

技術論文

鋼矢板と鋼管杭を組み合わせた新しい鋼製壁体 “コンビジャイロ工法®”の開発

Development of New Steel Wall, “Combi-Gyro Method”, Combined Steel Sheet Piles with Steel Pipe Piles

永尾直也*
Naoya NAGAO

藤原覚太
Kakuta FUJIWARA

田中宏征
Hiroyuki TANAKA

原田典佳
Noriyoshi HARATA

抄 録

コンビジャイロ工法®は、止水性に優れたハット形鋼矢板と剛性の高い鋼管杭を組み合わせた新しい鋼製壁体工法である。これにより、従来では鋼材のコスト競争力の低かった小径の鋼管矢板の剛性領域で合理的な構造の提供が可能となった。施工は、ハット形鋼矢板専用の圧入機をベースとして、鋼矢板と鋼管杭が1台で施工可能な新型の機械を用いる。新型施工機械による施工性確認試験及び実大掘削試験の結果と、これらを通じて構築したコンビジャイロ工法の設計・施工方法について述べた。

Abstract

Combi-Gyro Method is a new technology of steel wall combined steel sheet piles with steel pipe piles. It is expected to increase the cost competitiveness of steel wall. By a new construction equipment based on a press-in machine for exclusive construct of Hat-type sheet pile, steel sheet piles and the steel pipe piles can be constructed with one machine. A construction test was carried out with the new construction equipment. And a true size digging examination was carried out to inspect the validity of the design method.

1. はじめに

鋼矢板は優れた施工性、経済性から、本設構造物としての港湾工事、河川工事等に、仮設構造物としての土留め壁、止水壁等の壁体構造物に幅広く用いられてきた。また、鋼矢板を超える大きな剛性が必要となる大深度掘削の仮設土留め壁や、壁高の大きな河川護岸、港湾岸壁等については、鋼管矢板が用いられてきた。鋼管矢板は、鋼矢板に比べて大きな剛性・耐力を確保できるが、鋼管矢板は嵌合用の継手を溶接加工により取り付けるため、鋼管径 800mm 程度以下の小さな径になると施工延長あたりの継手の本数が増加して加工費が嵩み、コンクリート製の壁体等の他工法に比べてコスト競争力で劣る場合があった。

そこで、より経済的な鋼製壁体の構築を可能とする“コンビジャイロ工法®”を開発した。本工法は、単一圧延材で世界最大幅の“ハット形鋼矢板”¹⁾と高い剛性を有する鋼管杭を組み合わせ、さらに施工方法についても鋼矢板圧入工法と鋼管杭回転圧入工法“ジャイロプレス工法®”²⁾を組み合わせることで実現した新しい鋼製壁体工法である。

本報では、鋼材の適用領域の拡大が期待できるコンビジャイロ工法の性能検証を目的とした主要な研究成果として、新型施工機械による施工性確認試験及び実大掘削試験の結果を示し、その施工方法及び構築された壁体の設計方法を紹介する。

2. 工法概要

2.1 壁体断面構造

コンビジャイロ工法の断面形状例を図1に示す。鋼矢板壁の凹部分に鋼管杭が入り込む組み合わせの壁体となっており、優れた止水性を有するハット形鋼矢板に土砂流出防

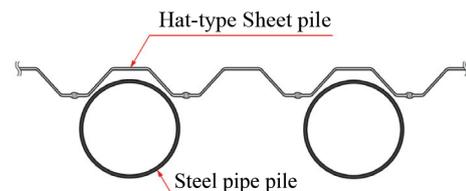


図1 コンビジャイロ工法の壁体構造の断面形状例
Cross-section of wall made by Combi-Gyro Method

* 建材事業部 建材開発技術部 土基礎建材技術第二室 主幹 東京都千代田区丸の内 2-6-1 〒100-8071

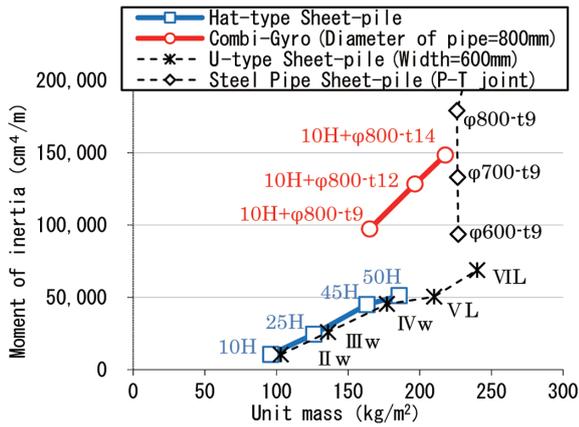


図2 鋼材重量と断面性能の関係

Relationship between steel weight and sectional performance

止等の継手の機能を持たせて、鋼管杭に土圧及び水圧に抵抗する機能を持たせる。なお、コンビジャイロ工法の鋼管のピッチは、施工上、任意に設定可能であるが、鋼管の設置間隔を飛ばしすぎると、壁体の剛性の均一性がなくなるため、ハット形鋼矢板2枚に対して鋼管1本を配置することを標準としている。

鋼矢板、鋼管矢板、及びコンビジャイロ工法によって構築した壁体の鋼材重量と断面性能との関係を図2に示す。ここでは、コンビジャイロ工法の剛性は鋼管のみで評価するものとし、鋼管の外径は800mm、鋼矢板はSP-10Hを用いて、長さは鋼管杭の7割程度としている。図2より、小径の鋼管矢板の剛性領域に対して、コンビジャイロ工法を適用すると鋼材重量の低減が可能なが分かる。

2.2 コンビジャイロ工法の施工

2.2.1 施工概要

コンビジャイロ工法の施工は、打設済みの鋼矢板から反力を取って地盤内に鋼矢板を順次打設していくハット形鋼矢板専用の圧入機をベースとしている。図3³⁾に示すように施工中に把持装置(チャック)を交換することで、鋼矢板と鋼管杭が1台の機械で施工可能であり、ハット形鋼矢板を地盤に連続して圧入した後、把持装置を鋼管用に交換し、鋼矢板を反力として鋼管杭を回転圧入する工程となる。比較的断面の小さな鋼矢板から反力を取って鋼管杭を圧入するため、鋼矢板が鋼管杭圧入時の反力で抜け上がらないように、貫入効率の高いジャイロプレス工法と同様の回転圧入原理を本工法の鋼管杭施工でも採用している。

2.2.2 施工性確認試験

コンビジャイロ工法の新型機械の施工性を検証するため、実地盤への施工性確認試験を実施した。その状況を写真1に示す。ハット形鋼矢板 SP-10H 長さ(L)=10.0m、鋼管杭 800mm 径×9mm 厚 L=12.0m を用いており、鋼管杭の先端には写真2に示すように回転圧入時の地盤切削の

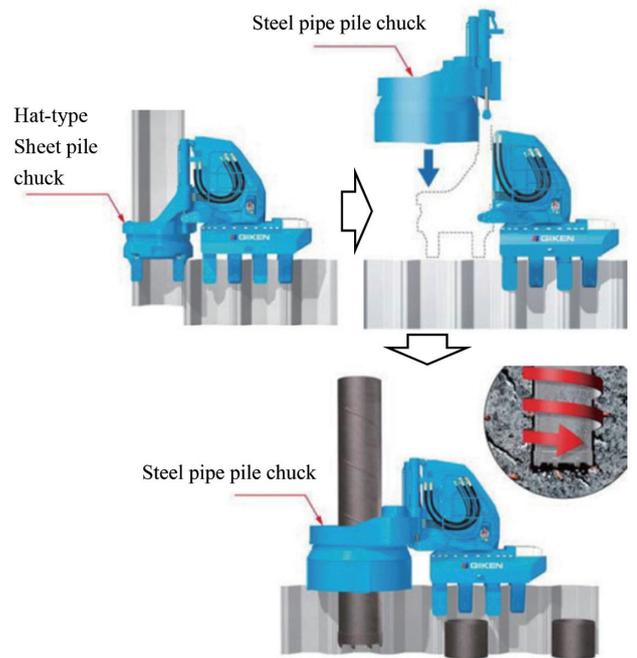


図3 コンビジャイロ工法の施工手順³⁾
Construction process of Combi-Gyro Method



写真1 コンビジャイロ工法の施工性確認試験状況
Construction test of Combi-Gyro Method



写真2 鋼管杭の先端ビット
Bit that was attached to the tip of steel pipe pile

ための先端ビットを取り付けている。鋼管杭の回転圧入時にも反力用として把持した鋼矢板の抜け上がりはなく、また、図4に示すように、最大N値50程度の砂礫地盤に対して、施工中に圧入力、トルクも大幅な上昇は見られず、鋼管杭1本あたりの施工時間は28分と安定して打設可能なことを確認した。

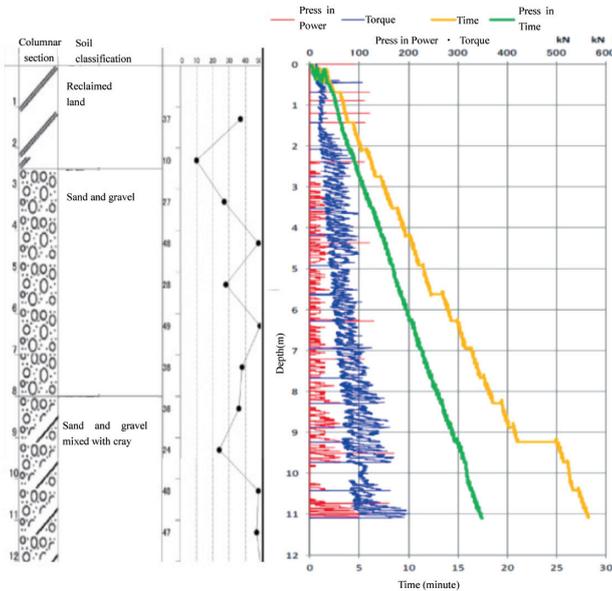


図4 地盤条件と圧入データの関係

Relationship between ground condition and construction data of press-in

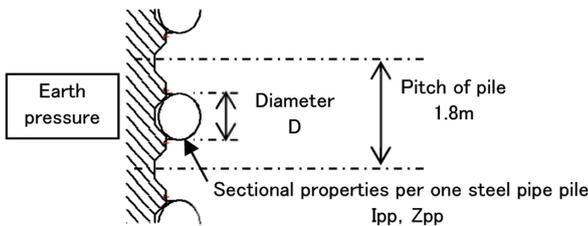


図5 コンビジャイロ工法壁体断面

Cross section of wall by Combi-Gyro Method

3. 設計の考え方

3.1 設計用作用荷重及び応力照査

図5に示すようにコンビジャイロ工法で構築された壁体は、鋼管を前面側（掘削側）に配置することを基本とし、鋼矢板を土圧伝達板として、鋼管杭のみで土圧及び水圧に抵抗するものとして設計する。

ハット形鋼矢板2枚に鋼管杭を1本配列するため、鋼管杭のピッチ1.8mの壁幅分の土圧及び水圧が鋼管1本に作用すると考えることができる。鋼管杭を前面に配置する構造を基本とするが、景観上や被覆防食工法上、前面側に鋼矢板を配置する必要がある場合には、鋼管を背面側に配置した壁体を適用することができる。ただし、このときには鋼矢板と鋼管杭の頭部を互いに鋼板等を用いて連結することが必須となる上、鋼矢板下端の根入れ部分の安定性を検討する必要がある。また、鋼矢板の応力照査は、頭部と設計地盤面によって支えられた単純梁に全ての土圧及び水圧が作用すると見なした断面計算をすることができる。

コンビジャイロ工法の設計計算モデルを図6に示す。上述の通り鋼管杭1本に、鋼管杭のピッチ1.8mの壁幅分の土圧及び水圧が作用すると考え、また、鋼矢板は頭部と設

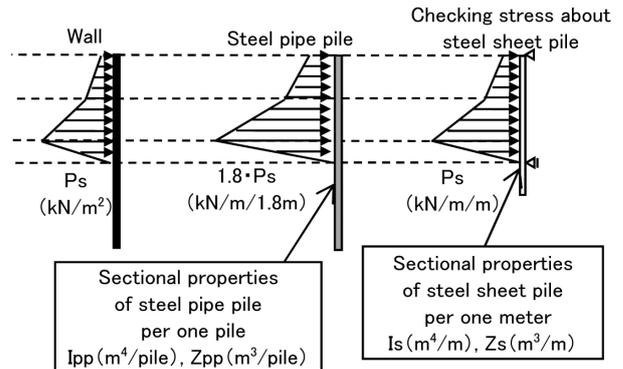


図6 コンビジャイロ工法の設計計算モデル
Design calculation model of Combi-Gyro Method

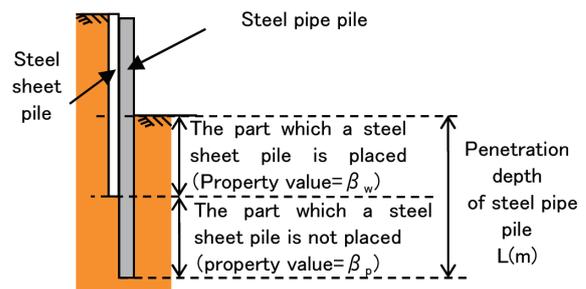


図7 特性値βの考え方
Way of thinking of the property value β

計地盤面によって支えられた単純梁に全ての土圧及び水圧が作用するとしている。

3.2 根入れの考え方

3.2.1 鋼管杭の根入れの考え方

鋼管杭の根入れ長については、通常の鋼矢板壁の設計と同様にチャンの式に基づき算出することができる。チャンの式で設定される杭の特性値βは、作用する水平方向地盤反力から求められる。この時、鋼矢板根入れ部に対しては以下のβ_wが、鋼矢板非根入れ部についてはβ_pが求められる。コンビジャイロ工法の特性値βの考え方を図7に示す。

上記β_w及びβ_pは以下の式によって算出することができる。鋼矢板の根入れ部分は、載荷幅を鋼管のピッチXとし、鋼矢板の非根入れ部分は、載荷幅は鋼管径Dとしている。

$$\beta_w = \sqrt[4]{\frac{k_H X}{4EI_{pp}}} \quad (1) \quad \beta_p = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI_{pp}}} \quad (2)$$

ここで、k_Hは水平方向地盤反力係数、Eは鋼材の弾性係数、I_{pp}は鋼管杭1本あたりの断面二次モーメントである。地中内に半無限長根入れする場合には、根入れ長Lは上記の鋼管杭の特性値を用いて3/β以上とする必要がある。

3.2.2 鋼矢板の根入れ長

鋼管前面側配置の場合は、鋼矢板の下端は前面側に鋼管で支持されるため、主働土圧と受働土圧のつり合い位置などを考慮した上で、ボーリング・ヒービングに必要な長さ

等から根入れ長を検討すれば良い。

4. 実大掘削実験

コンビジャイロ工法で構築した壁体の挙動を把握するために、ハット形鋼矢板 SP-10H と鋼管 800mm 径×9mm 厚とを組み合わせた壁体を二列構築後、二列の壁体の間を地表面から 4.5m の位置まで掘削する実験を実施した。二列の壁体のうち、一方は前面側に鋼管杭を配置して鋼管杭側を掘削し、もう一方は背面側に鋼管杭を配置して鋼矢板側を掘削することとした。ボーリング調査を実施した結果、土質は砂地盤で、掘削面以上の平均 N 値は 14 で、掘削面以下の平均 N 値は 8 であった。また、掘削面近傍で残留水位を計測し、4.5m 掘削時の残留水位は地表面から 1.6m であることを確認した。試験方法の概要を図 8 に、試験状況を写真 3 に示す。鋼管及び鋼矢板のひずみについては、両側の壁中央部において、図 9 に示す場所の鉛直方向のひずみを計測することとし、鋼管のひずみについては壁体の背面・前面両方で計測した。

鋼管を前面、背面に配置したどちらの壁体についても、鋼管杭のみで、作用する土圧、水圧に対して抵抗すると仮定して算出した設計計算結果と、実測により得られたひずみ、変位とを比較する。計算にあたっては、主動土圧と残留水圧の和が受働土圧とつり合う点、所謂仮想地盤面までは土圧及び水圧を考慮し、それ以下は地盤のばね反力が働くとして想定した。また、鋼矢板については、頭部と仮想地盤面で支持された単純梁に上記土圧及び水圧が作用すると仮定して、応力 - ひずみを算出し、ひずみの実測値と比較した。

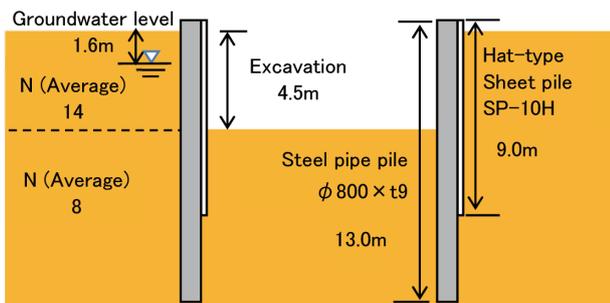


図 8 試験方法概要
Test outline

計算上の土質条件は、湿潤単位体積重量 $\gamma=18\text{kN/m}^3$ 、水中単位体積重量 $\gamma'=9\text{kN/m}^3$ 、壁面摩擦角は $\delta a=15^\circ$ 、 $\delta p=-15^\circ$ と設定し、内部摩擦角 ϕ については、平均 N 値 14 より以下のように算出した。

$$N_1 = \frac{170N}{\sigma'_v + 70} = \frac{170 \cdot 14}{50 + 70} = 19.8 \quad (3)$$

$$\phi = 4.8 \log_e N_1 + 21 = 35$$

ここで、 σ'_v は有効上載圧 (kN/m^2) で、標準貫入試験を実施した時点の値である。

壁体に作用する土圧と水圧を図 10 に示す。根入れ部分の地盤反力係数 k_H は、“災害復旧工事の設計要領”⁴⁾ に準拠すると、以下のように求められる。

$$k_H = 6910 N^{0.406} = 6910 \cdot 8^{0.406} = 16100 \text{ kN/m}^3 \quad (4)$$

ここで、3.2.1 で示す通り、鋼矢板の根入れ部分に対する鋼管杭の特性値 β_w は、載荷幅を鋼管のピッチ 1.8m として以下のように求められる。

$$\beta_w = \sqrt[4]{\frac{k_H X}{4EI_{pp}}} = \sqrt[4]{\frac{16100 \times 1.8}{4 \times 2.0 \times 10^8 \times 1.75 \times 10^{-3}}} = 0.379 \text{ m}^{-1} \quad (5)$$

通常、鋼矢板壁などの設計では、地盤面から $1/\beta$ の範囲の地盤反力が挙動に最も影響を及ぼすため、その部分の平均値を、根入れ部の地盤反力と見なすことが多い。上述した鋼管杭の特性値 β_w に基づく $1/\beta_w$ は 2.64m となり、鋼矢板の根入れ長 3.23m より小さくなる。つまり、仮想地盤面から $1/\beta$ の範囲は、全て鋼矢板根入れ部となっており、その部分の地盤反力が鋼管杭の根入れ部に作用すると見なした。根入れ部の地盤反力の考え方を図 11 に示す。

以上のように計算した計算値と、計測されたひずみ・変位量との比較を図 12 に示す。なお、壁体掘削方向に向かって片持ち梁で発生する方向の曲げひずみを正として記載し

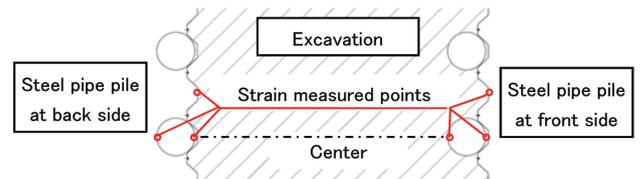


図 9 鋼材のひずみ計測位置
Distortion measurement position of steel materials



写真 3 実大掘削試験状況
Actual excavation test

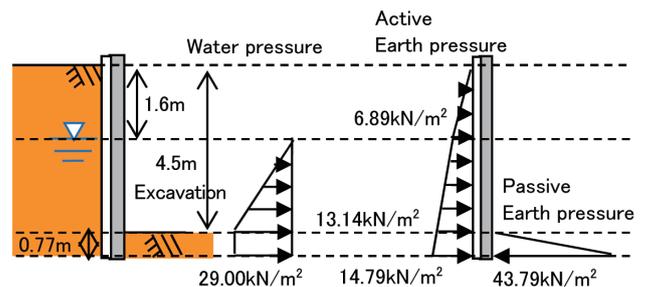


図 10 壁体に作用する土圧と水圧
Earth pressure and the water pressure to act on the wall

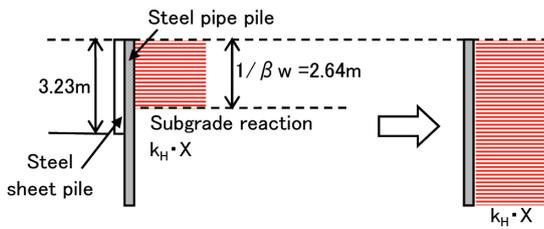
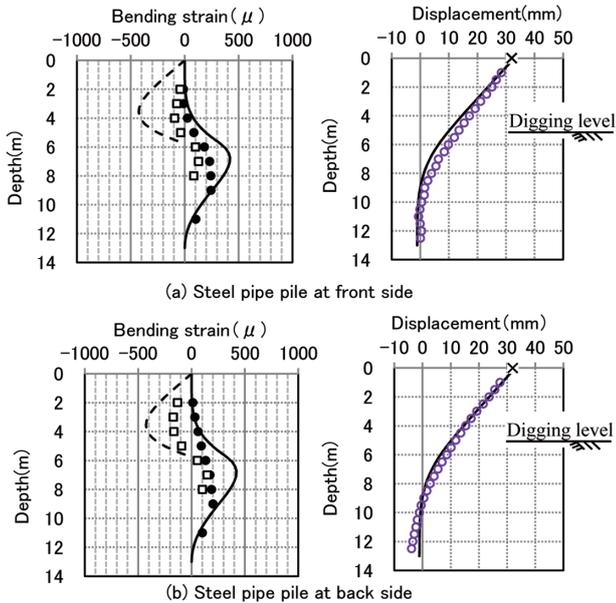


図 11 根入れ部の地盤反力の考え方
Way of thinking of subgrade reaction at penetration depth



	Pipe pile	Sheet pile		Head	×
Actual	●	□	Actual	Inclination	○
Calculated	—	- - - -	Calculated		—

図 12 実測値と設計計算値との曲げひずみ及び変位の比較
Comparison between actual value and design calculated value about bending strain and displacement

ている。また、変位については、頭部変位と鋼管内部の傾斜計の値からそれぞれの点での変位を算出している。

図 12 より、鋼管杭の配置の向きによらず、鋼管杭のみで土圧及び水圧に抵抗すると仮定して計算することで変位をほぼ表現できており、ひずみは実測値に比べて計算値が大きくなっていることが確認できる。ひずみに関しては、計算上、鋼矢板の荷重分担分を無視していることで、計算値が大きくなっているが、安全側の設計となっていると言える。

また、鋼矢板については、掘削面以浅で鋼管と反対向きのひずみが発生しており、頭部と掘削面の間で掘削側にはらみ出すように変形していると考えられる。したがって、頭部と仮想地盤面で支持された梁に土圧及び水圧が作用すると想定することで、掘削面以浅の変形のモードが表現できる。設計計算では、頭部から仮想地盤面を抜き出して単純梁として、全ての土圧及び水圧が作用すると想定することで、鋼矢板に対しても安全側の照査となっていると言

える。

5. おわりに

本報では、鋼矢板と鋼管杭を用いた新しい鋼製壁体コンビジャイロ工法について紹介した。コンビジャイロ工法により、鋼矢板や鋼管矢板などの従来の鋼製壁体では他工法に比べてコスト競争力が低かった領域での、鋼材適用が期待できる。

謝 辞

コンビジャイロ工法は、(株)技研製作所と共同で開発した工法であり、関係者の皆様方には多大なるご指導、ご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 原田典佳, 龍田昌毅, 黒澤辰昭, 西海健二, 妙中真治, 若槻輝行, 三浦洋介, 江田和彦: ハット形鋼矢板 900 の開発. 新日鉄技報. (387), 10-16 (2007)
- 2) 平田尚, 山下久男, 柳悦孝, 石濱吉郎: 都市再生プロジェクトに寄与する新鋼管杭工法の開発. 新日鉄技報. (387), 17-23 (2007)
- 3) 国際圧入学会: 圧入工法設計施工指針. 2015
- 4) (社)全国防災協会: 災害復旧工事の設計要領. 2015.7



永尾直也 Naoya NAGAO
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室 主幹
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



藤原覚太 Kakuta FUJIWARA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部



田中宏征 Hiroyuki TANAKA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第一室長 博士(工学)



原田典佳 Noriyoshi HARATA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室長