

論文 膨張モルタル注入式耐圧性鋼管継手工法の開発に関する研究

山崎 竹博*1・出光 隆*2・渡辺 明*3・蔵重 勲*4

要旨：一般に水圧を受ける鋼管の接合には、溶接やボルトの締付け圧力を利用した継手が用いられている。これらの継手工法では現場での施工条件や導入するボルト締付け力の相違などによって、継手の耐力や止水性能などにばらつきが生じやすい。本研究では天候や技能に左右されない無溶接継手工法として縦割りした鋼管スリーブを鋼管継手部に取り付けた後、スリーブと本管との隙間に膨張性モルタルを注入して接合・止水する工法を検討した。また現場での施工性実験も行い、その作業性についても確認したのでここに報告する。

キーワード：鋼管継手、膨張モルタル、膨張圧、施工性

1. はじめに

近年、都市の生活基盤として上下水道をはじめ各種用途のパイプラインが普及し、地震時のライフライン保全の観点からその力学的性能・施工性能の向上が検討されている。これらの管路の多くは鋼管であり、接合には溶接やボルト連結などの工法が多く用いられている。しかし、これらの工法では熟練した特殊技能者や特殊機器を要し、現場での電力もしくはガスの供給、管路周辺の溶接施工空間の確保および天候などによって、施工性に影響を受けるなどの問題がある。そこで、これらの施工性改善、工期の短縮、熟練技能の簡略化が期待でき、施工品質のばらつきが小さい鋼管の継手工法として、膨張モルタルを使用した工法を検討した。

2. 膨張モルタル注入式耐圧性鋼管継手工法

膨張モルタル注入式耐圧性鋼管継手工法は鋼管継手部分をスリーブで覆い、両者の隙間に膨張モルタルを注入して硬化させ、その膨張圧による摩擦力によって曲げ・引張に対する力学的抵抗性を持たせる他に、圧力水の漏水も防止する工法である。また、継手部の耐力が膨張モル

タルと鋼管との摩擦力に依存するため、地震時の過大な荷重や変形に対して継手部の伸縮で対応できる。従って、予期せぬ外力に対してライフラインの壊滅を防ぐ工法としても期待される。

本工法の定着メカニズムを図式的に図-1に示す。本工法は連結する2本の鋼管(内鋼管)とそれを覆う鋼製スリーブ(外鋼管)および注入膨張モルタルより構成される。

本工法では種々の管厚や管径およびモルタル注入間隙を持つ継手部で所要の膨張圧を発生させることが重要である。注入モルタルの膨張圧はモルタルの膨張性に加えて内鋼管と外鋼管の剛性や拘束度などにも影響される。

そこで本工法の実用化に向けてモルタルの配合と膨張性や流動性の関係、鋼管やスリーブの寸法(口径、厚さ)と膨張圧の関係および膨張圧と鋼管の軸方向耐力との関係などを把握する為、鋼管が降伏する膨張圧を目標に管径約100mmから700mmまでの鋼管を用いて膨張圧特性と接合耐力を調べた。更に水輸送用鋼管の規定水圧2.0~3.4MPaが作用する条件で曲げ漏水試験を実施し、現場での施工性についても実験的に検討した。

*1 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 工博(正会員)

*2 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 工博(正会員)

*3 九州共立大学教授 工学部社会学科 工博(正会員)

*4 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻(正会員)

3. 実験概要

3.1 供試体種類

本実験で使用する鋼管（内鋼管）と継手スリーブ（外鋼管）として表-1に示す4種類の組み合わせを用意した。鋼管の円周方向の膨張圧を拘束する剛性として $EA/U = Etb/\pi D$ を用いると、膨張圧は t/D の値に影響を受けることになる。ただし、 E ：鋼の弾性係数、 A ：単位長さ当たりの円周方向断面積、 b ：軸方向単位長さ、 U ：管の肉厚中心周長、 D ：管の肉厚中心径、 t ：管の厚さである。一方、モルタル厚さ（注入間隙） δ にも膨張変形量は比例すると考えられるので、膨張圧に影響する剛性の影響は、 $\delta \cdot t/D$ を用いて評価される。実験では比較的剛性の大きい小口径・中口径のものと同様の剛性の小さい大口径のものを用意し、膨張圧発現の変化を調べた。

3.2 膨張モルタルの配合

膨張モルタルは水、膨張材、無収縮グラウト材からなる。膨張圧を一定に保ち、高い流動性を得る目的で膨張モルタルは無収縮グラウト材に膨張材を置換することにした。注入する膨張

モルタルの配合を表-2に示す。膨張材率 E_p (vol.%) は膨張モルタル全容積に対する膨張材の容積を百分率で表したものである。また水比 W/M_s (wt.%) は膨張材(密度：3.21g/cm³)と無収縮グラウト材(密度：2.88g/cm³)を加えたモルタル固形分に対する水の重量比である。

3.3 膨張圧の測定

膨張圧は図-2の位置に貼付したゲージの測定値から式(1)、(2)に示す圧肉円筒理論を用いて算出した。

$$(外管法) P = \frac{E_S \cdot (K^2 - 1)}{2 \cdot (1 - \nu_S^2)} (\epsilon_\theta + \nu_S \cdot \epsilon_Z) \quad (1)$$

$$(内管法) P = - \frac{E_S \cdot (K^2 - 1)}{2 \cdot (1 - \nu_S^2) \cdot K^2} (\epsilon_\theta + \nu_S \cdot \epsilon_Z) \quad (2)$$

ここに、 P ：膨張圧 (MPa)

E_S ：鋼管の弾性係数 = 2.06×10^5 (MPa)

ν_S ：鋼管のポアソン比 = 0.33

K ：鋼管の内外径比(外径/内径)

ϵ_θ ：円周方向ひずみ

ϵ_Z ：軸方向ひずみ

外管法は外鋼管の、内管法は内鋼管の円周および軸方向ひずみを用いて膨張圧を算出する方法である。各供試体の膨張圧の測定は、小口径供

表-1 供試体種類

| 供試体 | 鋼管 | 鋼種 | 降伏点 (MPa) | 厚さ (mm) | 外径 (mm) | 内径 (mm) | δ (mm) | ℓ (mm) | 降伏膨張圧 (MPa) |
|------|----|--------|-----------|---------|---------|---------|---------------|-------------|-------------|
| 小口径 | 内 | STW290 | 162 | 4.5 | 114.3 | 105.3 | 20.45 | 120 | 12.76 |
| | 外 | STW290 | 162 | 5.0 | 165.2 | 155.2 | | | 10.44 |
| 中口径 | 内 | STW370 | 215 | 6.9 | 318.5 | 302.7 | 37.05 | 150 | 9.32 |
| | 外 | STW290 | 162 | 7.9 | 406.6 | 392.6 | | | 6.52 |
| 大口径 | 内 | STW400 | 225 | 7.0 | 609.6 | 595.6 | 44.80 | 200 | 5.17 |
| | 外 | STW400 | 225 | 6.0 | 711.2 | 699.2 | | | 3.86 |
| 新小口径 | 内 | STW370 | 215 | 4.9 | 114.3 | 104.5 | 20.45 | 120 | 18.43 |
| | 外 | STW290 | 162 | 5.0 | 165.2 | 155.2 | | | 10.44 |

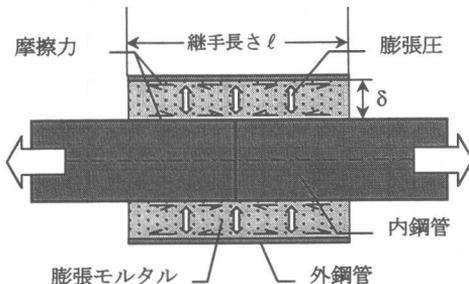


図-1 付着メカニズム

表-2 実験配合 (1000cc 当たり)

| 配合番号 | 膨張材率 E_p (vol.%) | 水比 W/M_s (wt.%) | 水 W (g) | 膨張材 E (g) | 無収縮グラウト材 G (g) |
|------|--------------------|-------------------|-----------|-------------|------------------|
| ① | 0.5 | 20 | 366 | 16 | 1813 |
| ② | 2 | | 366 | 64 | 1767 |
| ③ | 2 | 23 | 399 | 63 | 1673 |
| ④ | 4 | 20 | 367 | 128 | 1707 |
| ⑤ | 8 | | 369 | 257 | 1587 |
| ⑥ | 10 | | 370 | 321 | 1527 |
| ⑦ | 12 | | 371 | 385 | 1467 |
| ⑧ | 20 | | 337 | 642 | 1227 |

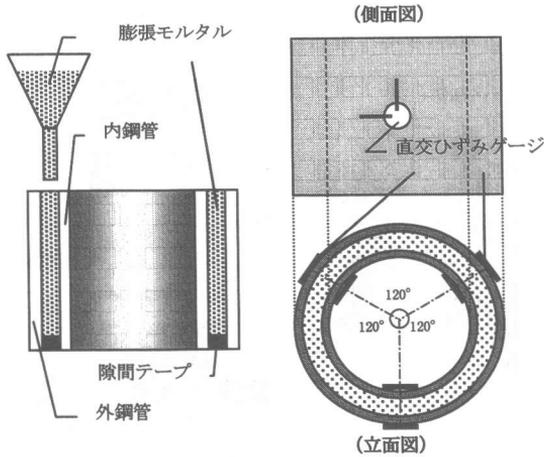


図-2 供試体概略図

試体は外管法で、中・大口径供試体は内管法で行った。

膨張モルタルは膨張材と無収縮モルタルをさじでよく攪拌し、水を投入してハンドミキサーで90秒間十分に練混ぜた。膨張モルタルはロートを用い図-2のように縦に注入した。また鋼管の底部はモルタルの漏れを防ぐために隙間テープでふさいだ。なお供試体の養生は気温 20℃の室内で行った。

4. 実験結果および考察

4.1 膨張材率と膨張圧

膨張材率と膨張圧の関係を調べるため、表-2の配合③~⑦を用いて、それぞれ大口径・中口径・小口径の供試体に生じる膨張圧を測定した。その結果、膨張圧はモルタル注入後、時間と共に増大し2~3日後にはほぼ一定となることが分かった。それらの測定結果のうち、小口径の供試体の値を図-3に示す。中口径および大口径の結果については6日後の値を最終値として読み、小口径の結果と併せて、それぞれ図-4に膨張材率と膨張圧の関係として示した。図-4に示す供試体の管の剛性比を $\delta \cdot t/D$ の値の比で求めると、小口径・中口径・大口径の順に1.00 : 1.05 : 0.60となる。これに対して図-4に示す実験値の傾きの比は1.00 : 0.87 : 0.60となり、ほぼ一致すると考えられる。中口径の実

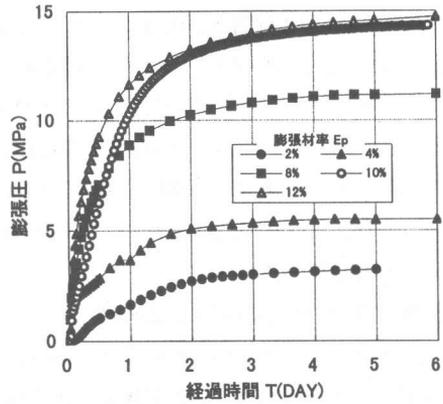


図-3 膨張圧の経時変化 (小口径 TYPE)

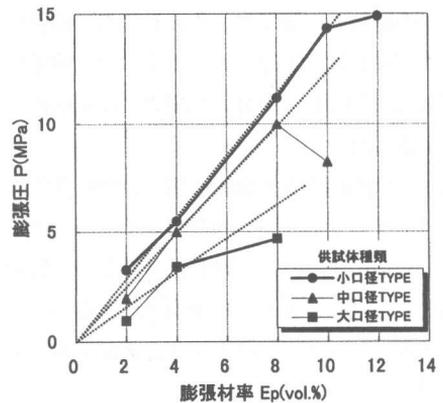


図-4 膨張材率と膨張圧の関係

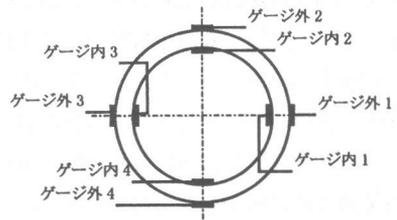


図-5 ゲージ貼付位置

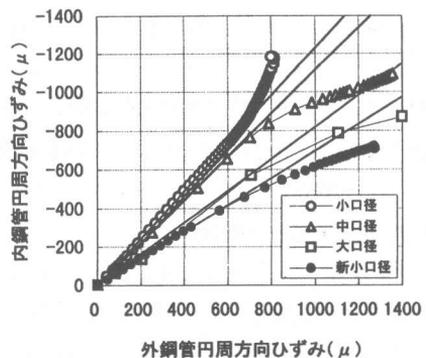


図-6 内・外鋼管の円周方向ひずみ

測膨張圧の比が管の剛性比から算出される値よりも小さい現象については、継手の空隙 δ と継手長さ l の比 l/δ が中口径で小さかったことが原因と考えられる。すなわち、小口径、中口径、大口径の順に l/δ は 2.93, 2.02, 2.23 であり、中口径で最も小さく、膨張圧の一部が端部で解放された影響と考えられる。

4.2 膨張圧と鋼管の座屈または降伏

注入モルタルの膨張圧が大きいほど、継手部の接合耐力は大きくなり、止水効果も大きくなる。しかし膨張圧が大き過ぎた場合、外鋼管の降伏や内鋼管の座屈が生じる。そこで、鋼管供試体のゲージ位置を図-5のように密に貼付して膨張圧を測定し、鋼管の座屈または降伏について照査した。

供試体の内鋼管と外鋼管の同一断面に位置する同 No. ゲージの円周方向ひずみの関係を図-6に口径別に示した。内鋼管と外鋼管が共に弾性域にあれば両ひずみは直線関係にあるが一方が降伏または座屈すれば測定値は直線関係から外れる。

継手部の鋼管は表-1の降伏膨張圧に示すように全て外鋼管の降伏が生じる組み合わせにしている。しかし、図-6の小口径の結果では内鋼管が座屈する結果となった。そこで、内鋼管を降伏点の高い材質に替えた新小口径の供試体について上記の測定を行った結果、図-6に示すよう外鋼管の降伏を生じる結果を得た。

表-1から各口径の供試体の内外鋼管の降伏膨張圧の比を計算すると、内鋼管が座屈した小口径の場合 1.22 であり、中口径 1.43, 大口径 1.33 に比べて小さいことが判る。このことから、内鋼管の座屈を防止するには外鋼管よりも30%以上高い降伏膨張圧になるように継手を設計することが望ましい。

4.3 膨張圧と継手の接合耐力

表-2の配合①~⑧で小口径の鋼管を用い図-7のように供試体を作製し付着試験を行った。実験結果から内鋼管表面に作用する付着応力と変位の関係を図-8に示した。図-8はモルタル

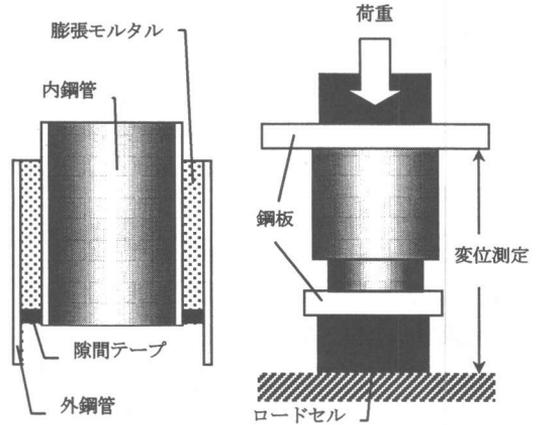


図-7 付着試験

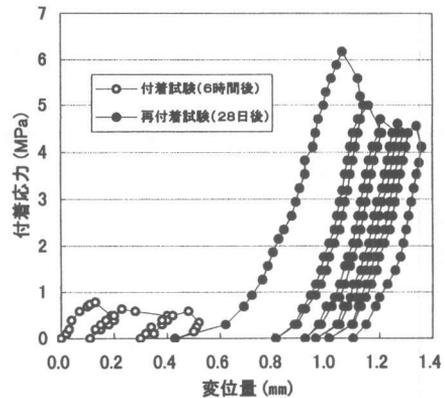


図-8 付着応力と変位置の関係

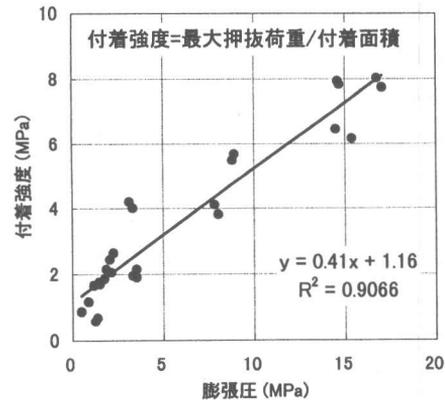


図-9 膨張圧と付着強度の関係

ル注入後6時間で付着試験を行い付着破壊させた後、再度28日後に行った付着試験の実測値である。その結果、膨張圧の低い時間に大きなすべりを生じて、その後の膨張反応で十分に体力を回復できることが判った。

また、材齢 28 日でのすべり発生時の最大付着応力と膨張圧との関係を表示したところ図-9のように直線的になることが判った。したがって、接合部の軸方向耐力は膨張圧の測定から算出することが可能となる。

4.4 曲げ漏水試験

水圧作用時の鋼管継手部の止水効果を調べるため、表-2の配合⑥で膨張圧 7MPa を導入した中口径の継手供試体を作製し、図-10のように載荷して管のたわみから継手部の曲げ角と漏水の有無を確認した。この時、管の曲げ角には弾性変形も含めてある。なお供試体の端部は鋼板を溶接し密閉している。供試体内部の水圧は試験実施中、表-3に示す一定圧力が維持できるようにジャッキで調整している。その結果、膨張圧 7MPa が作用する継手では曲げ角 2° までは、水圧 20MPa が作用しても漏水は生じないことが確認された。

5. 現場施工実験

膨張モルタル注入式耐圧性鋼管継手工法の実際の施工例を示す。施工現場は工業埋立地であり、工場からの下水道排水の継手（3カ所）を本工法で接続した。施工供試体を図-11に、注入した膨張モルタルの配合を表-2（配合

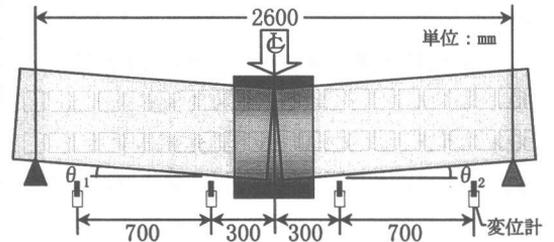


図-10 曲げ漏水試験

表-3 曲げ漏水試験結果

| 載荷荷重 (kN) | 曲げ角 $\theta_1 + \theta_2$ (°) | 水圧 (MPa) | 漏水 |
|-----------|-------------------------------|----------|----|
| 0 | 0 | 0 | 無 |
| | | 5 | |
| | | 10 | |
| | | 15 | |
| | | 20 | |
| 85 | 1.02 | 0 | 無 |
| | | 5 | |
| | | 10 | |
| | | 15 | |
| | | 20 | |
| 100 | 2.07 | 0 | 無 |
| | | 10 | |
| | | 15 | |
| | | 20 | |
| 100 | 3.01 | 0 | 無 |
| | | 10 | 有 |
| 102 | 3.85 | 0 | 有 |
| | | 10 | 有 |
| 105 | 3.98 | 0 | 有 |
| | | 10 | 有 |

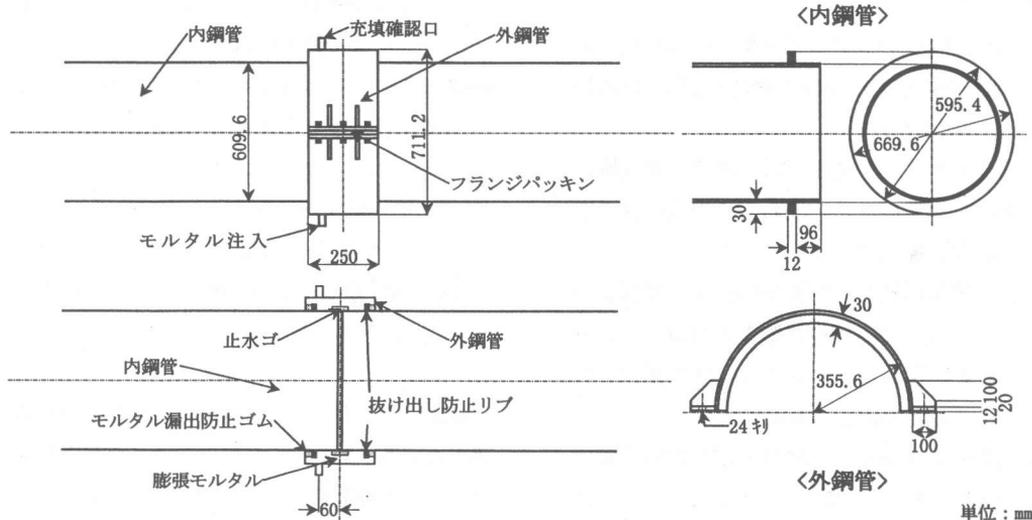


図-11 現場施工実験用鋼管寸法

②) に示す。

鋼管埋設用の掘削溝の深さを 2m とし底部の幅を 1.5m とした。接合部に仮支承を設置し、地盤と鋼管との間に 30 cm の作業空間を設けた。継手施工には内鋼管の突き合わせ部分を止水ゴム (JIS K 6353 SBR, 硬度 50) で覆い、注入モルタルの管内部への漏れを防止した。内鋼管連結部分を覆うように 2 つの外鋼管をスパナを用いボルト接合した (写真-1)。この時、完全に密着するようにボルト接合部分にパッキンを挟んだ。外鋼管の端部では 2 mm 程度の隙間が開くが、シリコン樹脂でコーティングしモルタルの漏出を防いだ。掘り下げた地盤底部には前日の降雨により深さ 30 cm の水溜まりができていたが、これら一連の作業の実施に影響はなかった。接合に要した作業時間の合計は 10 分程度 (作業人数 4 人) であり、容易に終了した。

膨張モルタルは地上でハンドミキサーを使用して練混ぜ、J ロート流下時間 14.4s を確認後、外鋼管底部に設けた注入口からホースの圧力差を利用して注入した。外鋼管上部の口からモルタルが溢れることで充填を確認し、注入を完了した。作業状況を写真-2 に示す。注入時間は 3 ~ 4 分間であり、外鋼管のセット時間を足して合計 14 分程度であった。

6. まとめ

以上、膨張モルタル注入式耐圧性鋼管継手工法の実用化に関する実験的検討から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 注入モルタルの膨張圧は、鋼管が弾性域にあれば鋼管の寸法に関わらず膨張材量の増加に伴い線形的に増大する。
- (2) 同一膨張材量での膨張圧の発現は膨張モルタルを注入する鋼管の隙間の広さ δ と管厚 t および管径 D から剛比 $\delta \cdot t / D$ を算出すればその値に比例して大きくなる。
- (3) 内鋼管の座屈を防ぐには外鋼管の降伏膨張圧を内鋼管より 30% 以上小さくしておく必要がある。

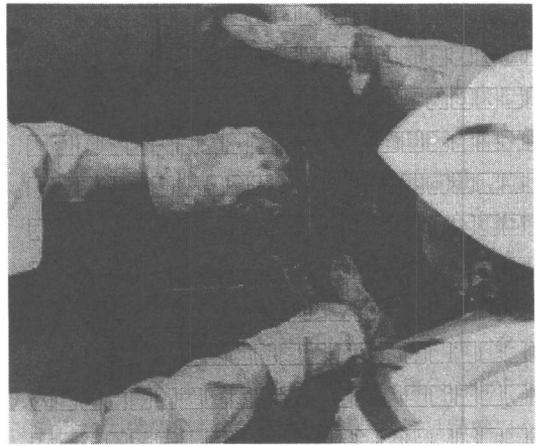


写真-1 外鋼管接合状況

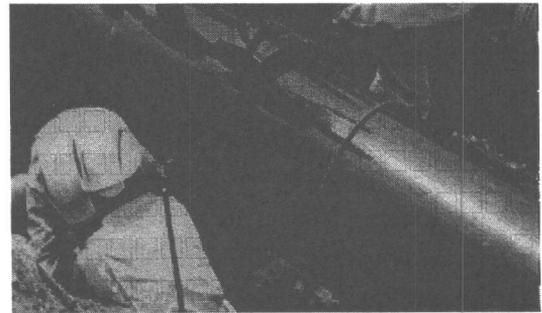


写真-2 モルタル注入状況

- (4) 継手部の付着強度は注入モルタルの膨張圧に比例し、軸方向接合耐力は膨張圧から算出できる。
- (5) 膨張モルタル注入後、掘削溝の埋め戻し作業などで継手部にすべりが生じても、以降の膨張反応で耐力は回復する。
- (6) 膨張圧 7MPa 程度で接合した継手部は水圧 20MPa 作用下で曲げ角 2° まで漏水は生じない。
- (7) 本工法の施工性は極めて良好であり、4 人で 1 つの継手を完成させるのに要した時間は外鋼管のセットから膨張モルタルの注入完了まで 14 分程度であった。

【謝辞】本報告は新日本製鐵株式会社との共同研究の成果であり、柿崎稔氏をはじめ御協力頂いた諸氏に謝意を表する。