

投稿論文

投稿くださる各位へのお願い

1. なるべく大勢の方々に投稿頂くため原稿枚数は、投稿原稿、依頼原稿とも規定以内(7. 参照)といたします。なお原稿料は規定枚数で打切りとなりますのでご了承ください。
2. 添付図はトレース(線図のみ墨入れ)または第2原図を原則とします。青図添付の場合は墨入れトレース代の一部負担を願いますので予めご了承ください。
3. 執筆者は依頼原稿の場合を除き正会員に限ります。したがって未加入者の場合は予め手続きいたしますのでその旨お申し出ください。
4. 本機関紙は現在、複数制編集委員による特集号形式としており、それぞれ特定のテーマによる依頼原稿が先行するため、投稿原稿は延期される傾向にありましたが、年間発行6冊のうち、2冊程度は投稿原稿による機関誌を予定し、また特集号でも数点は掲載余地を残すようにいたしますので、今後は投稿後半年以内には掲載されます。
5. 別刷は規定により50部を論説、報告、資料に限り贈呈いたします。それ以上希望される場合は実費増刷となりますので、原稿の表紙に部数をご記入願います。
6. 報告の投稿には必ず英文タイトル、英文著者名をつけてください。
7. 投稿原稿の制限枚数は次のとおりです。

論	説	刷上り6ページ(協会原稿用紙36枚、ただし図表、写真含む)以内
報	告	// 8 // (// 48枚 //) //
資	料	// 4 // (// 24枚 //) //
工	事	ニュース // 1 // (// 6枚 //) //
質	疑	応答 // 0.5 // (// 3枚 //) //
読	者	の 声 // 0.5 // (// 3枚 //) //

アンボンド PC 鋼材の摩擦係数について

竹 本 靖*

1. はじめに

7本よりまたは19本よりのPC鋼より線に、防錆用のグリースを塗布し、ポリエチレン製のシースを被せた、アンボンド工法用PC鋼材（以下、シーストストランドと表現）は、近年、プレストレスト鉄筋コンクリート構造の普及に伴って、質・量ともに急速に、適用範囲が拡がりつつある。その結果、当初は、設計および施工計画に必要なデータが充分には得られないまま、手探りの、したがって多分にコンサーバティブな配慮の下に取り扱われてきた諸問題に対して、新しい有効なバックデータを背景に、見直しを行い、より合理的なアプローチを試みる事が可能となってきた。

本報で対象とする、シーストストランドの緊張時摩擦係数も、それら見直しを必要とし、かつ可能となった問題点の一つである。

シーストストランドの摩擦係数（ μ および λ ）は、金属製のシーすと、恐らくややサビの出始めたPC鋼材表面との乾いた摩擦であるボンド方式の場合に比べて、潤滑剤としても有効なグリースを間に介した、ポリエチレンシーすと鋼材との濡れた摩擦である、という点で、ある程度値が小さくなるであろうことは、直感的にも理解できよう。しかし、アンボンド工法の我が国での実用化が始まった初期の段階では、信頼できるバックデータがほとんどなく、量的にもわずかな、しかも設定条件が必ずしも一般的とは言えない実験結果をもとにした、鋼材メーカーの推奨値を、そのまま設計用 μ , λ 仮定値として採用していた。表-1 に従来の参考資料を示す。

表-1 従来の μ , λ 資料

資 料	μ	λ
1) 鋼線メーカーパンフ (A)	0.12	0.0035
2) 同 上 (B)	0.1~0.15	0.003 ~0.008
3) ACI コード解説	0.05~0.15	0.0003~0.002
4) The Concrete Society	0.12	0.003

これらの値は、アンボンド工法の適用実績の中で、かなり大き過ぎるとの認識が深まってきており、見直しが求められてきたわけである。

大林組では、事情が許す限り、各工事の緊張作業開始

* (株)大林組技術研究所工法第2研究室長

時に、いくつかのアンボンドケーブルに対し、両端にセンターホール型のロードセルを装填し、緊張端と定着端の荷重差を検出するという直接的な方法で、緊張力の摩擦損失を実測し、当該工事の施工管理に利用するとともに、データとしての蓄積をはかってきた。

また技術研究所においては、シーストストランドを用いた大型模型実験（円筒形容器構造物）に先立ち、別途テストベッドを製作し、予備的緊張試験を行って、同様な実測データを採取している。

これらの実測データが、ある程度の量に達したので、今回それらをまとめ、以後、アンボンド工法によるプレストレストコンクリート構造の設計時および工事計画時に仮定すべき、摩擦係数 μ , λ 値を提案することとしたものである。（注：アンボンドPC鋼材として、PC鋼棒を加工したものも市販されているが、本報では対象に含めていない）

2. 摩擦損失実測ケーブルの概要

対象とした工事はA~Fの6件、測定したケーブルは合計52本、すなわち52データが得られた。いずれもシーストストランドの両端にセンターホール型のロードセルをセットし、ジャッキによる緊張作業中、所定の導入荷重時の両ロードセル荷重読み値をデータとしたものである。

工事A・Bは、円筒形容器構造模型に用いるシーストストランドの予備テストで、長さ l に比べて角変化 α の

表-2 摩擦損失測定ケーブル一覧

工事番号	構造の用途	ケーブルの種別	サンプル数	目標導入力 (t)	α の範囲 (ラジアン)	l の範囲 (m)
A	μ, λ 測定用供試体	7本より 6.2φ	4	3.0	3.142	4.7~5.2
B	同 上	19本より 12.7φ	12	13.0	1.571~2.371	3.5~5.9
C	1スパンポイドスラブ	7本より 15.2φ	5	18.0	0.181~0.208	8.1~9.2
D	フラットスラブ	7本より 15.2φ	2	18.1	0.408	21.8
E	ビル大梁	19本より 17.8φ	9	27.4	0.468~0.949	10.6~19.2
F	ビル大梁 (SRC造)	19本より 21.8φ (A工法)	10	42.9	0.374~1.864	25.3~55.4
		19本より 21.8φ (B工法)	10	42.9	0.374~1.742	13.5~44.4

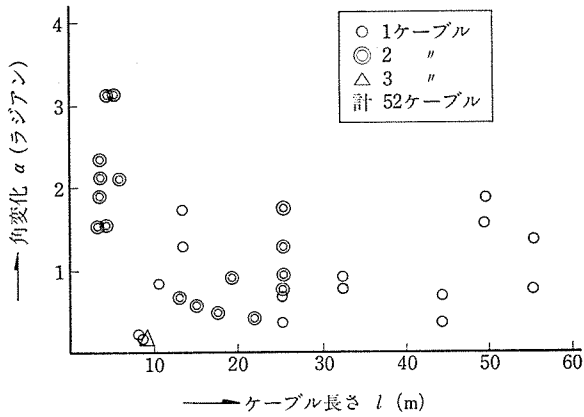


図-1 摩擦損失実測ケーブルの α, l 分布

大きいものである。C・Dは、実際のスラブに用いたもので、 α が小さく、 l も特に長くはない。E・Fは、ビルの大梁に用いた例で、ストランド径が大きく（したがって緊張力が大きい）、 α, l とも範囲が広い。

表-2 に測定ケーブルの諸元を示す。

全対象ケーブルの α および l の分布状態を図-1に示す。表-2 と 図-1 から分るように、対象としたケーブルの諸元は、実際の工事で遭遇するほとんどの範囲を埋めていると言えよう。

3. 実測結果

全対象ケーブルの摩擦損失実測結果を表-3に示す。表中、 P_0 は緊張端側ロードセルの指示値、 P_1 が定着端側の指示値である。 P_0/P_1 値は、 μ, λ を算出する際のベースとなるもので、その関係は、次式で与えられる：

$$\mu\alpha + \lambda l = \log \frac{P_0}{P_1} \dots\dots\dots (1)$$

4. データの処理と μ, λ の提案

各実測データから得られた P_0/P_1 値と、対応する各ケーブルの角変化 α および長さ l を用いて、最小二乗法により、1組の μ, λ を求める。

最小二乗法による μ, λ の計算式は、この場合、以下のようになる。

$$\mu = \frac{\sum l^2 \cdot \sum \alpha \cdot \log P_0/P_1 - \sum \alpha l \cdot \sum l \cdot \log P_0/P_1}{\sum \alpha^2 \cdot \sum l^2 - (\sum \alpha l)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda = \frac{\sum \alpha^2 \cdot \sum l \cdot \log P_0/P_1 - \sum \alpha l \cdot \sum \alpha \cdot \log P_0/P_1}{\sum \alpha^2 \cdot \sum l^2 - (\sum \alpha l)^2} \dots\dots\dots (3)$$

両式にデータを入れて、以下の値が得られた。

$$\mu = 0.0365 \quad \lambda = 0.00119$$

このように、実測データから求めた μ, λ は、先に引用した推奨値等（表-1）に比べて、著しく小さい。ただし、摩擦という現象である以上、データにはかなり

表-3 摩擦損失測定結果

工事	ケーブル	α (ラジアン)	l (m)	P_0 (t)	P_1 (t)	$\frac{P_0}{P_1}$
A	1	3.142	5.225	3.00	2.60	1.154
	2	"	"	"	2.59	1.158
	3	"	4.659	"	2.66	1.128
	4	"	"	"	2.65	1.132
B	1	2.094	5.86	12.97	11.79	1.100
	2	"	"	13.00	11.67	1.114
	3	1.571	4.34	12.85	12.04	1.067
	4	"	"	13.05	12.17	1.072
	5	"	3.46	12.88	12.44	1.035
	6	"	"	13.04	12.36	1.055
	7	2.371	3.86	13.00	11.79	1.103
	8	"	"	13.00	12.07	1.077
	9	2.114	3.82	13.00	11.95	1.088
	10	"	"	13.07	12.27	1.065
	11	1.849	3.78	12.80	11.76	1.088
	12	"	"	13.01	12.25	1.062
C	1	0.181	9.2	18.42	18.15	1.015
	2	"	"	18.22	17.82	1.022
	3	"	"	18.74	18.38	1.020
	4	0.193	8.7	18.33	17.74	1.033
	5	0.208	8.1	17.91	17.58	1.019
D	1	0.408	21.8	19.56	18.96	1.032
	2	"	"	19.79	17.86	1.108
E	1	0.9191	19.225	27.23	25.46	1.070
	2	0.9059	"	27.25	25.27	1.078
	3	0.4683	17.425	27.42	26.51	1.034
	4	"	"	27.42	26.43	1.037
	5	0.5524	15.175	27.07	26.43	1.024
	6	"	"	27.93	27.19	1.027
	7	0.6764	12.875	27.35	26.34	1.038
	8	"	"	27.63	26.62	1.038
	9	0.9490	10.575	27.47	26.32	1.044
F	1	0.690	25.3	42.3	39.9	1.060
	2	0.374	"	42.8	39.0	1.097
	3	1.742	25.5	43.6	41.7	1.046
	4	1.280	"	43.1	40.4	1.067
	5	0.932	25.3	42.1	40.4	1.042
	6	0.780	"	42.3	40.6	1.042
	7	1.380	55.4	42.5	38.5	1.104
	8	0.748	"	43.4	39.8	1.090
	9	1.864	49.5	43.2	36.8	1.174
	10	1.560	"	43.4	36.8	1.179
	11	0.690	44.4	43.4	40.6	1.069
	12	0.374	"	42.7	40.6	1.052
13	0.932	32.4	43.5	40.2	1.082	
14	0.780	"	43.4	40.7	1.066	
15	1.742	13.5	42.9	40.5	1.059	
16	1.280	"	41.3	40.0	1.033	
17	0.932	25.3	42.4	39.9	1.063	
18	0.780	"	42.5	39.8	1.068	
19	1.742	25.5	42.8	40.3	1.062	
20	1.280	"	42.4	40.1	1.057	

のばらつきがあり、設計・施工計画用 μ, λ としては、そのようなばらつきを補償しうるものでなければならぬ。 μ, λ 提案値を決めるに当たっては、下記の各項を考慮した。

a) とりあえず、最小二乗法で求めた μ, λ の比を一

定とし($\lambda/\mu=1/30$), 任意の値の μ, λ 組合せに対し, 各実測ケーブルの P_0/P_1 値 ($=e^{\mu\alpha+\lambda l}$) を逆算し, この計算値に対する実測値の比が, 1 を超える (計算上仮定したよりも緊張力の摩擦損失が大きくなる) 場合が, 全データ数の 5% 程度に納まるような μ, λ を求める。

b) 同上計算において, $(P_0/P_1 \text{ 実測値}) / (P_0/P_1 \text{ 計算値})$ の値が, どのデータについても 1.05 を超えないよう μ, λ を制限する。

c) ケーブル配置上の角変化に対応する摩擦係数 μ は, シーストストランドの材料としての品質管理によって決まる, すなわち, メーカー工場での品質管理によって決まるものなので, あまり変動はないことが期待できる。それに対し, ケーブルの予期せぬ波打ちを考慮した摩擦係数は, 工事現場でのケーブル配置精度によってかなり変動するものと考えざるを得ない。今回の各工事は, 配置精度確保のために特別な対策を講じた訳ではないが, 常識的に見て, 比較的精度のよい例であったと思われる。したがって, さまざまに変化する施工条件に対応させるには λ を一定値に固定せず, 幅を持たせて考えるのが妥当であろう。施工条件とは, 部材の形状, 鉄筋や設備配管との関係, 作業者の技能レベル, 工程の長短から工事単価の多寡に至るまで種々雑多である。

λ の幅をどの程度に設定するのがよいかは難しいが, 一応, 上記 a), b) で求めた値から, 50% 増し程度までは考えておきたい。

なお, 実施工事ではしばしば, μ, λ を別々に仮定することが面倒であるとして, $\lambda=0$ を仮定し, μ だけの加減によって摩擦損失を予測することが行われているが, 少なくともシーストストランドを用いたアンボンド工法では, このような方法はやめるべきである。ケーブル長さがある程度以上 (例えばスラブの場合, 20~30 m 以上) になれば, μ よりもむしろ λ の方が摩擦損失に対して支配的となり, その λ を無視することは, 大きな予測誤差を招くことになるからである。

以上のような考慮の下に, アンボンド工法に用いるシーストストランドの, 設計および施工計画用摩擦係数として, 下記の値を推奨する。

$$\mu = 0.06$$

$$\lambda = 0.002 \sim 0.003$$

図-2 は, $\mu=0.06, \lambda=0.002$ を仮定して, 今回の実測ケーブルに関して P_0/P_1 値を逆算し, その各計算値に対する同一ケーブルの実測値の比をプロットしたもの

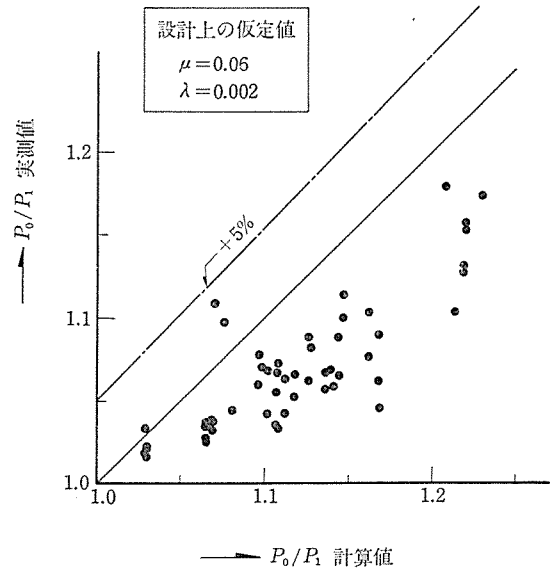


図-2 μ, λ を仮定した計算値と実測値の比

である。前記 a), b) の条件が満足されていることが分るのである。

5. あとがき

アンボンド工法は, 何しろ便利である。特別な仮設計画がいらず, 工程にもほとんど響かない点が良い。スラブは当然のこととして, あまり大断面の高プレストレスでさえなければ大・小梁の場合でも, シース配置やグラウト作業の面倒なボンド方式など, アンボンドに比べれば, とてもやっておれない, というのが実感である。

法律的な制約が解かれることによって, 建築分野では今後, 飛躍的な用途拡大が実現しよう。そのような状況に対して, 本報の提案が何ほどかのお役に立てれば幸いである。さらに多様な使用経験と豊富なデータの採取によって, より信頼性の高い資料が蓄積されていくことを望むものである。

終りに, 多数の実測データを提供して下さった, 大林組建築技術部・特殊工法部の皆さんに, 謝意を表す次第です。

参 考 文 献

- 1) 神鋼鋼線工業 (株): 営業パンフレット「アンボンド工法用シーストストランド」, 昭和 51 年版
- 2) 住友電気工業 (株): パンフレット「SM アンボンド工法」, 昭和 56 年版
- 3) ACI COMMITTEE REPORT, "COMMENTARY ON BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR REINFORCED CONCRETE (ACI 318-77)", 1978 年 6 月
- 4) Concrete Society Technical Report No. 17, "Flat slabs in post-tensioned with particular regard to the use of unbonded tendons-design recommendations", 1979 年 7 月 【昭和 57 年 3 月 23 日受理】