

PC橋におけるポリエチレン製シースの摩擦係数に関する実績調査

昭和コンクリート工業(株)	正会員	○佐藤 徹
ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)	正会員 博(工)	濱田 譲
日本高圧コンクリート(株)	正会員	小野塚 豊昭
グローバルジャパン(株)		中村 淳

1. はじめに

近年、PC橋の高耐久化を目的に腐食促進物質の遮蔽性を有するポリエチレン製シース（PEシース）を用いるケースが増加しつつある。PEシースは、既往の文献などで鋼製シースより摩擦係数を小さくできると報告されているが、国内の多くのPC橋で摩擦係数を調査した事例は少なく、その実態は明らかにされていない。そこで、PEシースを用いた約1400ケーブルの摩擦係数を施工記録などにもとづき調査し、鋼製シースとの違いを比較した。また、摩擦係数の違いが実施工に与える影響を把握するために、設計断面に所定のプレストレスを導入することを条件とし、摩擦係数の違いが端部の初期引張応力度に及ぼす影響を検討すると共に、緊張管理における諸課題について検討を行なった。

2. 摩擦係数の調査

2.1 摩擦係数の調査方法

摩擦係数の調査は、（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC建協）で収集した実施工におけるPEシースの摩擦係数の測定結果から、表-1に示す19橋、1406ケーブルに対して行った。また、PEシースと鋼製シースの摩擦係数の違いを把握することが今後のPEシースを用いたPC橋の設計に有効な知見となることから、鋼製シースの摩擦係数の実態調査も行なった。鋼製シースの摩擦係数については、PC建協で発刊した「プレストレスと緊張管理」¹⁾より主ケーブルの試験緊張による摩擦係数測定結果から、表-2に示す65橋、591ケーブルを対象とした。

表-1 PEシースの摩擦係数調査

構造形式	橋数	ケーブル本数
プレキャスト桁 (ボスT, コンボ)	3	238
ポータルラーメン中空床版	1	8
連続2主版桁橋	1	24
単純箱桁橋(固定支)	1	16
連続箱桁橋(固定支)	7	540
連続箱桁橋(張出)	4	394
波形ウェブ橋(張出)	2	186
合計	19	1406

表-2 鋼製シースの摩擦係数調査

構造形式	橋数	ケーブル本数
プレキャスト桁 (ボスT, コンボ, ハイフレ)	19	165
単純中空床版橋	22	202
連続中空床版橋	15	136
単純箱桁橋	4	44
連続箱桁橋	1	8
π形ラーメン橋	4	36
合計	65	591

2.2 摩擦係数の調査結果

(1) 鋼製シースについて

摩擦係数を比較する上で基準となる鋼製シースの摩擦係数は、図-1に示すように全体ケーブルでは実測平均値 $\bar{\mu}=0.149$ 、標準偏差 $\sigma=0.080$ (N=591本) となり、道路橋示方書に示す鋼製シースの摩擦係数 $\mu=0.30$ より低い結果であった。構造形式別に見ると図-2に示すようにプレキャスト桁は $\bar{\mu}=0.106$ 、 $\sigma=0.070$ (N=165本)、場所打ち桁は $\bar{\mu}=0.166$ 、 $\sigma=0.078$ (N=426本) となり、プレキャスト桁の方が小さい値である。この理由として、工場で製作するセグメント桁が比較的多いことから、

部材の製作精度に加え平面線形の影響がないことや定着端部付近での平面折れがないことが影響していると考えられる。

(2) PE シースについて

これに対し、PE シース全体の摩擦係数は図-3 に示すように平均値 $\mu=0.173$ 、 $\sigma=0.119$ (N=1406 本) であり、PE シースでも摩擦係数の基準値として使用されることの多い道路橋示方書に示す $\mu=0.30$ より低い結果であったが、その値は鋼製シースに比べ若干大きい結果となった。また、摩擦係数の分布は $\mu=0.10\sim0.15$ の範囲が多いものの、全体の分布範囲は $\mu=-0.20\sim0.60$ とばらつきが大きい。ばらつきが大きくなった理由として1406 本のデータ内には、①平面Rの小さい曲線橋の影響、②PC 鋼材の見かけの弾性係数の差が摩擦係数に与える影響が大きい柱頭部などの短いケーブルの影響、③角度変化が小さくほぼ直線配置となる張出し架設用上床版ケーブルの影響、があったためと考えられる。これらのデータを取除き標準的な形状のPE シースの摩擦係数を調査した結果を図-4 に示す。データ数はN=863 ケーブルに減ったものの $\mu=0.129$ 、 $\sigma=0.093$ と、摩擦係数およびばらつき範囲とも小さくなった。しかし、その摩擦係数の値は鋼製シースに比べても有意な差はなく、摩擦係数の設定を見直すほどの結果は得られなかった。

なお、ここに示す μ は緊張管理で測定された値であり、摩擦管理における管理の尺度として用いられている。この μ は、純粋な摩擦係数の他にプレストレス力に影響を与える他の値 (E_p 、 λ/μ 等) の変動を含む見かけの値であり、設計計算における摩擦係数 μ とは若干異なる指標であることに注意する必要がある。

3. 摩擦係数の違いによる端部初期引張応力度への影響

3.1 検討概要

PC 橋の設計計算では、ケーブル形状、初期引張応力度および摩擦係数を設定しておのおのの設計断面で応力度照査を行っている。ケーブル形状および初期引張応力度は設計計算により決定されるが、摩擦係数の設定については各規準類に従うことが多い。前述の2. で示したようにPE シースは摩擦係数のばらつきが大きく、その値が小さく示されている海外規準²⁾を参考に設計を行った場合、実施工での摩擦係数が設計時より大きくなるとPC 鋼材の引張応力度が絶対上限線に達し、所定のプレストレス力と与えられなくなることが懸念される。このため、絶対上限線に達することなく緊張作業が行えるように初期引張応力度や摩擦係数などにある程度の余裕をもた

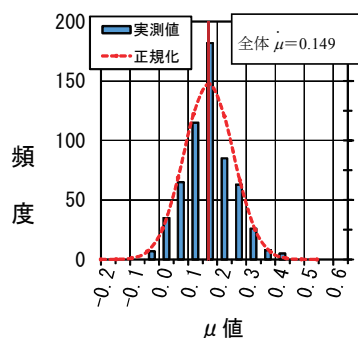


図-1 鋼製シース全体の摩擦係数

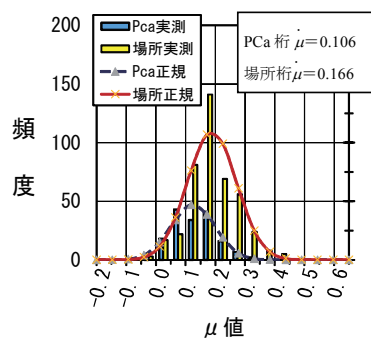


図-2 鋼製シース構造形式別の摩擦係数

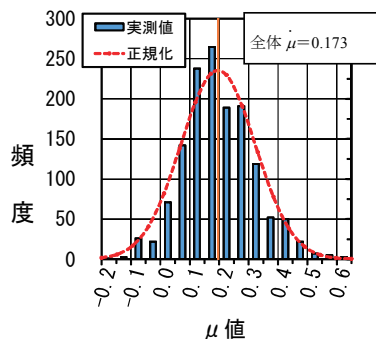


図-3 PE シース全体の摩擦係数

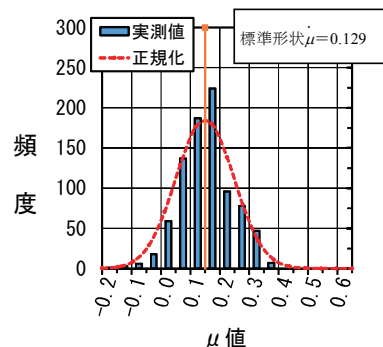


図-4 PE シース標準的の摩擦係数

せる必要がある。そこで、摩擦係数の違いが端部の初期引張応力度にどの程度の影響を及ぼすか、その傾向を探った。

3.2 検討方法

ここでは、設計時に定めた摩擦係数より施工時に測定された摩擦係数の方が大きくなった場合を想定し、以下の手順で端部引張応力度の比較を行う。具体的には、以下の(2)で算出された端部の初期引張応力度が、(1)の初期引張応力度と、どの程度の違いが生じるか検討する。なお、このときに用いる摩擦係数は表-3の値と仮定し、検討を行う構造形式およびその選定ケーブルは表-4のケースとした。

- (1) 設計時の摩擦係数は、その値の小さい海外規準²⁾を用いPC鋼材の摩擦損失計算を行う。このときの初期引張応力度は $\sigma_{pi}=1300\text{N/mm}^2$ とし、不動点位置における引張応力度を算出する。
- (2) 施工段階では、不動点位置に(1)で算出されたPC鋼材の引張応力度が導入されるように、施工時の摩擦係数（ここでは道路橋示方書の値と仮定）を用いて逆算し、端部引張応力度を算出する。

表-3 摩擦係数の設定

	角度変化	長さ変化	参考資料
設計時の仮定値	$\mu=0.14$	$\lambda=0.001$	<i>fib Bulletin 75</i> ²⁾
施工時の仮定値	$\mu=0.30$	$\lambda=0.004$	コンクリート標準示方書、道路橋示方書（鋼製スースの値）

表-4 構造形式および選定ケーブル

構造形式	支間長	選定ケーブル
単純コンボ橋	支間長 25m, 支間長 45m の 2 ケース	25m : 最大角 8.0 度, 最小角 4.0 度の 2 ケース 45m : 最大角 7.5 度, 最小角 3.0 度の 2 ケース
連続箱桁橋	支間長 3@40.0m 一括施工の連続ケーブル	最大角（不動点からの総角 34.0 度）の 1 ケース 最小角（不動点からの総角 19.0 度）の 1 ケース
張出し架設箱桁橋	中央支間長 120m (68m + 120m + 68m)の張出し 架設桁	最短の柱頭部ケーブル (L=12.5m, 25.0 度) 最大張出時の張出ケーブル (L=117.0m, 15.0 度) 支間ケーブル (L=72.3m, 10.0 度)

3.3 検討計算結果

摩擦係数が、設計時で想定した値より施工段階で大きくなった場合の比較検討結果を表-5に示す。

表-5 初期引張応力度の比較検討結果

構造形式	支間長 (m)	設計時の端部 初期引張応力度 $\sigma_{pi}(\text{N/mm}^2)$	施工時の摩擦係数で逆算 した端部初期引張応力度 $\sigma_{pi}'(\text{N/mm}^2)$	引張応力度の比率 (σ_{pi}'/σ_{pi})
単純コンボ橋	25.0	1300.0	1304.8 ~ 1304.9	1.004
単純コンボ橋	45.0	1300.0	1333.9 ~ 1389.1	1.026~1.069
3 径間連続箱桁橋	3@40.0	1300.0	1716.2 ~ 1840.2	1.320~1.416
3 径間連続ラーメン・柱頭部 C	68+120+68	1300.0	1351.6	1.040
3 径間連続ラーメン・最大張出 C	68+120+68	1300.0	1616.4	1.243
3 径間連続ラーメン・支間 C	68+120+68	1300.0	1515.1	1.165

検討の結果、以下のような傾向がみられた。

- ・単純桁や張出し架設の柱頭部のケーブルのように1本のケーブル長が比較的短く、曲げ角度の総角が小さいケーブルでは、設計と施工で摩擦係数が多少異なってもその影響は小さい。
- ・桁長とケーブルが長い場所打ち桁では、不動点からの角度変化の総角も大きくなり、設計と施工で摩擦係数が異なるとその影響は大きく端部初期引張応力度に大きな差が生じる。その結果、

実施工に必要なプレストレスを与えられないケースも想定される。

以上の結果から、設計時においては摩擦係数を小さく設定することで経済的な設計ができるメリットはあるものの、摩擦係数のばらつきが大きい場合、上記のようなケースが生じることも想定される。したがって、PE シースの摩擦係数の設定にあたっては、実際の摩擦係数を把握しさらに摩擦係数のばらつきに対応できるようにある程度の余裕率を考慮することが望ましいと考える。

4. 考察

PE シースの摩擦係数の実態調査を行ったが、摩擦係数の値は鋼製シースと有意な差がなかった。従来からPC 鋼材の緊張管理は、設計上の摩擦係数を実橋での摩擦係数より大きく設定し、安全代を確保した緊張管理が行われていたこと、そしてその管理手法で大きな問題が生じていないことも考慮すると、現時点の管理手法では、PE シースを採用した場合においても摩擦係数を小さくすることは難しいと判断される。

また、今回の実態調査からPEシースの摩擦係数にばらつきが大きいこともわかった。鋼製シースとPEシースの摩擦係数の調査結果から得た変動係数 CV (=標準偏差/平均値) を表-6に示すようにデータの的にもPEシースの摩擦係数はばらつきは大きいと言える。PEシースを用いた際の摩擦係数にばらつきが大きくなった理由として、PEシースは波付けされた形状であり軸方向の曲げ剛性が小さいことからコンクリート打込み時にコンクリート圧力や浮力で波打ちが生じ、その影響で摩擦係数が大きくなったことが考えられる。また、PEシースは高温時に軟化しやすい特性もあり、硬化熱の影響ですり減りが大きくなりやすいことも原因として考えられる。

これらの課題が解決されれば、将来的に摩擦係数も安定し小さくできる可能性もあるが、実際の摩擦係数が設計値より小さくなると、摩擦管理を行なわない床版横締め緊張などではオーバプレストレスとなり部材縁に引張応力が生じることも考えられるため、設計や照査段階で安全性を確認することも必要となる。

5. まとめ

PC 工学会では、海外規準での「*fib Bulletin 75*」²⁾などを参考に「PE シースを用いたPC 橋の設計施工指針 (案)」³⁾を発刊した。この指針では、PE シースの摩擦係数を安定させる方策としてPE シースの支持間隔や最小曲げ半径を設定し、設計時および施工時の留意点なども示している。今後、この指針に従い、PE シースの特性を十分に理解したうえでPE シースの支持間隔などを適切に設定して波打ちの影響を小さくすることができれば摩擦係数も安定してくると思われる。そして、より多くの実績データを収集し、その結果が確認できれば各種の規準類においても経済性と安全性を加味した有効なPE シースの摩擦係数を設定することが可能となってくる。そのためにも私たち施工者は、主ケーブルに限らず横締めケーブルにおいても有意義な実績データを蓄積していくことが重要であり、試験緊張などを実施して摩擦係数とPC 鋼材の見かけのヤング係数の両方を調査していくことが望まれる。

謝辞

本報告は、プレストレストコンクリート工学会の「PE シース設計施工指針作成検討委員会 (委員長・長岡技術科学大学下村匠教授)」の活動に関連して調査したものです。本検討に際して貴重なご助言を頂いた委員諸氏に感謝の意を表します。

参考資料

- 1) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業団体：プレストレスと緊張管理，平成23 年3 月
- 2) *fib* : Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning, *fib Bulletin 75*, 2014
- 3) (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 年8 月

表-6 変動係数の比較

	本数	μ	σ	CV
鋼製シース 全ケーブル	591	0.149	0.080	0.54
PE シース 全ケーブル	1406	0.173	0.119	0.69
PE シース 標準形状ケーブル	863	0.129	0.093	0.72