

コンクリート打込み時のPEシースの耐圧・変形状に関する実験的検討

三井住友建設(株) 正会員 博(工) ○梅津 健司
 東拓工業(株) 正会員 藤井 暁宏
 (株)栗本鐵工所 正会員 工修 池田 秀樹
 長岡技術科学大学 正会員 博(工) 下村 匠

Abstract : Resistance to pressure and deformation of polyethylene sheaths under concrete casting were experimentally investigated. The reduction coefficient of compression buckling of sheath against the theoretical buckling pressure was determined based on the loading test results of flat plate. Test method to obtain bending characteristics was standardized in order to determine the supporting interval of sheath. Casting-experimentation using a mock-up was carried out. It was confirmed that non-uniform pressure acted on sheath by cast fresh concrete but neither harmful deformation nor waviness of sheath occurred under normal construction condition. The validity of the regulation in *fib* Bulletin 75 "Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning" to control the calculated deformation by buoyancy within 1/500 of supporting interval was confirmed.

Key words : Polyethylene sheath, Buckling pressure, Mock-up

1. はじめに

PC鋼材用ポリエチレン製シース(以下, PEシース)は, 鋼製シースに比べ塩化物イオン等の侵入に対する遮蔽性が高く, シース内に配置するPC鋼材の防食に寄与する材料である。PEシースをPC橋に使用するにあたっては, その特性を踏まえた上で適切に使用することが肝要である。本検討では, PEシースが保有すべき性能のうち, 図-1に示す形状保持性能に着目し, その性能を確認するための試験方法を新たに制定するにあたり, 課題について検討した(表-1参照)。また, 実物大実験を行い, コンクリート打込み時のPEシースの挙動について明らかにした。

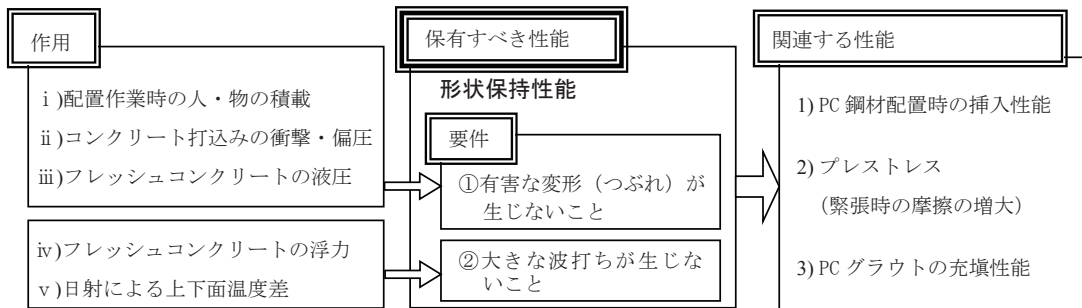


図-1 PEシースの形状保持性能に影響を及ぼす作用と要件, 関連する性能

表-1 検討した試験および実験

分類	試験項目	作用※	要件※
試験室で実施した試験	平板载荷による等圧外力抵抗性試験方法 (JPCI-A001)	iii	①
	曲げ特性試験方法 (JPCI-A002)	iv	②
実物大実験	耐圧・変形状を確認するための実験	ii, iii, iv	①, ②

※ 図-1参照

2. 平板载荷による等圧外力抵抗性試験方法

PEシースには、コンクリート打込み時に打込み深さに応じた座屈させる圧力が加わる。国内製造会社5社のPEシースに対し図-2に示す平板载荷による等圧外力抵抗性試験を試験室温度23℃で実施し、PEシースの円環曲げ剛性 $E \cdot I$ を式(1)、理論座屈圧力 q を式(2)により算出した。

$$E \cdot I = 0.149 \frac{W_2 \cdot R^3}{0.05D} \quad (\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{m}) \quad \text{式 (1)}$$

$$q = 3 \frac{E \cdot I}{R^3} \times 10^{-6} \quad (\text{MPa}) \quad \text{式 (2)}$$

ここに、 $E \cdot I$: PEシースの5%変位時荷重から算出した円環の単位長さ当たり曲げ剛性 ($\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{m}$)

W_2 : 単位長さ当たりの荷重 (N/m)

D : PEシース外径 (m)

q : 理論座屈圧力 (MPa)

R : 円環の平均半径 (m)

次に、PEシースを密閉された容器に入れ外水圧を増していく外水圧試験(写真-1)を試験室温度および水温ともに23℃で実施して座屈圧力の実測値 q_1 を求めた。それらの結果を表-2に示すが、 $q_1 / q = 0.78 \sim 1.00$ であった。これより、実測値 q_1 が理論座屈圧力 q より小さいのはシースの波付け形状の影響等が考えられ、その差異を考慮した補正係数 λ_1 として0.78を考慮することとした。

また、PEシースの引張弾性率の温度依存性を把握するため、高密度PE材料の引張試験を行った。その結果を図-3に示す。23℃時の引張弾性率に対する35℃の引張弾性率は、低下がもっとも顕著であったB社材料aで77%であった。これより暑中コンクリートを考慮した補正係数 λ_2 として0.77を考慮した。

座屈圧力がばらつくその他の要因として、PEシースを棚筋に結束したときの過度の緊結によるPEシースの変形や、最小曲げ半径配置に伴うPEシース断面の扁平変形が座屈挙動に及ぼす影響等が考えられる。そこで、座屈圧力 p を評価するにあたっては、理論座屈圧力 q に対する低減係数として $\lambda_1 \times \lambda_2$ の値(0.60)よりさらに安全側となる $\beta = 0.50$ を考慮することとした。これらのことより、制定した平板载荷による等圧外力抵抗性試験方法(JPCI-A001)²⁾において、座屈圧力 p の算定式を式(3)とした。

$$p = \beta \cdot q = 0.5q \quad \text{式 (3)}$$

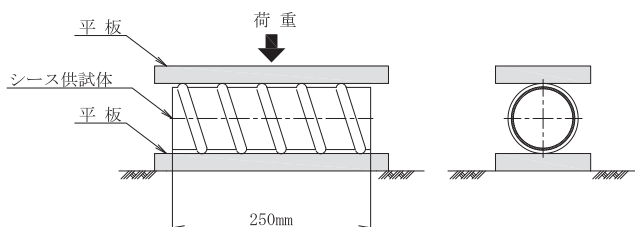


図-2 平板载荷による等圧外力抵抗性試験の载荷方法

表-2 座屈圧力実測値 q_1 と理論座屈圧力 q の比較 (5社)

製造会社	呼び径 $\phi 35\text{mm}$ シース			呼び径 $\phi 75\text{mm}$ シース		
	q_1 (MPa)	q (MPa)	q_1/q	q_1 (MPa)	q (MPa)	q_1/q
A社	0.50	0.51	0.98	0.26	0.32	0.81
B社	0.35	0.44	0.80	0.18	0.20	0.90
C社	0.67	0.83	0.81	0.21	0.27	0.78
D社	0.65	0.73	0.89	0.33	0.39	0.85
E社	0.60	0.64	0.94	0.18	0.18	1.00



写真-1 外水圧試験の状況

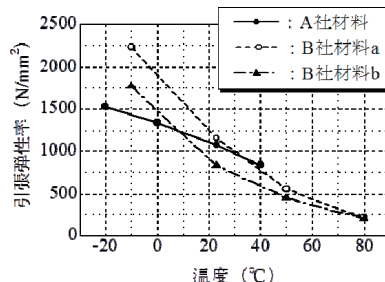


図-3 PEシースの引張弾性率と温度の関係

3. 曲げ特性試験方法

fib Bulletin 75³⁾では、PEシースの支持間隔をシース自重、PC鋼材自重(先挿入の場合)、フレッシュコンクリート内における浮力の作用を考慮し、最大たわみが支持間隔の1/500以内となるように定めることとしている。たわみの算定に用いる曲げ剛性は、図-4に示す曲げ特性試験により算定する。fibの試験に準拠しPC工学会の曲げ試験方法(JPCI-A002)²⁾を制定するにあたり、常温(23±5℃)のほか、暑中コンクリートを想定した高温(35℃以上)でも実施することとした。試験には、以下の課題があった。

① 与える変位が5mmと小さく、それに応じた荷重も小さいため、試験装置の荷重に誤差が含まれないように配慮する必要があること。

② 载荷初期の供試体のなじみを除去すること。

①に対しては、変位計のばね反力を必要に応じて控除することとした。②に対しては、初期たわみ2mm以下の範囲で初期荷重を与え、その状態で5分間保持し、それから5mmの変位を与えるための载荷を行うこととし、曲げ剛性算定では初期たわみ分を無視することとした。

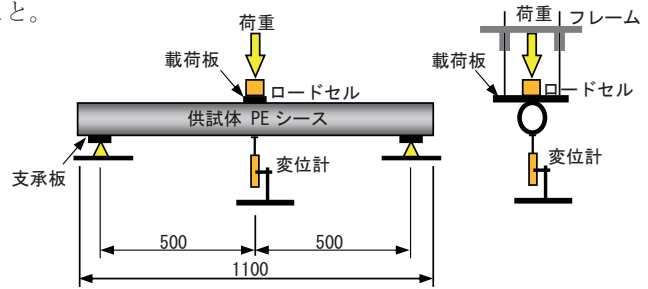


図-4 曲げ特性試験の装置

曲げ特性試験により算定したPEシースの曲げ剛性および最大支持間隔を表-3に示す(最大支持間隔の決定ケースとなる35℃の結果を示す)。現場におけるPEシースの支持間隔は、スターラップ配置間隔(一般に250mm)の倍数とするのが実用的であり、表-3の結果を踏まえるとφ35mmシースでは500mm、φ75mmシースでは750mmとすれば安全である。

表-3 曲げ特性試験により算定した曲げ剛性および最大支持間隔

製造会社	呼び径 φ35シース		呼び径 φ75シース	
	EI (N・mm ²)	最大支持間隔 (mm)	EI (N・mm ²)	最大支持間隔 (mm)
A社	2.61×10^7	888	1.31×10^8	931
B社	2.15×10^7	853	8.10×10^7	812
C社	1.42×10^7	760	9.38×10^7	869
D社	1.04×10^7	657	1.13×10^8	902
E社	1.69×10^7	767	1.77×10^8	1044

4. 耐圧・変形状を確認するための実物大実験

4.1 概要

コンクリート打込みによるPEシースの耐圧性や変形に着目した実物大実験を行った。供試体の構造寸法を図-5に示す。供試体には12S15.2用の呼び径φ75mmのPEシースを3本配置した。PEシースは、国内製造会社の製品のうち、2. 平板载荷による等圧外力抵抗性試験によって求めた曲げ剛性 EI の中位のA社と小さかったB社、E社の製品を用いた。シースはスターラップに沿わせた棚筋に結束紐を用いて固定し、棚筋の配置間隔は3. 曲げ特性試験で実施した試験結果より750mmとした。PEシースには、それより上に3m高さのコンクリートを打ち込むものとした。これは、普通コンクリートおよび高流動コンクリートの打込み時の液圧が最大でも0.075MPaであることを考慮し、コンクリート自重で0.075MPaとなる3m高さとしたものである。コンクリートは、設計基準強度 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ (早強ポルトランドセメント)、スランプ12cm、粗骨材最大寸法20mmのものを用いた。

4.2 コンクリートの打込み

打込み時のコンクリート落下高さは、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]⁴⁾に規定されている1.5m以下を満足するよう、型枠天端にホップおよび縦シュート(先端径150mm)を設けた(写真-2)。供試体へのコンクリート打込みは、ホップでコンクリートを一旦受け、縦シュートより自由落下させて行った。打込み状況を写真-3、写真-4に示す。

4.3 実験結果

(1) 打込み時にシースに作用するコンクリート圧力

打込み深さの増加に伴うシースに作用する圧力の推移を図-6に示す。これより、打込み当初は、圧力計2の方が圧力計1より、コンクリート打込み深さが深い分、大きな圧力を示していることが確認できる。この圧力計2と圧力計1の計測値の差分が、シースに作用する浮力となる。しかし、打込み深さが1.65mになった以降、圧力計2の計測値がほとんど増加しなくなっており、液圧としての作用が頭打ちとなったと推察される。打込み深さが1.8mになったとき、圧力計1計測値と圧力計2計測値の大小関係が逆転し、上からの重量(圧力)が支配的となり、シースには押し潰す力(偏圧)が増加

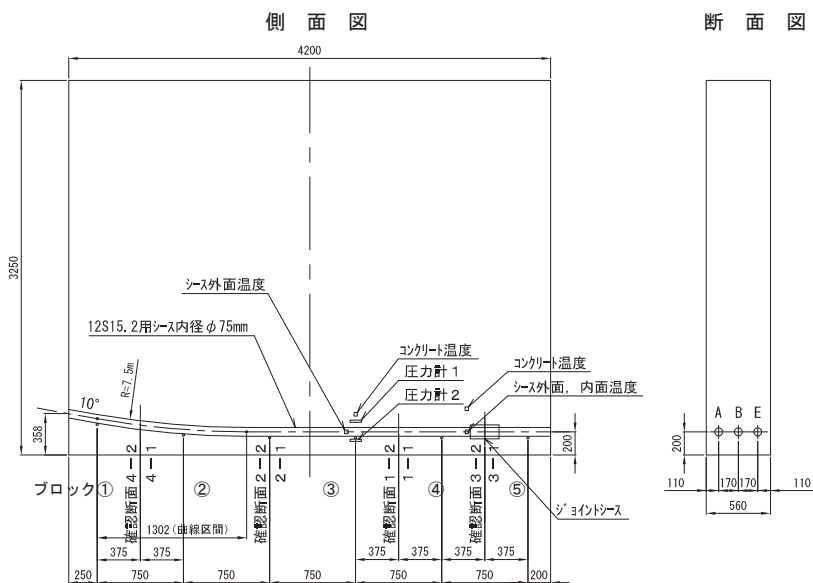


図-5 PEシース耐圧・変形確認供試体の構造寸法



写真-2 ホッパーおよび縦シュート



写真-3 縦シュートの建込み

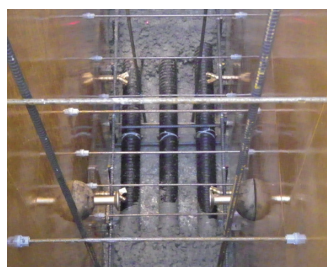


写真-4 コンクリート打込み

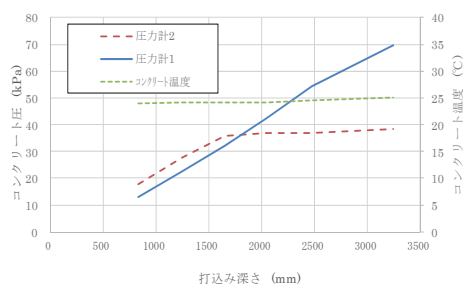


図-6 打込み深さの増加に伴うシースに作用する圧力の推移

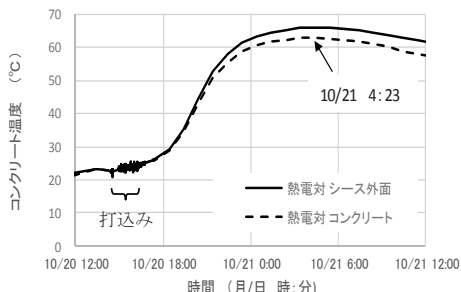


図-7 打込み時からのコンクリート温度の推移

している様子が確認できる。これは、コンクリートが完全な流体ではないために重力による上からの圧力の増加がシースの下側まで伝達されていないことによる。

図-7 に打込み時および打込み後における供試体の中央付近のコンクリート温度の推移を示す。コンクリートが未硬化の段階では、コンクリート温度は打込み開始時の 24℃からほとんど上昇していない。fib Bulletin 75 では、コンクリートの水和熱を考慮するため、曲げ特性試験では 23℃の他に 45℃以上の状態を考慮することとされているが、本実験結果より、コンクリート温度が 45℃に達したのは、打込みを終了して 4 時間後である。この頃には、コンクリートが硬化しているため、シースは変位しない。よって、浮力による変位を検討する曲げ特性試験において、45℃以上の状態を考慮することは、実態に即していないものと考えられる。これより新しく制定した曲げ特性試験 (JPCI-A002) では、温度条件の高温側は、暑中コンクリートの上限温度である 35℃以上とした。

(2) 打込みに伴うコンクリート圧力によるシースのつぶれ

コンクリートの打込みによる衝撃や打設後の偏圧により、シースに変形 (つぶれ) が生じないかを着目するため、硬化後に確認断面 1~4 を切断し、シース断面の変形を確認した。ここに確認断面は、浮力によるシースの曲げモーメントが大きくなる支持点および支持間中央とした。

小口および確認断面におけるシース水平内径と鉛直内径の差の実測値を図-8 に示す。図-8 より (シース水平内径-鉛直内径) は、-1.5mm~2mm とわずかであり、顕著なつぶれは見られなかった。-1.5mm を示した E 社シースの確認断面 3-2 における切断面を写真-5 に、2mm を示した B 社シースの確認断面 2-2 における切断面を写真-6 に示す。

これより、コンクリート打込み高さ 1.5m を順守して打ち込んでいる範囲では、打込みによる衝撃およびコンクリート自重により、PE シースに有害な変形 (つぶれ) は生じないことが確認された。

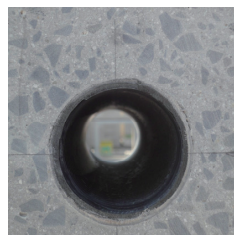
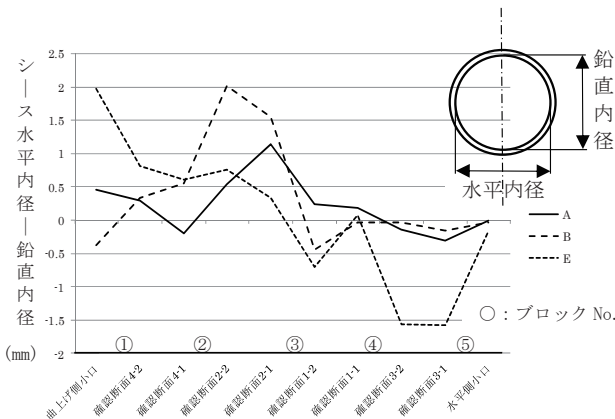


写真-5 確認断面 3-2 における E 社シース

写真-6 確認断面 2-2 における B 社シース

図-8 小口および確認断面におけるシース水平内径と鉛直内径の差の実測値

(3) シースの波打ち変位

供試体を確認断面で切断した後、確認断面を両端面とするコンクリートブロックごとに、図-9 に示す方法でシースに定規を挿入し、定規とシース内縁との空隙を測定した。確認断面ブロック両端における空隙の実測値の設計値との差の平均を図-10 に示す。ここに、設計値は、直線部では 0mm、曲線部では円弧と直線が成す幾何学的算出値を用いた。

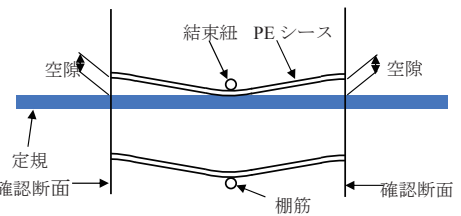


図-9 定規を用いた空隙の測定方法

供試体のシースの波打ち変位は-1.0~1.9mm であった。fib Bulletin 75 では、浮力による変位計算値が、支持間隔の 1/500 以内となるよう最大支持間隔を設定している。それを踏まえ、曲げ特性試験

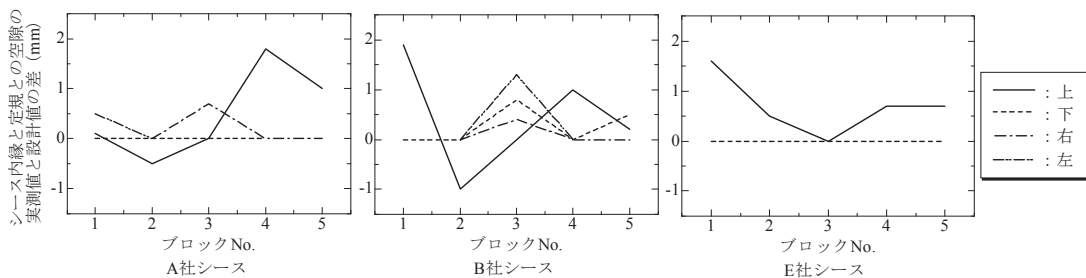


図-10 シース内縁と定規との空隙の実測値と設計値の差 (=実測値 - 設計値) の分布

により得られた曲げ剛性 EI より、シースの支持間隔は 750mm とした。すなわち、浮力による変位制御の目標値は $\pm 1.5\text{mm}$ ($=750/500$) で、最小から最大までの幅は 3.0mm である。供試体では、これに打込みの衝撃によるシースの変位や設置誤差が加わるため単純に比較できないものの、本供試体の波打ち変位は $-1.0 \sim 1.9\text{mm}$ であり、最小から最大までの幅に着目すれば 2.9mm であった。これより *fib* Bulletin 75 が推奨する支持間隔により設定すれば、目標とする波打ち変位におおむね納められるといえよう。

5. まとめ

本検討により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 平板载荷による等圧外力抵抗性試験

PE シースの座屈圧力は、円環の理論座屈応力よりおおむね算定できるものの、暑中コンクリートの温度や、PE シースを柵筋に結束したときの過度の緊結による変形や、曲げ配置に伴う扁平変形等の影響を考慮し、平板载荷による等圧外力抵抗性試験 (JPCI-A001) における座屈圧力の算定式は、安全側を与えるため、理論座屈圧力に低減係数 0.5 を乗じた式とした。

(2) 曲げ特性試験

PE シースの曲げ特性試験方法 (JPCI-A002) を制定するにあたり、荷重-変位関係に誤差が含まれないようにするための具体的措置を定めた。

(3) 耐圧・変形状を確認するための実物大実験

- ① 打込み当初は、シースに浮力が作用するものの、コンクリートの打込み深さがある程度増えると浮力は作用せず、それ以降に打ち込まれるコンクリート重量による上からの圧力の増加が支配的になり、シースには押し潰す力 (偏圧) が増加している様子が確認された。
- ② シースに浮力が作用している段階のコンクリート温度は、打込み開始時の温度 (本供試体では 24°C) からほとんど変わっておらず、*fib* Bulletin 75 の浮力による変位を検討する曲げ特性試験に示されている 45°C 以上には達していないことが確認された。
- ③ コンクリート打込み高さ 1.5m を順守して打ち込んでいる範囲では、PE シースに有害な変形 (つぶれ) は生じないことが確認された。
- ④ 供試体のシースの波打ち変位は、 $-1.0 \sim 1.9\text{mm}$ であった。これには、打込みの衝撃によるシースの変位や設置誤差が加わっているため単純に比較できないものの、*fib* Bulletin 75 の曲げ特性試験により推奨される支持間隔でシースを固定した場合の目標変位に、おおむね納まっていた。

謝辞 本検討は PC 工学会「PE シースを用いた 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)において実施したものです。ご指導ご協力いただいた委員諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (公社) 土木学会 : 構造力学公式集, p. 408, 414, 1986. 6.
- 2) (公社) プレストレストコンクリート工学会 : PEシースを用いたPC橋の設計施工指針(案), 2015. 8.
- 3) *fib* : Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning, *fib* Bulletin 75, 2014.
- 4) (公社) 土木学会 : 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], p. 115, 2013. 3.