

緊張材についてこの10年を振り返る

山田 真人*1・宮川 豊章*2

ここ約10年間のPC鋼材のJIS規格の変更内容、近年適用拡大が進んだ新たな高機能PC鋼材である樹脂被覆PC鋼材、2230MPa級の高強度PC鋼より線、亜鉛めっきPC鋼より線、ステンレスPC鋼より線や非金属製緊張材の動向と規準類、適用に際しての注意点に加えて、PC鋼材を中心とする調査や研究開発から注目すべきテーマをいくつか取り上げてその内容を紹介した。

キーワード：JISの改正、高機能PC鋼材、被覆PC鋼材、高強度PC鋼より線

1. はじめに

PC構造をもっともPC構造らしくしているものがPC鋼材、より正確に表現すれば緊張材であるといっても過言ではないだろう。もちろん、より正確にはコンクリートにプレストレスを導入する方法は緊張材を用いる方法ばかりとはいえないが、それらは現在主流とはいえず、ここではPC鋼材を中心とする緊張材に関する技術について、この約10年間の規格の変化や新しい規準、実用面での動き、主な調査・研究開発について振り返ってみたい。

2. JIS規格の動き

PC鋼線及びPC鋼より線は2014年に、PC鋼棒は2008年にそれぞれJIS規格が改正されている。その骨子は以下のとおりである。

2.1 JIS G 3536 PC鋼線及びPC鋼より線¹⁾の2014年の改正

大きな改正ポイントを以下に示す。

(1) 製造方法について

2014年版では熱間圧延後の冷却工程で行うパテンチング処理を「インラインパテンチング」、熱間圧延後の冷却完了後に行うパテンチング処理を「オフラインパテンチング」として定義し、どちらの方法によっても良いことが明

確にされた。これはPC鋼線およびPC鋼より線の原材料であるJIS G 3502（ピアノ線材）において、2013年改正で、これまで「パテンチング」という表現に含まれていた「インラインパテンチング」と「オフラインパテンチング」が区別され、用語の定義および製造方法が明確に規定されたことに起因するものである。インラインパテンチングの登場は高炭素鋼鋼材製造上の大きな技術革新ではあったが、それは30年以上前のことであり、世界的に見ても従来からインラインパテンチング処理された原材料を使う方法が、推測ではあるが圧倒的主流となっていて、PC鋼線やPC鋼より線の製造方法について近年の技術革新があったわけではない。インラインパテンチングでは熔融塩、沸騰水、空気（衝風）などが用いられ、オフラインパテンチングでは従来から鉛を使用する方法が主であるが、労働環境の面からできるだけ鉛を使用しないことを目指して流動床の研究が進められ、ピアノ線材で一部実用化がなされている。

(2) リラクセーション試験について

引用規格であるJIS Z 2276（金属材料の引張りラクセーション試験方法）が2012年に改正され、「リラクセーションの試験期間を1000時間（又は以上）の値と同等であるとの十分な証拠があれば、120時間以上で完了した試験から外挿してもよい」が追加されたことから、試験条件について「保持時間を120時間で行う場合は、JIS Z 2276の7.3.5（室温試験の場合の試験期間）の外挿法によってリラクセーション値を求める」が追加された。規格値はあくまで1000時間での値である。

(3) その他

用語の意味が分かりにくいとの意見から、「よりの長さ」、「径差」、「心線」、「側線」について用語の説明と図が加えられた。また、PC鋼材にかぎったことではなく鉄鋼製品全般についてのことはあるが、従来規格で「荷重」、「引張荷重」と称されたものが2008年版から「試験力」、「最大試験力」と改称されている。重さを表す用語から力を表す用語への変更は大きな流れではあるが、中身を連想しがたい表現のように思う。先ざき、より適切な表現に変更するのが良いように思うが皆さんはどうお考えであろうか。

なお、現行のJISに規定されていない疲労性能や耐遅れ



*1 Masato YAMADA

住友電工スチールワイヤー(株) 取締役技師長



*2 Toyoaki MIYAGAWA

京都大学
学際融合教育研究推進
センター 特任教授

破壊性能に関する新たな規定を設ける動きや強度レベルの上限を設けるなどの動きは現在のところない。

2.2 JIS G 3109 PC 鋼棒²⁾の2008年の改正

改正のポイントを以下に示す。

(1) 異形 PC 鋼棒 (総ねじ PC 鋼棒) の追加

異形 PC 鋼棒の構造物への実施例の増加と建築基準法の改正を背景に、丸形 PC 鋼棒に加えて異形 PC 鋼棒が追加規定された。規定された「異形」とはいずれも「総ねじ」であり、ナットで確実に定着することとグラウトとの付着を確保することを目的に、節高さの最小値と最大値、節間隔の最大値が規定されている。

(2) 引張試験における引張速度の規定の追加

従来の加力速度は軟鋼などの低強度材の実態に合せていて、高強度の PC 鋼材の実態に合っていないことが従来から指摘されていたため、実態調査とその試験結果に対する影響度が調査され、引張速度の規定が設けられた。

なお、PC 鋼棒の最新規格は2008年版であり、リラクセーションの規格は1000時間の値でのみ規定されたままで外挿が認められたわけではない。次回改正では120時間試験による外挿が認められる方向ではないかと考えられる。

PC 鋼材のリラクセーション性状は原材料や製造方法に変更がないかぎり十分に感受性が低く、材料や製造方法に変更がある場合に実施することとなっていることは以前から変わっていない。

2.3 その他の JIS 規格

国内では、JIS G 3536 (PC 鋼線及び PC 鋼より線) や JIS G 3502 (PC 鋼棒) 以外にも次の2点が規格化されている。

1) JIS G 3137 細径異形 PC 鋼棒³⁾

2) JIS G 3538 PC 硬鋼線⁴⁾

JIS G 3137 に規定される細径異形 PC 鋼棒は、その大部分が JIS A 5373 (プレキャストプレストレストコンクリート製品) に用いられるものである。2007年6月の建築基準法の改正に伴い、JIS 製品以外は大径認定品を除いて使用できなくなったため、最新の2008年版ではサイズの追加が行われると同時に、PC 鋼材の実態に合せて引張試験における引張速度の変更が行われた。

JIS G 3538 はブルーイング処理 (ひずみ取り焼鈍 (焼きなまし)) されていない PC 鋼線で、弾性限や伸び性能が低く、リラクセーションも大きい。また、原材料も JIS G 3536 (PC 鋼線及び PC 鋼より線) のそれと異なっている。冷間加工を与えながらプレストレスを付与する特殊な分野に限定的に適用されてきたもので、1994年以來改正はされていないままである。

3. 新しい高機能 PC 鋼材

PC 鋼材は、① 高い引張強度と降伏強度、② 高い疲労性能、③ 高い弾性限界、④ 高い弾性係数、⑤ 低いリラクセーション率、⑥ 降伏後に塑性伸びを発揮する、⑦ コンクリートに近い熱膨張係数、⑧ プレテンション、ポストテンション両方式での緊張・定着の簡便さ、⑨ グラウトやコンクリートとの付着確保の容易さ、⑩ ばらつきの小さい品質の安定性、などの特性によって有用性が広く認識され多用さ

れてきた。

一方で、過酷な環境条件下であっても現場でのグラウトやコンクリートのかぶり厚のみに頼った防錆方法を適用した場合、構造上のディテールが適切ではなかった場合 (たとえば、凍結防止剤を大量にまくにもかかわらず上縁定着となっている道路橋など)、グラウト充填不足があった場合には耐久性上の問題を起こしたケースもあった。PC 鋼材の腐食問題や施工中に長期間グラウトできないような構造の登場 (たとえば最終段階で張力調整を実施する斜ケーブル) は、工場であらかじめ樹脂によって防食加工を施した PC 鋼材やグラウトを注入しなくてもコンクリートとの一体性が確保できる PC 鋼材の登場を促し、ここ10年余りで、それが斜ケーブルばかりでなく外ケーブルや内ケーブルにもその適用事例が広がっている。ここではそれら JIS で規格化された性能以上の付加的機能を有する緊張材を取り上げて、それらのベースとなる近年の規準類と共に、適用事例の多いものについてその特徴や適用に際しての注意点などについて述べる。

3.1 樹脂被覆 PC 鋼材

この10年間にみれば、PC 鋼材技術のもっとも大きな変化は、腐食からの保護を現場でのグラウト (だけ) に頼らない PC 鋼材、とりわけ樹脂被覆 PC 鋼材の橋梁分野での大規模な適用である。従来から、建築分野においてはグリッドと高密度ポリエチレンによって被覆された PC 鋼材 (いわゆるアンボンド PC 鋼材) が主としてフラットスラブ構造に多用されてきたが、PC 鋼材表面に密着した樹脂で被覆された PC 鋼より線や現場でのグラウト作業を不要とするプレグラウト PC 鋼材の橋梁への適用がここ10年余りで加速されている。背景には、

- 1) 外ケーブルや斜ケーブル構造の増加
- 2) グラウト充填が比較的難しい長尺ケーブルや斜ケーブルの増加
- 3) 不適切なグラウト施工による問題を背景とした可能な範囲でのグラウト作業の回避
- 4) 想定を超えた厳しい塩害問題への対応
- 5) 工期短縮や現場労務削減のための一助などがある。

樹脂被覆 PC 鋼材は、① 工場での製造直後から輸送、保管、供用全期間にわたって防錆力を発揮する、② 被覆材が鋼材同士の高い接触圧力の緩衝材として機能して微動摩擦腐食 (フレッティング) の発生を抑える、③ 結果として疲労性能向上にも寄与する、などの効果があり、シースが連続しないプレキャスト部材を貫く内ケーブルとしても有効に活用され始めている。また、グラウト作業を不要にしながらも付着を確保できるプレグラウト PC 鋼材は橋梁の横締めを中心に多数適用され、シングルストランドの大容量化 (現行では最大試験力1139kNまで) が図られたことで主方向への適用も進みつつある。樹脂被覆 PC 鋼材はさまざまな利点がある一方で、適用にあたっての注意点も多い。樹脂被覆 PC 鋼材に対する要求性能や適用の留意点などは、たとえば以下の文献に詳しく示されている。

- 1) エポキシ樹脂被覆を用いた高機能 PC 鋼材を使用する

プレストレストコンクリート設計施工指針(案), 土木学会, コンクリートライブラリー 133号, 平成22年8月

- 2) 防錆被覆PC鋼材の品質・施工管理に関する手引き, (財)高速道路調査会, 平成22年2月
- 3) PC箱桁外ケーブルに用いる防錆被覆PC鋼材の性能調査指針, (公社)プレストレストコンクリート工学会, 平成24年4月

また, 国土交通省の「PC橋に用いる被覆PC鋼線技術」に関する公募(平成29年3月)によっても要求性能と試験方法が示され⁵⁾, その後4つの製品群が選定されている。当初スケジュールでは平成29年12月頃に試験結果の比較表が公表される予定であったが, その後試験項目の一部追加・要求性能の変更などがあり, 現在公表が待たれる状況にある。

樹脂被覆PC鋼材の主な注意点を列挙すると以下のようになる。

- 1) 適用用途・部位(プレテンション, 内ケーブル, 外ケーブル, 斜ケーブル)によって要求性能が異なる
- 2) 被覆材の物性に注意する(たとえば, エポキシ樹脂は紫外線に弱い, ポリエチレン樹脂は接着力や腹圧力に弱いなど)
- 3) ケーブル配置や緊張時に被覆材の損傷を回避するための施工方法, 養生対策を講じる
- 4) 定着性能, 定着部処理方法の確認
- 5) 専用の定着具を用いる必要性の有無と定着のために被覆材を剥ぐ必要性の有無
- 6) 盛替え・緊張・定着による被覆材損傷が無いことの確認
緊張・定着時の定着部での被覆材の損傷は定着不良に繋がることから, 耐久性の問題にとどまらず緊張材の滑り・突出など安全上の問題になりかねないこととくに注意が必要である。内ケーブルや斜ケーブルでは一旦配置を行うと被覆材の点検やタッチアップ・ペイントによる補修ができない。プレテンションや外ケーブルであっても鉄筋と違って長尺物であるためすべての損傷部を目視確認して補修することは困難である。樹脂被覆で鋼材が保護されている場合, 腐食の起点はピンホールであることから, 製造工程内で全長ピンホール検査が実施され全長にわたってピンホールフリーであることが望まれる。企業者によっては, 施工直前や施工後のピンホール検査を義務付けている。

プレグラウトPC鋼材では樹脂の硬化性状から決まる緊張可能期間を考慮した施工計画が必須である。プレグラウトPC鋼材用の樹脂は主流が熱硬化型から湿気硬化型へ変化したことで, 施工条件が随分と緩和され適用範囲拡大に繋がっている。

3.2 高強度PC鋼より線

JIS G 3536(PC鋼線及びPC鋼より線)に規定されるB種のPC鋼より線(引張強さ1860MPa級)を15~20%を超える高強度PC鋼より線の登場・実用化もこの10年間の大きな変化といえよう。引張強さが2230MPa級のは7本よりφ15.7mmのストランドから構成される桁内外ケーブルとして比較的大容量ケーブルとしての適用例が多

い。設計の自由度を広げ, 従来にないスレンダーな構造や断面, コンクリートウェブのスパン130m級の多径間連続ラーメン橋を実現する一助となっている。

高強度の内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線(以下, ECFストランドと称す, ECF: Epoxy Coated and Filled)はφ15.7mmからφ21.8mmの太径サイズまでが平成29年3月に土木学会技術評価機構で以下の内容で技術評価を受け, 参考文献6), 7)にすべての評価結果が纏められている。主たるポイントは以下の5点である。

- 1) 「新しいECFストランド」の被覆仕様および性能
対象材が土木学会指針(案)*に規準化されたエポキシ樹脂被覆仕様・性能を満足する。
- 2) 「新しいECFストランド」の設計・施工・維持管理および耐久性
対象材を用いることで, 「土木学会指針(案)*」および「コンクリート標準示方書」に基づいて設計耐用年数100年間のコンクリート構造物を適切に設計・施工・維持管理することが可能である。

3) 「新しいECFストランド」の安全係数

ECF高強度ストランドの安全係数は, JIS G 3536規定のPC鋼材の安全係数と同一として良い。

4) 「新しいECFストランド」の耐遅れ破壊特性

ECFストランドおよびECF高強度ストランドは, 「土木学会指針(案)*」および「コンクリート標準示方書」に従って設計・施工・維持管理されるかぎりにおいて, エポキシ樹脂被覆の効果により, 遅れ破壊を起こすリスクは著しく低減され, 実質上無視しうる。

5) 「新しいECFストランド」を適用する場合の留意事項

留意事項は「新しい内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線「ECFストランド」に関する技術評価報告書(土木学会, 技術推進ライブラリー No.19)」による。

※土木学会指針(案): 「エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針(案)」(土木学会, コンクリートライブラリー 133号)

引張強さが2230MPa級と1860MPa級のPC鋼より線は外観から識別できないことから, 高強度材の汎用サイズはφ15.2mmではなくφ15.7mmが採用されている。強度レベルに応じて従来のB種のPC鋼より線に対して20%増しのひずみレベルまで緊張されることから, PC鋼材の表面にきずがあった場合にはPC鋼材の性能に与える影響がより顕著になることや材料自体が高強度であること, 供用中の緊張荷重もそれに伴って高くなることから当然遅れ破壊に対する感受性も高くなることにも十分な注意が必要である。

高強度の7本より太径PC鋼より線(φ17.8mmおよびφ21.8mm)は樹脂被覆仕様であってもシース内空隙率を阻害することがなく, ケーブル挿入やグラウト注入に悪影響を与えない。したがって, 従来のコンクリート部材断面を変更することなく樹脂被覆仕様の適用が可能で, プレキャスト桁橋のPC鋼材あと挿入の横締めとしての適用が東北地方整備局を中心に増え始めている。

高強度材は, 資源・原材料の輸送, 製造から運搬までを

含めて省資源、省エネルギーに寄与する環境フレンドリーな材料といえる。ケーブル本数の削減は現場の省力化や工期短縮、将来の点検性の向上にも繋がる一方で、損傷や腐食によってPC鋼より線1本が損傷した場合の構造系への影響は大きいものになる。そのような観点や施工に伴うきず感受性が高まるリスク、遅れ破壊の感受性が高くなるリスクを回避するために、内ケーブルの場合も含めてそのほとんどすべてがグラウトだけに防食を依存しない樹脂被覆PC鋼材として適用されている。

PC工学会はPC技術協会時代の平成23年6月に「高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針(案)」を取り纏めている。

製造においては、鋼材のCやSi含有量を高めるなど化学成分を現行のB種の原材料であるピアノ線材から良い意味で逸脱し、精緻な温度制御によるパテンチング処理が施された原材料が使用されている。

3.3 亜鉛めっきPC鋼より線

亜鉛めっきはその製造プロセスで鋼材が水素を吸蔵することが不可避であることやコンクリートやグラウトとの反応によって水素を生成すること、めっきによってPC鋼材の強度低下を招くことからPC鋼材の防食方法として敬遠されてきたともいえるが、近年、強度低下を最小限にする製造方法が開発されたことを背景に、大気やグラウト、コンクリートと接触しないようグリース(またはワックス)とポリエチレン樹脂で被覆された状態で斜ケーブルとしての適用例が海外で増えつつある。国内に亜鉛めっきPC鋼より線自体の公的な規格はなく、(一財)土木研究センターの認証を得た形で斜材システム提供会社による独自規格がある。海外ではfibの“Acceptance of stay cable systems using prestressing steels”やprEN10337:2003“Zinc and zinc alloy coated prestressing wires and strands”に同PC鋼より線の技術規準が示されている。亜鉛めっきによる防食性能は亜鉛付着量に大きく依存する一方、過度な付着量は端部定着性能に影響を及ぼすことからここでは190~350g/m²に制限されている。

PC鋼材への亜鉛めっきの影響については、過去の知見を総括した“Effect of zinc on prestressing steel”が2012年にfibから発行されていてこのなかでコンクリートやグラウト中の亜鉛めっきPC鋼材の接触に関する問題も取り上げられている。結論としては、水素の発生による水素脆性の危険性は初期の期間に限定されるものの、セメントの種類や局所的なめっきの損傷位置・定着部のくさびの噛み込み位置の問題、実強度レベルの制限(PC鋼棒なら引張強さ1400MPa以下、PC鋼より線なら引張強さ2000MPa以下)などの考慮すべき多くの要因をあげて「技術者は関連するあらゆる要因を考慮してケースバイケースで適用を判断しなければならない」として、判断が容易ではないことは明らかである。たとえ数時間から数日間の危険性であっても、構造系に取り返しのつかない損傷を与える場合があることを考えるとグラウトやコンクリートとの組合せを回避した使い方を続けているのは賢明といえるだろう。

3.4 ステンレスPC鋼より線

国内での適用事例報告はほとんどないがプレテンション方式で防音壁への適用例がある。異種金属との接触による腐食が問題となることから定着具とともに用いられることがないプレテンション用途にかぎられている。米国のジョージア工科大学を中心に精力的な研究が行われ、海洋構造物への適用例もみられる⁸⁾。強度レベルが低い(JIS A種相当)ことや耐食性、経済性の面で必ずしも有用性が高いとはいえないが、非磁性(または低磁性)であることは特殊な用途の要求性能に叶った優位点であるといえる。

3.5 非金属性緊張材

炭素繊維系のCFRP、アラミド繊維系のAFRPがありいずれも繊維と樹脂の複合材で腐食しないことが最大の長である。1980年代から活発な研究開発がなされ、いずれもプレテンション用途中心であるが国内や北米で少ないながらも実績を積み重ねている。非磁性であること、軽量であること、AFRPは弾性係数が低いことで短い部材への現場でのプレストレス導入が容易であることなどにも優位性がある。CFRPの塑性伸びがない性状も鋼材との組合せによって部材として十分なじん性を確保するなどの試みもなされている⁹⁾。一方、90年代に期待されたほどの適用事例が増えていないのは定着の即時性や緊張材としての大容量化、経済性に課題があるということであろうか。2003年にACC倶楽部(現建設用先端複合協会)から「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物設計・施工マニュアル(案)(5訂版)」が発行され、PC工学会では「連続繊維補強材のPC構造物への適用に関する委員会」(委員長陸好宏史埼玉大学教授)が2018年に組織され、約2年で設計・施工指針が作成される予定となっている。腐食する金属をまったく使用しない橋梁あるいは部材、というコンセプトやLCCの観点から今日再度注目されているともいえる。適用部位を条件の厳しい部位に限定したり、LCCを考慮したりすることで適用の可能性を高める基礎的な検討もなされている¹⁰⁾。

CFRPやAFRPは緊張材としてばかりではなく、厳しい腐食環境下でのひび割れ制御やコンクリートの剥落防止を目的として部材表層に配置される鉄筋の代替としても有用である。

4. 調査・研究開発について

ここ約10年間に緊張材関連を主なテーマとして行われた調査・研究開発については従来から用いられてきたPC鋼材そのものに関するものは少なく、グラウト問題や塩害におけるPC鋼材の維持管理の技術を中心としたものと先に挙げた高機能PC鋼材に関するものが多い。PC鋼材の維持管理の技術に関することはPC工学会発行の会誌「プレレストコンクリート」(Vol.60, No.6, 2018)の特集号にも詳しく取り上げられている。ここでは注目すべきと考えられるテーマについて文献と資料を紹介する。

4.1 既設橋のPC鋼材の調査および補修について

「既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針」(PC工学会、平成28年9月)はPC工学会内

に設けられた「既設ポストテンション橋のPCグラウト問題対応委員会」で検討された成果を整理した同種問題に対する集大成であり、以下の内容が纏められている。

- 1) ポストテンション方式PC橋の実態把握(健全性・損傷事例の把握や規準などの整理)
- 2) PCグラウトの充填性調査手法の把握
- 3) PC鋼材の健全性調査手法の把握
- 4) ポストテンション方式PC橋の健全性診断の方法検討
- 5) PCグラウト充填不足問題の実態
- 6) PC鋼材損傷の補修・補強などの提案

調査は構造物の重要度とグラウトの充填不足ならびにPC鋼材の腐食や破断のリスクが高いものから実施すること、リスクは変状状況、建設時期、PC鋼材種別、構造形式、架橋環境などを考慮すべきこと、グラウトの充填不足は1960年代から80年代においては建設年次によらずある一定の割合で生じており、そのリスクはPC鋼材種別による影響が大きいことから、PC鋼材が採用されているポストテンション橋を優先すると良い、など具体的に記述されている。

グラウトの注入方法については真空ポンプの利用や自然流下方式、注入量の確認では通気法(空圧法)の事例、また、PC鋼材の健全性調査については磁化させたPC鋼材の漏洩磁束密度の変化によって破断の有無を捉える漏洩磁束(MFL)法など最新の知見までが盛り込まれている。

グラウトの充填不足に対する再注入工法については亜硝酸リチウム(LiNO₂)水溶液を用いた一連の研究がある¹¹⁾。PC鋼線束における効果の検証もなされすでに実用化に至っている。詳細は先にあげた会誌「プレストレストコンクリート」(Vol.60, No.6, 2018)の特集号にPC鋼線の腐食・破断特性とその補修方法とともに詳述されている¹²⁾。その有効性について今後長期的な評価が待たれる状況にある。

4.2 グラウト中の塩分濃度がPC鋼材の腐食に及ぼす影響

これについてはグラウトの塩分濃度とPC鋼材の緊張力が鋼材腐食に及ぼす影響に関する研究報告がある¹³⁾。

実験によって、①グラウトの塩化物イオン濃度が0.09%以下であればPC鋼材の腐食発生の可能性は低いこと、②PC鋼材に与えられる緊張力は実施工の範囲内(引張強度の80%以下)であれば腐食発生に影響を及ぼさないこと、が確認されている。グラウト中の塩化物濃度の閾値に関しては米国のAn FHWA Special Study: Post-Tensioning Tendon Grout Chloride Thresholds, MAY 2014などの報告もある。

4.3 防食加工鋼材の比較研究

各種防食加工されたPC鋼材の機械的性能と耐食性についての実験的な比較研究として、製造者ではない第三者としてテキサス大学の運輸研究センターでProf. Breenらによって行われた研究報告がある¹⁴⁾。

従来の裸PC鋼より線、銅クラッドPC鋼より線、溶融亜鉛めっきPC鋼より線、ステンレスクラッドPC鋼より線、ステンレスPC鋼より線、ECFストランドが取り上げられている。機械的性能ではECFストランドと裸PC鋼より線のみがASTM Grade270(JISのB種相当; 270ksi)を満

足し、耐食性ではECFストランドが他を圧倒し、ステンレスクラッドPC鋼より線、ステンレスPC鋼より線がそれに続く結果となっている。このとき供試されたステンレスPC鋼より線はASTM Grade250(JISのA種級; 250ksi)の強度レベルを満足せず、伸び性能は高々2%程度である。

4.4 モニタリング技術の開発

ひずみを計測するために光ファイバーをPC鋼より線に組込んで、PC鋼より線全長にわたって長期に張力モニタリングを可能にする技術が開発されている^{15, 16)}。適用されたPC鋼材の仕様については被覆のない裸PC鋼より線とECFストランドの両方があり、基礎的な実験から橋梁構造物やグラウンドアンカーへの適用までがフィールドテストによって確認されている。ケーブル全長にわたるひずみ、その結果として任意の位置でのケーブル張力の計測を可能にしたこと、ガラス製光ファイバーが優れて高耐久であることがポイントである。長期にわたる常時モニタリングはもちろんのこと大地震や大型台風後にケーブルの健全性を確認するなどの使い方にも有効と考えられる。

国内での報告はないが、欧州のEIT(Electrically Isolated Tendon)の研究開発も注目される。当初、スイスやイタリアの鉄道橋で始められた技術であるが¹⁷⁾、規準も整備され¹⁸⁾、欧州では少ないながらも試行的に道路橋にも広がりを見せている。グラウトキャップや定着体を含むグラウトされたケーブル全長・全体を周囲のコンクリートと電氣的に絶縁し(したがって当然プラスチック製シースを用いる)、その電気抵抗を長期にわたってモニタリングすることで抵抗値の低下からケーブル内への水や腐食原因物質の侵入や劣化を見極めようとする技術である。発想は素晴らしいが実用に供されてもいて、*fib*の規定する現状唯一のPL3^{***)}(Protection Level 3)を達成する技術であるが、初期の段階から完全な絶縁性を確保すること自体も容易ではないようである(プラスチック製シースも万能ではなく、仕様やケーブルの配置形状、ディテールによっては緊張段階ですでに損傷することもある)。また、劣化を検知しても内ケーブルではその補修も容易ではないうえに電気系統のケーブルの長期耐久性にも課題があると考えられ、今後この技術がどのように課題を解決し普及に繋がるのか注目したい。個人的には、本丸のPC鋼材自体を高耐久仕様にした上でさらにEITを適用するのが良いのではないかと考えている。

※※) *fib*の定めるProtection Levelには3段階があり、おのおの以下のとおり規定されている。

- 1) PL1: 耐久的な防食を付与する材料でダクトを充填している(たとえば、従来からの金属製シース内にセメントグラウトが充填されているテンドン)
- 2) PL2: PL1に加え、緊張材の束全長にわたる恒久的な密閉性を確保するバリアを有している(たとえば、堅牢なプラスチック製ダクトでテンドン全長がカプセル化されている)
- 3) PL3: PL2に加え、常時モニタリング・点検が可能な機能を有する

4.5 PC 鋼より線の破断時の挙動について

ポストテンション方式 PC 橋で PC 鋼材が腐食破断し、破断時の衝撃による PC 鋼材の突出など構造物に悪影響を及ぼすリスクについて、腐食破断を想定した素線の破断時の挙動を実験によって検証した研究報告がある¹⁹⁾。

被覆のない PC 鋼より線 (φ 15.2 mm) と被覆のある PC 鋼より線 (φ 15.2 mm および φ 21.8 mm) についての素線 1 本ずつの破断実験結果から、いずれの供試材においても素線が 1 本ずつ破断した場合に全素線が一挙に破断するような事象は発生せず、被覆がある場合には残存する素線に荷重の再分配が生じることはあるものの、残存素線に応じた荷重を保持しながら段階的に荷重低下を起し、PC 鋼より線が一挙に破断する可能性は低いことが示されている。

4.6 建築分野でのアンボンド PC 鋼材の活用

PC 技術協会 (現 PC 工学会) 内に公募委員会として設けられた「アンボンド PC 部材の構造性能解明とその有効利用に関する研究委員会」によって「アンボンドプレストレストコンクリート建築物の設計 - 材料, 力学性能, 耐久性・耐火性から設計例まで」(PC 工学会, 平成 24 年 10 月) がまとめられている。

研究委員会には材料・耐火性 WG, 力学性能 WG, 耐久性 WG および設計 WG が設置され、それぞれにアンボンド PC 部材に関する最新の情報ばかりではなく一般の PC 部材に関する耐火性や耐久性についても多くの情報が盛り込まれていて貴重な一冊となっている。

5. おわりに

2018 年 8 月 14 日に発生したイタリアジェノヴァの Polcevera 橋の衝撃的な落橋は、構造系のリダンダンシーやロバストネスのことを別にすれば、原稿執筆時点で当局の公式見解はまだ発表されていないものの、PC 鋼材の腐食による破断が主因だと考えられているようである。腐食がなぜ起きたのか、なぜその問題解決がなされなかったのかは別の問題として、あまりにも当然のことながら PC 構造が緊張材の長期的な耐久性を前提に成立していることをわれわれに改めて強く認識させることとなった。高強度故に各種の外乱に対して感受性が高いと考えられるにもかかわらず、長期にわたって高い緊張力が与えられる緊張材が文字どおり PC 構造のアキレス腱 (Tendon) ともなることを示したあまりにも大きな教訓であった。日本でも決して対岸の火事ととらえないことが望まれる。

次の 10 年間、あるいは次の 60 年間で緊張材はどのような課題を抱え、どのような進歩を遂げるであろうか。日本が PC 技術で世界のフロントランナーの一員となった今、十年一日の如くすでに規格化されたものを作り、使い続け、経済性を追求するだけではまったく技術的進歩がない。経済合理性は当然のこととして LCC など長期的な視点を取り入れながら、専門家や社会の要請に対して常にそれを先取りした技術に学・官・民が共に挑戦しつづけることが大切だと考えている。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS G 3536 (2014) PC 鋼線及び PC 鋼より線
- 2) 日本規格協会：JIS G 3109 (2008) PC 鋼棒
- 3) 日本規格協会：JIS G 3137 (2008) 細径異形 PC 鋼棒
- 4) 日本規格協会：JIS G 3538 (1994) PC 硬鋼線
- 5) 国土交通省「PC 橋に用いる被服 PC 鋼線の要求性能に関する意見募集結果と技術の公募について - 新技術活用システムのテーマ設定型 (技術公募) における技術の公募について -」別紙 -1-2 性能評価項目と試験方法：www.mlit.go.jp/common/001176084.pdf (平成 29 年 3 月 16 日)
- 6) 土木学会：技術推進ライブラリー No.19 「新しい内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線「ECF ストランド」に関する技術評価報告書, 第 16006 号, 2017.3
- 7) 沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 16006 号, 内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線 ECF ストランド, 2017.3
- 8) Moser R, Singh P, Kahn L, Kurtis K : Durability of Precast Prestressed Concrete Piles in Marine Environment, Part2, Volume2:Stainless Steel Prestressing Strand and Wire, GDOT Research Project No.10-26, Georgia DOT, 2012.6
- 9) 古瀬徳明, 横田 弘, 加藤絵乃, 岡崎慎一郎 : CFRP 材を適用したプレストレストコンクリート桁の載荷試験, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.569-572, 2015.10
- 10) 古村 豊, 大山博明, 中井聖棋, 榎本 剛 : 繊維補強材を使用した超高耐久 PC 橋の適用性に関する基礎的検討, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.69-72, 2015.10
- 11) 鴨谷知繁, 石井浩司, 森川英典 : 亜硝酸リチウムを用いたグラウト再注入を行った PC 橋の鋼材腐食抑制効果, 第 26 回プレストレストコンクリートシンポジウム論文集, pp.317-322, 2017.10
- 12) 森川英典, 美濃智広, 鴨谷知繁 : PC グラウト再注入工法, プレストレストコンクリート Vol.60, No.6, pp.54-59, 2018.11
- 13) 東 洋輔, 宮里心一, 二井谷教治, 山田一夫, 宮川豊章 : グラウトの塩分濃度と PC 鋼材の緊張力が鋼材腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集 E Vol.65, No.1, pp.103-117, 2009.3
- 14) R.D.Kalina, S.Mac Lean, J.E.Breen : Comparative Study of Mechanical and Corrosion Resistance Properties of Bridge Post-Tensioning Strands, 2011.8
- 15) 大窪一正, 今井道男, 千桐一芳, 中上晋志 : 光ファイバーを用いた PC 張力計測技術, 第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.283-288, 2016.10
- 16) 曾我部直樹, 今井道男, 中上晋志, 早川道洋 : 光ファイバーを用いた PC 張力計測技術のグラウンドアンカーへの適用, 第 27 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.405-410, 2018
- 17) M.Della Vedova, B.Elsener : Enhanced Durability, Quality Control and Monitoring of Electrically Isolated Tendons, fib Proceedings of the 2nd International Congress, June 2006-Naples, Italy
- 18) Swiss Federal Roads Authority and Swiss Federal Railways : Swiss Guideline (2007). "Measures to ensure the durability of post-Tensioning tendons in bridges", edition 2007
- 19) 大島克仁, 松原喜之, 福田雅人, 青木圭一 : PC 鋼より線破断時の挙動に関する一実験, プレストレストコンクリート Vol.58, No.5, pp.62-67, 2016.9

【2019 年 2 月 4 日受付】