料

ケーブル種類	7 T 15. 2 B
グラウト	セメント系 W/C 45 % 混和剤コンベックス 208 EX
被覆管	PE 管 内径 68 mm および 79 mm

材料を使用した。

### 4.3 試験手順

所定のケーブルを配線、緊張、グラウトし、グラウト硬化後以下の手順で試験を行った。

① 保護管 (PE 管) およびグラウトの除去 (除去方法の安全性、施工性の確認)

中央部の長さ  $l=50$  cm にわたってケーブルの保護管 (PE 管) を金ノコで切断し、たがねでグラウトをはつり取った。また、定着コンクリート付近 30 cm の PE 管を剝し、硬化したグラウトを露出させた。

② ケーブルの加熱 (加熱方法の安全性、正確性の確認)

露出部分のケーブルの 25 cm を 600℃程度まで徐々に加熱し、張力を解放した。また熱の影響を受けない部分のケーブルにひずみゲージを貼付し、張力の変化を見た。ケーブルの張力変化に伴い、①で述べた露出したグラウトの変化する様子を観察した。加熱は電気炉で 2 体行い、比較の意味でプロパンガスによるものを 1 体行った。電気炉によるものは、温度センサーをケーブルに配置し、ケーブル温度を管理し、平均約 25℃/分の上昇速度で加熱した。

③ ケーブルの切断 (切断時の安全性の確認)

ひずみゲージによる鋼材張力消失の確認後、アセチレン・酸素ガス切断器によりケーブルを切断した。

④ ケーブルの取外し (取外し作業の確認)

切断後、定着ブロックをコンクリートから引き抜いた。

### 4.4 試験結果

① 保護管 (PE 管) およびグラウトの除去

支障なく PE 管の切断を行えた。グラウトのはつり作

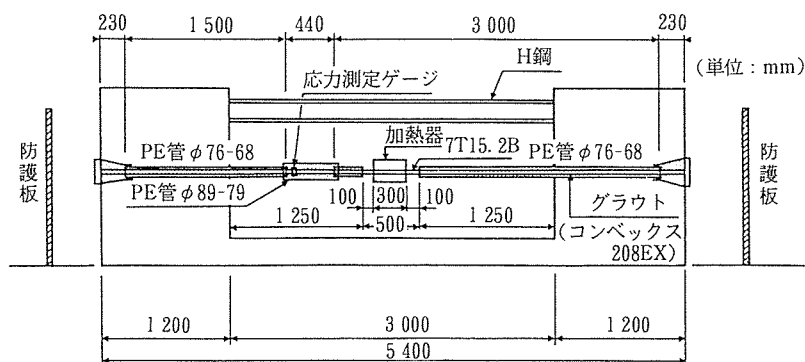


図-5 試験ベッドと試験供試体

◇研究報告◇

業も2人で20分以内で行えた。

② ケーブルの加熱

電気炉による加熱の場合、約25℃/分の上昇速度(600℃まで23分)であったが、なんら支障なく安全性に問題はなかった。加熱された鋼材は、すべて一様に变色しており均一に加熱されたと判断できる。

ガスバーナーによる場合は、均一な加熱ができなかったようで加熱後の鋼材に色むらがあった。また、加熱中鋼材の1本が早期に破断した。加熱中、加熱による鋼材の張力変化により、グラウトの鋼材方向にクラックが観察された。これは、鋼材とグラウトの付着が切れたためと考えられる。

③ ケーブル切断および④ケーブル取外しはなんら衝撃等の支障もなく行えた。

図-6のB線は実際に測定された温度と応力をプロットしたものである。実際導入された張力はセット量が予想値より大きかったため、予定した張力より小さくなっている。

測定値は理論値のように降伏強度に達した後、急激に角度を変えて、降伏強度曲線に沿って進まず、ゆるやかな曲線を描いて低下している。これは、張力の減少が小

さい間はグラウトとの付着力あるいは摩擦力が残存しており、それが影響していると考えられる。また降伏強度の定義を0.2%の永久ひずみが発生する応力としているため、この仮定と実際との差も影響しているものと考えられる。しかしながら、張力低下が大きくなる600℃付近ではほぼ一致しており、おおむね理論どおりの挙動を示していると考えられる。

5. ま と め

以下に本試験およびそれに伴う検討で得られた結果を要約する。

- 1) クサビ式定着でグラウトタイプの外ケーブルの取替えは加熱による張力解放の方法が有効である。
- 2) 加熱による張力解放には、プロパンガスによるガスバーナー方式、電熱ヒーターによる電気炉方式いずれも適用可能である。
- 3) 温度コントロール、一様加熱、遠隔操作の可能な温度センサー付き電気炉方式がガスバーナー方式より安全かつ確実である。
- 4) 加熱区間の全ケーブルを同時に一様に加熱し、徐々に温度を上げていくことが望ましい。
- 5) 緊張解放後は酸素・アセチレンガス切断器でなんら支障なくケーブルを切断できる。
- 6) 理論的検討によると、安全にケーブルを解放・切断するには加熱部分の長さは、通常の設計で用いられている張力の範囲ではケーブル全長の1%程度以上は必要であると思われる。
- 7) 本試験で使用したFKK 7 E 15のケーブルは、トランペット管、定着ブロックとともにコンクリートから容易に取り外すことができ、取替え可能な外ケーブルシステムとして有効である。

最後に、本試験について終始助言をいただいた極東鋼弦コンクリート振興株式会社の松村、田村両氏および新潟県吉田氏他関係者に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 荒川敏雄：外ケーブル方式プレストレスング(その3) SETRA：和訳、プレストレスコンクリート, Vol. 33, No. 6, p. 57~p. 72, 1991
- 2) 高温におけるPC鋼材の機械的性質, 住友電気第74号, 住友電気工業株式会社, 昭和35年9月
- 3) FKK フレシネー外ケーブル(Eシステム)に関する技術資料, 極東鋼弦コンクリート振興株式会社, 1992年7月

【1993年10月1日受付】

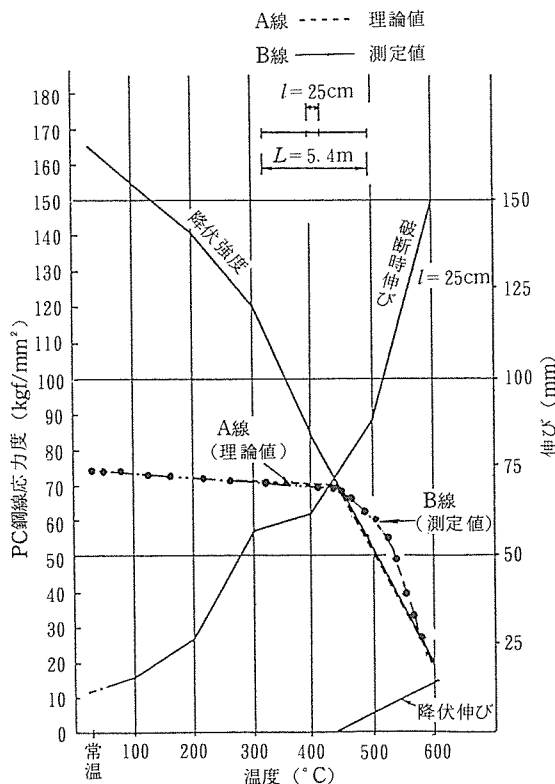


図-6 加熱温度と鋼材応力度 (試験結果)