

プレグラウト PC 鋼より線の開発

白濱 昭二*1・大西 睦彦*2・名取 耕一朗*3

1. はじめに

プレグラウト PC 鋼より線は施工現場でのグラウト注入を不要にした防食型 PC 鋼材である。プレストレストコンクリート技術は欧米から技術導入が多いが、プレグラウト PC 鋼より線は欧米にはなく、純国産技術により開発されたプレストレストコンクリート材料である。プレグラウト PC 鋼より線はその名のとおりあらかじめグラウトが施された PC 鋼より線を指し、現在使用されているプレグラウト PC 鋼より線は PC 鋼より線の表面に未硬化のグラウト材を塗布し、その上からポリエチレンシースを連続成形により被覆したものである。この未硬化のグラウト材は硬化するまでの期間が長く、必要な期間アンボンド状態を保ち、プレストレス導入後、時間の経過に伴い自然硬化して、PC 鋼より線とコンクリートを一体化できる性能を持つ。当初開発されたプレグラウト材料は熱硬化型エポキシ樹脂を基にしており今も広く使用されているが、この樹脂は使用される環境が 10℃ 上昇すれば硬化速度がおおよそ 2 倍となる性質があり、コンクリートの水和反応熱が蓄積し 80℃ を越す部材には適用が困難であった。2000 年前後に旧日本道路公団がプレグラウト PC 鋼材を主ケーブルに使用する方針が示され、同時期に熱硬化型の改良品として温度依存性の低い湿気硬化型エポキシ樹脂が開発され、プレグラウト PC 鋼材の適用範囲が広がった。しかしながら熱硬化型および湿気硬化型とも、たとえば床版横締めを使用した場合は硬化期間は数年を要し、また安全衛生面では樹脂が皮膚に付き、処置を怠るとかぶれを起こす可能性があるなどセメント系グラウトにはない欠点もある。この 2 点を克服するためにセメント系材料を用いたプレグラウト材料、皮膚感作性に対して改善したプレグラウト材料も開発されている。本稿においてはプレグラウト PC 鋼より線の開発の歴史の紹介とともに現在使用されている熱硬化型、湿気硬化型プ

レグラウト樹脂および新たに開発されたプレグラウト材料の性能を紹介する。

2. プレグラウト PC 鋼材の開発経緯（歴史）

2.1 開発期（1985 年～1989 年）

プレグラウト PC 鋼より線はアンボンド PC 鋼より線を原型とし発展させた鋼材である。アンボンド PC 鋼より線は 1980 年代前半から建築構造物のスラブや梁への採用が拡大し、1986 年には日本建築学会より「プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説」が刊行され、建築材料として認知されていった。このころプレストレストコンクリートの発展に尽力されていた大阪大学鈴木計夫教授（現福井工業大学教授）から、アンボンド PC 鋼より線の施工性の良さやグラウトケーブルと同様の付着性能を合わせ持った PC 鋼より線が開発できれば今後の日本のプレストレストコンクリートに貢献できるとの提言をいただき、これに基づき 1985 年に開発に着手した。

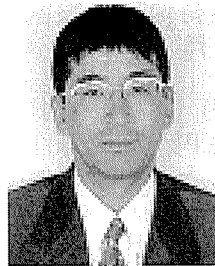
まずグラウト材料の開発から着手し、材料としてセメント系と樹脂系の両面から検討に入った。セメント系においては当時の超遅延剤では緊張可能な状態を維持できる期間は攪拌後 1～2 日であり、使用可能なものは見つからなかった。後述する現在開発中のセメント系プレグラウト材料は 1～2 ヶ月間緊張可能な状態を維持できるが、当時はそのようなものが開発できるとは想像だにできなかった。

セメント系は早々に断念し、ターゲットを樹脂系にしばり検討に入った。樹脂系では鋼材の防食材としても使用されており、接着力、強度に優れたエポキシ樹脂に着目した。ただ一般的にその硬化特性は、より急速な硬化という方向の検討はなされていたが、硬化を遅延させる方法はあまり多くは無かった。しかし種々検討を行った結果、硬化剤に潜在性硬化剤を使用し、触媒として硬化促進剤を用い、かつ促進剤量を極度に少量とすることで常温で数ヶ月間緊張



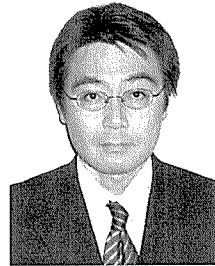
*1 Shoji SHIRAHAMA

神鋼鋼線工業(株) 開発部
加工品開発グループ



*2 Mutsuhiko OHNISHI

神鋼鋼線工業(株) 鋼線事業部
PC 技術室



*3 Kouichirou NATORI

住友電工スチールワイヤー(株)
PC 統括部 PC 技術部

可能な状態を維持できるプレグラウト樹脂が開発できた。

プレグラウト樹脂の開発は1年半程度で目処が立ったためシース材料の検討に入った。アンボンドPC鋼より線はシースにポリエチレンを使用しているが、ポリエチレン樹脂はエポキシ樹脂にもコンクリートに対しても接着性がなく、アンボンドPC鋼より線のグリースをエポキシ樹脂に置き換えただけではグラウト材料となり得ないことは自明であった。このため、コンクリートとPC鋼材との付着を得るため、シースに異型鉄筋のような凹凸をつけることとし、付着試験を実施したところ良好な付着性能が得られ、写真-1に示す現在のプレグラウトPC鋼より線の基本構成ができあがった。その後アンボンドPC鋼より線の製造ラインを改良し、ポリエチレン被覆装置の後方に、新たに開発した凹凸形状をつけられる成型機を設置し、連続成形による被覆が可能となった。図-1に製造ラインの概略を示す。

2.2 黎明期 (1990年～1997年)

当初、プレグラウトPC鋼より線はアンボンドPC鋼より線が使用されていた建築構造物への適用を目標としており、1988年に施工された「京阪神不動産曙町ビル」で初めて採用された。その後アンボンドPC鋼より線の高品質材として使用実績を積み、1992年には神鋼鋼線工業(株)従業員厚生施設建築に対してプレグラウトPC鋼より線を大梁に使用した。これはグラウト工法の置き換えとして耐震部材への

初めての適用事例であり、建築評定を取得して使用した。

建築での実績を踏まえ土木構造物への適用を進めていたが、1992年に山陽自動車道木門田川橋の床版横締めにて初めて採用された。その後天子川橋、ホロナイ川橋等、高速道路の橋梁に床版横締め用としての採用が徐々に増えてきた。そして旧日本道路公団では1997年に設計要領第2集が改訂され、プレグラウトPC鋼材は床版横締め用ケーブルとして標準的に使用できるようになった。この時までプレグラウトPC鋼より線の呼び名は学会等では「後硬化型PC鋼より線」、一般的には商品名の「アフターボンドPC鋼より線」が使用されていたが、旧日本道路公団によって「プレグラウト」と名付けられ、名称および仕様に至るまで広く認知される礎となった。

2.3 用途拡大期 (1998年～)

1999年のPCグラウト施工マニュアルRの改訂時にプレグラウトPC鋼材が追加され、高速道路の橋梁以外でも使用実績が増えていった。1999年頃から旧日本道路公団では内ケーブルの主ケーブルにプレグラウトPC鋼より線が使用されはじめた。しかしながら構造形式によっては主ケーブルはコンクリートの内部温度が80℃を超える部位を貫通することがある。その場合熱硬化型プレグラウト樹脂では硬化促進剤量をいかに調整しても早期に樹脂が硬化し、緊張不可能な状態となるおそれがあった。そこで、新たに開発された湿気硬化型樹脂が注目された。夏期打設のマスコンクリートに対しても納入から1ヶ月以内に打設した場合、2週間は緊張可能な状態を維持できるため、高速道路の橋梁で使用されるに至った。

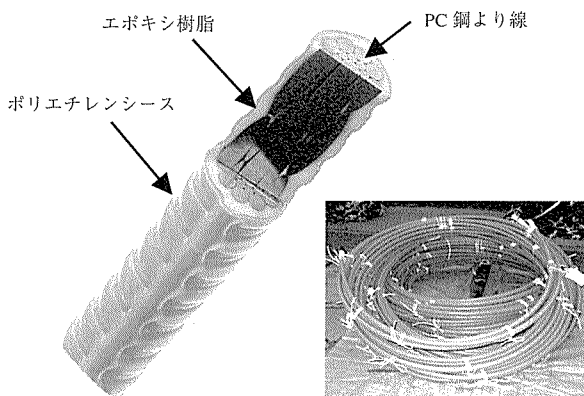


写真-1 プレグラウトPC鋼より線の構成および荷姿

3. プレグラウトPC鋼より線の現状

プレグラウト樹脂の種類は、初期開発品である熱硬化型と近年開発された湿気硬化型に大別される。熱硬化型はさらに使用条件に合わせて4タイプの配合から適切な樹脂タイプを選定することになるが、湿気硬化型樹脂は硬化に及ぼす温度の影響が少なく1種類で広い範囲の温度条件に適用可能である。以下にプレグラウトPC鋼より線の特徴を示す。

3.1 PC鋼より線

PC鋼より線はJIS G 3536に規定される低レラクセーショ

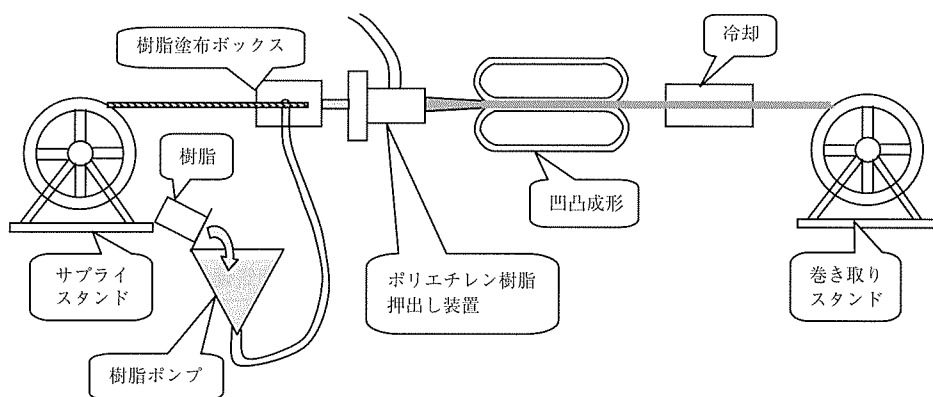


図-1 プレグラウトPC鋼より線製造設備の概要

ン材を使用している。適用可能な PC 鋼より線は SWPR7BL 12.7 mm, 15.2 mm, SWPR19L 17.8 mm, 19.3 mm, 21.8 mm, 28.6 mm であり、すべてシングルストランド工法用とし適用可能である。その他のサイズとして JIS 外ではあるが 25.4 mm も適用可能である。マルチストランド工法用は開発に至っていない。

3.2 シース

シースにはポリエチレンを用いており、ポリエチレン樹脂の特性を表-1に示す。

表-1 ポリエチレン樹脂の特性

項目	特性値
密度	942 kg/m ³ 以上
引張破壊強さ	20 N/mm ² 以上
引張破壊伸び	300 % 以上
デュロメーター D 硬度	55 以上
ピカット軟化点	100 ℃ 以上
耐寒性	-60 ℃ 以下

3.3 プレグラウト樹脂

(1) 熱硬化型プレグラウト樹脂

液体であるエポキシ樹脂に固体の硬化剤を混合し、容易には反応しない状態としている。その中へ希釈剤とともに硬化促進剤を投入することにより、固体であった硬化剤を液状化させて反応を促進させる。この化学反応は一種の溶解反応であるため温度感受性が高く、4グレードある樹脂から適用部材に合わせて最適樹脂を選定する必要がある。表-2に樹脂の主成分、表-3に樹脂の物理特性、図-2に硬化反応模式図を示す。また、4グレードある熱硬化型樹脂の分類および適用可能範囲とおおよその硬化期間を表-4に示す。

(2) 湿気硬化型プレグラウト樹脂

湿気硬化型樹脂に添加されている硬化剤（ケチミン）は微量の水分により加水分解し、ケトンとアミンに分解する。この反応は熱硬化型の硬化反応より、温度依存性が小さい。ただし分解したアミンとエポキシ樹脂の硬化反応は熱硬化型と同じ反応となり、温度依存性を持つ。硬化反応に寄与する水分はエポキシ樹脂にあらかじめ存在する微量の水分

表-2 熱硬化型プレグラウト樹脂の主成分

項目	成分
エポキシ樹脂の種類	ビスフェノール A 型 ビスフェノール F 型
硬化剤の種類	ジシアンジアミド (潜在性硬化剤)
硬化促進剤	変性特殊ポリアミン
他	粘度調整剤、溶剤が少量混合

表-3 プレグラウト樹脂の物理特性
(熱硬化型&湿気硬化型)

項目	特性値
圧縮強度	70 N/mm ² 以上
硬化収縮率	1.0 % 以下
熱分解温度	300 ℃ 以上

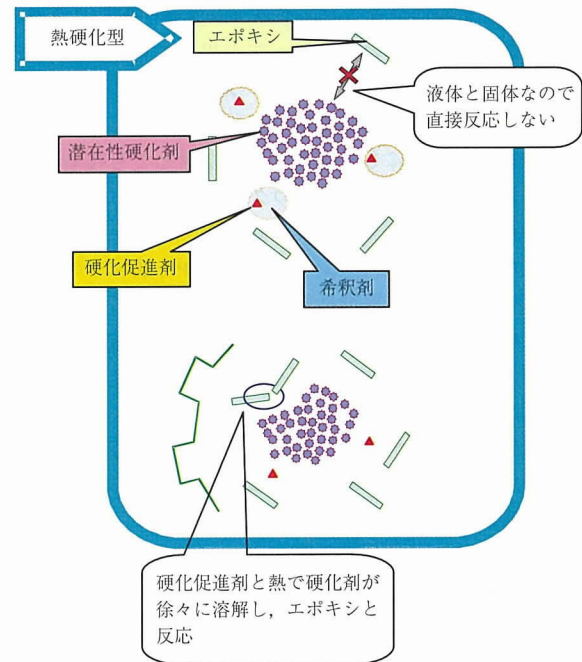


図-2 熱硬化型樹脂の硬化反応模式図

表-4 熱硬化型樹脂の分類と適用可能範囲例

部材	樹脂タイプ	夏期	冬期	硬化期間
床版 横締め	常温	△	○	1～1.5年
	暑中	○	○	2～3年
	高温	○	○	3～5年
	超高温	○	○	3～5年
横桁 横締め	常温	×	×	-
	暑中	×	×	-
	高温	×	△	2～3年
	超高温	×	△	2～3年

○：適用可
△：条件により適用可能

および高分子樹脂は湿度差があると平衡状態になるまで湿度の高い方から低い方へと蒸気が透過する性質があり、平衡状態に達するまでシースを通して浸透する水蒸気を利用している。このため熱硬化型樹脂に比べ温度依存性が小さく、コンクリートの水和反応熱により内部温度が高温となる部材にも適用が可能となった。表-5に樹脂の主成分、図-3に硬化反応模式図を示す。なお、物理特性は熱硬化型と同様であり表-3に示す値となる。また、湿気硬化型樹脂の適用可能範囲とおおよその硬化期間を表-6に示す。

3.4 プレグラウト PC 鋼より線の耐食性

表-7に示す試験により1000時間経過後においてもシース内のPC鋼より線は健全であり、優れた耐食性を有している。

表-5 湿気硬化型プレグラウト樹脂の主成分

項目	成分
エポキシ樹脂の種類	ビスフェノール A 型
硬化剤の種類	ケチミン (湿気硬化型硬化剤)
他	粘度調整剤、吸湿剤が少量混合

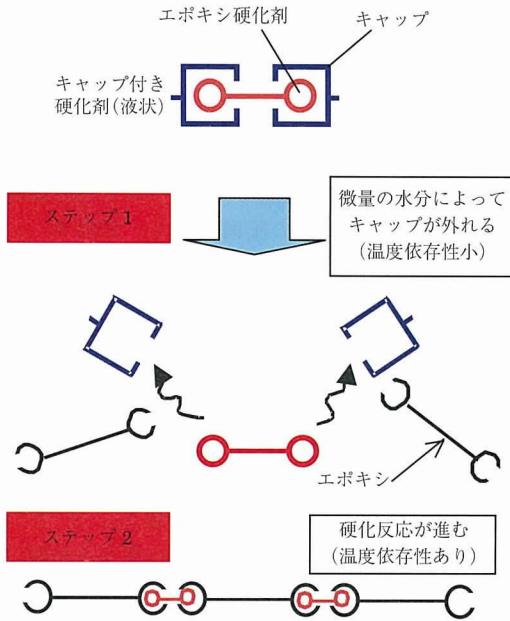


図-3 湿気硬化型樹脂の硬化反応模式図

表-6 湿気硬化型樹脂の適用可能範囲例

部材	樹脂タイプ	夏期	冬期	硬化期間
床版横締め	湿気硬化型	○	○	3～5年*
横桁横締め	湿気硬化型	○	○	2～4年

○：適用可

*：床版用として、2～3年で硬化する樹脂タイプの利用も可能。

表-7 耐食性試験条件

試験名	試験方法	溶液
塩水噴霧	JIS Z 2371	5 ± 0.5 % 濃度 NaCl
耐アルカリ性	ASTM G 20	飽和 Ca(OH) ₂ + 3 % NaCl

3.5 プレグラウト PC 鋼より線の付着特性

プレグラウト PC 鋼より線の樹脂硬化後の付着力を表-8に示す。本試験結果は①コンクリートにプレグラウト PC 鋼より線を埋設したもの、②コンクリートにスパイラルシースを配置し、PC 鋼より線を通しグラウトしたもの、③コンクリートに PC 鋼より線を単独で埋設したもの3種類で引抜試験を行った比較試験結果である。供試体の寸法はφ180 mm, L 200 mm とし、コンクリートの強度発現後に引抜試験を行い、付着力を求めた。

3.6 プレグラウト PC 鋼より線の摩擦係数

プレグラウト PC 鋼より線の PC 鋼より線とシースとの摩擦係数は表-9に示す値を標準としている。

3.7 定着具、緊張および保護具

プレグラウト PC 鋼より線の定着具および緊張装置はプレグラウト PC 鋼より線に対して性能を確認されたものを使用する必要がある。

なお、定着具取り付け時から余長切断、端部処理に至る作業では余長部のポリエチレン被覆が除去されるため樹脂が体に付着し、体質によってはかぶれ等の皮膚障害を起こ

注) PC 鋼より線は 21.8 mm を使用。

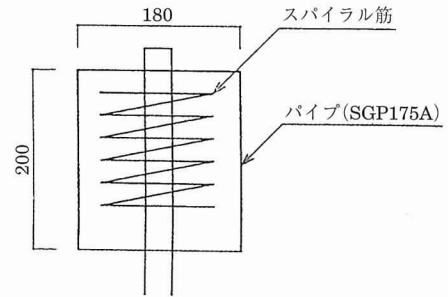


図-4 付着強度試験体

表-8 試験結果

試験項目	プレグラウト PC 鋼より線	グラウトした PC 鋼より線	直接埋設 PC 鋼より線
付着強度 (N/mm ²)	3.9	3.8	3.9

表-9 試験結果

対象	μ (1/rad.)	λ (1/m)	備考
横締め	0.10	0.003	直線に近く、比較的短い鋼材
縦締め	0.30	0.004	上記以外の横締め鋼材を含む

すおそれがあるので保護具の着用は必須である。

4. これからのプレグラウト PC 鋼材

以上、プレグラウト PC 鋼材の開発経緯および現状について述べてきた。ここでは、これからのプレグラウト PC 鋼材として、現在、実用化に向けて開発が進められている無機系プレグラウト PC 鋼材について述べる。

4.1 無機系プレグラウト PC 鋼材の概要

これまでのプレグラウト PC 鋼材は、グラウト材として樹脂系の材料を使用したものである。しかし最近では、グラウト材として無機系のものが開発され、実用化に向けた実証試験が行われている^{2)・3)}。

無機系プレグラウト PC 鋼材用のグラウト材は、低熱ポルトランドセメントを主成分としたものであり、混和材(剤)として石灰石微粉末、減水剤、増粘剤および超遅延剤などを添加した超遅延型のグラウト材である。そのため、一般に有機系の樹脂に見られるような皮膚に対する刺激性がなく、また PC 鋼材の表面に不動態皮膜が形成されるために耐久性にも優れている。

以下に、このグラウト材を使用した無機系プレグラウト PC 鋼材の諸特性について述べる。

4.2 無機系プレグラウト PC 鋼材の諸特性

(1) グラウト材の流動性

グラウト材の粘性は、通常の内ケーブルに使用するグラウト材に比べてかなり高く設定している。その理由として、現場でのグラウト注入作業に必要な流動性を確保する必要がないこと、輸送時や施工時にグラウト材の流出を防止す

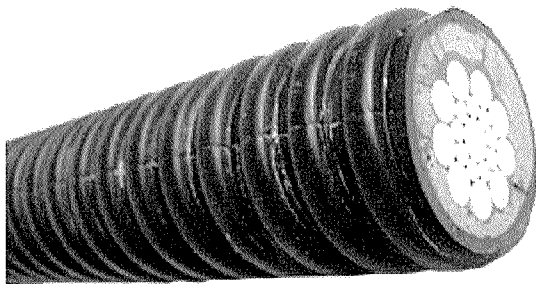


写真-2 セメント系プレグラウト PC 鋼材

表 - 10 グラウト材の硬化特性

緊張可能日数	硬化までの日数	圧縮強度
製造から 30 日	製造から 90 日	60 N/mm ² 以上

表 - 11 摩擦係数

μ , 1/rad	0.3
λ , 1/m	0.004

ること、ケーブルの連続製造時には粘性が高いほうが望ましいことなどが挙げられる。

(2) グラウト材の硬化特性

グラウト材の硬化特性の一例を表 - 10 に、ケーブルの摩擦係数を表 - 11 に示す。緊張可能日数および硬化までの日数は、それぞれケーブル製造後 30 日および 90 日であり、これらを考慮すると現時点での適用箇所としては、床版横締めなどに限定されるであろう。また、圧縮強度が 60 N/mm² 以上であるというのは、グラウト材として十分な特性といえる。

4.3 施工性確認試験

施工性の確認を行うために、無機系プレグラウト PC 鋼材 28.6 mm を 6 ケーブル配置した、橋梁の上床版部を模した長さ約 11 m のコンクリート試験体を用いた施工性確認試験が実施された。この試験の結果、以下の結論が得られている。

- ・ケーブル製造日から 30 日後での緊張は問題なく行えた。その際の摩擦係数は、 $\lambda = 0.001$ (1/m) であった。

- ・45 日目では $\lambda = 0.005$ (1/m) であり、実用上、緊張可能日数は 45 日であった。
- ・90 日目にケーブルを緊張しても、ケーブルの固定端側には緊張荷重がまったく伝達せず、グラウト材が完全に硬化していることが確認できた。
- ・コンクリート試験体に配置したケーブルと同じ温度条件で養生したグラウト材の圧縮強度は、材齢 84 日で 47 N/mm² であった。
- ・施工性にはまったく問題がなく、従来のエポキシ系プレグラウト PC 鋼材と同等の施工が可能であった。

4.4 今後の展開

現時点での無機系プレグラウト PC 鋼材の緊張可能時間は、安全を考慮して約 30 日程度である。これでも床版の横締めとしての使用は可能であるが、できれば最低でも 2 ヶ月程度の緊張可能時間を有することが望ましい。したがって、今後の課題としては緊張可能時間の更なる長期化が挙げられる。また、樹脂系のグラウト材であっても皮膚に対する感作性のないものや湿気硬化型より温度など外部環境に対し感受性の低いもの、さらにより高機能なシースを用いたものなどが開発されており、実用化に向けた検討が進められている。

プレグラウト PC 鋼材用のグラウト材として、樹脂系のものに加えてセメント系のものが現れてきた。両者にはそれぞれ特長があり、その特長を生かした適材適所へ適用を行うことにより、プレグラウト PC 鋼材全体としての更なる発展を願うものである。

参考文献

- 1) (社) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC グラウト & プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル (改訂版), 1999.11
- 2) 荒金 勝, 三上泰治, 星野 実, 鈴木計夫：無機系プレグラウト PC 鋼材の材料特性に関する実験的研究 (超遅延硬化性グラウトの開発), 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.971 ~ 972, 2004 年 8 月
- 3) 呉 承寧, 石橋忠良, 白濱昭二, 広瀬晴次：超遅延性を有する PC グラウトのプレグラウト工法への適用, 第 13 回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.571 ~ 576, 2004 年 10 月

【2005 年 12 月 27 日受付】