

技術論文

オンライン窪み成形技術による小口径ディンプル鋼管の開発

Development of Small Pipe with Dimples by Dent-forming through Hot Rolling Mills

妙中 真治*
Shinji TAENAKA

茂手木 優輝
Yuki MOTEGI

寺田 好男
Yoshio TERADA

山本 和人
Kazuto YAMAMOTO

大沢 隆
Takashi OHSAWA

榎本 邦広
Kunihiro ENOMOTO

高木 優任
Masahide TAKAGI

抄 録

新日鉄住金(株)は、熱間での造管プロセスラインを活用することにより、鋼管表面に自在に窪みを成形するオンライン窪み成形技術を開発し、2006年より小口径の窪みつき鋼管の製造を開始した。この小口径鋼管は、地盤改良工法や山岳トンネル地山補強工法において、ソイルセメントやグラウトなどセメント系材料との高い付着性能を発揮することで、コストダウン、工期短縮および構造物の信頼性向上などのメリットを生み出すことが可能となる。オンライン窪み成形技術やその製品群を概説するとともに、構造耐力にも考慮し新たに開発したディンプル鋼管の特長とその構造、付着性能について報告した。

Abstract

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has been developed dent-forming techniques in the hot rolling mills, making the small pipes with flexible depressions on the surface. Utilizing the dent-forming techniques, a special small pipe to improve the bond strength with cement materials such as soil-cement and grout has been provided since 2006. This special pipe can reduce construction cost and period by improving structural stabilities based on the high bond strength. This article introduces the dent-forming techniques and the productions briefly, and then focuses on a newly developed small pipe with dimples on the surface. The features and structural performance of the small pipe are explained.

1. 緒 言

住宅や低層建築物を対象とした地盤改良や基礎、都市部の狭隘地における杭工事や山岳トンネル工事など、施工する空間や工期などが制約される環境において、小口径の鋼管を活用した各種工法が開発されている。新日鉄住金(株)は熱間での造管プロセスラインを活用することにより、鋼管表面に自在に窪みを成形する技術を開発し、ソイルセメントやグラウトなどのセメント系材料に適した特殊な形状の小口径鋼管の開発、実用化に成功した。2006年から製造を開始している段付き鋼管は、鋼管の長手方向に一定間隔で成形された窪み(段)によりセメント系材料との付着耐力を向上させており、柱状地盤改良の芯材や山岳トンネルの補助工分野で実績を積み上げてきている。本報告では、これらの特殊形状の小口径鋼管の製造を可能としたオンライン窪み成形技術に関して概説するとともに、2012年より新たに商品化したディンプル鋼管の特徴と、要求性能にお

ける性能試験結果について報告する。

2. 新日鉄住金のオンライン窪み成形技術

鋼管の製造方法は、①鋼板または帯鋼を管状に成形し、その継手を溶接して製造する溶接鋼管と、②丸または角断面の鋼片や鋼塊を用いて継目なく製造するシームレス鋼管とに大別される。さらに鋼管の成形温度により、これらの鋼管の製造プロセスは、熱間製造プロセスと冷間製造プロセスに区分される。

新日鉄住金のオンライン窪み成形技術は、鍛接鋼管やシームレス鋼管に代表される熱間製造プロセスの特徴を活かしている。窪み成形技術で用いられるのは、鍛接鋼管の製造プロセスである連続成形方式とシームレス鋼管の製造方法の一つであるマンネスマン圧延方式である。ここでは連続成形方式である鍛接鋼管の製造方法を例としてオンライン窪み成形技術について概説する。図1は鍛接鋼管の製造プロセスにおける成形および鍛接部を模式的に示したも

* 鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

のである。まず素材である帯鋼は連続成形を行うために前処理にて複数の帯鋼が長手方向に溶接にて接続される。つぎにトンネル式加熱炉で約 1300℃程度に加熱され、その後、成形、接合、外径絞りが行われる。所定のサイズに成形された鋼管は、所定の長さに切断された後、冷却床にて常温まで冷却される。

オンライン窪み成形技術は、鍛接鋼管やシームレス鋼管の製造プロセスにおいて、ロールに凸形状の突起を設けることにより、鋼管に凹み（窪み）形状を転写し、鋼管表面に自在に窪みを成形することを可能とした（図2）。類似の技術としては、リブ鋼板や異形鉄筋のようにロールに溝加工を施し、圧延時に該溝へ鋼材を充填させることで、鋼材表面に突起（凸部）を成形する方式がある²⁾。しかし中空断面の鋼管では、鋼材は溝部に充填せず、半径方向（鋼管中心方向）へ逃げてしまうため、鋼材表面を成形できないという特有の課題があった。本技術の開発にあたっては、性能が十分に発揮可能であることを確認した上で、従来のような突起成形に替えて窪み成形を選択することにより、製造上の課題を解消する発想の転換がある。

鋼管分野ではプレス方式や多段スタンドを使用した冷間ロールフォーミングによって異形断面をもつ鋼管の製造が行われている¹⁾。しかしながら、これらの製品は長手方向に同一な断面形状であることが基本である。本オンライン窪み成形技術は、長手方向に不連続な断面成形に成功する

とともに連続断面、不連続断面を自由に選択することが可能である。また、本オンライン窪み成形技術は、熱間プロセスを活用することにより大きな断面変形を少スタンドで行うことが可能であり、多数のロールを購入することによるコストアップを抑制するとともに、オンラインで成形することにより安価製造を可能とする。

3. オンライン窪み成形技術を活用した製品群

オンライン窪み成形技術を確立したことにより、非常にユニークな形状の鋼管をミルエンド商品として提供することが可能となった。図3に段付き鋼管、斜め段付き鋼管、ディンプル鋼管の窪み配置例を示す。

段付き鋼管（図3上段）では窪みは一定の間隔で鋼管長手方向に規則的に配置されている。これらの窪みは、斜め段付き鋼管（図3中段）のように鋼管軸方向に対して角度をもって配置することも可能であり、かつ、その窪み形状や配置ピッチも自在に制御することが可能である。このように成形された窪みは、その窪みにセメント系材料が十分に充填されることで、非常に高い付着性能を発揮することが可能である。段付き鋼管はすでに住宅向けの柱状地盤改良の芯材として多くの実績を保有している（図4）。山岳トンネル向け脚部補強⁴⁾などでは、段付き鋼管の高い付着力により従来の鋼管による補強に比べて打設長さを短くできるため、コストダウンや工期短縮といったメリットを生み出すことが可能である（図5⁵⁾。

一方、ディンプル鋼管（図3の最下段）では、段付き鋼管に比較して窪みは浅く、かつ小さく成形されており、更に鋼管軸方向のみならず周方向にも規則的に配置されている。段付き鋼管と比べると明らかに表面形状が異なる鋼管であることがわかる。

このように開発したオンライン窪み成形技術は、窪み自体の大きさや深さ、窪み自体の配置などを自在に制御することが可能であり、ユーザーニーズに応じて多様な鋼管を提供することが可能である。

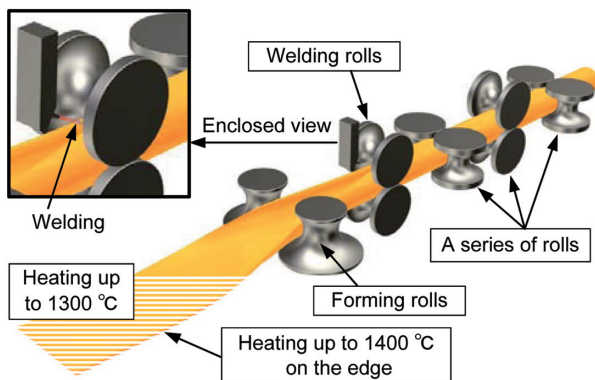


図1 鍛接鋼管製造方法の模式図

Schematic drawing of the production process for butt-welded pipes

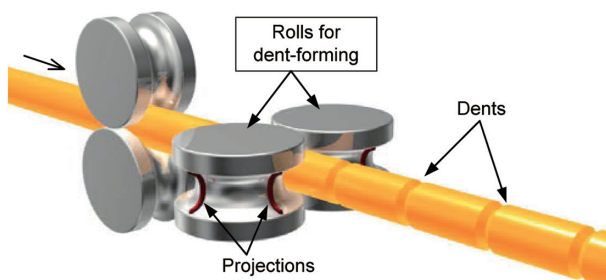


図2 鋼管表面への窪み成形方法の模式図

Schematic drawing of dent-forming on a pipe surface

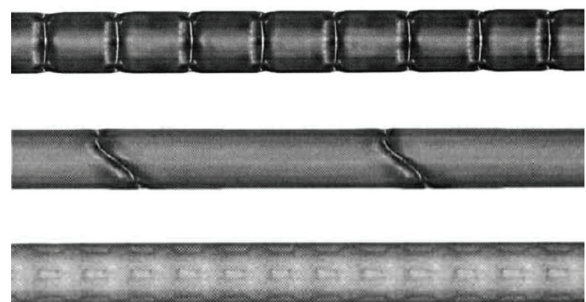


図3 窪み付き鋼管の例

上段：段付き鋼管、中段：斜め段付き鋼管、下段：ディンプル鋼管

Examples of a small dent-formed pipe
From top: Grooved pipe, Oblique grooved pipe and Dimple pipe



図4 住宅向け地盤改良での適用例

Example of applications for ground improvement using small pipes

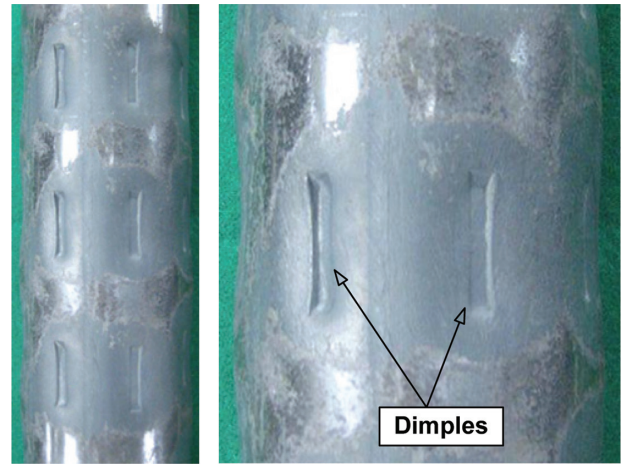


図6 ディンプル鋼管

Dimple pipe (pipe with dimples on the surface)



図5 段付き鋼管と掘削ビットおよび脚部補強施工状況⁵⁾
Oblique grooved pipes (right) and construction process of the foot piles

4. ディンプル鋼管

4.1 ニーズの多様化とディンプル仕様

小規模建築物の柱状地盤改良体の芯材として開発された段付き鋼管は、溶接加工などを必要とせず高い付着性能を発揮できることから多様な構造物への適用が検討された。先に紹介した山岳トンネル向け脚部補強は、その一例である。しかしながら、一方で構造耐力面での改良ニーズも同時に高まってきた^{6,7)}。

オンライン窪み成形技術により成形された鋼管は、ミルエンドにおいて既に初期不整としての窪み変形を有しており、この窪みが鋼管自体の構造耐力に与える影響が懸念される。つまり窪みが鋼管に成形された場合、鋼管は窪みを起点として早期に座屈することが懸念される。窪みの配置は付着性能を格段に高める一方で、構造耐力を低下させる危険性を伴う。

そこで、鋼管の引張・圧縮耐力も同時に高めたいというユーザーニーズに応える形で、新日鐵住金は構造耐力を低下させる危険性を回避し、鋼管自体が有する構造耐力を引き出すため、窪み形状の最適化検討を進めた結果、図6に

示すディンプル鋼管の開発に成功した^{8,9)}。ディンプル鋼管に配置される窪みは、幅3~4mmで長さ約20mmの長方形形状であり、平均窪み深さは約2.3mmである。本窪みは鋼管径76.3mmの場合には、周方向へ8個、軸方向には25mm間隔で配置されている。窪み配置は対象とする鋼管径に応じて変化する、また適用条件に応じて変更することも可能である。

4.2 ディンプル鋼管の構造性能

ディンプル鋼管の構造性能において、最も懸念されるのは窪み成形による座屈耐力の低下である。特に窪みが多数配置されるときに耐力低下の懸念があることから、性能評価では鋼管径76.3mmを対象に、周方向へ8個、軸方向には25mm間隔で配置したものを対象とした。

まず窪み成形が局部座屈に与える影響に着目した短柱圧縮試験を実施し、窪みのない通常鋼管と比較した結果を図7に示す。グラフは縦軸に作用圧縮応力を材料降伏強度で無次元化しており、横軸は試験体長さで無次元化した軸方向ひずみであらわしている。板厚3.2mmでは比較的薄肉の鋼管のため、最大荷重後に急激な耐力低下がみられるが、板厚4.5mmの場合は急激な低下は発生せず、十分な変形性能を有していることが本結果からわかる。図8には板厚3.2mmを対象に最大荷重後の破壊形態を示す。図7に参考に示した通常鋼管の場合と比較すると、荷重-変位関係はかなり異なるが、いずれの板厚でも材料降伏強度を超過する圧縮耐力を有していることが確認され、窪みによる圧縮耐力の低下は無視できる程度であることが確認された。

四点曲げ試験による曲げ性能評価も実施しており、その結果を図9に示す。対象とした鋼管は短柱圧縮試験と同様に窪みを配置した鋼管径76.3mmのディンプル鋼管であり、板厚は4.7mmである。荷重-変位関係から明らかのように最大耐力が僅かに低下しているが、通常鋼管と比較して十分な曲げ性能を有することが確認される。

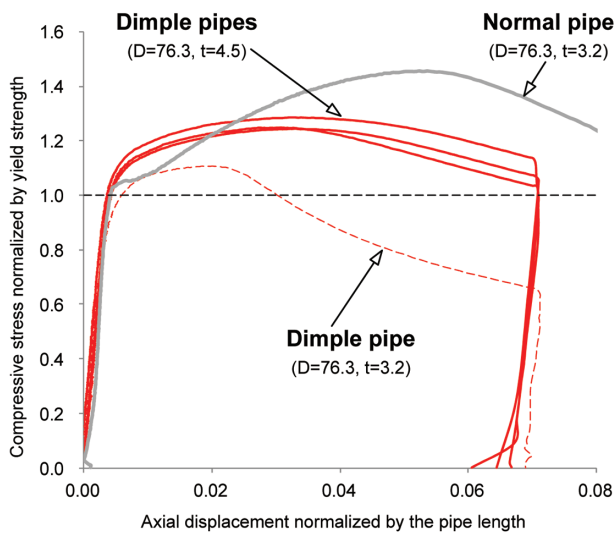


図7 短柱圧縮試験結果
Result from compressive tests for short tubes

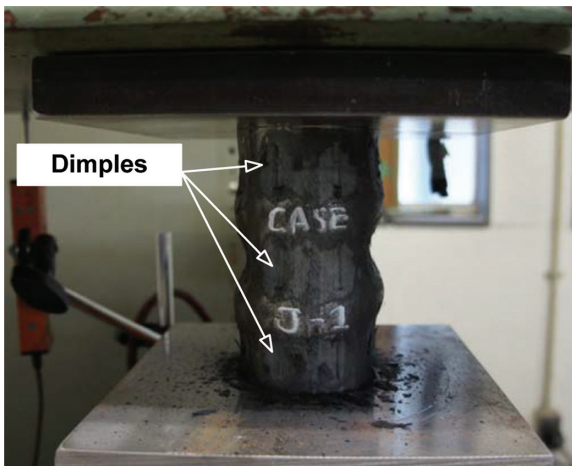


図8 短柱圧縮試験状況（最大荷重時）
Deformation photo at the ultimate loads

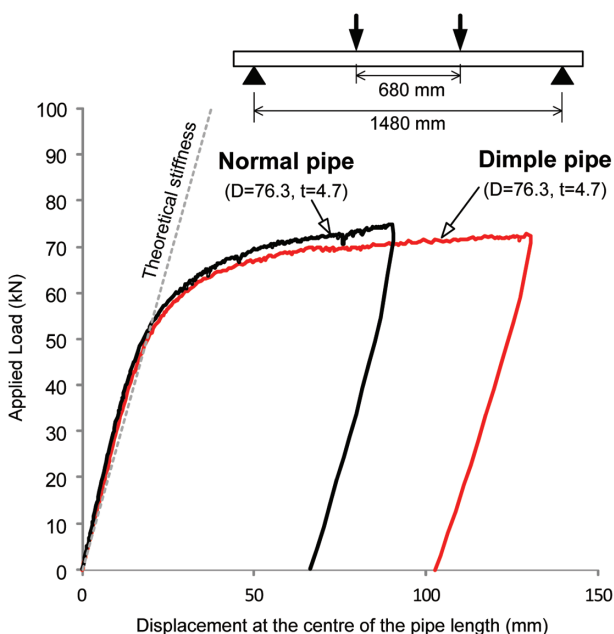


図9 曲げ試験結果
Result from the four-point bending tests

4.3 ディンプル鋼管の付着性能

ディンプル鋼管の適用先は、柱状地盤改良や山岳トンネル補強、斜面補強に代表される地盤の補強構造が中心となる。本分野では付着強度の確保のため、鋼管表面に突起を溶接加工した鋼管が従来から用いられてきた^{6,7)}。

実験に際しては、地盤はその強度や剛性が応力レベルに強く依存することが知られており、この境界条件を考慮することが非常に重要である¹⁰⁾。そのためディンプル鋼管とセメント系材料の付着強度も周辺地盤における拘束条件に応じて変化するため、実験に際しては、地盤剛性における拘束条件を考慮する必要がある。

そのため、試験体となるディンプル鋼管など試験管材を中央に配置し、その周囲に別の型枠用の管材を準備し、二つの管材の間にソイルセメントあるいはモルタルを充填した試験体を準備した。周辺地盤の拘束による剛性条件の定式化は基礎杭¹¹⁾や地盤定着部材¹²⁾に対して既に提案されているため、地盤の剛性条件と型枠用の管材の構造的な内圧による剛性ばねを相関させることにより、要求される使用条件に応じた付着性能を評価することが可能となる。本試験では、型枠用の管材は拘束条件の影響を調査するために、鋼管(径 216.3mm, 板厚 5.8mm)と塩化ビニルパイプ(径 216.3mm, 板厚 10.3mm)の2種を準備し、それぞれ拘束が強い場合と比較的に低い場合を模擬した。尚、拘束の低い場合の径厚比は約 20 であり、これは D 級地盤と同程度の拘束効果となる^{6,7)}。

付着試験における試験体は、構造性能評価と同様に鋼管径 76.3mm で窪みを周方向へ 8 個、軸方向には 25mm 間隔で配置したものを対象とした。また比較材として窪みのない通常鋼管(鋼管径 76.3mm)とともに鉄筋 D51 を準備した。試験は、図 10 に示すように型枠用管材および充填材の下端を支持した上で、試験鋼管頭部に下向きの荷重を載荷する押し抜き試験として実施した。対象とする構造、工法により使用されるセメント系材料強度が大きく異なることが想定されるため、対象材は 2～5MPa のソイルセメントと、20MPa および 36MPa 程度のモルタル材料と広い強度レベルを対象としている。

まず拘束の強い条件として鋼管を型枠管材として用い、強度 36MPa のグラウト材を対象とした場合の 3 種の試験材の付着試験結果を図 11 に示す。窪みのない通常鋼管は付着強度が低く、ピーク荷重後に滑り破壊を起こすことが確認される。鉄筋 D51 はディンプル鋼管よりも高い付着強度を示すものの、ピーク荷重後は耐力低下が大きく脆性的な破壊モードを示す。これに対してディンプル鋼管は、最大付着強度は鉄筋よりも低いものの、最大付着強度後の耐力低下は殆ど生じず、極めて安定性の高い付着性能を示すことが確認される。

図 12 に、対象材の一軸圧縮強度と、この付着試験から得られた最大耐力を整理した(上図が全体試験結果であり、

下図がソイルセメント強度レンジの拡大図)。尚、縦軸は鋼管単位長さあたりの付着耐力として示している。まず、明らかに通常鋼管と比較して、ディンプル鋼管が非常に大きな付着耐力を発揮していることが確認される。また通常鋼管の付着耐力は、対象材の強度が上昇しても大きくは改善されていない。一方、ディンプル鋼管では、対象材の強度に応じて大きく付着耐力の向上が見られる結果となった。単純に比較すれば、ディンプル鋼管の付着耐力は、通常鋼管の約3倍から、約7倍以上まで向上することとなる。本改善比率は、鋼管に長さ1mあたりに4箇所(25cmピッチ)で突起を設けた既往の試験結果^{6,7)}と比較しても、突起付き鋼管と同等以上の付着耐力の改善効果を示していることが確認される。

図13には押し抜き試験後に引き抜いた試験体の窪み表

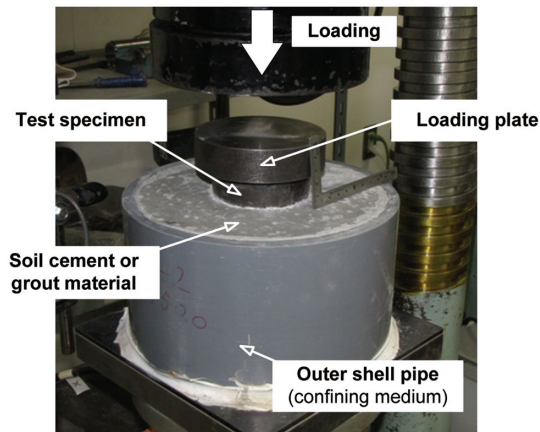


図10 付着試験の状況

Photo of the bonding tests under the downward punching load

面を観察した結果を示す。ここでは代表例として、セメントモルタル2MPaの場合とモルタル強度が約36MPaのものを示す。写真からわかるように、長方形の窪み部分に対象材が入り込み、これにより図12に示した高い付着耐力が発揮されていると推測される。

4.4 ディンプル鋼管に関するまとめ

以上のように、オンライン窪み成形技術を利用して表面に窪みを施したディンプル鋼管は、窪みのない通常鋼管と同等レベルの構造性能を担保することが確認された。更に、窪みが小さいにも関わらず、利用されるセメント系材料が窪みに充填され一体化が図られることにより、非常に高い付着性能も同時に発揮されることが確認された。従来の突

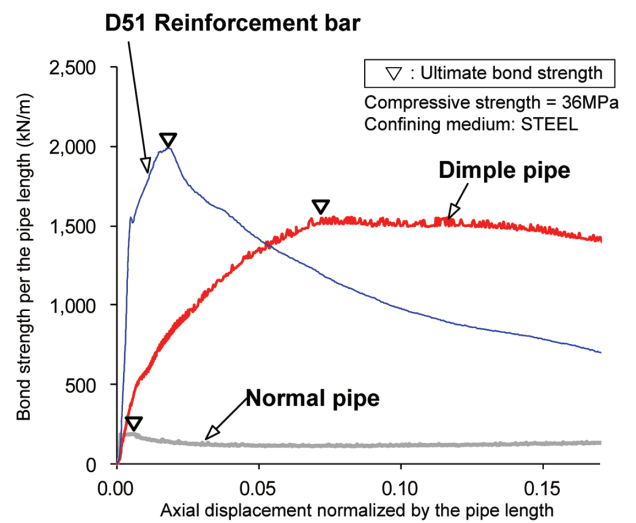


図11 付着試験における付着強度 - 変形関係 Load-displacement curves in the bonding tests

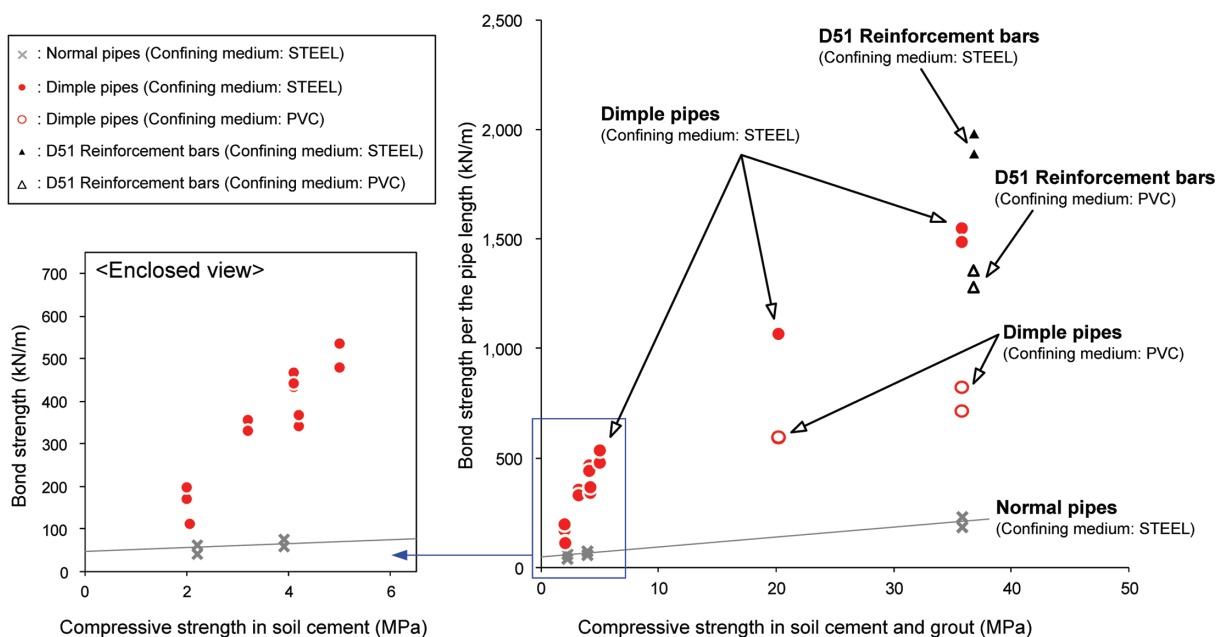


図12 対象材の強度と付着耐力の関係

Relationship between compressive strength of the cement materials and the bond strength on the outer surface of the pipes



図13 押し抜き試験後の窪み表面
(左：ソイルセメント (2MPa) 右：モルタル (36MPa))
Observation on the outer surface of test pipes after bonding tests (left: soil-cement of 2 MPa; right: mortar of 36 MPa)



図14 ソーラーパネルでの適用例写真
Example of applications for foundations of the solar systems

起付き鋼管と比較すると、後溶接加工が必要なく、高い付着性能を発揮できることが特長となる。本試験では鋼管径76.3mmを対象としたが、適用構造に応じて多様な鋼管仕様(径、板厚)を基に、窪み個数の最適化などを図ることが可能である。

図14には既にも実績のあるソーラーパネルの基礎適用を示す。付着性能に加えて、構造性能を改善できたことにより、図に示すように杭-柱部材としての適用範囲が広がりつつある。また、これまでの柱状改良体や山岳トンネルの脚部補強に限定されず、図15に示すような基礎補強におけるマイクロパイルや斜面補強、山岳トンネルにおける鏡補強など、類似構造・工法への適用によりメリットが期待される。

5. 結 言

新日鐵住金は、鋼管の熱間プロセスを活用した独自のオンライン窪み成形技術を開発し、特にセメント系材料との付着強度を高める窪み付き鋼管を製品化した。窪み形状は適用先に応じて、自在に制御可能であり、付着耐力や構造耐力を改善した小口径鋼管を提供することにより、住宅や

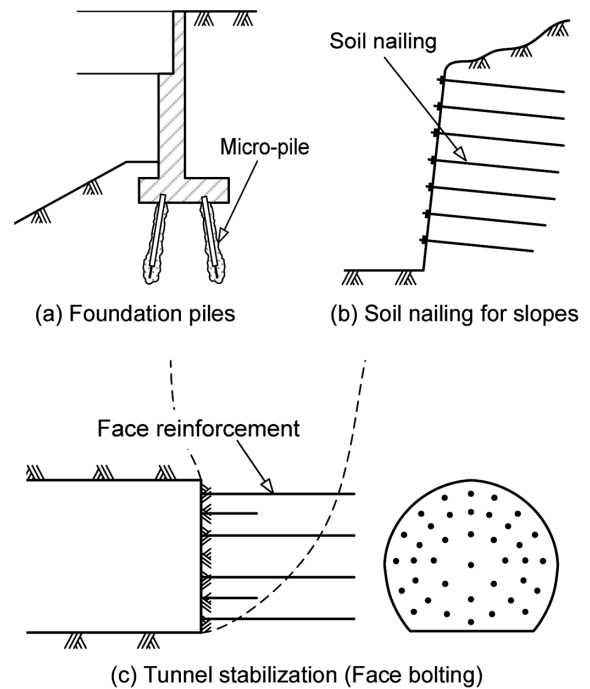


図15 付着性能を有する小口径鋼管の適用先
(a) 基礎杭への適用 (b) 斜面安定工への適用 (c) 山岳トンネル補強工への適用 (鏡補強)
Applications of small steel pipes with high bond strength

低層建築物を対象とした地盤改良や基礎、都市部の狭隘地における杭工事や山岳トンネル工事など、施工する空間や工期などが制約される環境において、各種工法・構造の技術改善が可能であると考えている。

参照文献

- 1) 桐本武志：第171, 172回西山記念技術講座 鋼管の主要製品と製造法概論. 日本鉄鋼協会, 1999
- 2) 松村弘道 ほか：鉄と鋼. 76(8), 75(1990)
- 3) 木内学 ほか：第77回ロールフォーミング分科会, 2008
- 4) 日経コンストラクション. 2009年12月11日号, p.27
- 5) 株式会社大林組ホームページ
<http://www.obayashi.co.jp/press/news20091027>
- 6) 高橋佳孝 ほか：トンネル工学報告集. 65, 123-128(2010)
- 7) 木梨秀雄 ほか：トンネルと地下. 504(43), 645-654(2012)
- 8) Taenaka, S. et al.: Proceedings of State of the Art of Pile Foundation and Pile Case Histories (PILE2013). Indonesia, 2013-6, G2-1
- 9) 妙中真治 ほか：第48回地盤工学研究発表会. 富山, 2013-7, No.747, 1493-1494, 社団法人地盤工学会
- 10) Salgado, R. et al.: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 124(9), 878-888(1998)
- 11) Airey, D.W. et al.: Geotechnical Testing Journal. ASTM, 15(4), 388-392(1992)
- 12) Hyett, A.J.: International of Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts. 29(5), 503-524(1992)



妙中真治 Shinji TAENAKA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



大沢 隆 Takashi OHSAWA
鋼管技術部 鋼管技術室長



茂手木優輝 Yuki MOTEGI
君津製鉄所 鋼管部 小径管工場
小径管課長



榎本邦広 Kunihiko ENOMOTO
君津製鉄所 品質管理部 小径管管理室
主査



寺田好男 Yoshio TERADA
鋼管技術部 メカニカル・配管商品技術室
主幹 博士(工学)



高木優任 Masahide TAKAGI
建材開発技術部 橋梁開発技術室
主幹 博士(工学)



山本和人 Kazuto YAMAMOTO
大分製鉄所 光鋼管部 主幹