

壁やスラブのせん断補強を効率的に行う T プレート工法

前 田 敏 也

阪神大震災以前の旧耐震基準で設計・施工されたボックスカルバートなどの壁やスラブは、せん断補強筋が少ないため、現行の耐震基準ではせん断耐力が不足する場合がある。これまでに鉄筋挿入等によってせん断補強が実施されている例もあるが、数十 cm 間隔で膨大な本数の鉄筋を挿入しなければならないため、施工性や工期、工費の面で課題がある。このような課題を解決するため、2～3 m 間隔で溝を切って T 型のプレートを挿入することにより、効率的にせん断耐力を向上させる補強工法 T プレート工法（以下「本工法」という）を開発し、性能確認試験を行った。その結果、鉄筋を用いた場合と同様のせん断補強効果が得られ、プレートの付着を考慮することで補強後のせん断耐力を評価できること等が明らかとなった。

キーワード：コンクリート構造物、面状部材、せん断補強、T 型プレート、施工性、効率化

1. はじめに

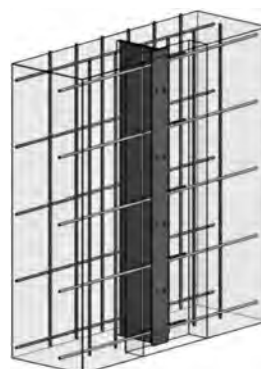
1995 年の阪神大震災以前の旧耐震基準で設計・施工されたボックスカルバートや擁壁などの面状構造物は、コンクリートの許容せん断応力度が高く設定されていたことや¹⁾、せん断力に対して有効に抵抗できる鉄筋が少ないため、現行の耐震基準ではせん断耐力が不足する場合がある。このため、コンクリートによる増し厚や鉄筋挿入等によるせん断補強が研究・実施されている例がある²⁾。しかし、内空断面が狭くなることや、数十 cm 間隔で膨大な本数の鉄筋を挿入するため、補強後の機能や施工性等の面で課題が残されている。

このような課題を解決するため、壁やスラブ等の面状部材に 2～3 m 間隔で溝を切り、T 型のプレートを挿入することによって部材のせん断耐力を向上させる工法を開発した。ここでは、本工法の補強効果や施工性を確認するために実施した各種の試験について紹介する。

2. 補強工法の概要

(1) 補強方法とその効果

図—1 に工法の概要を示す。本工法は、壁やスラブ等の面状部材の表面に 2～3 m 間隔で部材厚方向に幅 20～30 mm の溝を切り、その中に写真—1 に示す厚さ 6～9 mm 程度の T 型の補強プレート（以下「補強プレート」という）を挿入後、エポキシ樹脂を注入することに



図—1 補強工法の概要



写真—1 補強プレート

よってプレートをコンクリートと接着し、部材をせん断補強する工法である。従来の鉄筋挿入工法では、補強鉄筋 1 本の有効範囲が狭いために複数本の鉄筋で広い範囲のせん断力に抵抗していた。これに対し、本工法

では、エポキシ樹脂で接着された1枚の補強プレートの有効範囲が広いために1枚の補強プレートで広い範囲のせん断力に抵抗できる。その結果、施工箇所数が少なくなって施工性が向上するとともに、支障物があるために従来工法では補強できない場合等に有効である。

(2) 施工手順

本工法の施工手順を図一2に示す。

(a) 鉄筋探査

施工に先立ち、補強プレートと主鉄筋が干渉しないように挿入箇所近傍の鉄筋探査を、電磁波レーダー等の非破壊試験機を用いて行う。鉄筋挿入工法がほぼ全域を探査対象とするのに対し、本工法では補強プレートを挿入する箇所のみに探査範囲が限定されるため効率的である。

(b) 溝切り

鉄筋探査後、補強プレートを挿入するための溝切りをボーリングマシンやウォールカッター等で行う。溝の深さは背面側鉄筋の手前までとする。ウォールカッターは円弧状のため、溝の端部はボーリングマシンによる連続コア削孔を行う。溝切りの際には配力筋を切断するため、補強プレート挿入後にフレア溶接等によって配力筋を復旧する。

(c) はつり

補強プレート埋込みおよび配力筋の復旧のため、かぶりコンクリートを配力筋位置まではつる。

(d) 補強プレート設置

溝に補強プレートを挿入してアンカーボルトで固定する。補強プレートは人力で施工することを考慮して1枚当たり15～20 kg程度の重さに分割する。補強プレートのウェブには接着材となるエポキシ樹脂の充填性を向上させるための穴(φ 50 mm程度)や配力筋を復旧するための添筋を通す穴(φ 25 mm程度)が、またフランジには補強プレート固定用の穴(φ 10 mm程度)やエポキシ樹脂注入(φ 25 mm程度)

およびエア抜き(φ 10 mm程度)のための穴が設けられている。補強プレート設置後、エポキシ樹脂の注入孔およびエア抜き孔を設置する。

(e) 配力筋復旧

配力筋の位置に合わせてウェブに開けられた穴に添筋を貫通させ、フレア溶接や機械式継手等で配力筋と一体化させる。

(f) 断面修復

はつり部の断面修復をポリマーセメントモルタルや無収縮モルタルで行う。断面修復に先立ち、補強プレートおよびコンクリートのはつり面にプライマーを塗布して付着力を高める。

(g) 樹脂注入

溝の隙間にエポキシ樹脂を注入し、補強プレートをコンクリートと接着して一体化させる。

(3) 設計手法

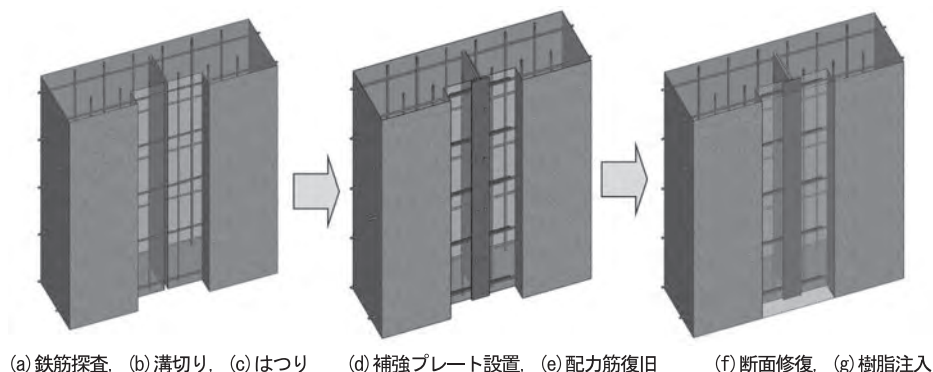
本工法で補強された部材のせん断耐力は、他の一般的な補強工法と同様に、補強前のコンクリートおよびせん断補強鋼材が受け持つせん断耐力に、補強材である補強プレートが受け持つせん断耐力を足し合わせて算定する。ここで、補強前の部材のせん断耐力は、「土木学会:コンクリート標準示方書[設計編]」³⁾に準じ、通常の鉄筋コンクリート部材のせん断耐力算定式を用いて算定する。一方、補強プレートが受け持つせん断耐力は、後述する補強プレートで補強した部材の載荷試験および鋼板の付着試験の結果から、以下の式により算定する。

$$V_{tyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{td} \quad (1)$$

ここに、 V_{tyd} : 補強プレートで補強された部材のせん断耐力

V_{cd} : 補強材を用いない部材のせん断耐力

V_{sd} : 既存の補強材により受け持たれる部材のせん断耐力



図一2 施工手順

V_{td} ：補強プレートにより受け持たれる部材のせん断耐力で式(2)による。

$$V_{td} = A_{tw} \cdot f_{ty} \cdot \gamma_t / 1.15 / \gamma_b \quad (2)$$

A_{tw} ：せん断ひび割れ近傍の補強プレートウェブの断面積で式(3)による。

$$A_{tw} = t \cdot d \cdot k \quad (3)$$

t ：補強プレートのウェブの厚さ (mm)

d ：部材の有効高さ (mm)

k ：補強プレートのウェブの孔による有効断面率で0.8とする。

f_{ty} ：補強プレートの設計降伏強度 (N/mm²)

γ_t ：補強プレートの付着により有効に抵抗できる寄与率で式(4)による。

$$\gamma_t = B_e / d \quad (4)$$

$$B_e = d - L_e \quad (5)$$

L_e ：補強プレートとコンクリートとの有効付着長で鋼板の場合250 mmとする。

γ_b ：部材係数で1.1とする。

補強プレートは、エポキシ樹脂によってコンクリートと接着、一体化されることにより、せん断力に抵抗する。したがって、補強プレートがはく離してコンク

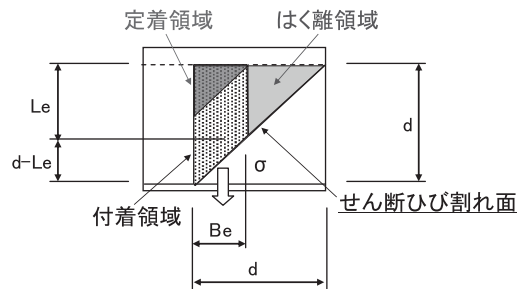


図-3 補強プレートのせん断抵抗機構

リートとの付着が確保できない領域では、補強プレートがせん断抵抗に寄与しない。ここで、補強プレートの付着特性について、後述する鋼板の付着試験や載荷試験の結果、厚さ4.5～9 mmの鋼板と圧縮強度30 N/mm²程度のコンクリートとの有効付着長を250 mmとした。これにより、せん断ひび割れ面から250 mm以上の深さを確保できる補強プレートのみがせん断に対して有効に抵抗できるものとし、その割合を式(4)に示す寄与率で表す。図-3に補強プレートのせん断抵抗の機構を示す。また、式(3)では、補強プレートのウェブに樹脂の充填性を向上させるための貫通孔が設けられているため、有効断面率を0.8とする。

3. 性能確認試験

(1) 補強した部材の載荷試験

本工法の補強効果を確認するために、スラブの載荷

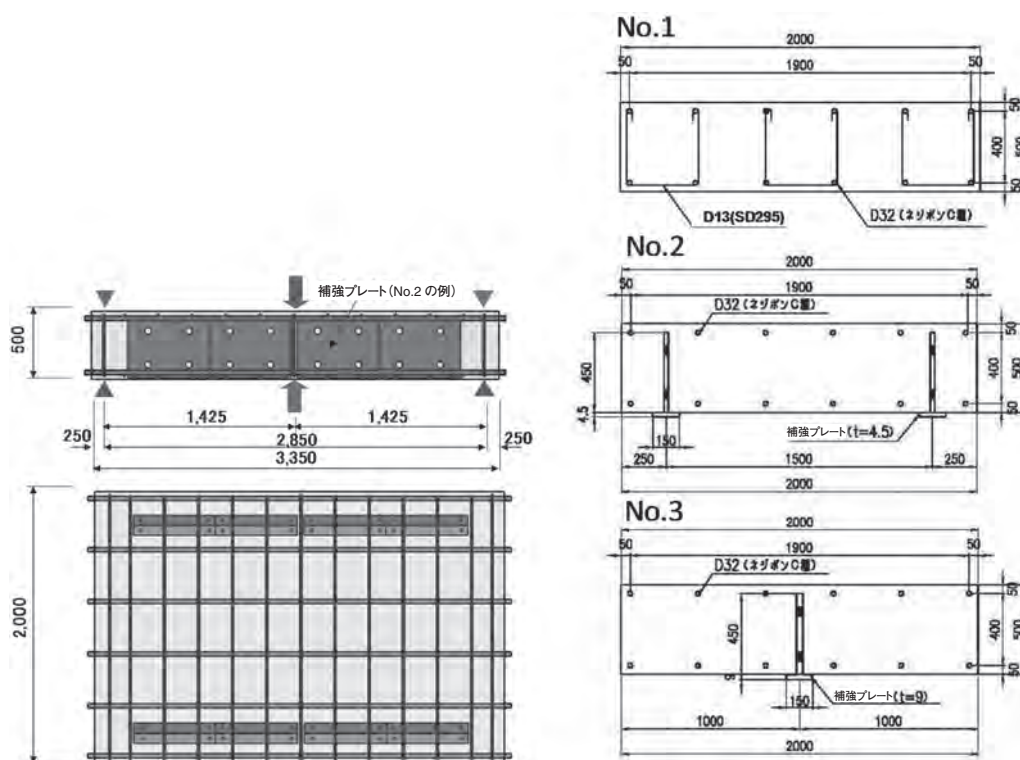


図-4 試験体の概要

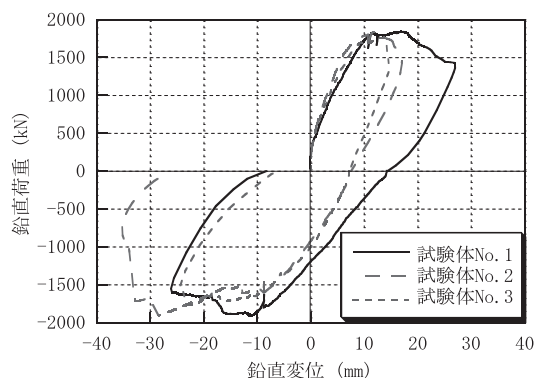
表—1 材料の物性

材料	材質	強度 (N/mm ²)
主筋 : D32	PC 鋼棒 C 種 1 号	1,167 (降伏)
せん断筋 : D13	SD295	387 (降伏)
補強プレート	SS400	285 (降伏) 421 (破断)
コンクリート	----	30 (圧縮)
樹脂	低粘度エポキシ	70 以上 (圧縮) 35 以上 (引張)

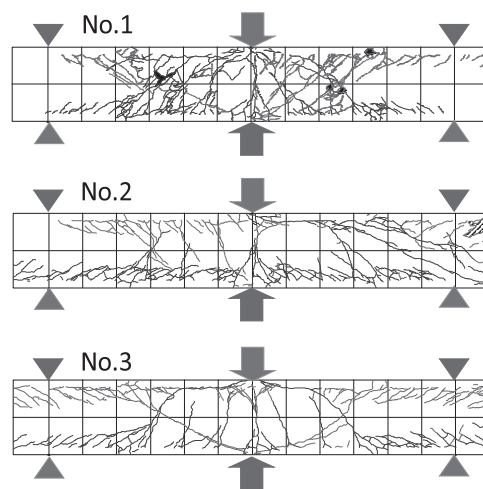
試験を行った。試験体の概要を図—4, 表—1 に示す。試験体は幅 2 m, 長さ 3.35 m, 厚さ 50 cm の実構造物の壁を模擬したスラブで, 主筋は D32 (PC 鋼棒 C 種 1 号) を 380 mm 間隔, 配力筋は D13 (SD295) を 250 mm 間隔で配置した。また, No.1 試験体は 6 本の D13 (SD295) のせん断補強筋を 250 mm 間隔, No.2 試験体は厚さ 4.5 mm の補強プレートを 2 列, No.3 試験体は厚さ 9 mm の補強プレートを 1 列配置してせん断補強を行った。ここで, 補強プレートは, 高さ 450 mm のウェブに幅 150 mm のフランジを溶接した鋼板 (SS400) で, 表面はブラスト処理後, エッチングプライマーを塗布した。補強プレートは, 曲げ耐力を向上させないように軸方向に 4 分割した。補強プレートの接着は, あらかじめウェブの両側にそれぞれ 5 mm 程度の隙間を箱抜きしておき, 型枠解体後, 隙間に鋼板接着用の低粘度エポキシ樹脂を注入して行った。コンクリートの圧縮強度は 30 N/mm² である。

荷重は, 支点間中央の 1 点集中荷重とし, 正方向に最大荷重まで荷重した後, 負方向に最大荷重まで荷重して試験を終了した。試験では, 荷重, 支間中央変位, 鉄筋および補強プレートウェブのひずみを測定した。

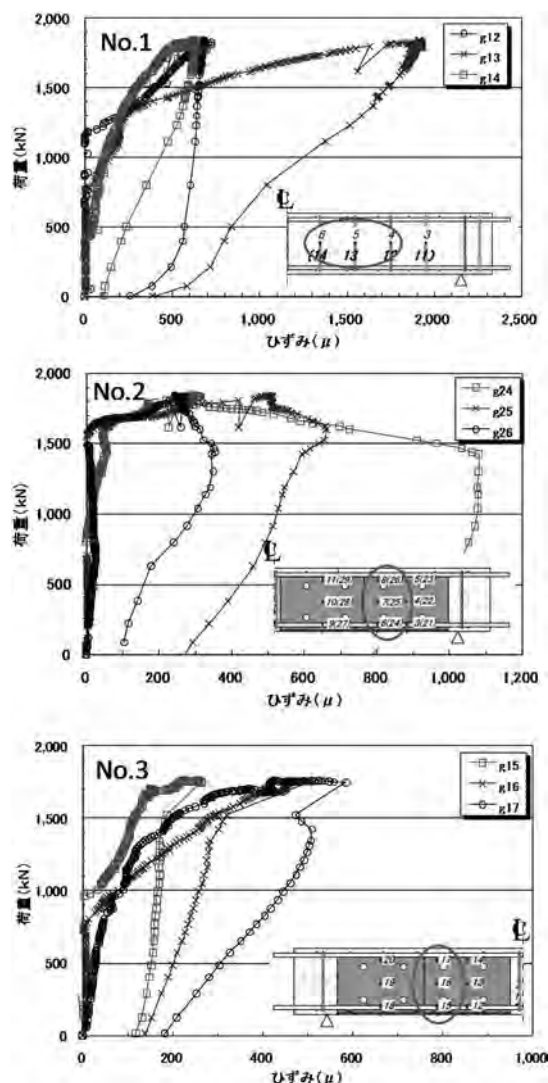
各試験体の荷重—変位曲線, ひび割れ状況および補強材のひずみの一例を図—5 ~ 7 にそれぞれ示す。試験体は, いずれも荷重 800 ~ 1,000 kN でコンクリートに斜めせん断ひび割れが発生し, その後ひび割れの伸展とともに試験体下面にひび割れが貫通してせん断



図—5 荷重—変位曲線



図—6 ひび割れ図



図—7 補強材のひずみ

破壊を生じた。また, せん断補強筋や補強プレートのひずみは, せん断ひび割れが発生した近傍から徐々に大きくなり, No.1 試験体ではせん断補強筋が降伏したが, No.2, No.3 試験体では補強プレートのひずみ

測定位置で鋼板の降伏に至らなかった。これは、設計式で安全側に設定したプレートの有効付着長が実際には250 mm よりも短く、有効に抵抗するプレートの面積が大きいことが原因の一つとして考えられる。ここで、最大荷重を比較すると、各試験体、正負方向ともほぼ同じ値となっており、補強プレートを挿入することによってせん断補強効果が得られることがわかる。また、No.2 試験体と No.3 試験体との比較から、補強プレートの厚みと本数、間隔を調整することによって、同じ補強量であれば同等の補強効果が得られると考えられる。

表—2 に最大荷重の試験結果と部材係数を1.0とした場合の計算結果との比較を示す。これらの結果から、No.2、No.3 試験体の実験値は、計算値に比べて5～15%程度大きいものの安全側の結果となっており、先に示した設計手法によって補強プレートが受け持つせん断耐力を評価することが可能であると考えられる。

(2) 鋼板の付着試験

補強プレートとコンクリートとの付着特性を明らかにするため、鋼板の付着試験を行った。試験体の概要を図—8 に示す。試験体は幅約15 mm の箱抜きを設けたコンクリートブロックに厚さ4.5 mm の鋼板 (SS400) を50 cm の深さまでコンクリートに挿入し、周囲にエポキシ樹脂を注入して鋼板を接着した。使用

した材料および鋼板の表面処理方法は荷重試験の場合と同様である。鋼板には、 $\phi 50$ mm の孔を125 mm および250 mm 間隔で設けたもの、先端にずれ止めとして $\phi 13$ mm の鉄筋を溶接したものを用いた。荷重はセンターホールジャッキを用いて鋼板を鉛直方向に引張り、荷重および埋込んだ鋼板の上、中央、下部 (深さ0、250、500 mm) のひずみを測定した。

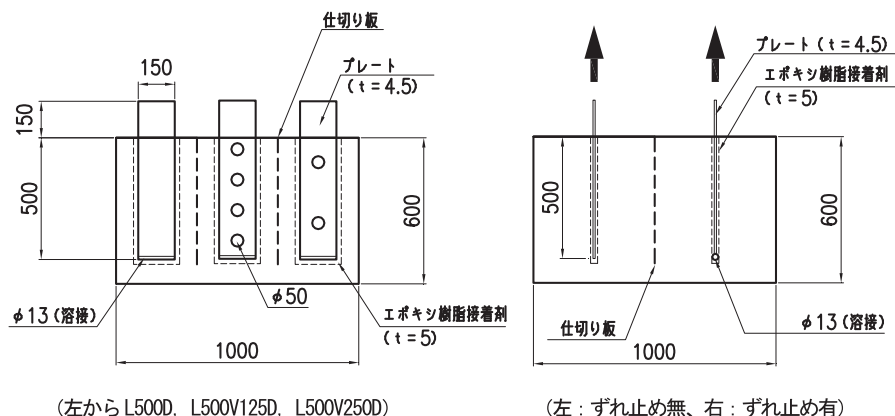
試験結果の一覧を表—3 に示す。鋼板は孔の間隔やずれ止めの有無にかかわらず、全てコンクリート表面近傍で破断した。これらの結果から、孔が無く有効断面積が大きいL500、L500Dを除いた最大荷重は210～230 kN と比較的近い値となった。また、図—9 に一例を示すように、鋼板のひずみは埋込み深さ250 mm までしか生じていない。測定間隔が250 mm であるため250 mm より上部のひずみ挙動が把握できていないが、鋼板降伏時のひずみ発生域は250 mm よ

表—3 試験結果一覧

試験体	定着長 (mm)	孔間隔 (mm)	ずれ止め	最大荷重 (kN)
L500	500	孔無し	無	257.0
L500V125	500	125	無	208.6
L500V250	500	250	無	217.5
L500D	500	孔無し	有	257.8
L500V125D	500	125	有	213.6
L500V250D	500	250	有	234.4

表—2 実験値と計算値との比較

試験体	計算値 (kN)					実験値 (kN)	実験値／計算値
	V _c	V _t = A _{tw} ・f _{ty} ・γ _t ／1.15			V _{ty}		
		A _{tw} (mm ²)	γ _t	V _t			
		正／負	正／負				
No.2	527.2	3,443	0.44	309.6	836.8	919/950	1.10/1.14
No.3	527.2	3,443	0.44	309.6	836.8	880/884	1.05/1.05



図—8 試験体の概要

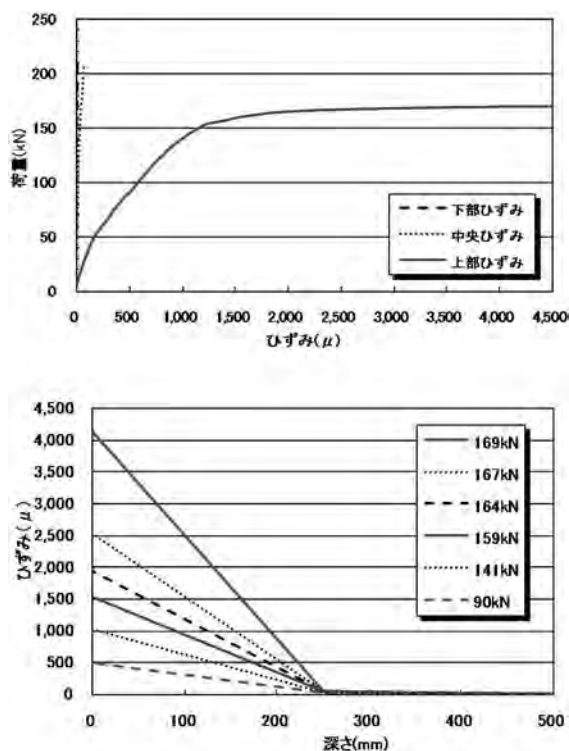


図-9 プレートのひずみ挙動

りも短いと考えられる。したがって、鋼板降伏時の有効付着長は安全側を見て 250 mm とする。

(3) 施工性確認試験

本工法の施工性について、ボックスカルバートの壁を模擬した高さ 3 m、幅 3 m、厚さ 50 cm の鉄筋コンクリート試験体を作製し、図-2 に示した施工手順で確実に施工ができることを確認した。配筋は主筋、配力筋とも D13 (SD295) を 250 mm 間隔、配力筋のかぶり厚は 50 mm、コンクリートの圧縮強度は 30 N/mm² である。補強プレートは厚さ 9 mm、フランジ幅 150 mm、ウェブ高 350 mm で、1 枚の長さを 50 cm (重量: 約 15 kg) とし、高さ方向に 5 段設置した。試験状況を写真-2 に示す。

(a) 溝切り

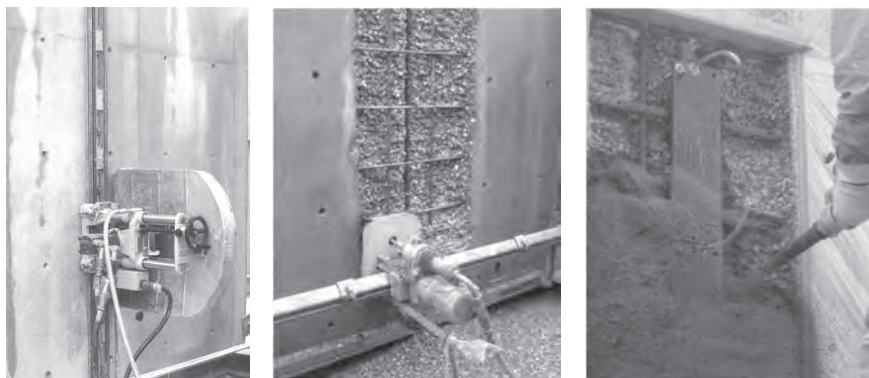
溝切りは、壁の表面にガイドレールを設置し、油圧式ウォールカッターを上下に移動させて行った。ウォールカッターの刃 (厚さ 6 mm) は浅い部分は φ 680 mm、深い部分は φ 1,180 mm の 2 種類を使用し、溝の深さは背面側の鉄筋を切断しないように 410 mm を目標とした。刃は 2 枚を同時に回転させて 2 列の溝を切り、溝の内側に残った薄板状のコンクリートをバールやピックではつり出して幅 24 mm の溝を形成した。実際の溝の深さは 410 ~ 420 mm であった。なお、壁の上下端はウォールカッターでは円弧状の未切断部が残るため、φ 30 mm のコアを連続削孔して溝を形成した。

(b) はつり

はつりは、水圧 2,400 bar、水量 38 ℓ/分のポンプを用いて斜角噴流単穴型のウォータージェット (以下、WJ) により行った。WJ は、水平、鉛直方向に設置したガイドフレームによって移動させ、目標はつり深さ 76 mm に対して実際の深さは 80 ~ 100 mm であった。また、はつり幅は、配力筋のフレア溶接長 (鉄筋径の 10 倍 = 130 mm 以上) を確保するため 600 mm 程度とした。なお、フレームの背面や端部のはつりは、電動ピックを用いて行った。

(c) 補強プレート設置、配力筋復旧

補強プレートを溝に挿入してアンカーボルト (M8) で仮固定し、補強プレートに切断した配力筋の位置をマーキングした後取りはずし、マーキングした位置にマグネットドリルを用いて φ 25 mm の添筋貫通用の穴をウェブに削孔した。この穴に添筋を通して補強プレートを再び挿入・固定し、添筋を配力筋とフレア溶接で一体化した。なお、補強プレートが溝の中心に設置できるように、ウェブの両側にスペーサーを設けて位置を調整した。



(a) 溝切り

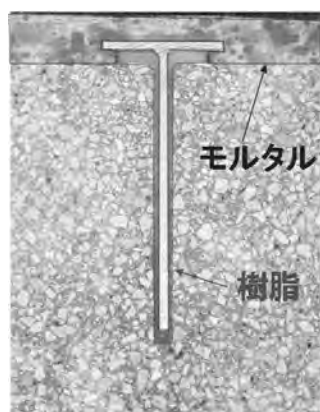
(b) はつり

(c) 補強プレート設置、(d) 断面修復

写真-2 施工試験状況

(d) 断面修復, 樹脂注入

補強プレートの最下部に注入孔, 上部に 50 cm 間隔でエア抜き孔を設置し, プライマー塗布後, 急結剤を添加したポリマーセメントモルタルの湿式吹付けにより約 100 mm の厚さを 1 回で断面修復した。断面修復後, 注入孔からエポキシ樹脂を電動ポンプを用いて注入し, エア抜き孔から樹脂が漏出するのを確認した。エポキシ樹脂は低粘度でほぼ水平な状態で充填されるため, 試験体を切断した結果, 写真—3 に示すように補強プレートと溝やはつり面との隙間への充填性は良好であった。



写真—3 樹脂の充填状況

4. おわりに

今回の試験で得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 補強プレートの厚みや間隔を適切に設定することによって, 鉄筋と同様にせん断補強筋効果が得られる。
- (2) 鋼板厚 4.5 ~ 9 mm, コンクリート強度 30 N/mm² 程度の場合, 補強プレートとコンクリートとの有効付着長を 250 mm 程度とし, 付着特性を考慮することによって補強プレートが受け持つせん断耐力が評価できる。
- (3) 本工法における溝切り, はつり, 補強プレート挿入, 断面修復, 樹脂注入等の一連の流れは, 確実に施工が可能であり, 施工性の向上や工期短縮, 工費削減に有効である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編, 1994.2
- 2) 例えば, 山村賢輔, 清宮理：開削トンネル擁壁部のせん断力に対する鉄筋差込による耐震補強方法, 土木学会論文集 No.777, pp.37-51, 2004.12
- 3) 土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.188-195, 2018.3

【筆者紹介】

前田 敏也 (まえだ としや)
清水建設㈱
土木技術本部 基盤技術部
担当部長

