

腐食損傷した PC 外ケーブルの張替え工事 — ケーシングパイプを用いた張力解放 —

峯村 智也*1・徳永 孝継*2・山岸 俊一*3・河田 洋志*4

橋脚横梁を補強する PC 外ケーブルに腐食損傷が発見された。腐食はケーブル全体に進行し、ケーブルの素線の一部には破断しているものもあったため、ケーブルの張替えを行うこととなった。

既設ケーブルの撤去はガス切断にて行うこととしたが、ガスバーナーにてケーブルを直に切断すると衝撃が大きいことが予想され、安全性が懸念された。そこで、鋼板で作製したケーシングパイプをケーブルに巻き、ケーシングパイプからケーブルを間接的に熱することでケーブルを延性破断させる技術を開発した。

本稿では、PC 外ケーブルの腐食損傷状況を報告するとともに、ケーブル切断の室内実験から現場施工までを報告する。

キーワード：PC ケーブル張替え、腐食、張力解放

1. はじめに

橋脚横梁を補強する PC 外ケーブル（写真 - 1）に腐食損傷が発見された。当該橋梁は、昭和 44 年に供用したが、供用開始 2 年後に RC 橋脚の隅角部にひび割れが発見され（図 - 1）、昭和 49 年に PC 外ケーブルにて補強を行っている。ケーブルは、保護コンクリートで充填された鋼製ボックス内に配置されていたが、保護コンクリートが密に充填されていなかったため、橋脚天端からの雨水が保護コンクリート内に浸入し、ケーブルを腐食させたものと考えられる。詳細調査の結果、ケーブルの腐食損傷が著しいことから、PC 外ケーブルの張替えを行うことになった。

既設ケーブルの撤去は、定着部での張力解放が困難な場合、ガス切断にて行うことがあるが、ガスバーナーにてケーブルを切断すると衝撃が大きいことが予想され、安全性が懸念された。そこで、本工事ではケーブルを間接的に熱することでケーブルを延性破断させる技術を開発した。本稿では、PC 外ケーブルの損傷と間接加熱による切断技術



写真 - 1 PC 外ケーブルで補強された橋脚

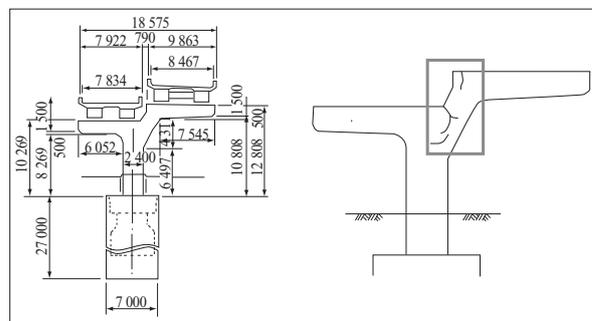


図 - 1 昭和 46 年のひび割れ調査図

を用いたケーブルの張替え施工概要を報告する。

2. PC 外ケーブルの損傷概要

2.1 腐食状況

当該ケーブルは、7 本よりの PC 鋼より線をさらに 19 本より合せた PC 鋼材であり（写真 - 2）、当該橋脚には合計 4 本（起点側・終点側それぞれ上下 2 段）配置されている。

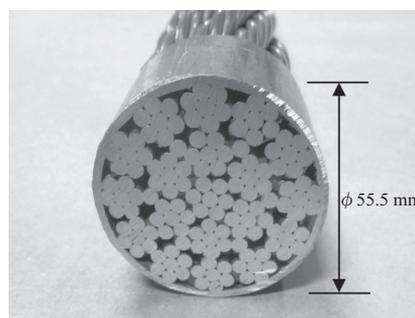


写真 - 2 現場と同種の PC 鋼材 (F270)

*1 Tomoya MINEMURA：首都高速道路(株) 西東京管理局

*2 Takatsugu TOKUNAGA：首都高メンテナンス西東京(株) 護国寺事務所

*3 Toshikazu YAMAGISHI：川田建設(株) 東京支店

*4 Yoji KAWATA：(株) エスイー東北支店

腐食損傷は、平成 20 年の定期点検で保護コンクリートから鋼より線がむき出した状態で発見された（写真 - 3）。鋼より線の腐食は、保護コンクリートの内部でも進行している可能性があったため、橋脚周りに吊足場を設置し、詳細調査を実施することにした。

詳細調査の結果、シーす内はグラウトの充填不良（写真 - 4）が多くみられ、鋼より線は全体的に腐食し、断面が減少していた（写真 - 5）。また、保護コンクリートも密に充填されていないことが分かった。腐食の原因は、橋脚天端からの雨水が保護コンクリート内に浸入し、シーすおよび鋼線を腐食させたものと推定される。

詳細調査後、保護コンクリートを撤去した終点側のケーブルに、鋼より線の一部が破断している状態を確認した（写真 - 6）。これは、保護コンクリートの撤去により、周

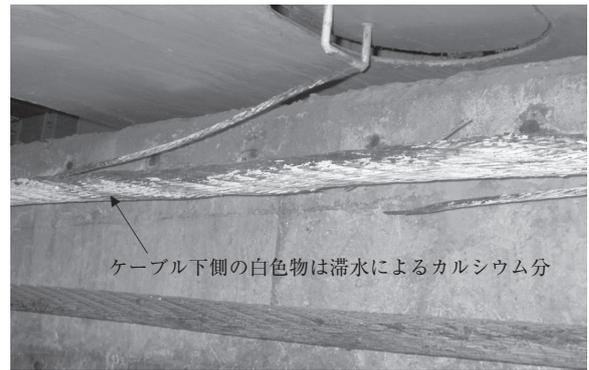


写真 - 6 一部が破断した鋼より線（終点側）

辺拘束が解放されたケーブルが自由に振動できる状態となり、腐食した鋼線に張力変動が生じた結果、破断したものと考えられる。

2.2 ケーブルの張力測定

当該橋脚の PC 外ケーブルの導入緊張力は、ケーブル設置当時の設計計算書より 1 564 kN/ 本と判明した。

鋼より線の腐食損傷により、導入張力が減少しているか否かを確認するため、EM センサーにより張力を測定した。EM センサーとは、引張応力に依存する鋼材の磁気弾性特性を応用した計測システムである。事前に現地と同タイプのケーブル（F270）における張力と透磁率に対する室内キャリブレーションを実施し、現地ケーブルの透磁率を測定することにより保有張力を判定した。なお、室内キャリブレーションでは、腐食したケーブルにおいても 1 % 程度の誤差で張力を測定できることを確認している。

測定結果は表 - 1 のとおりであり、設計導入張力の 80 % 程度まで張力が減少していることが分かった。

表 - 1 は、終点側の鋼線が破断する前に測定した結果であるが、鋼より線の一部が破断（写真 - 6 の状態）したのちに再度張力測定した結果（終点側）を表 - 2 に示す。



写真 - 3 点検時の状況



写真 - 4 グラウト未充填状況



写真 - 5 腐食状況



写真 - 7 EM センサーでの測定状況

表 - 1 張力測定結果 (kN)

	設計導入張力	測定結果
終点側	1 564 (100 %)	1 201 (77 %)
起点側	1 564 (100 %)	1 284 (82 %)

※ 起・終点ともに上段のケーブルを測定

表 - 2 鋼線破断前後の張力測定結果 (kN)

	破断前	破断後
終点側	1 201 (100 %)	969 (81 %)

19本の鋼より線のうち1本の素線束が破断したため、理論上1/19本=5.27%の張力が減少していると推定されたが、実際には20%程度の張力が減少していた。

これは、1本の素線束が破断し、よりが大きくばらけた結果、固着や摩擦などの張力以外に拘束されていた力も同時に解放され、測定上1本以上の張力が減少したものと推測される。

3. ケーブルの張替え検討

3.1 現況の応力状態とひび割れ原因の推定

詳細調査より、ケーブルは全体的に腐食が進行しており(ケーブルの一部は破断)、張力の減少も見られることが分かった。そこでケーブルの張替え検討を実施した。

まず、現況の応力状態を確認するため、建設時のしゅん功図を基にフレーム解析による復元設計を行った。復元設計による断面照査では、外ケーブルによる補強がない場合でも許容応力度内に収まる結果となった。

しかし、復元設計による設計断面の照査のみでは、局所的な応力集中によるひび割れなどの原因推定までは至らない。そこで、応力集中点とひび割れの関係を確認するため、FEM解析を実施することにした。

図-2は「外ケーブル補強なし」の場合の応力コンター図であるが、ひび割れ発生箇所に高い引張応力が発生していることが分かる。また、建設時の配筋図とひび割れ発生位置を重ね合わせると、ひび割れは梁の主筋が曲げ下がり始めた位置で発生していることが分かった(図-3)。このことから、ひび割れの原因は、主筋が曲げ下げられた位置に局所的に引張応力が集中したためではないかと推定される。

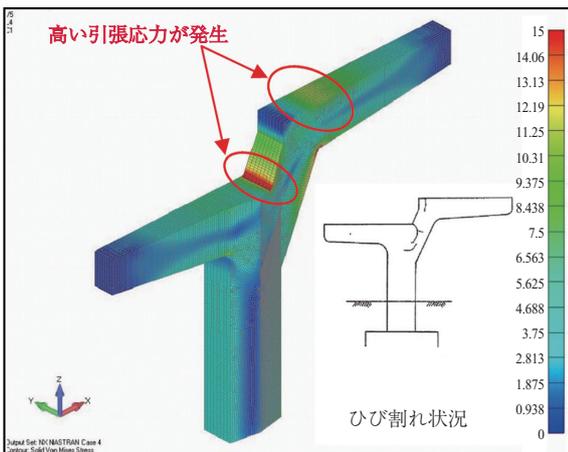


図 - 2 外ケーブル補強なしの応力コンター図

3.2 必要補強量の検証

当初補強時の設計計算書より、PC外ケーブルの設計導入緊張力は1564kN/本と判明したが、その根拠は設計計

算書に記載がなく不明である。よって、ケーブルの補強量が妥当であるかを検証した。

前述のとおり、復元設計による断面照査では外ケーブル補強なしの場合でも応力上は問題ないことを確認している。しかし、図-3のとおり、横梁上面のひび割れが発生している箇所は配筋が曲げ下げられて鉄筋配置が急激に変化する断面となっている。よって、この箇所について、曲げ下げられた鉄筋を考慮しないものとして断面照査を実施した。

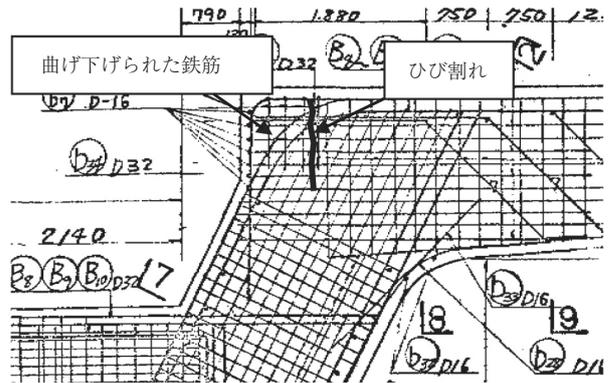


図 - 3 橋脚横梁上面のひび割れと鉄筋配置の関係

照査は、補強ケーブルを橋脚の両側面に上下2段配置した場合(現況)と1段のみ配置した場合の2ケースについて、FEM解析上の発生応力から必要鉄筋量を算出し、既設鉄筋量との比較により行った。なお、補強ケーブルはFEM解析上、線要素として再現し、導入張力は1500kN/本とした。

照査断面および照査結果は図-4および表-3のとおりである。補強ケーブル1段では鉄筋量が不足しており、現況の2段配置の補強は適切であることが確認できた。

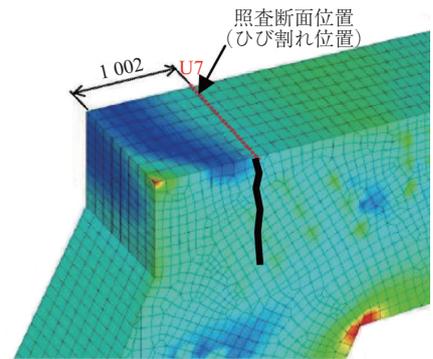


図 - 4 照査断面

表 - 3 照査結果

	①既設鉄筋量 (mm ²)	②必要鉄筋量 (mm ²)	①/②
ケーブル2段配置	11 118.8	9 071.4	122.6 %
ケーブル1段配置	11 118.8	11 461.3	97.0 %

3.3 新設ケーブルの選定

新設ケーブルは、今後の維持管理性を考慮し、ポリエチレン被覆ケーブルとした。ただし、偏向金具は既設部材を利用する必要があり（写真 - 8）、配置できるケーブル断面寸法に制約があった。そのため、通常の規格に比べ小さい外形寸法となるよう、被覆厚さを薄くすることで対応した（図 - 5）。ただし、被覆厚さが薄くなることで通常の規格ケーブルに比べ損傷リスクが高まる懸念があった。そこで、万一被覆が損傷し PC 鋼材が露出した場合でも定期点検インターバルの間は腐食進行を抑制できるように、亜鉛めっきを施した PC 鋼材を用いる仕様の被覆ケーブルとした。

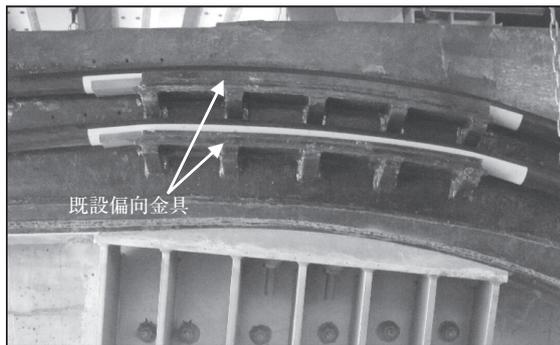


写真 - 8 既設偏向金具

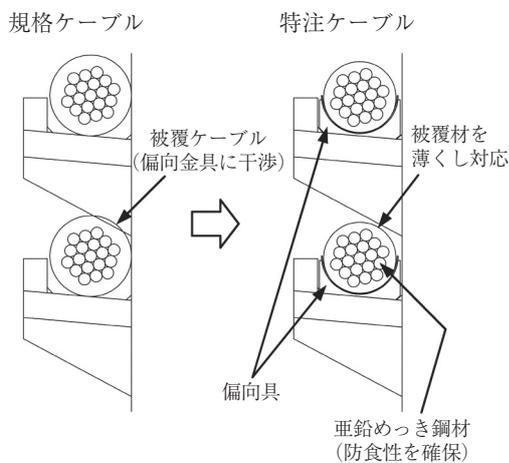


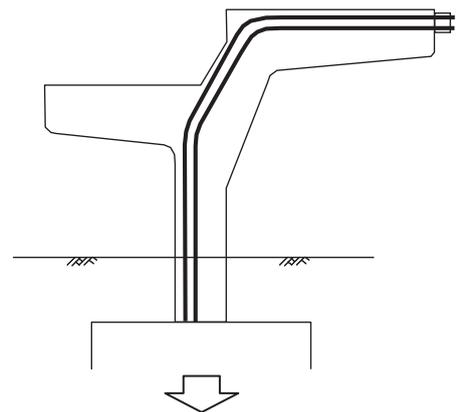
図 - 5 ケーブルと偏向金具の干渉状況

3.4 ケーブル張替え手順の検討

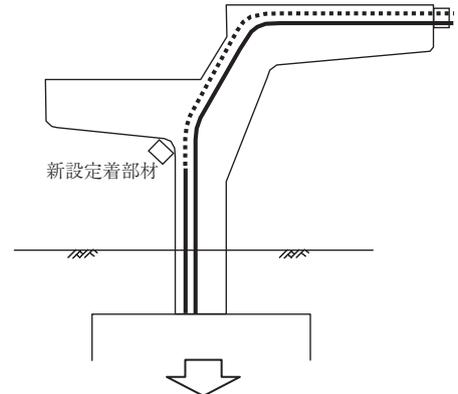
ケーブルの張替え手順は図 - 6 のとおりとした。張替え施工時、ケーブルが1段のみとなることがあるが、下記の理由から問題ないものとした。

- 施工時、ケーブルが1段のみとなるのは最大で1週間程度と短期間である。
- 鉄筋の不足量は許容応力度で3%程度である。
- 鉄筋照査はB活荷重満載時として実施したが、実際は車線の半分がゼブラ処理となっており、現時点でB活荷重の満載はありえない（活荷重反力は全反力の65%程度）。

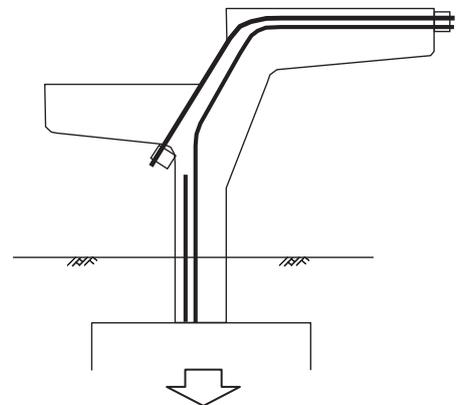
①張替え前



②新設定着部材設置および上段ケーブル撤去



③上段被覆ケーブル配線緊張



④下段ケーブル撤去・被覆ケーブル配線緊張

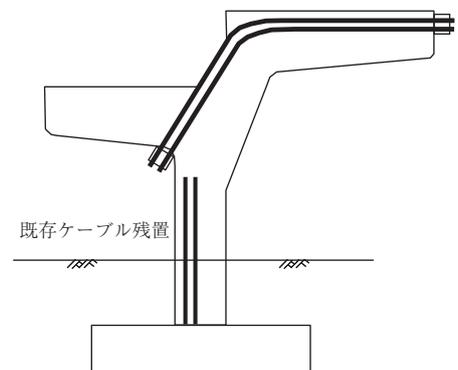


図 - 6 施工ステップ図

4. ケーブルの張力解放方法の検討

4.1 間接加熱による張力解放

既設ケーブルは腐食がケーブル全体に進行し、素線の一部が破断しているため、緊張ジャッキによりケーブル張力を安全に解放することはできないと判断した。また、ガスバーナー等で直に切断する方法（以下、「直接加熱法」という）では、破断時の衝撃が大きく、切断されたケーブルが定着部側に飛び出す可能性があり安全性を確保できないと考え、べつの切断方法を検討した。

PC 鋼材は、加熱すると 400℃ 付近から力学的性質の低下が始まり、荷重をかけると延性変形する性質を有する。このことから、張力が残存した PC 外ケーブルを徐々に加熱して伸び変形させ、張力減少と延性破壊により安全に切断することができるのではないかと考えた。

加熱方法については、PC 外ケーブルの外周に半割状で内径 80 mm の鋼製ケーシングパイプ（写真 - 9）をセットし、そのケーシングパイプの外周全体を圧接用バーナーで熱することでケーブルを間接的に加熱する方法（以下、「間接加熱法」という）を考案した（図 - 7）。



写真 - 9 鋼製ケーシングパイプ取付け状況

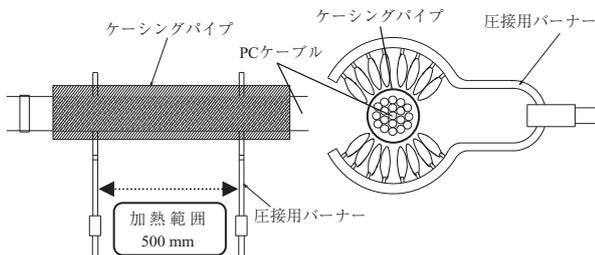


図 - 7 間接加熱法概要図

4.2 室内実験による検証

4.2.1 室内実験概要

4.1 で述べた間接加熱法の適用性を室内実験にて確認することにした。実験は、1 500 kN の張力を導入した PC 鋼材（現場と同一タイプで延長 7 m）を反力台（写真 - 10）にセットし、表 - 4 に示す項目について計測した。また、比較のために直接加熱法による切断実験も実施した。

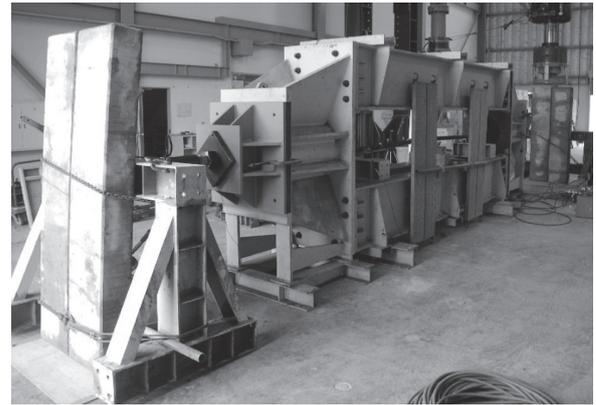


写真 - 10 反力台

表 - 4 ケーブル切断時の計測項目

計測項目	計測方法
温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーシングパイプ外面温度は非接触型温度計を使用 ・ケーシングパイプの内部空気層温度は熱電対式温度計を使用
ケーブル張力	<ul style="list-style-type: none"> ・定着部マンションにひずみゲージを設置し、ひずみ量から張力の変化量を計測
破断面の形状	<ul style="list-style-type: none"> ・目視により観察

4.2.2 室内実験結果

(1) 間接加熱法

間接加熱法（写真 - 11）による切断では、ケーブル全体が延性変形して 15% 程度張力が減少し、加熱開始 4 分後、ケーシングパイプ内の空気層が 600℃ に達する頃から素線破断の連鎖が始まった（図 - 8）。その後、加熱開始から 8 分で張力は完全に解放された。破断形状は写真 - 13 のとおり、延性破断状態であることが確認できた。

(2) 直接加熱法

直接加熱法（写真 - 12）による切断では、定着部が突出することはなかったが、大きな衝撃を伴いながら加熱後直ちに素線が破断した（図 - 9）。また、破断形状は写真 - 14 のとおり、金属が溶融した痕跡が確認できた。PC 鋼材加熱点の表面温度は、ガス炎の接触と同時に切断されたため確認できなかった。

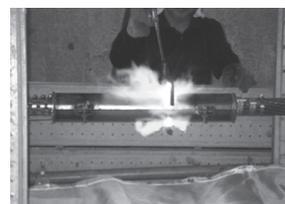


写真 - 11 間接加熱法



写真 - 12 直接加熱法

5. 現場への適用

5.1 ケーブル切断の準備

室内実験より、間接加熱法による切断が可能であると考え、現場に適用することとした。実際の PC 外ケーブルは、

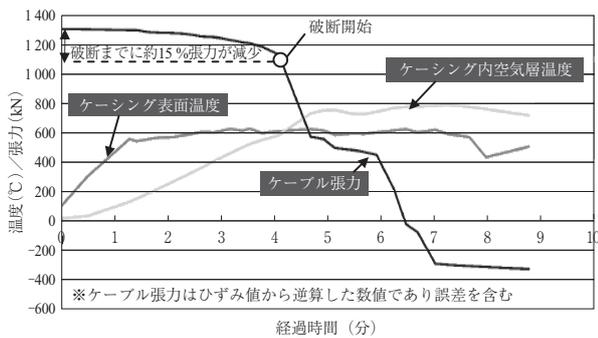


図 - 8 温度 / 張力の時間的な変化 (間接加熱法)

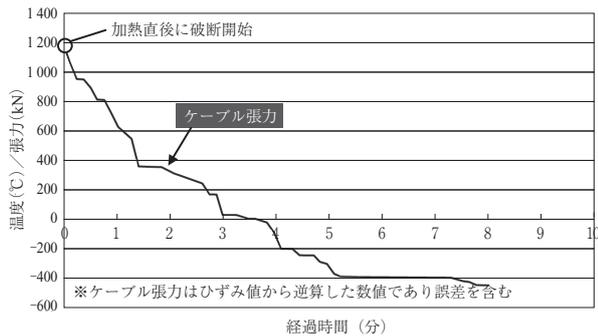


図 - 9 温度 / 張力の時間的な変化 (直接加熱法)

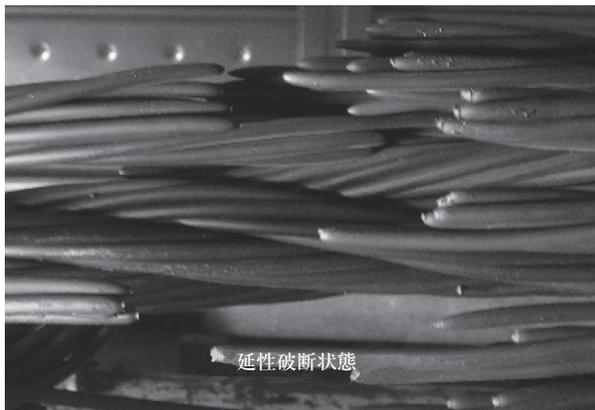


写真 - 13 間接加熱法による破断形状

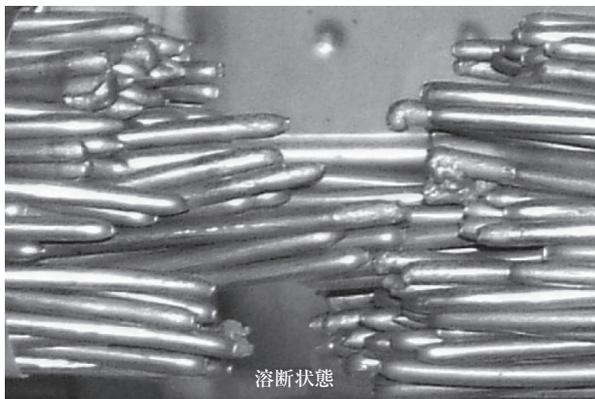


写真 - 14 直接加熱法による破断形状

定着間長が 16 m あり実験時より 9 m 長くなるため、鋼より線の跳ね上がりやばらけが大きくなることが想定された。そのため、以下による安全対策を行った。

- ① 切断時にケーブルが跳ね上がらないよう、ケーブル押さえ金具 (L 型鋼) を設置する (写真 - 15)。
- ② 鋼より線のばらけを抑えるため、鋼製拘束バンドを 80 cm 程度の間隔にて取り付ける (図 - 10)。



写真 - 15 押さえ金具の設置

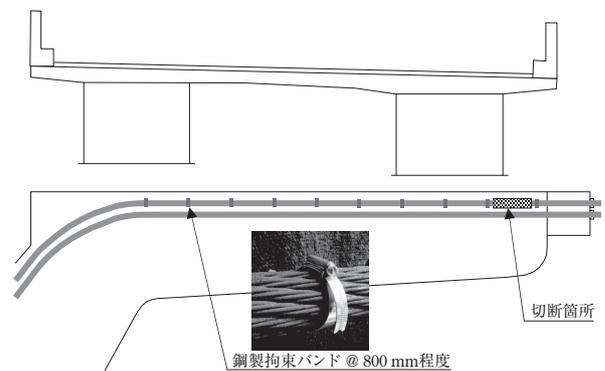


図 - 10 鋼製拘束バンド設置図

5.2 ケーブルの張替え

ケーブル張替えの状況を写真 - 16 ~ 20 に示す。鋼より線の戻りやばらけを抑えるため、拘束バンドや押さえ金具等を設置したが、写真 - 18 のとおり、鋼より線は想定以上にばらけた。より安全な作業とするには、鋼より線のばらけ対策が今後の課題である。また、現場における各ケーブルの張力、加熱温度および破断時間の関係は表 - 5 のとおりであり、張力が小さいほど破断までに時間を要することが分かった (各ケーブルの張力と温度の時間的な変化は図 - 11 ~ 14 を参照)。

表 - 5 ケーブル張力と加熱・破断時間の関係

ケーブル	導入張力 (計測値)	最大温度	破断までの時間
室内実験	1 500 kN	600 °C	8 分
終点側上段	1 284 kN	900 °C	8 分
終点側下段	1 348 kN	900 °C	7 分
起点側上段	969 kN	900 °C	11 分
起点側下段	508 kN	1 170 °C	11 分

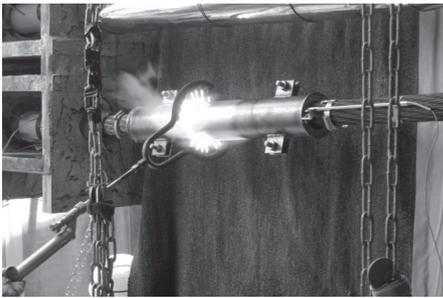


写真 - 16 間接加熱状況



写真 - 17 切断後

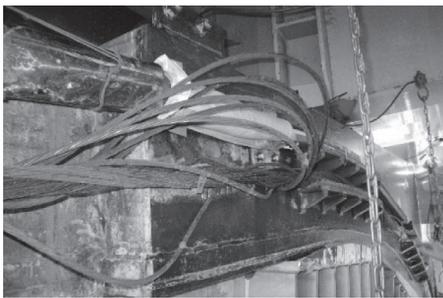


写真 - 18 鋼より線のばらけ状況



写真 - 19 新設ケーブル設置状況

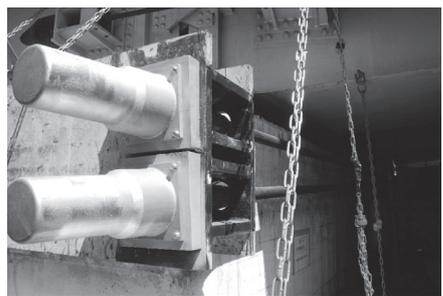


写真 - 20 ケーブル張替え完了

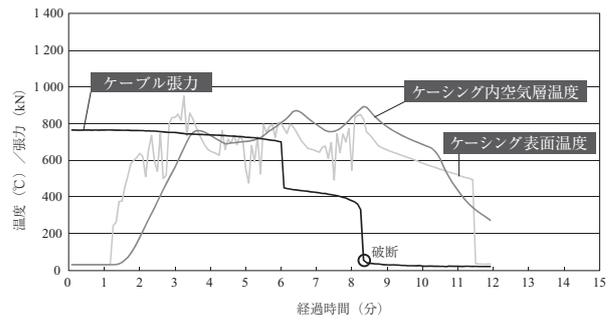


図 - 11 温度 / 張力の時間的な変化 (終点側上段)

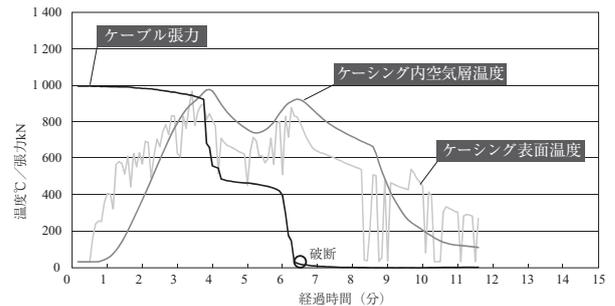


図 - 12 温度 / 張力の時間的な変化 (終点側下段)

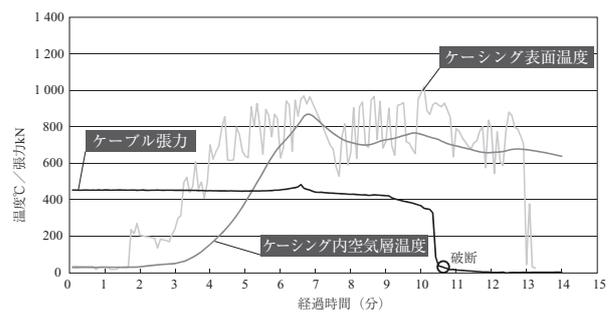


図 - 13 温度 / 張力の時間的な変化 (起点側上段)

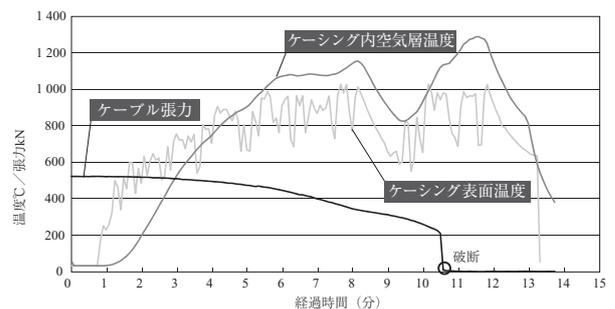


図 - 14 温度 / 張力の時間的な変化 (起点側下段)

※ 図 - 11 ~ 14 のグラフのケーブル張力は、切断時に計測したケーブルのひずみ値から逆算した数値であり誤差を含む。

5.3 橋脚梁先端の変位確認

ケーブル張替え時の安全管理として、ケーブル切断および新設ケーブル緊張時のプレストレスの変化による橋脚横梁先端の変位計測を行った。変位計測では、FEM 解析に

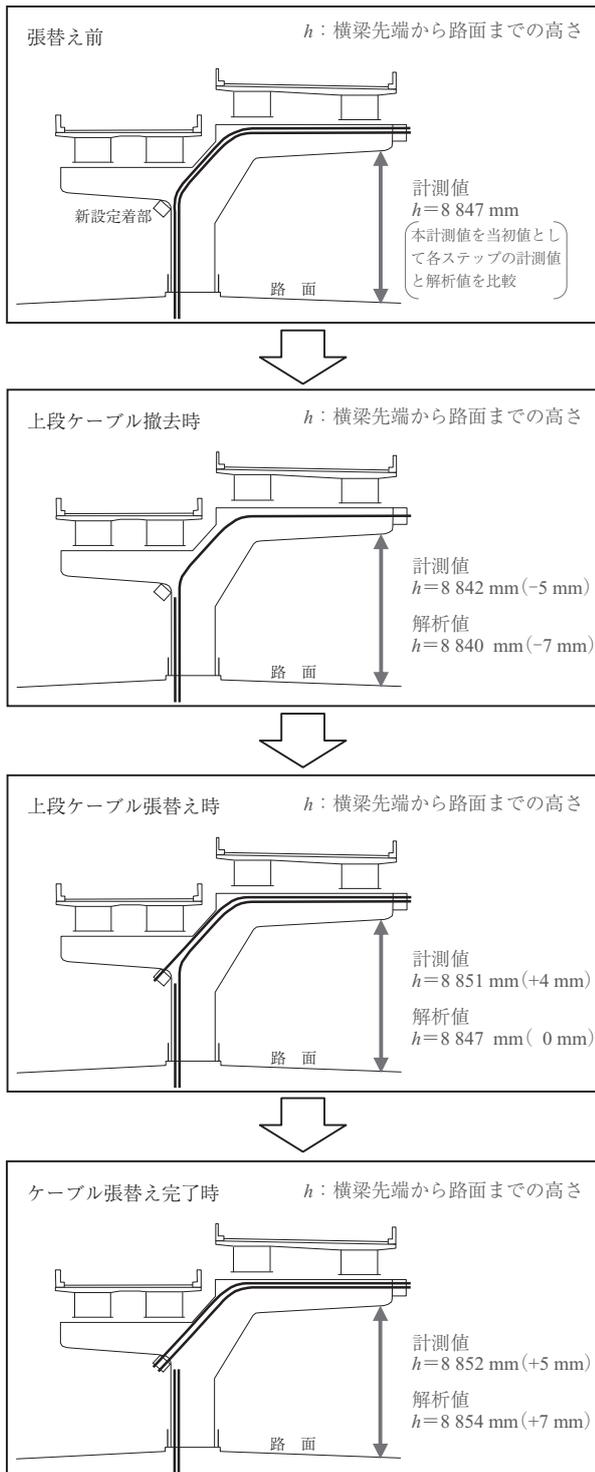


図 - 15 橋脚梁先端の変位

より求めた変位量を管理の目安として用いた。結果は図 - 15 のとおり、梁先端の高さ変化はおおむね解析値と一致しており、正常な挙動であったことを確認できた。

6. おわりに

今回は、腐食した PC 外ケーブルを鋼製ケーシングパイプ上から加熱するという間接加熱法の採用により、ケーブルを安全に切断し、張替えを完了することができた。

間接加熱法では破断開始前にケーブル全体が延性変形することで 1 箇所の熱源だけでも 15% 程度張力が減少することが確認できた。したがって、当工法の原理を応用し、加熱箇所数を適切に設定すれば、ケーブルを破断させず延性変形だけで全張力を解放させることができる可能性もある。

なお、張力解放技術として発展可能性のある当工法の鋼製ケーシングパイプは、首都高速道路(株)ほか 3 社にて意匠権の登録申請中である。



写真 - 21 ケーブル張替え後の状況

参考文献

- 1) 黒川章二, 羅黄順, Ming.L.Wang, 嶋野慶次: EM センサを用いた PC 梁緊張材の応力モニタリング実験, 土木学会応用力学論文集 Vol.1, 2002.8
- 2) プレストレストコンクリート技術協会: コンクリート構造診断技術 2008.5

【2012年6月30日受付】