

孔あき鋼板ジベルを用いた側壁合成トンネルの設計・施工

(財)阪神高速道路管理技術センター企画研究部事業管理課 下地 勝啓
阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部淀川左岸線建設事務所 杉本 学
阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部淀川左岸線建設事務所 関川 洋介
阪神高速道路(株)建設事業本部建設技術課(大阪設計担当) 石橋 照久

要 旨

淀川左岸線では、開削トンネル工事に柱列式中連続壁の H 鋼芯材をトンネル函体に有効利用し、開削施工幅、掘削土量、鉄筋量およびコンクリート量等の削減により経済的な設計・施工が可能となる側壁合成トンネル工法を一部採用している。H 鋼芯材と本体 RC 構造のずれ止めには、一般的にスタッドジベルが用いられてきたが、橋梁分野で実績のある孔あき鋼板ジベルの適用性を検討した。孔あき鋼板ジベル方式はスタッドジベル方式に対して、溶接作業の省力化によりコスト削減が図れる、側壁鉄筋との干渉が小さく施工性に優れる、ハンチ筋など鉄筋の定着に鋼板ジベルの孔を利用できるなど、コストや施工性、品質確保において利点を有する。供試体実験によるせん断剛性の確認を行い、一般的なスタッドジベル方式を変更して孔あき鋼板ジベル方式を採用している。

本稿では孔あき鋼板ジベルを用いた側壁合成トンネルの設計・施工について、供試体実験を踏まえた設計検討及び現場施工の概要を述べるものである。

キーワード: 孔あき鋼板ジベル, 側壁合成トンネル, 柱列式中連続壁

はじめに

側壁合成トンネルにおける合成土留壁は、図-1 に示すように H 鋼芯材と RC 構造の本体側壁がずれ止めを介して一体となり、作用断面力に抵抗する構造となっている¹⁾。従来、ずれ止めには頭付きスタッドジベルが多く採用されてきたが、多数のスタッドジベルを H 鋼芯材に溶接する必要があるため、現場作業が繁雑になっていた。また、スタッドジベルの高さが高く、合成するコンクリート壁の配筋の取り合いが煩雑になっていた。スタッドジベルの溶接に関しては、土留工芯材を建て込む

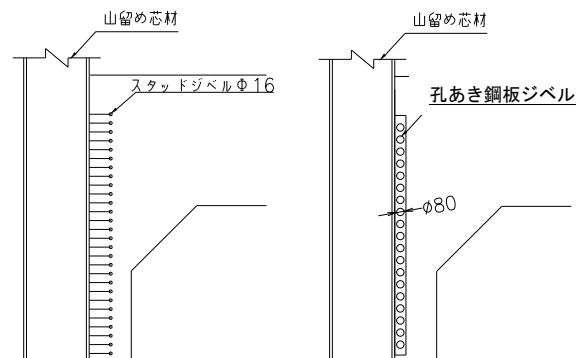


図-1 側壁合成トンネルの合成土留壁

前に工場溶接により、あらかじめ設置する方法もあるが、芯材挿入時の変形や損傷に対する配慮が必要となっている。

そこで、橋梁分野においてずれ止めとして実績のある孔あき鋼板ジベルを採用する検討を行った。

孔あき鋼板ジベルは図-2 に示すとおり、孔をあけた鋼板を鋼材に溶接して取り付け、孔に充填されたコンクリートにより、鋼材とコンクリートを一体化するものである。この孔あき鋼板ジベルを合成土留壁に適用する場合、次のような利点がある（図-3 参照）。

- a. 必要高さを小さくでき、孔あき鋼板ジベルを設置した状態で土留芯材の立込が可能（ジベル先付けとするか否かは、ソイルセメント径への影響など施工条件等を総合的に勘案して適切に判断することが必要）。
- b. 工場溶接による製作が可能のため、品質管理の面で有利。
- c. 従来溶接で行ってきたハンチ筋・隅角部補強筋と鋼材との結合に、孔あき鋼板ジベル孔を利用可能。

本稿では、孔あき鋼板ジベルを側壁合成トンネルのずれ止めとして適用するに当たり、設計上必要となるずれ止めとしての性能を確認するために実施した実験概要及びせん断耐力、せん断剛性の評価について述べる。また、孔あき鋼板ジベルを採用した現場施工における品質管理やコストメリットについて報告するものである。

1. 孔あき鋼板ジベルの設計

孔あき鋼板ジベルを適用した合成土留壁の設計については、H 鋼と RC 側壁の断面力を別々に求めることができる設計手引き²⁾に基づくことにした。

また、孔あき鋼板ジベルの設計は、橋梁分野において採用されている設計式³⁾を用いた。これは孔あき鋼板ジベルの破壊モードとして、(1)コンクリートのせん断破壊、(2)コンクリートの割裂破壊、(3)孔間の鋼板のせん断破壊を設定し、各

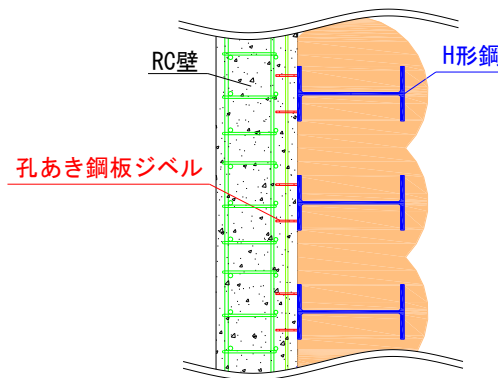


図-2 孔あき鋼板ジベルによる合成土留壁

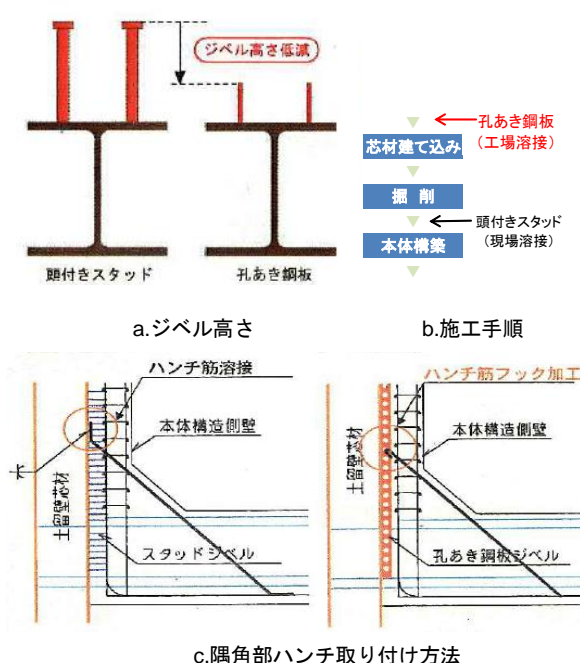


図-3 頭付きスタッドとの比較

破壊モードに対して耐力を算定し、最小の値を孔あき鋼板ジベルの耐力とするものである。さらに、今回合成土留め壁への適用ということで設計手引きに従い、上記耐力に低減係数 α を乗じて許容せん断耐力を設定した。設計手引きでは、スタッドジベルの終局耐力に対して既往の実験結果から低減係数 α を長期荷重に対して 0.4、短期荷重に対して 0.6 としている。孔あき鋼板ジベルを対象とした本検討においても低減係数をスタッドジベルと同じく 0.4 及び 0.6 とし、実験によりその妥当性を検討した。

表-1 試験体一覧

試験体名	孔径 (mm)	孔の中心間隔 (mm)	鋼板厚 (mm)	すみ肉溶接	孔数 ※1 (個)	設計せん断耐力※2		
						V_{s1} (kN/孔)	V_{s2} (kN/孔)	V_{s3} (kN/孔)
t9	80	150	9	両側	3 (12)	244	162	149
t12			12			244	216	198
t9-W			9	片側		244	162	149

※1：括弧内の数字は2面せん断試験体1体当たりの孔数

$$V_s = \alpha \cdot \min(V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}) \quad (1)$$

ここに、 V_s ：許容せん断耐力、 α ：低減係数（長期：0.4、短期：0.6）、 V_{s1} 、 V_{s2} 、 V_{s3} ：各破壊モードに対する耐力。

(1) コンクリートのせん断破壊
(貫通鉄筋を入れる場合に適用)

$$V_{s1} = (1.85 \cdot A / 1000 - 106.1) \quad (2a)$$

$$A = 1/4 \cdot \pi \left[(d^2 - \phi_{st}^2) \cdot f'_{cu} + \phi_{st}^2 \cdot f_{st} \right] \quad (2b)$$

ここに、 f'_{cu} ：コンクリートの設計圧縮強度（ $= \eta \cdot f'_{ck} / \gamma_c$ ）、 $\eta = 1.1$ 、 f'_{ck} ：コンクリートの設計基準強度（ N/mm^2 ）、 γ_c ：コンクリートの材料係数（ $= 1.3$ ）、 d ：孔径（ mm ）、 ϕ_{st} ：貫通鉄筋の鉄筋径（ mm ）、 f_{st} ：貫通鉄筋の引張強度（ N/mm^2 ）。

(2) コンクリートの割裂破壊

$$V_{s2} = d \cdot t \cdot 7.5 \cdot f'_{ck} \quad (3)$$

ここに、 d ：孔径（ mm ）、 t ：鋼板厚（ mm ）、 f'_{ck} ：コンクリートの設計基準強度（ N/mm^2 ）。

(3) 孔間の鋼板せん断破壊

$$V_{s3} = A_s \cdot f_{sy} / \sqrt{3} \cdot (100/60) \quad (4)$$

ここに、 A_s ：2つの孔の間の鋼板部分面積（ mm^2 ）、 f_{sy} ：鋼板の降伏点応力度（ N/mm^2 ）。

今回の設計では、設計せん断耐力として必要耐力を確保しつつ、鋼材量をできるだけ低減するよう鋼板厚や孔間隔をパラメータとして設計を行った。その結果、設計せん断耐力は、孔間の鋼板のせん断破壊によって耐力が決まる形状とした。

2. 実験概要

2-1 試験体の種類

表-1 に試験体一覧を示す。孔あき鋼板ジベルの形状は設計の結果、孔径 80mm、鋼板厚 9mm、及び孔の中心間隔 150mm とし、孔の中に貫通鉄筋 D13 を通すこととした。この形状を基本ケース（t9）とし、鋼板厚さ、鋼板の溶接方法をパラメータとした比較ケース（t12）（t9-W）と共に3ケースの試験体を用いて実験を行った。

また、表-1 に示した設計せん断耐力は材料の設計強度を用いて、式(2)～(4)により算出した。

2-2 試験体形状

図-4 に試験体の形状寸法を示す。RC 壁に相当するコンクリート部は、実構造物の側壁と同じく 450mm（側壁高さ）×600mm（H 鋼芯材の配置間隔）の断面を有し、長さを 1,000 mm とした。また、実構造物と同じく鉄筋を配置した。

孔あき鋼板がずれる方向の孔あき鋼板端部には、鋼板端部のコンクリートへの支圧によるせん断耐力への影響を取り除くために発泡スチロールを配置した。また、H 鋼のフランジにはグリースを塗布しコンクリートとの間の付着の影響を除去した。

2-3 荷重方法

荷重は、5,000kN アムスラー型荷重試験機を使用し、2面せん断試験として試験体中央部の H 鋼に鉛直に荷重を作用させた。荷重部には偏心荷重させないように球座を設けた。また、荷重方法は $\alpha = 0.4$ 及び 0.6 における許容せん断耐力の設計

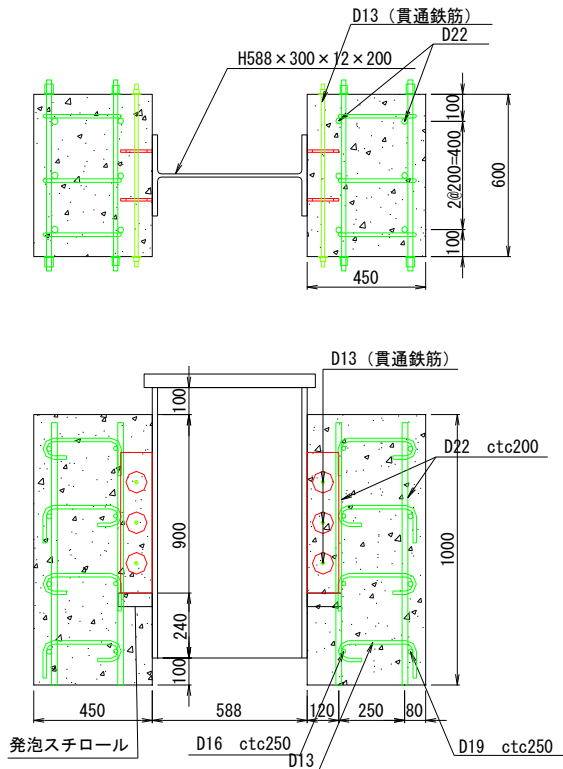


図-4 試験体形状

値においてそれぞれ一旦除荷を行い、その後単調に増加させた。

H 鋼フランジとコンクリートとの相対ずれ量を計測し、荷重と相対ずれ量との関係から孔あき鋼板ジベルのせん断バネ値を求めた。また、孔あき鋼板の孔と孔の間 (P-U および P-L) にひずみゲージを貼付し、鋼板のひずみを計測した。

3. 実験結果及び考察

3-1 耐力及び破壊状況

表-2 に実験結果一覧を、図-5~7 に各試験体の載荷荷重と相対ずれの関係を示す。表の耐力及び図の載荷荷重は、鋼板の孔数 (12 孔) で除した 1 孔当たりの値に換算して示す。また、相対ずれは 4 箇所計測したが、ばらつきがなかったため 4 点の平均値で示した。

図には材料の設計強度を用いて式 (1) によって求めた設計せん断耐力及び許容せん断耐力を示す。また、実験で使用した材料の強度は設計強度と異

なることから、材料試験結果を用いて求めた計算耐力を併記した。

いずれの試験体も、35kN 程度から相対ずれが生じ始め、許容せん断耐力 ($\alpha=0.6$) を超えた後に剛性が大きく低下し、緩やかに荷重が増加して最大耐力を示した。最大耐力は計算耐力を 1.1~1.3 倍上回っており、「1. 孔あき鋼板ジベルの設計」で示した設計式が本実験で使用した形状に対して適用可能であると考えられる。

図-8~10 に鋼板に添付したひずみゲージから求められるせん断ひずみを示す。いずれの試験体も荷重-相対ずれ関係において剛性が低下し始めた後に、まず P-U のひずみが急激に増加して降伏に至り、その後、計算耐力を上回ってから P-L が降伏した。これより、剛性が低下し始めるのはコンクリートがひび割れることによるものだと考えられた。ただし、この時試験体の外観ではひび割れは観察されず、鋼板の孔周辺の局所的な損傷だと考えられる。その後はコンクリートの損傷と鋼板の降伏が複合して生じ、最大耐力に至った。溶接方法が異なる t9 と t9-W を比較すると、荷重と相対ずれの関係は同じ挙動をしており、溶接方法の違いによる影響は見られなかった。このことより、孔あき鋼板ジベルに作用するせん断力が、孔あき鋼板の面内方向であり、溶接のど厚を適切に設定すれば片側すみ肉溶接でも両側すみ肉溶接と同様に機能することが確認された。

3-2 せん断剛性

鋼板厚 9mm の t9 試験体、及び t9-W 試験体について、いずれの試験体も許容せん断耐力 ($\alpha=0.6$) まで、荷重と相対ずれの関係はほぼ直線の線形関係を示した。この荷重までは鋼板も降伏しておらず、許容せん断耐力を設定する際の低減係数 α は妥当な値であったと考えられる。

また、許容せん断耐力 ($\alpha=0.6$) までの線形関係から、孔あき鋼板ジベルのせん断バネ値が推定された。許容せん断耐力時の相対ずれ量から割線剛性を求め、これをせん断バネ値として表-2 に示す。

表-2 実験結果一覧

試験体名	最大耐力実験値	計算耐力※1		実験値と 計算耐力の比 A/B	せん断バネ値※2 (kN/mm)
	(kN/孔) A	(kN/孔) B			
t9	222	178		1.3	250
t12	241	228		1.1	273
t9-W	225	184		1.2	244

※1：材料試験結果を用いて算出

※2：許容せん断耐力 ($\alpha=0.6$) 時における割線剛性

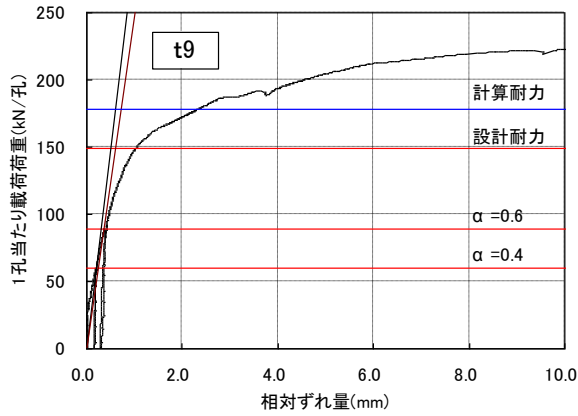


図-5 荷重-相対ずれ関係 (t9)

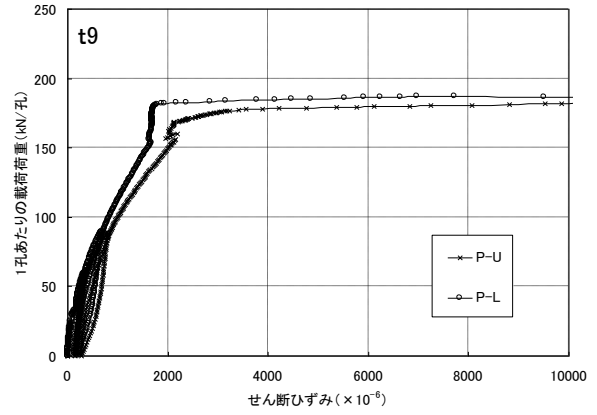


図-8 荷重-せん断ひずみ関係 (t9)

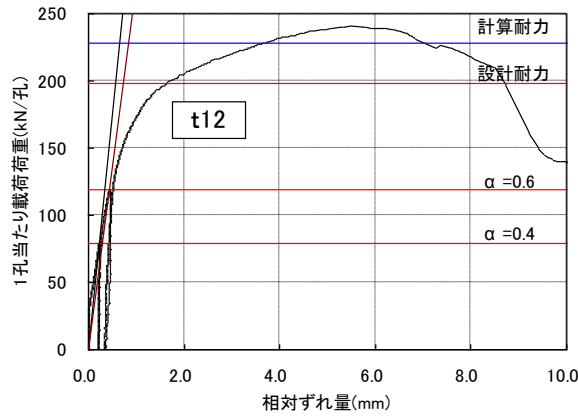


図-6 荷重-相対ずれ関係 (t12)

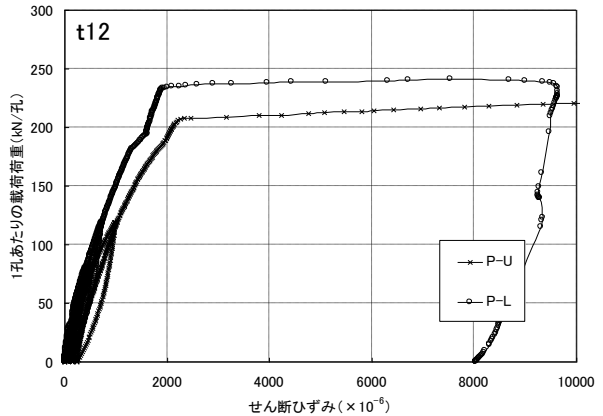


図-9 荷重-せん断ひずみ関係 (t12)

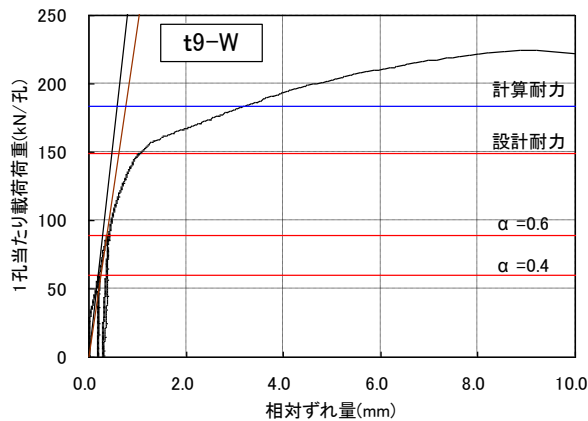


図-7 荷重-相対ずれ関係 (t9-W)

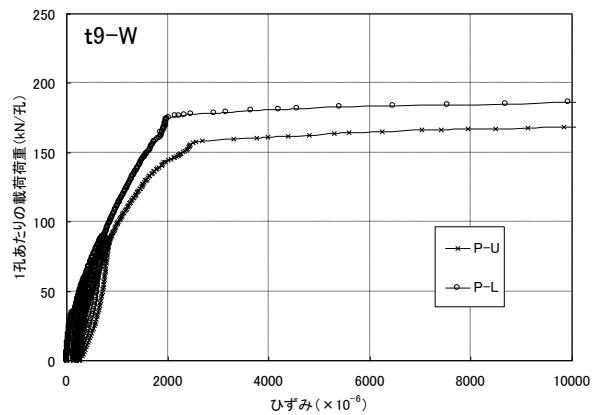


図-10 荷重-せん断ひずみ関係 (t9-W)

この値は、1孔当たりの載荷荷重から求めた値であり、孔あき鋼板ジベルの1孔当たりのせん断バネ値となる。鋼板厚9mmで250, 244kN/mm、鋼板厚12mmでは273kN/mmであった。鋼板厚を厚くすることでせん断バネ値が大きくなること、本実験の溶接方法ではせん断バネ値は変わらないことが確認された。

設計手引きにはφ22mm頭付きスタッドジベル1本当たりのせん断バネ値が示されており100kN/mmとされている。これはせん断実験から求められたもので、コンクリートの圧縮強度24N/mm²、ヤング係数25kN/mm²の条件で許容せん断耐力(α=0.6)86.6kN時のずれ剛性として求められている。

本実験において、鋼板厚9mmの場合の許容せん断耐力(α=0.6)は89kN(=149kN×0.6)であり、前述のスタッドジベルと同程度であった。これより、孔あき鋼板ジベルの1孔は、同程度の耐力を持つスタッドジベル1本と比較して、2倍以上のせん断バネ値を有していることが確認された。

4. 実施工の状況

先に述べたように、孔あき鋼板ジベルの採用については、孔あき鋼板ジベルを工場で溶接し現地で建て込むことが可能であることから作業の省力化や品質管理の面で優位性を有する。しかし、実施工では本章に示すようにH鋼を建て込んだあとに孔あき鋼板ジベルを設置しており、本章においてはこうした実施工の状況について述べる。

4-1 工事概要と現場状況

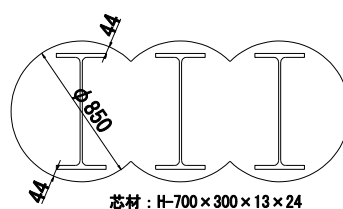
今回孔あき鋼板ジベルを採用したのは島屋北工区開削トンネル工事である。発注時の標準案ではスタッドジベルであったが、鹿島・銭高・東亜JVからスタッドジベルに替え孔あき鋼板ジベルでの施工を行うVE提案がなされ、同JVが落札した。工区延長は357.5m、その内230mが側壁合成区間。側壁合成区間の総土留壁施工延長=460mのうち、430.7mに関しては先行工区により地

中連続壁の設置が完了しており、当工区で地中連続壁の設置を行った側壁合成区間は29.3mであった。

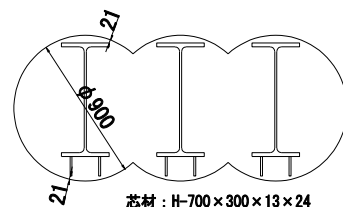
4-2 地中連続壁の施工

通常の開削トンネル工事の施工では地中連続壁を施工し、土留支保工を組みながら掘削し、その過程で地中連続壁の函体側のソイルセメントをそぎ落とす必要があるが、孔あき鋼板ジベルを溶接した状態で地中連続壁を施工するとソイルセメントのそぎ落としに孔あき鋼板ジベルが支障となり、損傷を与える可能性が高いため、大型機械による作業が出来なくなる。加えて掘削中から孔あき鋼板ジベルが露出し、本体構築までの比較的長い期間の保護・防錆の養生が必要となる。

また、地中連続壁の施工において孔あき鋼板ジベルを溶接した状態でH鋼芯材を建て込む際に、孔あき鋼板ジベルの必要高さがスタッドジベルよりも小さいといえども今回施工したソイルセメントの径(φ850)では施工出来ないため、改良径を大きくする必要が生じる。さらに改良径を大きくしたとしてもソイルセメント造成精度およびH鋼芯材建て込み精度をかなり高めない限り、建て込みが困難な状況であった。(図-11参照)



(a) ソイルセメント改良径の標準(実施工仕様)



(b) 孔あき鋼板ジベル先行設置の場合のソイルセメント改良径

図-11 孔あき鋼板ジベルとソイルセメント改径

こうしたことから、実施工にあたっては、あらかじめ孔あき鋼板ジベルを工場溶接し現場にて建て込むのではなく、H 鋼芯材をそのまま建て込み、ソイルセメントをそぎ落としたのち、現場にて孔あき鋼板ジベルを溶接することとなった。

4-3 現場溶接に関する品質管理

孔あき鋼板ジベルの現場での溶接については、品質管理の面で工場溶接に劣ることが懸念されたが、溶接工の選定および現場浸透探傷試験により品質管理に努めた。以下その詳細を示す。

(1) 溶接工の選定

溶接作業に先立ち、本工事で必要な溶接工の技能を有するかを JIS Z 3841（半自動溶接技能検定）により確認した。

(2) 浸透探傷試験

溶接箇所の検査については外観検査とともに JIS Z 2343（現場溶接浸透探傷試験）により有害な欠陥が無いことを全数検査した。また全数の内 10%については JIS Z 2343 の認定者による検査とした。（図-12、13 参照）



図-12 浸透探傷試験状況

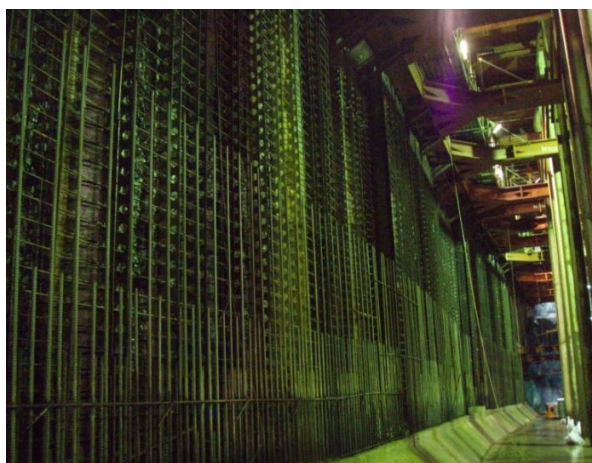


図-13 孔あき鋼板ジベル設置状況

4-4 その他施工全般について

孔あき鋼板ジベルを採用することによるメリットとしては、スタッドジベルと比較して必要高さを小さくできるため、本体側壁の鉄筋との干渉を避けることが可能であり、鉄筋組立作業において支障になることがない。

また、土留壁と側壁の隙間（合成部）のコンクリート締固めのためのバイブレータ等の挿入時において、孔あき鋼板ジベルはスタッドジベルに対して部材が連続しているため、バイブレータ等を挿入しても引っかかり等の支障がなく、スムーズに作業が実施できることが挙げられる。

4-5 コストメリットについて

スタッドジベルによる施工と孔あき鋼板ジベルによる施工との費用比較について、今回実施した内容で鋼材費のみの比較を行ったものを表-3 に示す。

この結果からは単純に施工費全体の比較は出来ないが、スタッドジベルに比べ、孔あき鋼板ジベルのほうが部材数が少ないため、施工費を含めた比較においても孔あき鋼板ジベルの方がコストメリットが大きいいといえる。

表-3 使用鋼材費の比較

工 法	数 量	概算金額の比率*
スタッドジベル	128,426 本	2.0
孔あき鋼板ジベル	129 t	1.0

*概算金額は請負者からのヒアリング結果

5. まとめ

- ・淀川左岸線の実構造物を対象に、設計によって決定した形状を有する孔あき鋼板を適用した合

成土留壁の試験体を用いて 2 面せん断実験を行い、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力を得るとともに、孔あき鋼板ジベルのせん断バネ値を推定した。

- せん断耐力は、既往の設計式によって求められる計算値を上回る結果が得られ、本設計式が今回の形状の孔あき鋼板ジベルに対しても適用可能であることを確認した。また、今回設定した許容せん断耐力までにおいて、ずれ剛性は線形と言える範囲であったことから、その時の割線剛性を孔あき鋼板ジベルのせん断バネ値として算出した。
- 実施工に当たっては H 鋼芯材を建て込んだのち現場溶接にて孔あき鋼板ジベルの設置を行った

が、現場での品質管理に努めることにより欠陥なく施工できた。

参考文献

- 1) 金治英貞, 中島隆, 尾関良純: 側壁合成トンネルの変遷とコスト分析, 阪神高速道路公団第 37 回技術研究発表会論文集, 2005
- 2) 日本トンネル技術協会: H 形鋼を芯材とする土留め壁本体利用の設計手引き, 平成 14 年 7 月
- 3) 藤井秀樹, 古市耕輔, 一宮利通, 平 陽兵: 孔あき鋼板ジベルを用いた合成土留壁, コンクリート工学年次論文集, pp.1351-1356, 2002.
- 4) NEXCO 中央研究所: 設計要領第二集橋梁建設編, 2006
- 5) 八木博嗣, 奥西史伸: 孔あき鋼板ジベルの側壁合成トンネルへの適用について, 阪神高速道路株式会社第 40 回技術研究発表会論文集, 平成 19 年度

DESIGN AND CONSTRUCTION OF EARTH RETAINING WALLS OF COMPOSITE STRUCTURE USING PERFOBOND-RIB SHEAR CONNECTERS

Katsuhiro SHIMOJI, Manabu SUGIMOTO, Yosuke SEKIGAWA and Teruhisa ISHIBASHI

A composite retaining wall consists of the H steels of the pile diaphragm wall and the reinforced concrete of the tunnel side wall connected via shear connectors to resist sectional force as a single structure. Stud dowels conventionally used for that purpose require intricate operation and considerable labor for welding. The authors examined perFOBOND-rib shear connectors by experiment and used them for the first time during the construction of the Shimaya-Kita Tunnel. This paper describes design and verification test of the perFOBOND-rib shear connector and its application at site.

下地 勝啓



財団法人阪神高速道路
管理技術センター
企画研究部事業管理課

Katuhiro Shimoji

杉本 学



阪神高速道路株式会社
建設事業本部大阪建設部
淀川左岸線建設事務所

Manabu Sugimoto

関川 洋介



阪神高速道路株式会社
建設事業本部大阪建設部
淀川左岸線建設事務所

Yosuke Sekigawa

石橋 照久



阪神高速道路株式会社
建設事業本部建設技術課
(大阪設計担当)

Teruhisa Ishibashi