

鋼矢板を用いた高性能の合成壁構築技術 J-WALL[®] II の開発

Development of High Performance Composite Wall “J-WALLTM II”

恩田 邦彦 ONDA Kunihiko JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員(副部長)
道野 正嗣 MICHINO Masashi JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部
後藤 宏輔 GOTOH Kohsuke JFE スチール 建材センター 建材開発部 土木技術室

要旨

J-WALL[®] II 工法は、合成構造用鋼矢板(製品名:ビートルパイル)を仮設の土留め壁として利用するとともに、これを地盤掘削後に構築した鉄筋コンクリートと一体化させることにより、薄い壁厚で高剛性・高耐力の地下壁を実現する技術である。圧入施工機によるビートルパイルの打設施工試験により、従来のハット形鋼矢板と比較し、圧入抵抗や施工スピードに違いが無いことを確認した。また、ビートルパイルと後打ち鉄筋コンクリート部との押抜きせん断試験により、シアコネクタ部のせん断耐力評価方法を構築した。さらに実物大の J-WALL II 構造部材の曲げ試験により、壁体が終局限界状態まで一体壁構造(完全合成壁)として設計できることを確認した。

Abstract:

The J-WALLTM II is a construction method that realizes high rigidity and high strength underground wall with a thin wall thickness. Firstly, it utilizes the steel sheet pile (product name: Beetle pile) as temporary soil fastening wall, and then it is integrated with the reinforced concrete part after ground excavation to construct composite underground wall. In order to confirm workability and structural performance of J-WALL II, we conducted investigations and obtained the following results.(1) It was confirmed that there was no difference in press-in resistance and construction speed compared with the conventional hat-type steel sheet pile by the installation test of new steel sheet pile for composite wall “Beetle pile” by the Silent Piler (Press-in Method).(2) Strength of the shear connector part of J-WALL II was confirmed by punching shear test between “Beetle pile” and reinforced concrete part. And the design method of shear connector part was established.(3) By the bending test of the actual J-WALL II structural member, we confirmed that the wall body can be designed as an integral wall structure (complete composite wall) up to the ultimate limit state.

1. はじめに

立体交差や地下構造物における地下車路アプローチ部の U 型擁壁構造部や、レトロフィット工事におけるピット階の地下外壁などの工事では、仮設の土留め壁を構築したのちに本設の地下壁を構築する方法が一般に取られている。しかし建物の間の狭隘地や隣地境界での施工が多く、より狭い空間で地下壁構築を実現する工法が望まれている。J-WALL[®] II 工法は、合成構造用鋼矢板(製品名:ビートルパイル)を仮設の土留め壁として利用するとともに、これを地盤掘削後に構築した鉄筋コンクリートと一体化させることにより、薄い壁厚で高剛性・高耐力の地下壁を実現する技術である。我々は、J-WALL II 工法の性能を確認するため、以下の検討をおこなった。

- ① 圧入施工機によるビートルパイルの打設試験
- ② ビートルパイルと後打ち鉄筋コンクリート部との一体性の

評価

- ③ 実物大 J-WALL II による、構造性能確認のための曲げ試験

2. J-WALL[®] II 工法の特長

J-WALL II 工法は、ビートルパイルを仮設の土留め壁として利用するとともに、これを地盤掘削後に構築した鉄筋コンクリート部と一体化させることにより、高剛性・高耐力の地下壁を実現する技術である(図 1)。ビートルパイルは、ハット形鋼矢板に CT 形鋼と定着用鉄筋が溶接された新しい鋼矢板であり、鉄筋コンクリート部と一体化する際は、CT 形鋼と定着用鉄筋がシアコネクタの機能を発揮する。表 1 にビートルパイルの断面寸法および断面性能を示す。ビートルパイルを構成する鋼矢板にはハット形鋼矢板 JFESP-25H および JFESP-10H を使用する。図 2 にビートルパイルの断面形状を示す。CT 形鋼は既存の低振動・低騒音型の油圧圧入施工機械の掴み構造(チャック)に適合できるよう、フランジ幅 204 mm、ウェブ高さ 106 mm の形状を基本としている。

2018年9月26日受付

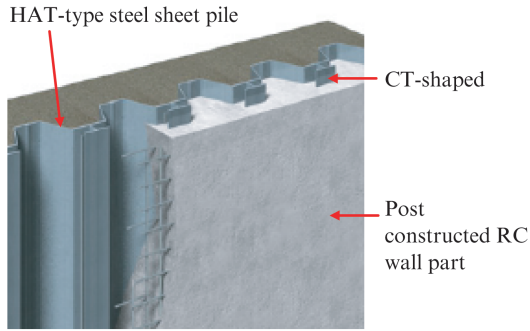


図1 J-WALL[®] II 工法

Fig. 1 J-WALLTM II construction method

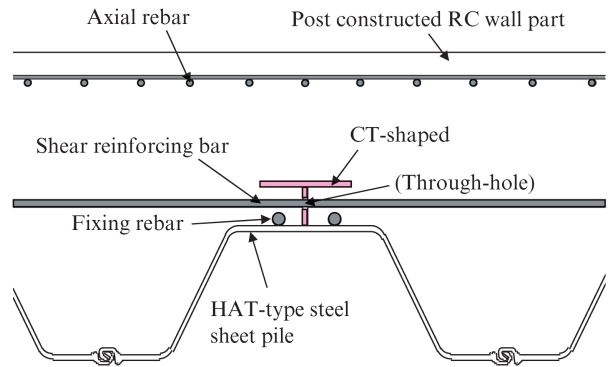


図3 合成構造断面 (例)

Fig. 3 Section of J-WALLTM II

表1 ビートルパイルの断面緒元

Table 1 Cross-sectional performance of the Beetle Pile

Type	Sectional area	Moment of inertia	Section modulus
	cm ²	cm ⁴	cm ³
“B-25H” 【CT-shaped】 + 【JFESP-25H】	192	41 836	2 123
“B-10H” 【CT-shaped】 + 【JFESP-10H】	158	23 158	1 438

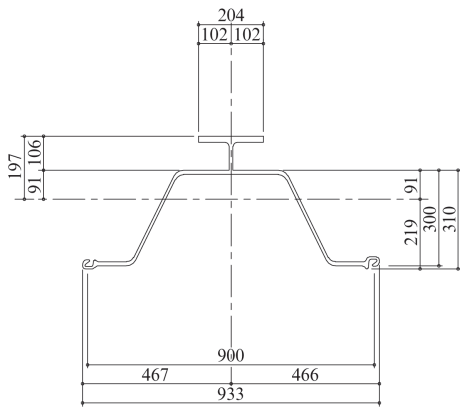


図2 ビートルパイルの断面形状 (B-25H)

Fig. 2 Sectional shape of the Beetle Pile

これにより、曲げ剛性が、ハット形 25H 単体時と比べて 90%、ハット形 10H 単体時と比べて 145% 上昇し、より高い壁高に対応可能となる。合成壁断面を図 3 に示す。鉄筋コンクリート部との一体化のため、鋼矢板ウェブ部の定着用鉄筋に加えて、CT 形鋼のウェブを貫通する形で補強鉄筋を配した構造となっている。

仮土留め工と本設地下壁とを別構造で施工する既存工法と、J-WALL II 工法との対比を図 4 に示す。既存工法では仮土留めとして、鋼矢板 IV 型を用いた後、本設地下壁として場所打ち鉄筋コンクリート壁 ($t=1100$ mm) が構築され、必要施工幅が $B=2900$ mm となる。一方、J-WALL II 工法

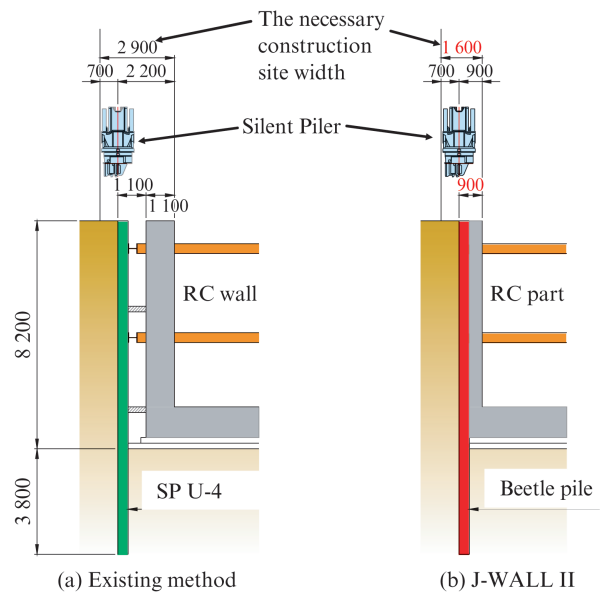


図4 既存工法と J-WALL[®] II 工法との対比

Fig. 4 Comparison with the existing construction method

ではビートルパイルと後打ち鉄筋コンクリート壁 ($t=900$ mm) との一体壁構造で形成されることから、必要施工幅が $B=1600$ mm であり、既存工法に比べて 55% 低減できる。

3. ビートルパイルの打設試験

3.1 打設試験の概要

ビートルパイルが、従来のハット形鋼矢板打設と同程度の打設性能を有することを確認するため、打設試験を実施した。試験体は、ビートルパイル (B-25H) $L=15$ m とハット形鋼矢板 (25H) $L=15$ m とした。試験体の仕様を表 2 に示す。施工方法は、サイレントパイラー ECO900、パワーユニット EU300 を用いた圧入工法とした。ウォータージェットなどの補助工法は併用していない。また施工時に、圧入力、打設時間および出来高を確認した。継手間の抵抗の影響を

確認するため、矢板 No ①, ⑧は継手を嵌合せず圧入した。打設状況を写真 1 に示す。図 5 に土質柱状図（地下水位は、GL-25 m 以深）を示す。試験場所の地盤構成は、表層から深度 10 m 程度までは、軟弱なローム・粘土層であるが、10 m 以深は、締まった細砂層となっており、圧入抵抗が大きくなることから、打設が困難になることが予想された。

3.2 打設試験の結果

図 6 にハット形鋼矢板，ビートルパイルの打設時に生じた圧入力（貫入抵抗）について，継手嵌合をせずに打設したケース (No. ①, ⑧)，および継手嵌合させて打設したケース (No. ③, ⑥) を比較して示す。いずれのケースも施工深度が大きくなるにつれて打設に必要な圧入力が高まっており，締まった細砂層にあたる 10 m 以深で増加度合いが大きくなる傾向にある。施工深度が 12 m 前後に到達した時点で貫入抵抗が増大し，それ以上のスムーズな施工が困難となった。各ケースの最終的に打設できた長さ，施工深度 10 m まで到達するのに要した時間を図 7 に示す。圧入機により最終的に打設できた長さ（打設長さ）は，ハット形鋼矢板で平均 12.0 m，ビートルパイルで平均 11.8 m であり，大き

な差はなかった。また深度 10 m に至るまで（ローム層，粘土層）の到達時間は，ハット形鋼矢板で平均 365 秒，ビートルパイルで平均 341 秒であり，到達時間のばらつきも，いずれもおおよそ 300 秒～400 秒の範囲内であり，大きな差はなかった。以上の結果からビートルパイルの施工性はハット形鋼矢板と同程度であることが確認できた。

表 2 打設試験条件

Table 2 Condition of Installation test

	SP No.	Length of SP	Joint fitting
Hat shaped-25H	①	15.0 m	×
	②	15.0 m	○
	③	15.0 m	○
Beetle Pile B-25H	④	15.0 m	○
	⑤	15.0 m	○
	⑥	15.0 m	○
	⑦	15.0 m	○
	⑧	15.0 m	×
	⑨	15.0 m	○



写真 1 打設状況

Photo 1 Installation scene

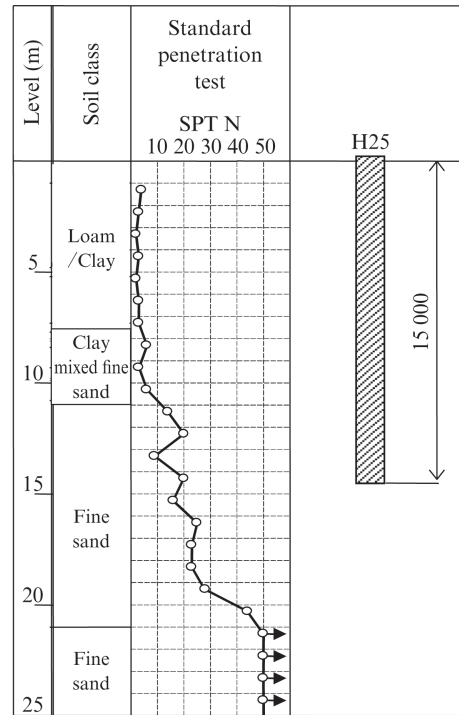


図 5 施工場所の土質柱状図

Fig. 5 Soil histogram of the installation test site

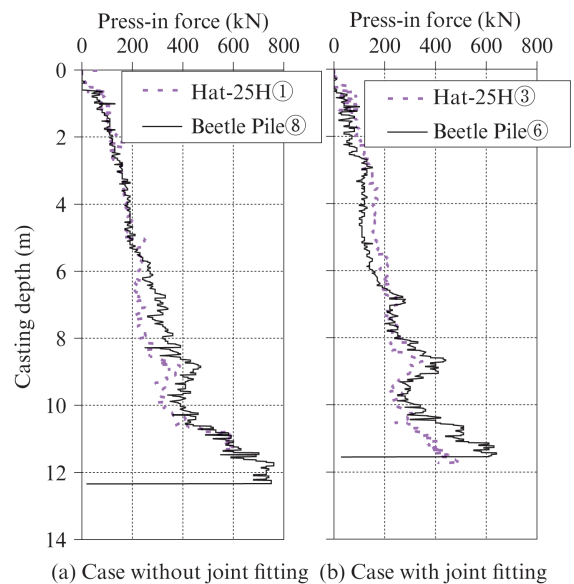


図 6 打設時に生じた圧入力

Fig. 6 Press-in force of Beetle Pile and hat-25H

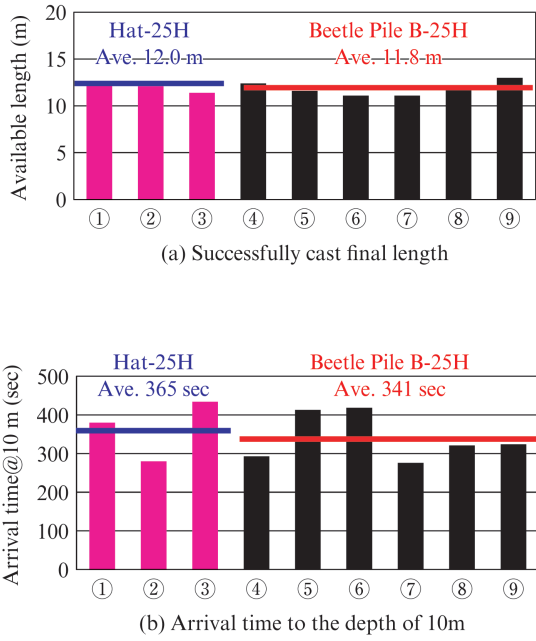


図7 打設試験結果
Fig. 7 Result of Installation test

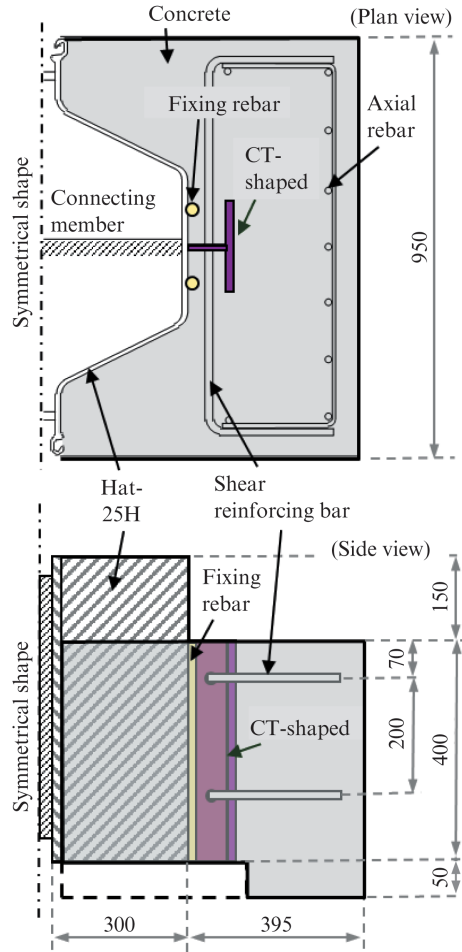


図8 押抜き試験体
Fig. 8 Specimen of punching shear test

4. ビートルパイルと後打ち鉄筋コンクリート部との一体性評価

4.1 評価試験（押抜き試験）の概要

鋼矢板と後打ち RC 壁の一体性評価をするため、押抜き試験を実施した（写真2）。試験体は均等に押せるように2枚の鋼矢板を向い合せた対称形状とし、鋼矢板および CT 形鋼の下端 50 mm をあらかじめ箱抜きし、コンクリートのみ接地させるとともに、上端では鋼矢板のみ 150 mm を突出させ、ここに加力した（図8）。また、地下壁体構造では壁延長方向（水平）へのコンクリートの動きが抑えられることを再現するため、試験体側面に拘束治具を配置した。

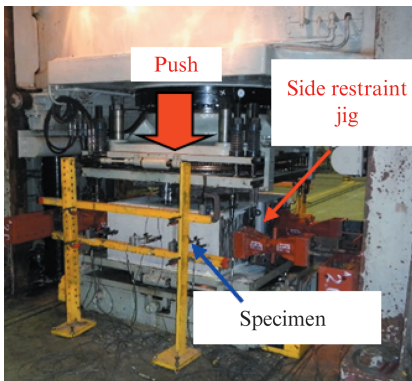


写真2 押抜き試験状況
Photo 2 Punching shear test

4.2 押し抜き試験結果

表3に試験条件と試験結果（せん断耐力）を示す。今回の試験では、①補強鉄筋の有無およびサイズ、②コンクリート強度、をパラメータとした。なお定着用鉄筋は、いずれのケースにおいても、鋼矢板ウェブ部に2本ずつ配置した（片面フレア溶接）。いずれのケースにおいても、CT鋼フランジ先端から、鋼矢板ウェブ端部にかけて、コンクリートの一面せん断破壊が生じた後、耐力が低下した。一方、定着用鉄筋まわりの付着性能は維持されており、鉄筋の抜け出しは観察されなかった（写真3）。

図9より、補強鉄筋サイズがD25のケースを除くと、補強鉄筋の引張降伏荷重（4本分合計）と実験せん断耐力増分（D0-F30耐力を差引き）が1:1で対応していることがわかる。一方、D25のケースでは、最終的に配筋位置に沿ってコンクリートの一面せん断破壊が生じていた（写真4）。これはD25鉄筋とコンクリートとの付着が劣化し拘束力低下したためであり、耐力増分が小さくなった要因である。

岡田の研究¹⁾で提案されているコンクリート接合面強度式をもとに、試験結果に基づく適用上限を設定して、本構

表 3 押抜き試験条件およびせん断耐力

Table 3 Case of punching shear test

Case	Shear reinforcing bar	Concrete compressive strength (N/mm ²)	Shear strength (kN/m)
D13-F30	D13	29.3	1 260
D16-F30	D16		1 412
D19-F30	D19		1 521
D25-F30	D25		1 670
D16-F40	D16	38.2	1 721
D16-F48	D16	47.8	1 767
D0-F30	No reinforcement	29.0	1 009

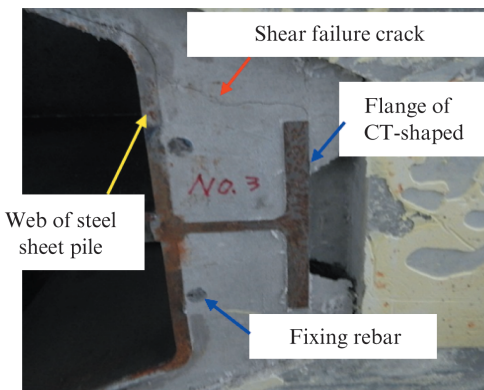


写真 3 押抜き試験体の破壊モード

Photo 3 Failure mode

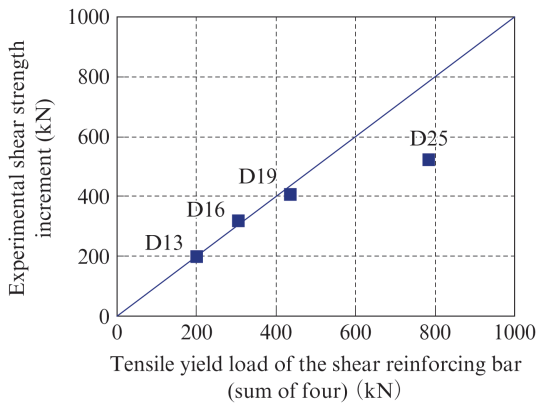


図 9 補強鉄筋によるせん断耐力の増分

Fig. 9 Strength increment by shear reinforcing bar

造のシアコネクタ部のせん断耐力評価式を導出した。評価式と試験値との比較を図 10 に示す（補強鉄筋サイズを変えた場合と、コンクリート圧縮強度を変えた場合とに分けて表示）。補強鉄筋サイズについては D19 以上の場合はせん断耐力の上昇を頭打ちとした。また、コンクリート強度については圧縮強度が 45 N/mm² 以上の場合は、せん断耐力の上昇

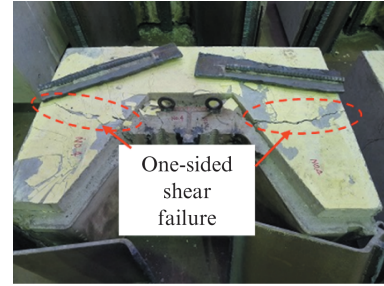
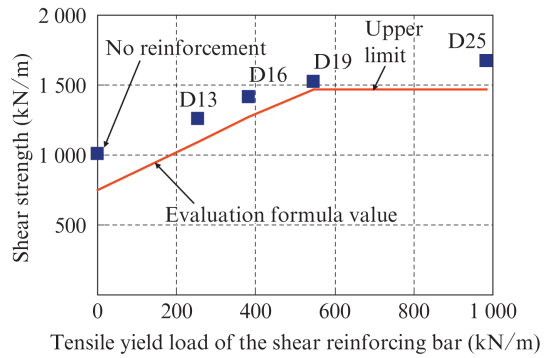
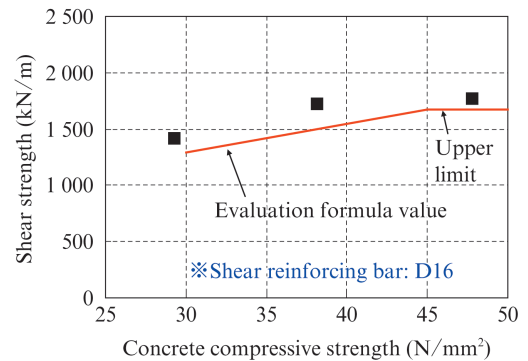


写真 4 補強筋 D25 の場合の破壊

Photo 4 Failure mode (Case of D25-F30)



(a) Effect of Shear reinforcing bar



(b) Concrete compressive strength

図 10 せん断耐力評価式と実験値の関係

Fig. 10 Comparison of Experimental shear strength and strength formula value

を頭打ちとした。

5. 合成壁 J-WALL[®] II の構造性能

5.1 実大曲げ試験

ビートルパイルと後打ち RC 部で形成される壁体が、合成構造として挙動することを確認するため、実大サイズの曲げ試験を実施した。

試験は、正曲げ試験（鋼矢板が引張り縁側に位置）、負曲げ試験（鋼矢板が圧縮縁側に位置）の 2 ケースを実施した

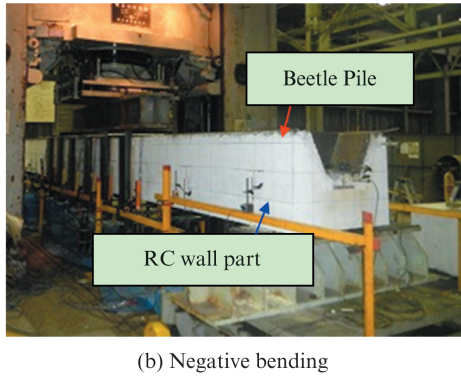
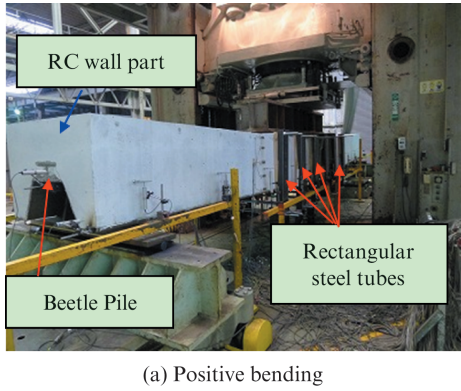


写真 5 曲げ試験状況
Photo 5 Bending test of J-WALLTM II

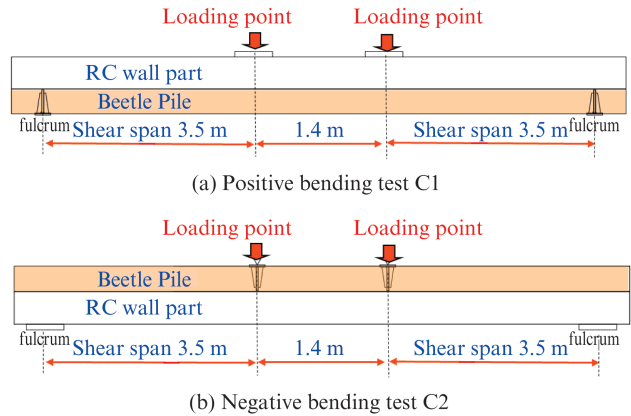


図 12 曲げ試験体概要 (側面図)
Fig. 12 Outline of the specimen (bending test)

表 4 曲げ試験条件および試験結果
Table 4 Material strength and test result of bending test

Case	Material strength (N/mm ²)			Test result Maximum load (kN)
	Concrete compressi ve strength	Yield strength of steel sheet pile	Yield strength of axial rebar	
C1	28.0	326	365	1 368
C2	25.6			756

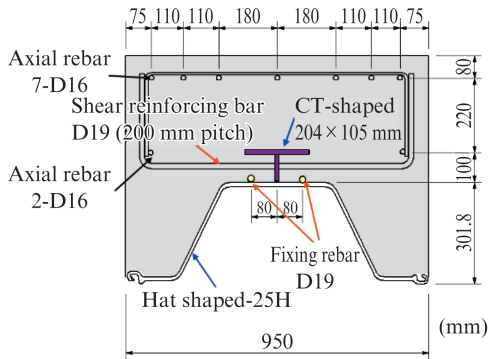
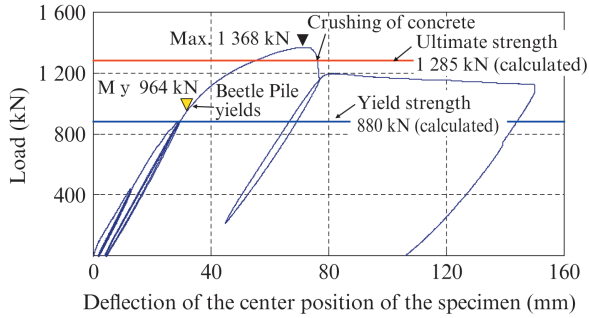


図 11 曲げ試験体概要 (断面図)
Fig. 11 Sectional view of the specimen (bending test)

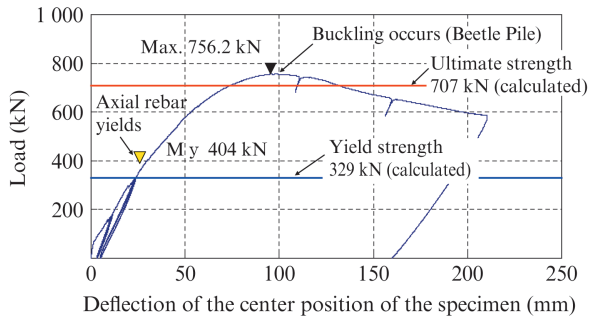
(写真 5)。試験体断面図を図 11 に、試験体概要図を図 12 に示す。後打ち RC 壁の断面高さ (鋼矢板ウェブ位置からの高さ) は 40 cm とした。荷重方法は 4 点曲げとし、支点から荷重点までの距離 (せん断スパン) は 3.5 m とした。なお、地下壁体構造では壁延長方向 (水平方向) へのコンクリートの動きが拘束されることを考慮し、2 対の角型鋼管を用いて、試験体を挟み、上下端をボルトで固定して、試験体の側面変形をできるだけ拘束した (計 6 箇所設置, 写真 5)。

5.2 実大曲げ試験の結果

表 4 に試験条件および試験結果 (最大荷重) を示す。図 13 に荷重と試験体中央位置のたわみ量との関係を示す。同図中には、完全合成構造の想定 (平面保持) のもと計算した降伏耐力および終局耐力を示す。鋼矢板、コンクリート、軸方向鉄筋は、「トンネル標準示方書開削工法・同解説」²⁾ に準拠し、材料非線形性を考慮してモデル化した (表 4 の材料強度を使用)。いずれのケースも試験値は計算値を上回っており、十分な構造性能を保有することが確認できた。なお試験値が上回った要因としては、合成壁の計算では CT 鋼はシアコネクタ部材としてのみ考慮しているが、実際は多少であるが構造部材としての寄与もあったためと考えられる。図 14 に正曲げ試験の降伏荷重時における、荷重点位置の材軸方向のひずみ分布を示す。ひずみ分布は平面保持条件の成立を示していることから、完全な合成構造として挙動していることが確認できた。



(a) Positive bending test C1



(b) Negative bending test C2

図 13 荷重と試験体中央位置のたわみ量との関係

Fig. 13 Relationship between the load and deflection of the center position of the specimen

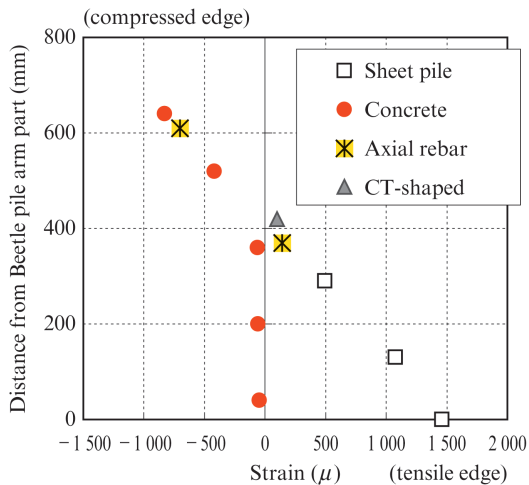


図 14 正曲げ試験降伏荷重時における載荷点位置の材軸方向のひずみ分布

Fig. 14 Strain distribution in the material axis direction at the yield load

6. おわりに

薄い壁厚で高剛性・高耐力の地下壁を構築する J-WALL II 工法について、各種の性能確認試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 圧入施工機によるビートルパイルの打設施工試験により、従来のハット形鋼矢板比べて、圧入抵抗や施工スピードの違いはないことを確認した。
- (2) ビートルパイルと後打ち鉄筋コンクリート部との押抜きせん断試験により、シアコネクタ部のせん断耐力評価方法を構築した。
- (3) 実物大の J-WALL II 工法構造部材の曲げ試験により、壁体が終局限界状態まで一体壁構造（完全合成壁）として設計できることを確認した。

また、J-WALL II 工法は、以上の内容について、一般財団法人国土技術研究センターにおいて審査を受け、技術審査証明³⁾を取得している。

なお、本研究は、株式会社大林組、ジェコス株式会社および JFE スチールとの共同開発によるものである。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

参考文献

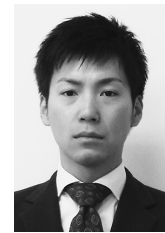
- 1) 岡田武二. コンクリート接合面のせん断伝達に関する研究. 土木学会論文集. 1994, no. 502/V-25, p. 75-82.
- 2) 土木学会. トンネル標準示方書開削工法・同解説 (2006年制定).
- 3) 国土技術研究センター. J-WALL II 工法 (合成構造用鋼矢板の本体利用技術) 建設技術審査証明事業 (一般土木工法) 報告書. 2015.



恩田 邦彦



道野 正嗣



後藤 宏輔