

(99) 付着改良型樹脂防錆PCストランドのプレテンション部材への適用性研究

住建コンクリート工業(株)技術部 正会員 ○ 近藤 二郎
 フドウ建研(株)技術本部 正会員 南 伊三男
 ヒエン電工(株)開発部 千桐 一芳
 神鋼鋼線工業(株)PC技術部 白濱 昭二

1. はじめに

筆者らは、前報において高耐久構造研究会で開発した樹脂防錆被膜表面に溝加工を施した付着改良型内外完全防錆高耐久PCストランドをポストテンショングラウト部材に適用し、付着改良によって裸ストランド使用時と同等のひびわれ分散性が得られることを確認した^{1), 2)}。本研究では、付着改良型防錆ストランドのプレテンション部材への適用性を確認するために、プレテンション梁によるプレストレス導入実験を行い、ストランド配置位置でのコンクリートの圧縮ひずみ測定値からPC鋼材の定着長さを推定するとともに、裸ストランド導入実験結果と比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) PCストランド

φ15.2mm 7本より(SWPR7BL)裸ストランド、及び、ストランド内部の芯線と側線間の内部空間をストランドのよりを戻すことなく樹脂注入し、同時に表面をコーティングした完全防錆ストランドの表面樹脂被膜に溝加工を施した付着改良型内外完全防錆高耐久ストランド(以下防錆ストランドと略記)を用いた。各ストランドの機械的性質を表-1に示す。

表-1 φ15.2mm 7本よりストランドの機械的性質*

| ストランドの種類 | 引張強さ** (kN) | 降伏強さ** (kN) | 破断伸び (%) | ヤング係数 (MPa) |
|----------|-----------------|-----------------|----------|--------------------|
| 裸ストランド | 269 (1939.4) | 254 (1831.3) | 8.1 | 1.91×10^5 |
| 防錆ストランド | 268 (1932.2) | 257 (1852.9) | 7.8 | 1.91×10^5 |
| JIS規格値 | ≥261 | ≥222 | ≥3.5 | —— |

(2) コンクリート

コンクリートは、工場内のプランで練り混ぜたものを使用した。示方配合を表-2に示す。

力学的性質は表-4を参照されたい。

* ストランドの公称断面積は $A_{sp} = 138.7 \text{mm}^2$

** カッコ内数値の単位はMPa

表-2 コンクリートの示方配合

| 粗骨材最大 寸法 (mm) | スランブ (cm) | 空気量 (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位容積重量 (kg/m ³) | | | | |
|------------------|--------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-----|-----|------|------|
| | | | | | W | C | S | G | Ad |
| 20 | 8±2.5 | 2.0±1.0 | 37.2 | 41.0 | 160 | 430 | 731 | 1060 | 4.73 |

2.2 供試体寸法及び製造

プレストレス導入実験は、断面寸法125×240mm、全長4mの長方形断面コンクリート梁にφ15.2mm防錆ストランド1本を、コンクリート断面核半径位置(e=40mm)に直線配置したもの3本(供試体TE-2~4)と、同

裸ストランドを用いたもの1本 (TE-1) につき行った。それぞれの供試体の諸元を表-3及び図-1に示す。

各供試体はTE-1, 2及びTE-3, 4に分けてプレテンションベッドにて製造した。コンクリート打設に先立ち、PCストランドをプレテンションベッドで緊張し、定着後の引張力が $P_i = 0.7P_u = 182.7\text{kN}$ (ただし、規格引張荷重 $P_u = 261\text{kN}$) となるよう定着した。コンクリート打設後は蒸気養生を行い、その後は乾燥収縮を極力避けるため実験時まで湿潤養生を行った。なお実験時及び材令28日のコンクリートの力学的性質を表-4に示す。

表-3 供試体の諸元

| 供試体記号 | 幅 (mm) | 高さ (mm) | 長さ (mm) | φ15.2mm PC ストランド | 偏心距離 (mm) |
|-------|--------|---------|---------|------------------|-----------|
| TE-1 | 125 | 240 | 4000 | 裸ストランド | 40 |
| TE-2 | | | | 防錆ストランド | |
| TE-3 | | | | | |
| TE-4 | | | | | |

2.3 実験方法

表-4 コンクリートの力学的性質

プレストレス導入実験は供試体 TE-1, 2については材令7日, TE-3, 4については材令8日でそれぞれ行った。導入は、プレテンションベッドに定着されているPCストランドの引張力を徐々に解放して行った。

| 供試体記号 | 材令 (日) | 圧縮強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | ヤング係数* (MPa) |
|---------|--------|------------|------------|---------------------|
| TE-1, 2 | 7日 ** | 60.2 | 4.53 | 3.601×10^4 |
| | 28日 | 69.7 | 4.25 | 3.565×10^4 |
| TE-3, 4 | 8日 ** | 54.9 | 3.80 | 3.554×10^4 |
| | 28日 | 66.5 | 4.51 | 3.640×10^4 |

*圧縮強度の1/3の応力に対するセカントモジュラス

**プレストレス導入実験材令

解放プレストレス力の管理はロードセルにより行い、4段階の解放プレストレス力 $P_i = 50, 100, 150,$ 及び182.7kN (全プレストレス力解放時) に対するコンクリート圧縮ひずみをPCストランド配置位置と同レベルの位置に連続貼付したG.L. = 30mmのWire Strain Gauge により測定した。Wire Strain Gauge 貼付位置については図-1及び写真-1を参照されたい。ただし、供試体TE-1については、解放導入プレストレス力 $P_i = 182.7\text{kN}$ の場合についてのみ実施した。なお、プレストレス導入作業時には、プレストレス力解放にともなう供試体の軸方向移動に支障をきたさないように、図-1または写真-2に示すように供試体底面と型枠底版との間に鉄筋コロを配置した。

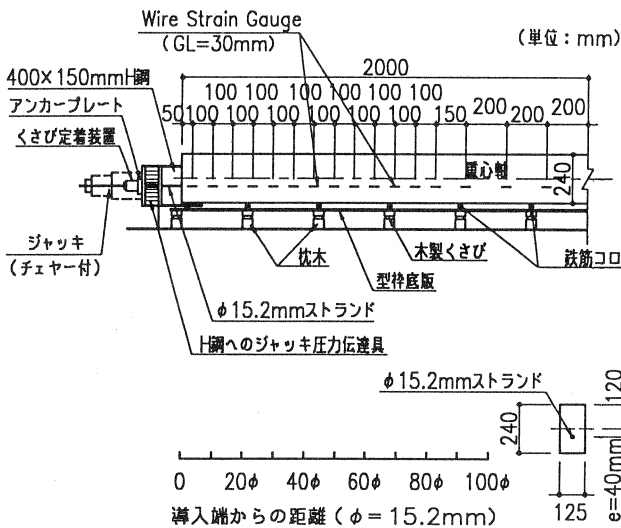


図-1 供試体概要図

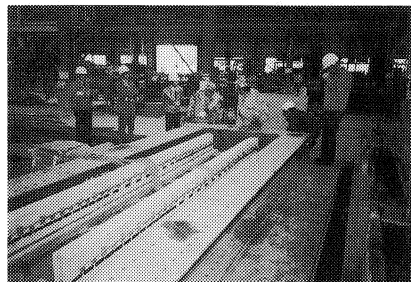


写真-1 Wire Strain Gauge貼付状況

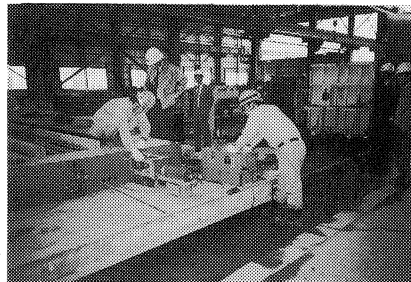


写真-2 プレストレス導入状況

3. 実験結果

3. 1 導入プレストレス力の材軸方向分布

図-2はストランド配置レベルにおけるプレストレス導入にともなうコンクリート圧縮ひずみ実測値 ϵ_{cp} から、各測定点断面での導入プレストレス力 P_{exp} を計算した結果を図示したものである。

各測定点における P_{exp} の計算式は

$$P_{exp} = \epsilon_{cp} \cdot E_c \cdot A_c \cdot 3/4 \quad (1)$$

E_c : コンクリートのヤング係数, A_c : コンクリートの断面積

であり、供試体両端面付近のストランド定着長部分についても上式を適用した。各供試体とも両端着長部を除く中央部ではほぼ一様のプレストレス力が導入されており、防錆ストランドの場合でも附着によるプレストレス導入が可能であることが確認された。

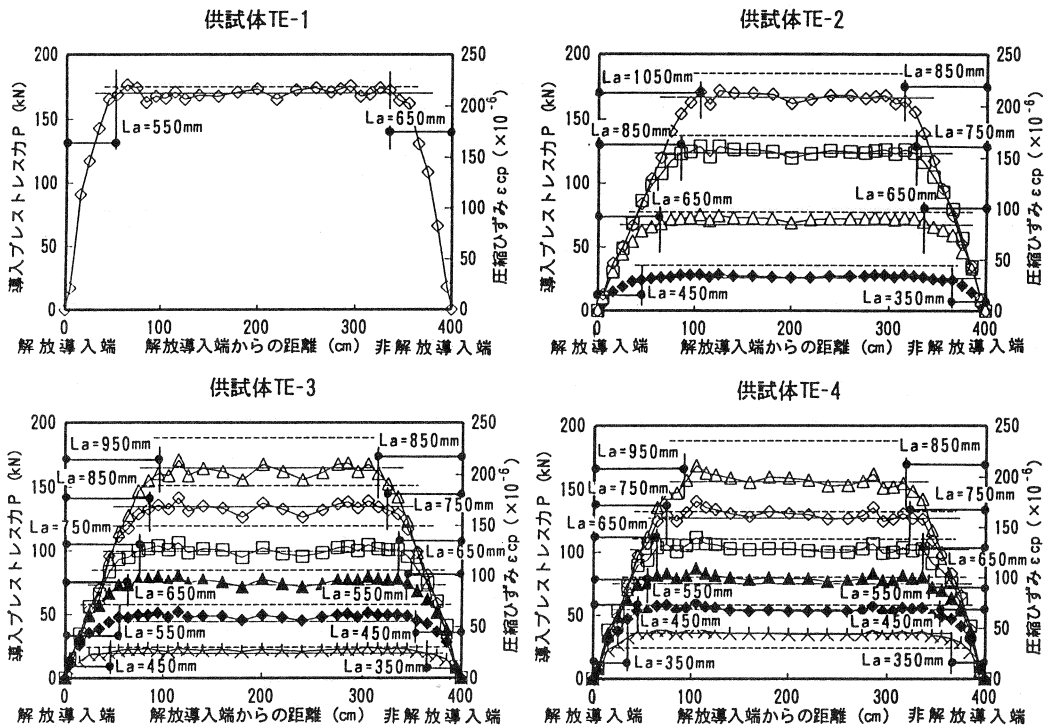


図-2 導入プレストレス力の材軸方向分布

3. 2 導入プレストレス力の大きさ

表-5は、各供試体の中央部の一様プレストレス力導入部分でのストランド配置位置におけるコンクリート圧縮ひずみ測定値 ϵ_{cp} の平均値を用いて (1) 式から導入プレストレス力実験値 P_{exp} を計算した結果を、解放プレストレス力 P_i から計算した導入プレストレス力計算値 P_{cal} と比較したものである。 P_{cal} の計算式は下記のとおりである。

$$P_{cal} = P_i / (1 + 4np/3) \quad (2)$$

$n = E_{sp} / E_c$: ヤング係数比, $p = A_{sp} / A_c$: PC鋼材比

E_{sp} : PC鋼材のヤング係数, A_{sp} : PC鋼材断面積

表-5 導入プレストレス力実験値と解放プレストレス力に基づく計算値の比較

| 供試体 | 解放プレ ストレス力 P_i (kN) | 導入プレ ストレス力 計算値 P_{cal} (kN) | 供試体中央部 実測圧縮ひずみ 平均値 ϵ_{cp} | 導入プレ ストレス 力実測値 P_{exp} (kN) | $\frac{P_{exp}}{P_{cal}}$ |
|----------------------|-----------------------------|--|---|--|---------------------------|
| 解放プレストレス力公称値 50kN | | | | | |
| TE-1 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| TE-2 | 41.80 | 40.47 | 41.08×10^{-6} | 33.28 | 0.822 |
| TE-3 | 67.67 | 65.50 | 60.83×10^{-6} | 48.65 | 0.743 |
| TE-4 | 61.78 | 59.80 | 68.48×10^{-6} | 54.76 | 0.916 |
| 解放プレストレス力公称値 100kN | | | | | |
| TE-1 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| TE-2 | 83.59 | 80.95 | 88.81×10^{-6} | 71.96 | 0.889 |
| TE-3 | 95.12 | 92.07 | 95.00×10^{-6} | 75.97 | 0.825 |
| TE-4 | 89.24 | 86.38 | 99.74×10^{-6} | 79.76 | 0.923 |
| 解放プレストレス力公称値 150kN | | | | | |
| TE-1 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| TE-2 | 140.64 | 136.18 | 154.06×10^{-6} | 124.82 | 0.917 |
| TE-3 | 157.89 | 152.82 | 167.56×10^{-6} | 133.99 | 0.877 |
| TE-4 | 140.24 | 135.74 | 163.21×10^{-6} | 130.51 | 0.961 |
| 解放プレストレス力公称値 182.7kN | | | | | |
| TE-1 | 181.30 | 175.56 | 210.33×10^{-6} | 170.41 | 0.971 |
| TE-2 | 183.71 | 177.89 | 206.20×10^{-6} | 167.07 | 0.939 |
| TE-3 | 186.33 | 180.35 | 204.00×10^{-6} | 163.13 | 0.905 |
| TE-4 | 187.30 | 181.30 | 197.47×10^{-6} | 157.88 | 0.842 |

表-5から明らかなように、各供試体におけるコンクリート圧縮ひずみ実測値から求めた導入プレストレス力実験値 P_{exp} は、解放プレストレス力 P_i から求めた計算値 P_{cal} よりもやや小さくなっている。その差は解放プレストレス力の小さい場合に大きく現れる傾向が見られる。防錆ストランドと裸ストランドとの上記の差については、解放プレストレス力 $P_i = 182.7$ kN の場合しか比較できないが、防錆ストランドでは裸ストランドよりも大きい導入プレストレス力の損失が起こっている。このような導入時のプレストレス力の損失がプレストレス力導入のどの時点で起こるのかを推定するために、本研究では図-3に示した P_{exp} と P_{cal} との関係に基づき検討した。すなわち、同図から明らかなように、上述の P_{exp} と P_{cal} との差、すなわち、プレストレス力の損失は導入初期において起こっており、本研究では解放プレストレス力 $P_i = 50$ kN までにすべての損失が起こっていると判断される。その原因は明らかではないが、特に防錆ストランドでは、ストランドと部材コンクリート間の付着応力の伝達が表面樹脂被膜を介して行われ、その結果、被膜のせん断変形が起こるのではないかと判断される。なお、プレストレス力損失量は10kN程度である。

3.3 定着長さ

図-2に示した導入プレストレス力分布から、導入プレストレス力が一様となるまでの位置の材端からの長さを求め、これを定着長さとした。表-6は全プレストレス力解放時、すなわち、公称解放プレストレス力 $P_i = 182.7$ kN に対する各供試体についての定着長さをまとめたものである。供試体TE-1(裸ストランド)における定着長さは、プレストレス力解放導入端及び同非解放導入端の平均値で $L_a = 600$ mm、すなわち、使用ストランド公称径 $\phi 15.2$ mmの39.5倍であるのに対して、防錆ストランド使用供試体TE-2~4では $L_a = 900 \sim 950$ mm、すなわち、使用ストランド公称径の59.2~62.5倍となった。

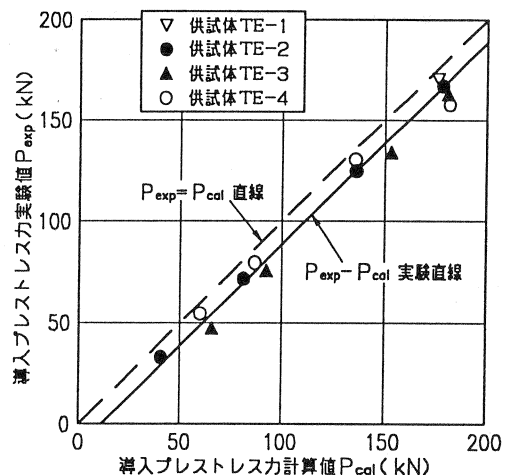


図-3 導入プレストレス力計算値と実験値の比較

すなわち、防錆ストランドにおいては裸ストランドの場合の約1.500~1.583倍の定着長さとなるが、樹脂被膜表面を溝加工することにより附着によるストランドの定着が可能であることが確認された。

表-6 プレストレス導入直後の定着長さ実験値一覧
(公称解放プレストレス力 $P_{exp} = 182.7 \text{ kN}$)

| 供試体 | 導入プレストレス力実験値 P_{exp} (kN) | 定着長さ実験値: L_a (mm) | | | 供試体TE-1 に対する 定着長さ比 |
|------|-----------------------------|---------------------|------------|-----|--------------------------|
| | | 解放 導入端 | 非解放 導入端 | 平均値 | |
| TE-1 | 170.41 | 550 | 650 | 600 | 1.0 |
| TE-2 | 167.07 | 1050 | 850 | 950 | 1.583 |
| TE-3 | 163.13 | 950 | 850 | 900 | 1.500 |
| TE-4 | 157.88 | 950 | 850 | 900 | 1.500 |

3. 4 定着長さの経時変化

プレストレス導入実験終了後の各供試体は材令28日まで大気中に放置し、時間経過にともなう定着長さの変化を測定した。図-4は導入直後のストランド配置位置でのコンクリート側面材軸方向圧縮ひずみ分布実測値と材令28日におけるそれとを比較したものである。導入直後のひずみ分布と比較して、材令28日ではコンクリートのクリープ及び乾燥収縮ひずみが加わっていずれも大きい値となっているが、定着長さについては、防錆ストランド使用供試体TE-2及びTE-3において左右平均長さで100mm、供試体TE-4において50mmの増加が認められた。ただし、このような増加が加わっても、防錆ストランドの定着長さは裸ストランド使用供試体TE-1のその約1.583~1.750倍に止まっている。

なお、各供試体は材令28日で曲げ試験を行ったところ、防錆ストランド使用供試体TE-2~4は裸ストランド使用供試体TE-1とほぼ同等の力学的性質を示した。詳細は別途報告する。また、曲げ試験後、各供試体からプレストレス導入端部分における防錆ストランドを取り出し、コンクリートとの附着面状況及び樹脂防錆被膜の状況を調査した。写真-3及び4に示すように樹脂被膜表面の溝加工は極めて健全で破損は全く認められず、コンクリートとの附着性が極めて良好であったことを確認した。

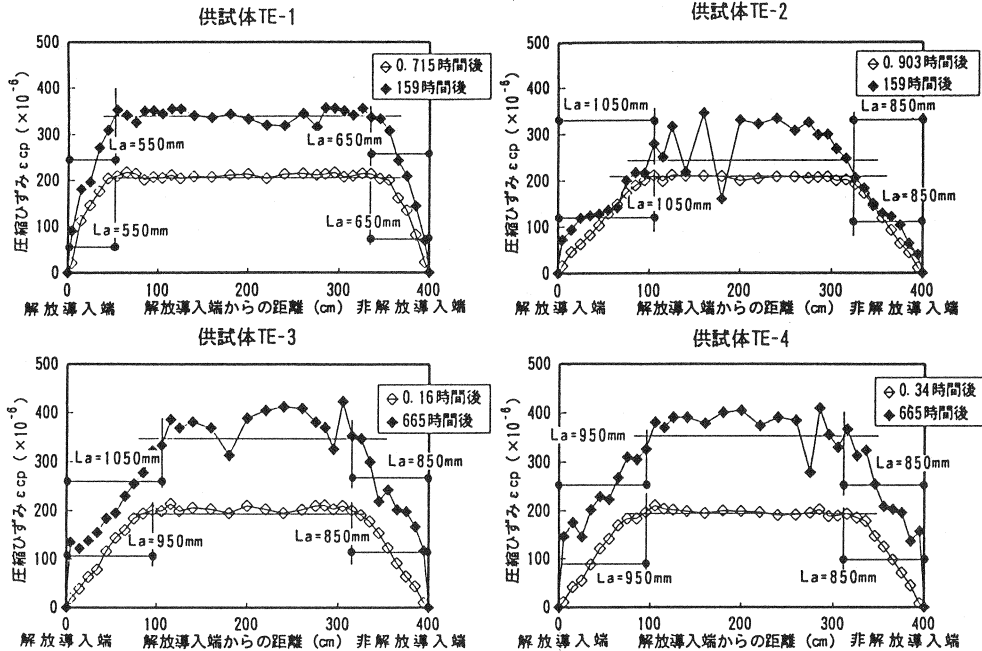


図-4 導入後の時間経過にともなうコンクリートの材軸方向圧縮ひずみ分布の変化

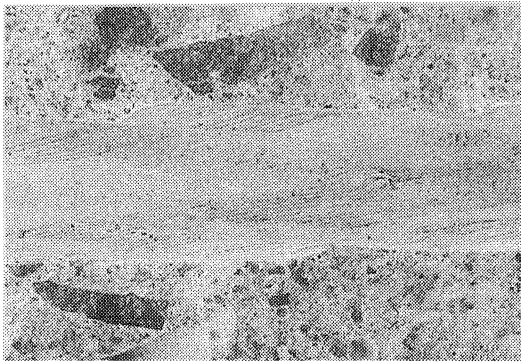


写真-3 防錆ストランドとコンクリートとの接触部

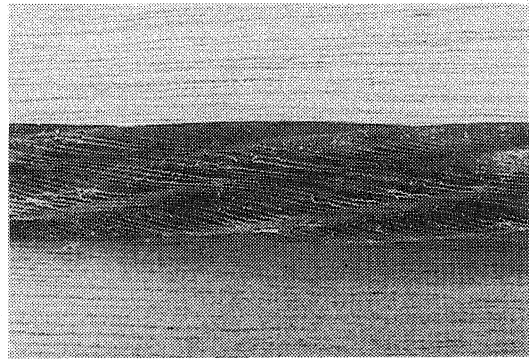


写真-4 実験後に取り出した防錆ストランドの表面

4. 結論

本研究は、樹脂防錆被膜の表面に溝加工を施した付着改良型内外完全樹脂防錆高耐久PCストランドのプレテンション部材への適用性を調べる目的で、付着によるプレストレス導入実験を行ったもので、得られた主な成果をまとめると以下のとおりである。

- ①表面溝加工により付着改良を行った防錆ストランドにより、裸ストランドの場合と同様に付着によるプレストレス導入が可能であることを基本的に確認した。
- ②解放プレストレス力の少ないプレストレス導入初期において、プレストレス力の損失が認められたが、以後は導入プレストレスの損失が起ることなく計算どおりのプレストレスが導入された。ちなみに、本研究で使用した $\phi 15.2\text{mm}$ PCストランドにおけるプレストレス力の初期損失は 10kN であった。
- ③上記の導入にともなうプレストレス力の初期損失は、ストランドの解放プレストレス力が表面防錆被膜を介してコンクリート部材に伝達されることから、表面防錆被膜のせん断変形によるものではないかと判断される。
- ④導入プレストレス力が $P=0.7P_0$ 。(ただし、 P_0 はストランドの規格引張強さ)に対する付着改良型防錆ストランドのプレストレス導入時定着長さは、裸ストランドの場合の $1.500\sim 1.583$ 倍である。なお、材令7日及び8日の導入実験終了後の材令28日までの時間経過にともなうコンクリートのクリープおよび乾燥収縮により定着長さはやや長くなったが、裸ストランドの場合の $1.583\sim 1.750$ 倍に止まっている。
- ⑤試験終了後の供試体から取り出した付着改良型防錆ストランドの樹脂防錆被膜には全く損傷は認められず、コンクリートとの付着性は良好であったと判断した。

なお、結論②で述べた付着によるプレストレス導入の初期損失の防止のためには、部材端においてストランドの簡便な定着装置を併用するアンカードプレテンション法を用いる方法もあること、本研究で使用した供試体については材令28日において曲げ試験を行い、良好な実験結果を得ていることを付記する。

謝辞：本研究は京都大学 六車 照名誉教授のご指導のもとに高耐久構造研究会において実施したものである。本研究の実施および内容の取りまとめにあたり貴重なご意見を賜りましたことを深謝いたします。

参考文献

- 1) 南伊三男, 田中 徹, 千桐一芳: 完全防錆ストランドの開発, プレストレストコンクリート, Vol. 39 No4, pp37-45, July-August 1997
- 2) 南伊三男, 竹田清二, 内田国彦, 六車 照: 樹脂防錆ストランドの付着性能改善に関する研究, PC技術協会第6回シンポジウム論文集, pp. 661-616, 1996年10月