

ポリエチレン製シースを用いたPC橋の多層防錆構造実現のための性能の評価

(株)日本ピーエス	正会員	工修	○天谷	公彦
エステーエンジニアリング(株)		工修	谷山	慎吾
極東鋼弦コンクリート振興(株)	正会員		岡田	稔
愛知工業大学	正会員	工(博)	呉	承寧

Abstract : To prolong the structural life span and to obtain highly durable prestressing concrete bridges, multi-layer protection concept for internal bonded post-tensioning tendons is quite frequently adopted in recent designs with using Polyethylene Sheath (called PE sheath, hereafter). Wear resistance during the tensioning and under sustained load in subsequent, and leak tightness performance of PE sheath system against any corrosive materials intrude neither at any connecting couplers nor at anchorage zones throughout the tendon is very important. To evaluate these performance, investigations have been made and new test methods for PE sheath were suggested. Furthermore, investigated the post-tensioning anchorage system performance connected with PE sheath and considered about how to acquire the multi-layer protection barrier for post-tensioning tendons.

Key words : PE sheath, Multi-layer protection, Wear resistance test, Wear resistance under sustained load, leak tightness test

1. はじめに

今後の持続可能な社会に向けて、プレストレストコンクリート（以下、PC）橋のさらなる耐久性の向上が求められている。現在の耐久性設計の枠組みの中で設計されたPC橋でも、所要の耐久性を設計供用期間にわたって保持していると考えられるが、一般的に用いられている鋼製シースは塩化物イオンや水、空気などの腐食促進物質の遮蔽効果が高いとはいえない。そこで、腐食促進物質の遮蔽効果を有するポリエチレン製シース（以下、PEシース）を用いて防護層を追加し、多層防錆構造を実現することが有効となる。

腐食促進物質の侵入経路として、コンクリート表面から内部に侵入する経路と、PC鋼材に直接到達する経路が考えられる。前者に対してはPEシース全長にわたっての遮蔽性能の確保が、後者に対してはグラウトホースおよびグラウトキャップを含む定着部全体での遮蔽性能の確保が必要となる。

そこで、ポストテンショニングシステム（以下、PTシステム）全体にわたっての遮蔽性能を確保し、多層防錆構造を実現するために、PTシステムに求められる性能を明確にするとともに、その性能を評価するための試験方法について検討し、新たな試験方法案を提案した。さらに、PEシースを用いたPTシステムの性能評価を行い、多層防錆構造を実現するための方策について考察した。

2. PEシースを用いたPTシステムの保有すべき性能

PC橋の耐久性向上を目指すにあたり、PEシースにはPC鋼材を保護する役割が求められ、この役割を果たすためには、PEシースを用いたPTシステムが保有すべき性能を明確にする必要がある。

*fib*の「Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning, *fib* Bulletin 75, 2014」¹⁾（以下、「*fib* Bulletin 75」）では、構造物の周辺環境と設計で考慮されている防食対策の程度に応じて、以下の3段階のPC鋼材の防食レベル（Protection Level：以下、PL）を設定している。

PL1: PC鋼材+鋼製シーす (またはPEシーす) +PCグラウト

PL2: PC鋼材+PEシーす+PCグラウト+密閉された定着部 (遮蔽性能の確保)

PL3: PL2の仕様+PC鋼材の絶縁化+絶縁状態のモニタリング

PL1は、一般的なPC橋の仕様となる。PL2は、定着部を含むPC鋼材全長にわたっての密閉性を確保することとしており、これを実現するためにはPEシーす相互の接続部、PEシーすと定着具の接続部での密閉性の確保とともに、防錆効果を有する定着具やグラウトキャップを用い、PTシステム全体としての密閉性を確保する必要がある。PL3は、PL2の仕様に加えて、PC鋼材の絶縁化とその絶縁状態のモニタリング機能を求めている。これは、迷走電流がPC鋼材中を流れることによるマクロセル腐食の発生を防止を目的としている。ただし、国内のPC橋においては迷走電流による腐食事例はほとんど報告されていないことから、本検討ではPL2相当の防食レベルを目指すこととした。

PEシーすを用いたPTシステムが所要の腐食促進物質の遮蔽効果を発揮するためには、以下に示す性能が担保される必要がある。

- ① PC鋼材緊張時にPEシーすに破れなどの損傷が生じないこと
- ② PEシーす相互およびPEシーすと定着具の接続部の遮蔽性能が確保されていること
- ③ グラウトキャップの密閉性が確保されていること

そこで、これらの性能が確保されていることを確認するための試験方法についての検討を行った。

3. 遮蔽性能を評価するための試験方法の検討

3.1 試験方法の概要と調査

PEシーすを用いたPTシステムの性能を評価するための試験方法について検討を行った。検討にあたり、国内外の示方書・規準類に示されるPEシーすの試験方法から、2節で示した①～③の遮蔽性能の確保に関連する試験方法を抽出し、その内容の検証を行った。抽出した試験方法の概要を表-1に示す。

表-1 PEシーすの遮蔽性能を評価するための国内外の試験方法の概要^{1), 2), 3)}

試験の名称	試験規準	試験方法の概要	判定基準	温度条件
漏れ試験	土木学会規準	・PEシーす標準部に0.05MPa以上の水圧を作用させ5分間保持する。	水の漏れがないこと	23℃
	NEXCO施工管理要領	・PEシーすに0.05MPa以上の水圧を作用させ5分間保持する。 ・PEシーす標準部、PEシーす相互の接続部に対して試験を実施。		23℃
	fib Bulletin 75	・PEシーす相互の接続部を有する供試体に対して水密 (気密) 試験を実施 ・供試体内に水を充てんし0.5気圧を作用させ5分間保持する。 ・水中に供試体を配置し0.5気圧の負圧を5分間作用させる。 ・PEシーす標準部および定着部を含むPTシステムに対して水密 (気密) 試験を実施。 ・PL1では0.5気圧の正圧の水密試験を実施。試験時間は5分間。 ・PL2では0.5気圧の正圧および負圧の気密試験を実施。試験時間は5分間。	水 (空気) の漏れがないこと	23℃
すり減り抵抗性試験	土木学会規準	・PEシーすに所定の腹圧力を載荷する。	水の漏れがないこと	23℃
	NEXCO施工管理要領	・PC鋼材を2分間程度で800mm滑らせる。 ・PC鋼材の回転は拘束しない。		23℃
	fib Bulletin 75	・PEシーすに所定の腹圧力の10%を載荷する。 ・腹圧力を増加させながらPC鋼材を750mm滑らせ2分間保持する。 ・試験時はPC鋼材の回転を拘束する。	残留肉厚1.5mm以上	23℃ 45℃以上
くぼみ抵抗性試験	fib Bulletin 75	・PEシーすに所定の腹圧力を載荷し14日間保持する。	残留肉厚1.0mm以上	23℃ 45℃以上

PEシーす相互の接続部の遮蔽性能を評価する試験方法として「漏れ試験」が挙げられる。漏れ試験は、国内では土木学会規準およびNEXCO構造物施工管理要領に、海外ではfib Bulletin 75に試験方法が示されており、いずれの規定においても類似した試験方法が示されている。なお、fib Bulletin 75ではPEシーす標準部および定着体を組み込んだPTシステム全体の水密 (気密) 性を確認する「水圧 (気圧) 試験」の実施も求めており、PL1では0.5気圧の正圧の水圧を5分間かけ、漏れた水量を計測するとしている。さらにPL2では、0.5気圧の正圧および負圧の空気圧力を5分間かけ、正圧では空気の漏れがないこと、負圧では水の漏れがないことを確認するよう求めている。

緊張時のすり減り作用に対する抵抗性を評価する試験として「すり減り抵抗性試験」が挙げられる。すり減り抵抗性試験は、国内の示方書・指針類では滑り量を800mmとし、試験時のPC鋼材移動時の回転を許容しているのに対し、*fib Bulletin 75*では、滑り量を750mmとし、試験時のPC鋼材の回転を拘束している。また、腹圧力の載荷方法も異なり、前者は最初に所定の荷重を載荷してからPC鋼材を滑らせるのに対し、後者は滑り量に応じて段階的に腹圧力を増加させる方法を採用している。

PEシースは、PC鋼材の緊張後もグラウトが硬化するまでは偏向部で腹圧力を継続して受けることになる。*fib Bulletin 75*では、この継続して作用する腹圧力の影響を評価するため、「くぼみ抵抗性試験」の実施を求めている。なお、国内の規準類においては、これに相当する試験は規定されていない。

上記の調査結果より、「すり減り抵抗性試験」、「くぼみ抵抗性試験」は、より実状に近いと考えられる*fib Bulletin 75*に示される方法を基本として実施し、「水圧試験」については、PEシースに定着部を組み込んだ供試体に、土木学会規準に示される試験方法を適用して実施することとした。これらの試験結果から、PEシースによる多層防錆構造の実現の可能性を考察する。

なお、「水圧試験」の方法は、塩化物イオンの侵入は水分の移動を伴うことが多いため、PTシステムの水密性が確保されていれば侵食物質を遮蔽することが可能と考え、土木学会規準の方法を適用することとした。また、「すり減り抵抗性試験」については、PC鋼材の回転の有無の影響を明確にするため、「すり減り抵抗性試験」の実施に先立ち試験方法に関する検討を行った。

3.2 すり減り抵抗性試験に関する事前確認試験

PC鋼材の回転の有無をパラメータとしてすり減り抵抗性試験を実施し、その影響を検証した。試験には $\phi 35$ mmのPEシースを用い、曲げ半径 $100D$ (D : PEシースの呼び径)を想定した腹圧力を載荷し、滑り量を400mmとした。なお、試験の供試体はそれぞれ2体とした。

すり減り抵抗性試験の結果を表-2に、試験後のPEシースの状況を写真-1に示す。すり減り量は、PC鋼材の回転を許容した場合で0.50mm、拘束した場合で1.08mmとなり、回転を拘束した方がすり減り量が大きくなる結果であった。実際の緊張時においても、最下層のPC鋼材は回転せずにシース上を滑っていくと推定され、PEシースのすり減り抵抗性はPC鋼材の回転を拘束した試験で評価すべきと考えられる。そこで、本検討で行うすり減り抵抗性試験は、回転を拘束して実施することとした。

表-2 すり減り抵抗性試験結果

試験条件	すり減り量 (mm)		
	実測値	平均値	
回転を許容	1	0.56	0.50
	2	0.44	
回転を拘束	1	1.08	1.08
	2	1.08	



(a) 回転を許容

(b) 回転を拘束

写真-1 試験後の状況

4. 多層防錆構造を実現するための試験方法と結果

4.1 試験方法

(1) すり減り抵抗性試験

すり減り抵抗性試験の概要図を図-1に、試験条件を表-3に示す。すり減り抵抗性試験は、供試体台座上にPEシースを配置し、加圧板にて腹圧力を載荷した状態でジャッキにてPC鋼材を滑らせて実施した。なお、腹圧力は*fib Bulletin 75*にて推奨されている*Weiherr*および*Oertle*の式を用いて算出した。PC鋼材の滑り量は、 $\phi 35$ mmPEシースは横締め鋼材 (片側緊張約20m, 両側緊張約40m)を想定して150mm, $\phi 75$ mmPEシースは縦締め鋼材 (片側緊張約105m, 両側緊張約210m)を想定して750mmとした。試験時の温度は、常温 ($23 \pm 5^\circ\text{C}$) と水和熱の影響を考慮した高温 ($50 \pm 5^\circ\text{C}$) を基本とし、C社の

φ75mmのPEシースのみ60℃の環境下での試験も行った。試験結果の評価は、*fib Bulletin 75*に示されるPL2の残留肉厚の判定基準 (≥1.5mm) を参考とした。

表-3 すり減り抵抗性試験の条件

シース呼び径	PC鋼材種類	滑り量 (mm)	腹圧力(kN)	
			100D	200D
φ35	1S21.8	150	14.11	7.06
φ75	12S15.2	750	9.02	4.51

注記：φ35mmシースはWeiberの式で腹圧力を算出した。
φ75mmシースはOertleの式で腹圧力を算出した。
DはPEシースの呼び径を示す。

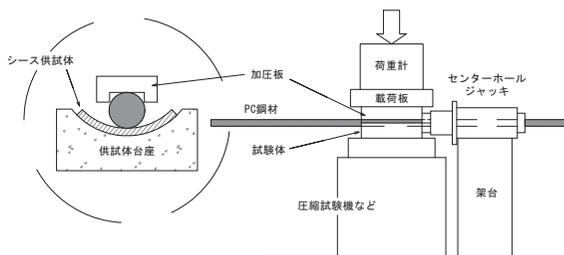


図-1 すり減り抵抗性試験の概要

(2) くぼみ抵抗性試験

くぼみ抵抗性試験の実施状況を写真-2に示す。くぼみ抵抗性試験では「すり減り抵抗性試験」を終えたPEシース供試体のPC鋼材接触部分に、すべりを伴わない腹圧力を継続的に載荷し、残留肉厚の変化量(くぼみ量)を測定した。載荷条件は、水和熱の影響を考慮した高温条件(50℃±5℃)とし、載荷期間は3日間とした。試験結果の評価は、*fib Bulletin 75*に示されるPL2のくぼみ量の判定基準 (≤0.5mm) を参考とした。

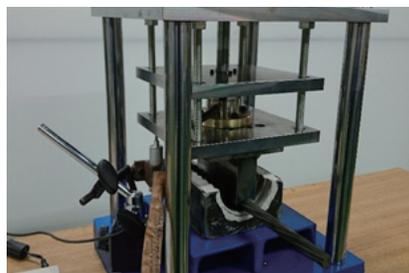


写真-2 くぼみ抵抗性試験実施状況

(3) PTシステムの水圧試験

水圧試験の概要を図-2に示す。試験は、定着具・グラウトキャップ・PEシースを接続した供試体を用いて行い、JSCE-E707-2010に示されるように内水圧と外水圧を5分間作用させて水漏れの有無を観察した。なお、*fib Bulletin 75*に準拠して、定着ブロックにPC鋼材定着時の緊張力を模擬して与えるため、ロッドを緊張して定着ブロックとガイドに1kNの圧縮荷重を与えた状態で試験を行った。外水圧試験は大型の定着具を内部へ入れることができる容量の圧力容器の入手が困難であったので、*fib Bulletin 75*を参考に内部の圧力を減圧する手法を採った。

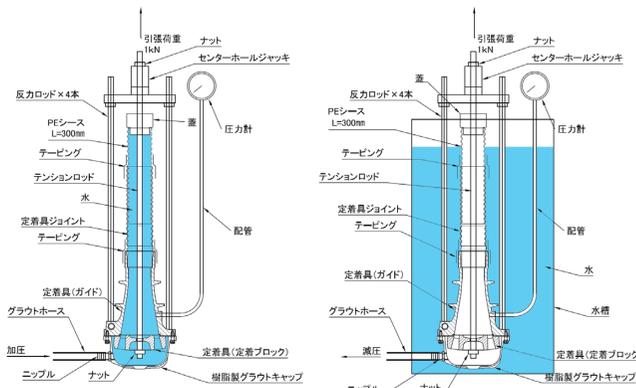


図-2 水圧試験の概要

試験温度は23±5℃とし、試験圧力は内水圧、外水圧ともに0.05MPaとした。なお、供試体数は内水圧、外水圧ともに1体とした。

4.2 試験結果

(1) すり減り抵抗性試験

すり減り抵抗性試験結果の一覧を表-4に示す。全体的な傾向として、試験時の温度が高くなるほど、また曲げ半

表-4 すり減り抵抗性試験結果の一覧

曲げ半径	製造会社	φ35 PEシース				φ75 PEシース			
		残留肉厚(mm)		すり減り量(mm)		残留肉厚(mm)		すり減り量(mm)	
		23℃	50℃	23℃	50℃	23℃	50℃	23℃	50℃
100D	A社	2.58	2.23	0.26	0.57	3.11	2.16	0.68	1.63
	B社	1.80	1.59	0.29	0.56	1.60	1.24	0.87	1.16
	C社	1.88	1.95	0.39	0.49	2.07	1.61	0.49	0.89
	D社	—	—	—	—	1.79	1.51	0.76	1.07
200D	A社	2.64	2.53	0.16	0.29	3.45	3.24	0.34	0.57
	B社	1.93	1.82	0.21	0.35	2.16	2.31	0.27	0.43
	C社	2.18	2.32	0.16	0.14	2.44	2.17	0.17	0.44
	D社	—	—	—	—	2.13	1.91	0.40	0.69

径が小さくなるほどすり減り量が大きくなる傾向がみられた。

PEシースのすり減り作用に厳しい条件となる高温50℃での腹圧力と残留肉厚の結果を図-3、図-4に示す。φ35mmのPEシースは試験温度50℃、曲げ半径100Dの条件においても、3社ともfibの基準値である残留肉厚1.5mmを満足する結果が得られた。一方で、φ75mmのPEシースは、B社が1.24mmとなりfibの基準値を下回り、D社も1.51mmと基準値とほぼ等しい結果であった。これは、φ75 mmのPEシースは滑り量を750mmと、φ35 mmのPEシースよりも大きめに設定していることが要因であると考えられる。

これらの結果より、φ35mmのPEシースはPC鋼材長が20m (片引きの場合) 程度であれば、道路橋示方書に示される最小曲げ半径 (100D) の配置が可能であるが、φ75mmのPEシースはPEシースの性能に応じて曲げ半径を大きめに設定する必要がある。

試験温度とすり減り量の関係を図-5に示す。温度とすり減り量の関係を見ると、試験温度が23℃~50℃の範囲では両者の関係はほぼ線形となった。一方で、60℃の環境下では、曲げ半径を100Dとした場合にすり減り量が大幅に増加する結果が得られた。この現象は、ポリエチレンの強度特性が温度依存性を有することが要因と考えられ、ほかの製造会社のPEシースにおいても同様の傾向にあると推測される。そのため、コンクリートの水和熱などの影響により、PEシースの温度が50℃を超える恐れがある場合は、温度が50℃以下に降下するまで緊張作業を避けるか、別途対策を講じる必要がある。

(2) くぼみ抵抗性試験

くぼみ抵抗性試験の結果の一覧を表-5に、くぼみ量が最大となった試験体の変位の経時変化を図-6に示す。なお、腹圧力荷重中はくぼみ量の測定が不可のため、図-6の縦軸は載荷板の変位としている。

くぼみ抵抗性試験は、すり減り抵抗性試験後に継続して荷重を載荷して行く。そのため、すり減り抵抗性試験の滑り量が大きいφ75mmのPEシースの方が試験条件が厳しくなる。そこで、φ75mmの試

表-5 くぼみ抵抗性試験の結果

シー呼び径	試験温度	製造会社	曲げ半径	くぼみ量 (mm)	荷重保持時間
φ35	50℃	A社	100D	0.27	3日間
		B社	100D	0.38	3日間
		C社	100D	0.13	3日間
φ75	50℃	A社	100D	0.47	3日間
		C社	100D	0.23	3日間

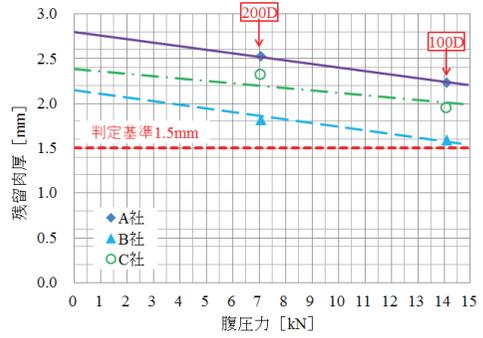


図-3 φ35mmPE シースの腹圧力と残留肉厚

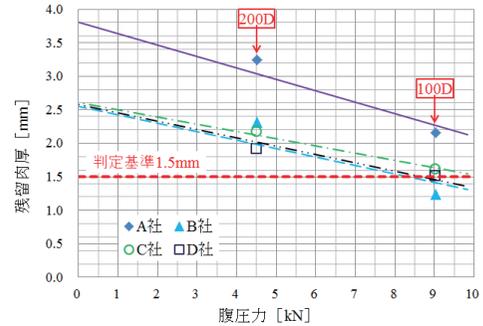


図-4 φ75mmPE シースの腹圧力と残留肉厚

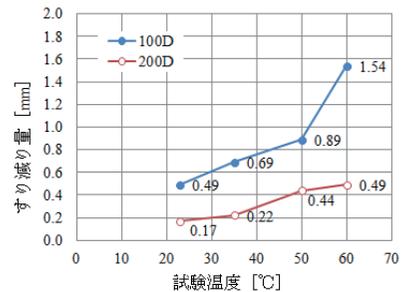


図-5 試験温度とすり減り量の関係 (C社 呼び径75mm)

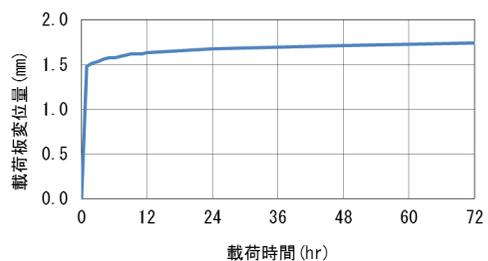


図-6 くぼみ抵抗性試験の変位量

験結果に着目すると、くぼみ量は最大で0.47mmであり、評価基準の0.5mmよりも小さい結果であった。このことから、シースの曲げ半径が100D以上で、緊張完了時のPEシー（周辺コンクリート）の温度が50℃以下であれば、継続して作用する腹圧力に対する検討は不要になると考えられる。また、図-6に示す載荷板変位の経時変化をみると、腹圧力載荷後3時間程度で1.53mmの変位を生じ、その後3日間の変位量は小さいものであった。このことから、くぼみ抵抗性は、腹圧力を3時間程度載荷する試験で概ね評価が可能になると考えられる。

(3) PTシステムの水圧試験

PTシステムの水圧試験の結果を表-6に、試験状況を写真-3、写真-4に示す。内水圧および外水圧のどちらの試験においても供試体からの漏水は無く、定着具に緊張力を模擬した荷重を与えた場合でも定着具とシースの接続部およびグラウトキャップ部は、所要の遮蔽性能を有することが確認された。

表-6 PTシステムの水圧試験の結果

試験手順	温度 (°C)	圧力 (kPa)	載荷荷重 (kN)	試験時間 (分)	試験結果
内水圧	21	50	1	5	供試体外部への水漏れなし
外水圧	23	-50	1	5	供試体内部への水漏れなし



写真-3 内水圧試験状況



写真-4 外水圧試験状況

5. 考察と今後の課題

(1) 試験方法について

- ・すり減り抵抗性試験は、PC鋼材の回転を拘束することで、実状に即したすり減り作用に対する抵抗性を評価できると考えられる。なお、くぼみ抵抗性試験は、緊張時のPEシー（周辺コンクリート）の温度が50℃以下であれば検討は省略できると考えられる。
- ・JSCE-E707に準拠した水圧試験をPTシステムに適用することで、遮蔽性の確認は可能であると考えられる。ただし、*fib* Bulletin 75では、PL2の密閉性の評価を正圧の気圧試験でも行うこととしており、この試験を導入した理由の調査と評価が今後の課題となる。

(2) PEシーを用いたPTシステムの遮蔽性能を確保するための方策について

- ・市販されているPEシーは、50℃の環境であれば横締め鋼材は曲げ半径を100D以上、縦締め鋼材は200D以上に設定することで、緊張後の残留肉厚1.5mmは確保できると考えられる。なお、この条件から外れて施工を行う場合は実状に即した条件で試験を行い、結果に応じた対策が必要となる。
- ・今回の検討で対象としたPEシーおよび定着具の組合せは限定的であるため、今後ほかの種類PEシーおよび定着具にて同様の試験を行い、データを蓄積する必要がある。

謝辞 本検討はPC工学会「PEシーを用いたPC橋の設計施工指針作成に関する検討委員会」（委員長：下村匠）での検討を取り纏めたものです。ご指導ご協力頂いた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) *fib* : Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning, *fib* Bulletin 75, 2014, 2015.
- 2) (公社)土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書 [規準編]，2013.11.
- 3) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，2014.7.