

# 角形鋼管切梁「Eco ラム<sup>®</sup>工法」の開発

## Development of Square Steel Pipe Struts

福川 丈雄 FUKUKAWA Takeo ジェコス 技術総括部 副部長  
藤本 正貴 FUJIMOTO Masaki ジェコス 技術部 副部長

### 要旨

土留め支保工の重要部材である切梁は従来より H 形鋼を使用しているが、開断面であることから座屈性能を確保するために中間杭による部材中間の支点（6～8 m 間隔）を必要とする。

『Eco ラム<sup>®</sup>工法』は、土留め支保工の切梁に閉鎖断面である角形鋼管を使用することにより、同じ作用軸力下では座屈長を長くでき、結果として中間杭を省略できる地下工事の省力化および躯体品質向上に寄与する技術である。

本報では、開発概要、作業荷重を考慮した切梁材曲げモーメント算定式およびその確認のための載荷実験について紹介する。

### Abstract:

Wide flange section is used for strut member to support earth retaining wall. This kind of struts requires intermediate support securing buckling strength of compressed struts members.

Square steel pipe strut has been developed for intermediate support free strutting systems. Eliminating intermediate support makes it possible to perform excavation work more quickly with better quality of base concrete.

This is to report the development outline, formula for incurred bending moment of the struts, and compressed test of steel pipe strut.

## 1. はじめに

近年の掘削土留め工事は、観測施工等の充実により設計施工品質は着実に向上しているが、更なる合理化が求められている。ここで、土留め支保工部材に着目すると、従来から H 形鋼が用いられており、切梁材では、スパンが長くなる場合は、弱軸方向（通常は水平方向）の座屈止めとして、中間杭が設置される。図 1 に土留め支保工の標準計画図を示す。

切梁材に鉛直方向と水平方向の剛性差がない角形鋼管を用いれば、中間杭を省略することができ、作業空間が広がり、土留め工事の施工性・安全性の向上が期待できる。

図 2 に角形鋼管を用いた切梁（以下、コラム切梁と略記する）による土留め支保工計画を示す。

本報は、コラム切梁の構造と特徴、曲げモーメント算定式の導出、実大軸力載荷試験における性能評価および『Eco ラム<sup>®</sup>工法』の適用について述べる。

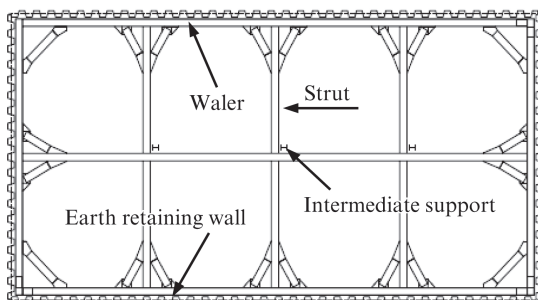


図 1 土留め支保工の標準計画

Fig. 1 Standard layout of strutting system

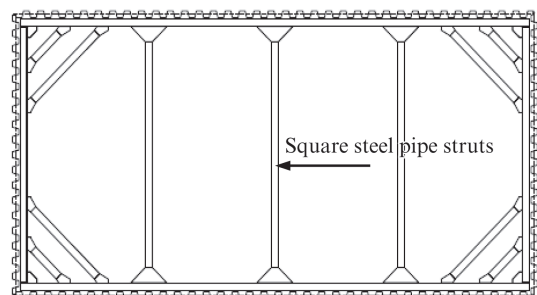


図 2 コラム切梁による土留め支保工計画

Fig. 2 Strutting system using square steel pipe struts

2018年9月27日受付

## 2. コラム切梁の概要

### 2.1 開発の背景と契機

土留め工法とは、地盤を掘削時に土留め壁、腹起し、切梁、中間杭などを用いて周辺の地盤の崩壊を防止する工法である。特に切梁は、土留め壁に作用する側圧を、腹起しを介した圧縮材として反対側の土留め壁に伝達させ、土留め壁の変形を抑制する最も重要な支保工部材である。

切梁は、写真1に示すように広幅H形鋼を加工した部材の組合せが一般的に使用されている。H形鋼は曲げ部材として優れている一方、圧縮材としては開断面であり、強軸、弱軸を有しており、座屈性能を確保するため、切梁の中間に横方向の変形を拘束する支点（通常6～8m間隔）が必要となる。この中間支点は、通常土中に打ちこまれた中間杭に切梁を緊結することにより拘束点として機能する。図3に切梁交差部を示す。中間杭は、掘削作業の障害となるだけでなく、基礎底版等の構造躯体を貫通するため、貫通部の補強工事や止水工事が必要となり、躯体品質並びに工程上の弱点となる。

また、図4に示すように切梁継手部や切梁火打の取り付けボルトの数量が多く施工能率に課題があった。

一方、海外の山留め工事に目を向けると、円形鋼管切梁

による土留め支保工の技術は確立されており、写真2に示すように大規模現場での実績が多数報告されている。これらの事例に着目するとともに、地下工事における施工能率の向上および構造躯体の品質向上を目的に、前述した従来工法の課題解決に取り組んだ。

本技術では、従来の既存切梁材との接合組合せ、架設・解体工事の施工性ならびに保管・整備の観点から角形鋼管を選定し、『Ecoラム®工法』の開発に至った。

### 2.2 コラム切梁の構造と特徴

コラム切梁の構造を図5に示す。コラム切梁と、油圧ジャッキ、火打ちピース、調整材で構成され、各部材同士はボルト接合される。コラム切梁は冷間ロール成形材（STKR490）、調整材はコラム切梁と外径が同じH形鋼を加工したものを using ている。

従来型の土留め部材との互換性を確保するために、部材

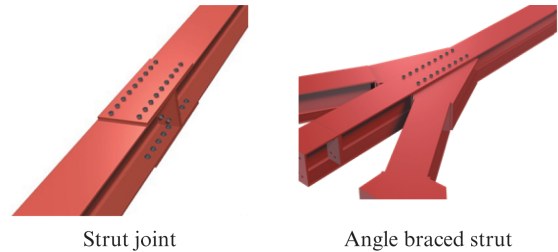


図4 切梁・火打梁 継手部  
Fig. 4 Ordinary struts' joints



写真1 山留め支保工材  
Photo 1 Ordinary strut member

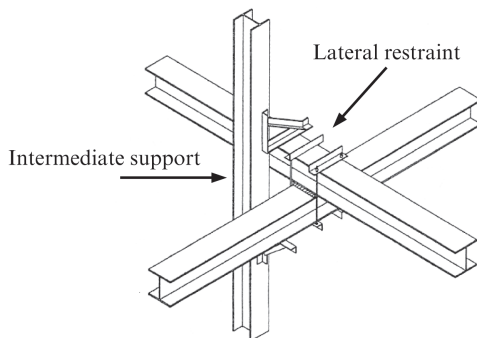


図3 切梁交差部  
Fig. 3 Intermediate strut support

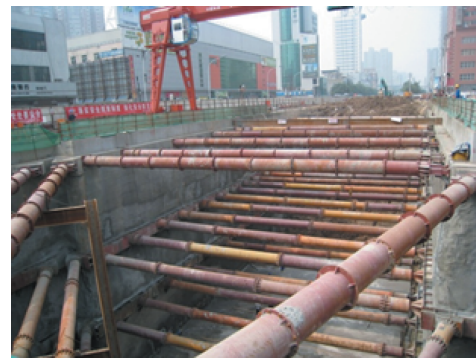


写真2 円形鋼管切梁の施工事例  
Photo 2 Construction site using steel pipe struts

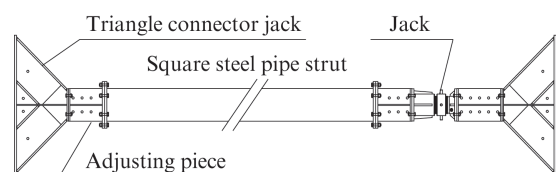


図5 コラム切梁の構造  
Fig. 5 Assembly of square steel pipe strut

同士の接合ディテールを新たに設計した。図6に従来の部材と接合する調整部材，コラム切梁同士の接合部を示す。

これらの部材を接合連結したこと特徴とする切梁装置として平成30年8月10日に特許を取得した。

構造上の特徴は，座屈性能の高い閉鎖断面である角型鋼管を切梁に採用したことである。H形鋼部材に比べ座屈性能が大幅に向上するため，同じ作用軸力下では座屈長が長くなり，結果として中間杭を省略できる。現在までに，□350，□400を商品化しており，□400では最大18mまで中間杭を使用せずに架設でき，切梁1本あたりのスパン（間隔）も広げることができる。図7にコラム切梁の座屈スパンの比較を示す。

### 2.3 コラム切梁の継手仕様の決定

コラム切梁継手部はシンプルな形状で確実に軸力が伝達され，かつ十分な曲げ強度を有しなければならない。そこで異なる継手仕様3種類および継手無しの計4体の曲げ試験を実施した。試験体は断面サイズ□350×16のSTKR490を用い，2つのエンドプレート付きコラム切梁をボルトで接合した（エンドプレート形状の異なる）Type-1, Type-2, カバープレートで接合したType-3およびコラム単体のType-4の4体であり，仕様を図8に示す。

単純支間3.3mの中央に継手を設置した試験体の中央部

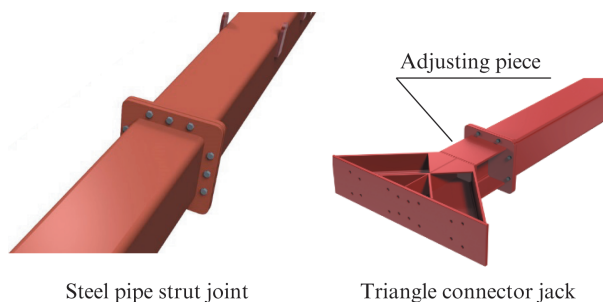


図6 コラム切梁の接合部材

Fig. 6 Square steel pipe strut joints

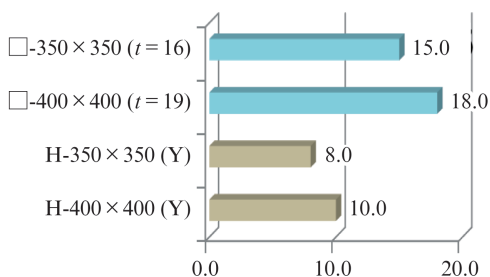


図7 コラム切梁の座屈スパンの比較

Fig. 7 Comparison of buckling length

1.3 m間に軸直角方向荷重点を設け，曲げ破壊試験3.3 mの中央に継手を設置した試験とした。荷重は継手ボルトの破断または継手プレートの降伏までとした。試験要領を図9に示す。

Type-1からType-4の試験結果を表1，図10に示す。荷重300 kN程度までは概ね同一の荷重たわみ関係である。荷重300 kNを超えるとType-1からType-3の剛性は低下し，特にType-3の低下率は大きい。Type-1とType-2は，最大荷重までほぼ同一の荷重たわみ関係であることが確認できた<sup>1)</sup>。

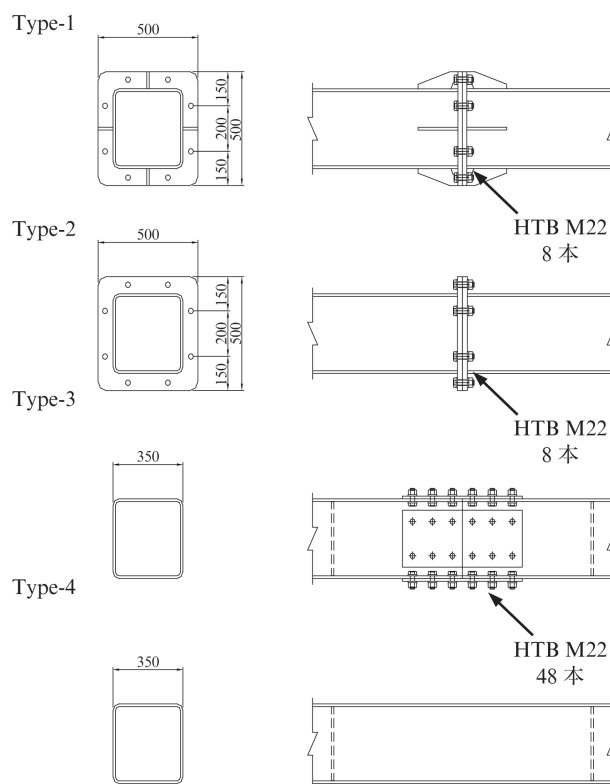


図8 試験体仕様

Fig. 8 Test specimen

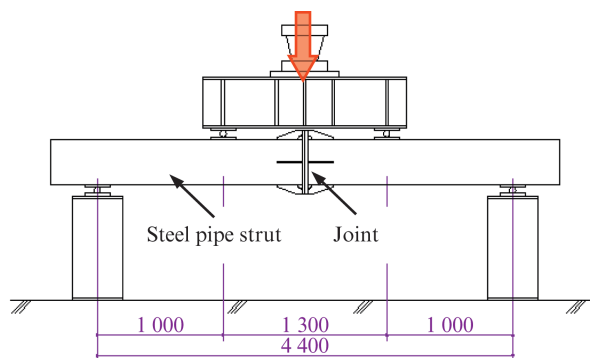


図9 継手曲げ試験要領

Fig. 9 Arrangement for bending test for joint

表1 試験結果の比較  
Table 1 Test result

	Maximum load			Final phenomena
	Load (kN)	Deflection at loading point (mm)	Deflection at center (mm)	
Type-1	979.5	16.5	19.4	Fracture of joint bolt (4bolts)
Type-2	942.2	15.8	18.5	Fracture of joint bolt (3bolts)
Type-3	923.7	22.3	30.3	Yield of splice plate
Type-4	1 503.4	39.0	37.6	Maximum deformation

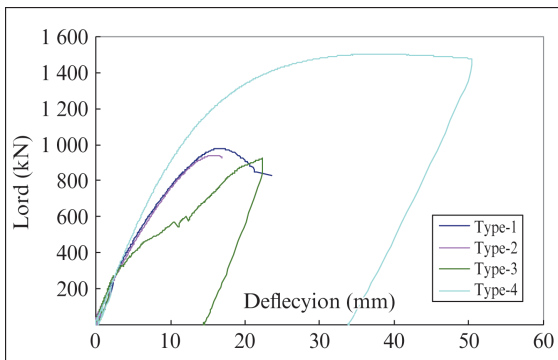


図10 荷重～たわみ曲線  
Fig. 10 Load vs. deflection curve

### 3. コラム切梁の曲げモーメント算定式の導出

両端ピン支持を前提に、軸力と鉛直荷重（等分布荷重）を受けるコラム切梁に生じる曲げモーメントを与える理論式を以下に導出する。両端の調整材やプレロードジャッキは材長が短く、曲げ剛性も極端に低くないこと、材軸方向には圧縮軸力が常時作用することを勘案し、全長に渡って均質なコラム切梁、すなわち角形鋼管の単一部材として扱う。コラム切梁の曲げ剛性を  $EI$ 、たわみを  $u$ 、初期たわみを  $u_0$ 、作用軸力を  $N$ 、等分布荷重を  $w$  とし、微小要素の釣合いを考えると次式の関係が成立する。

$$EI \frac{d^4(u-u_0)}{dz^4} + N \cdot \frac{d^2u}{dz^2} - w = 0 \dots\dots\dots (1)$$

初期たわみ  $u_0$  は振幅  $K_1$  である半波の  $\sin$  波で与える。ただし、部材長（ピン間長さ）を1とする。

$$u_0 = K_1 \sin \frac{\pi}{l} z \dots\dots\dots (2)$$

また、両端ピン支持であるから、 $z=0, z=1$  において次式が成立する。

$$u=0, r_f EI \frac{d^2(u-u_0)}{dz^2} = 0 \dots\dots\dots (3.a), (3.b)$$

(1)～(3) 式より、軸力  $N$ 、鉛直荷重  $w$  が作用したときのたわみ曲線  $u$  は次式で求められる。

$$u = EI \frac{w}{N^2} \cdot \left\{ \cos \sqrt{\frac{N}{EI}} z - \frac{\cos \sqrt{\frac{N}{EI}} l - 1}{\sin \sqrt{\frac{N}{EI}} l} \cdot \sin \sqrt{\frac{N}{EI}} z - 1 \right\} + \frac{K_1}{1 - N \cdot l^2 / (\pi^2 EI)} \sin \frac{\pi}{l} z + \frac{w}{2N} z(z-l) \dots (4)$$

作用する曲げモーメント  $M$  は次式で求められる。

$$M = -EI \frac{d^2(u-u_0)}{dz^2} = N \cdot u \dots\dots\dots (5)$$

また、図11に示す鉛直方向の一点集中荷重  $P_V$  を考慮する場合は以下のようなになる。軸力  $N$  が作用せず、 $P_V$  のみが作用したときに生じるたわみに初期たわみ  $u_0$  を加えた値を新たに初期たわみとして定義して、(1), (3) 式によりたわみ曲線  $u$  が求められる。曲げモーメント分布は(5)式の左辺に  $P_V$  のみが作用したときの曲げモーメント分布を重ね合わせることで求めることができる。

### 4. 実大軸力載荷実験

#### 4.1 試験体および実験の概要

比較的長いコラム切梁構造の座屈性能の確認と、前述した曲げモーメント理論式との整合性の確認を目的に、実大の軸力載荷試験を行った。図11に試験体形状および載荷方法の概要を、図12に切梁に用いたコラムの引張試験結果を示す。コラム切梁は断面サイズ  $\square$ -350×16 を用いた。本試験体では火打ちピースは無視し、試験体の両端にピン支持部材を設けている。ピンの回転方向は図11上図の上下方向であり、ピン中心間長さは13 393 mm である。載荷前に、試験体全長がおおよそ水平を保つように、鉛直方向に支えを設けた状態で変位計測および歪計測の初期値をとり、その後上記の支えを外した。その後、図11に示す水平油圧ジャッキによって1950 kNの軸力を与え、これを保持した

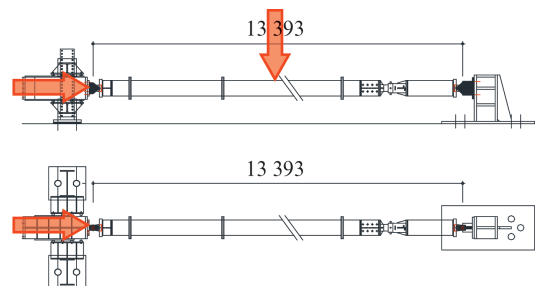


図11 試験体および載荷装置の概要  
Fig. 11 Arrangement for compress test

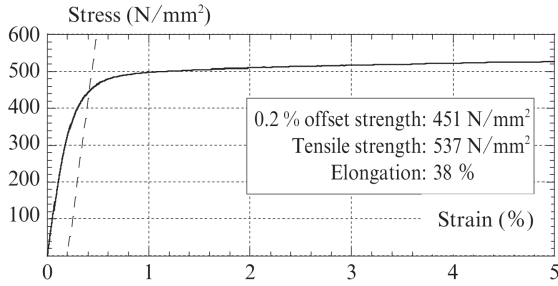


図 12 供試鋼 (コラム切梁 STKR490 の引張試験結果)

Fig. 12 Stress-strain curve of test specimen

状態で、試験体中央の鉛直油圧ジャッキで漸増載荷し、耐力が低下するまで載荷を継続した。

なお、一般に切梁の設計では鉛直荷重は自重や積載荷重を想定した 5 kN/m 程度の等分布荷重を仮定するが、これを実験で再現するのは容易でないことから、本試験では 1 点集中荷重で代用した。

#### 4.2 実験結果

図 13 に実験結果を示す。(a) は鉛直ジャッキによる荷重  $P_V$ —試験体中央の鉛直変位  $u_V$  関係である。(b-1) ~ (b-3) はそれぞれ  $P_V=25$  kN, 50 kN, 70 kN ((a) の▼) におけるコラム切梁の曲げモーメント分布である。(c-1)~(c-3) は、 $P_V=25$  kN, 50 kN, 70 kN において次式より計算される値の分布を表したものである。なお、 $\phi=1$  が降伏条件を表す。

$$\Phi = \frac{N}{N_y} + \frac{M}{M_y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $N$ : 水平ジャッキによる軸力

$N_y$ : コラム切梁の降伏軸力

$M$ : コラム切梁の曲げモーメント

$M_y$ : コラム切梁の降伏曲げモーメント

ただし、図 12 にみるように、本試験体に用いたコラム切梁素材は早々に接線剛性が低下し始めており、ここでは  $N_y$  は接線剛性が初期剛性の 1/2 となるとき軸力 (降伏応力が 0.2% オフセット耐力の約 7 割=324 N/mm<sup>2</sup>) と定義した。図 13 (b), (c) において、プロットつきの分布が実験結果であり、プロットなしの点線は 3 章に示す理論式による計算値である。

図 13 (a) において、 $P_V=0$  において  $u_V$  が増大しているのは水平ジャッキによる軸力  $N$  の作用に伴うものである。また、 $P_V=50$  kN 付近より断続的に荷重が若干下がっているが、これはボルトのすべりに起因するものである。終局状態に至るまで、急激な荷重低下やたわみの急増は見られず、徐々に剛性が低下しながらたわみが増大し、載荷装置のストローク限界に達した時点で載荷終了とした。

図 13 (b), (c) より、多少の相違はあるものの  $P_V=25$  kN,  $P_V=50$  kN においては上述の理論式による計算は実験結果を

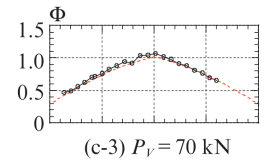
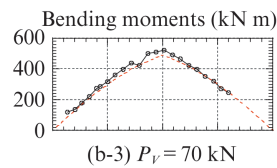
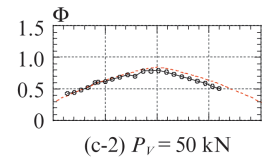
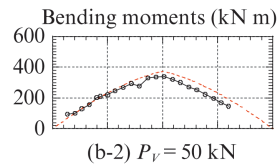
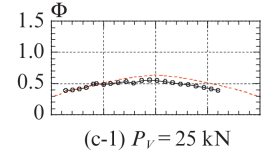
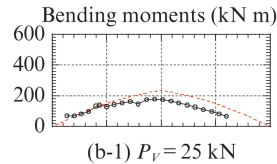
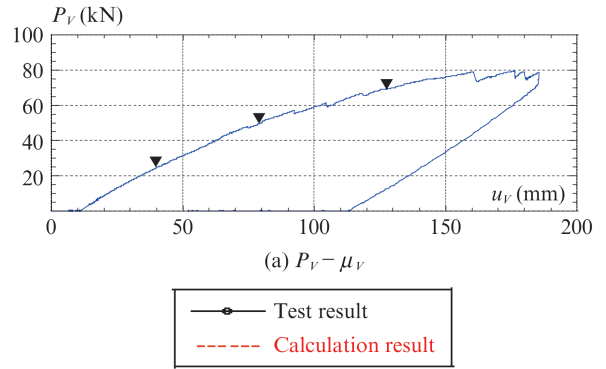


図 13 実験結果

Fig. 13 Test result

おおむね捉えているといえる。計算結果と実験結果との差異は、計算で仮定している初期たわみと実勢値との差異、生じている変形モードの違い (計算では対称形の 1 次モードを仮定) に起因するものと考えられる。また、 $P_V=70$  kN においては、 $\phi=1$  を上まわっており、コラム切梁の曲げ剛性が低下し始めていることから、弾性保持を想定したたわみ計算結果に対して実験結果がやや上まわっている<sup>2)</sup>。

### 5. 『Ecoラム®工法』の適用

#### 5.1 開削土留め工事での採用事例

開削工法によるトンネルアプローチ部土留め工事における『Ecoラム®工法』の採用事例を写真 3 に示す。当該工事の技術的な課題は、切梁座屈防止用の中間杭により、掘削重機の動きが制限され作業効率が低下すること、中間杭のケレン作業は人力で行うため、掘削範囲内で人と重機の混在作業が発生することである。そこでコラム切梁を採用し中間杭を省略、掘削および躯体構築時の作業性、安全性が格段に向上した。また、中間杭打設作業の省略と地下躯体の底版・頂版部における杭貫通部の補強鉄筋、止水処理、杭



写真3 Eco ラム®工法の適用事例

Photo 3 Intermediate support free excavation work

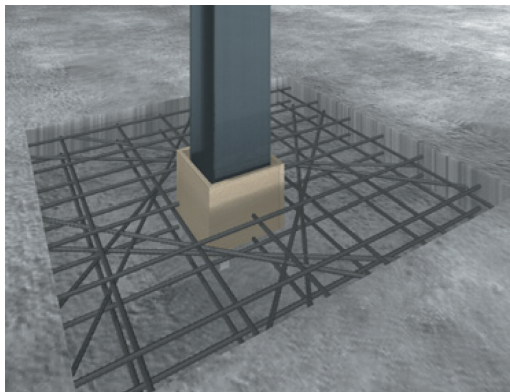


図14 躯体貫通部の処理

Fig. 14 Base concrete penetrate by intermediate support

切断等の作業が省略され、工程短縮および躯体品質向上の効果が発揮された。

さらに、コラム切梁部材の接合手間等が減り、架設・撤去の工程は10%程度削減できた。図14に中間杭の躯体貫通部の処理を示す。

## 5.2 コラム切梁の効果と適用範囲

座屈性能の高いコラム切梁を採用することにより、下記に示す効果が期待できる。

- (1) 躯体品質向上：鉄筋補強・止水処理・中間杭の撤去が不要となり躯体品質が向上する。
- (2) 工期短縮：中間杭の打設・撤去が不要となる。また、部材の接合方法も簡略化できる。
- (3) 安全性向上：作業時間短縮、杭打設重機作業の削減で安全性が向上する。

- (4) 作業効率向上：作業空間が広がり、掘削や躯体工事の能率が向上する。
- (5) 経済性向上：中間杭不要で経済性も向上する。

また、適用範囲としては、掘削工事における切梁式土留め工法で、掘削深さが3m以上、水平に切梁が架けられる土留め壁（親杭横矢板壁・鋼矢板壁・ソイル柱列壁）に対応可能である。特に効果の高い適用範囲は、開削幅が9～18mの現場、一方向切梁計画の現場、中間杭の施工費が大きい現場（杭が長い、地盤が硬質、既存躯体を削孔）である。

## 6. おわりに

コラム切梁の構造部材の特徴と曲げ座屈性能の確認、適用効果について報告した。コラム切梁継手部の仕様については、Type-2継手が、実用上の耐力を保有しながらType-3よりボルト本数が少なく経済的な構造であることが確認でき、採用に至った。実大部材による軸力載荷実験では、弾性限界まで比較的安定した履歴を示し、終局時も急激な耐力低下や不安定現象は生じなかった。また、軸力と鉛直荷重（等分布荷重）を受ける部材の曲げモーメント分布を与える理論式を導出し、理論式による計算結果は実験結果をおおむね捉えていることを確認した。

実現場における適用事例では、施工リスク回避のみならず、生産性向上（作業性・工期・躯体品質）、安全性向上の効果が得られた。土留め工事の合理化が求められる中、今後も『Eco ラム®工法』の更なる技術向上を図っていく所存である。

### 参考文献

- 1) 松山積夫ほか. 角形鋼管を用いた切梁構造の強度確認試験. 第71回土木学会年次学術講演会. 2016.
- 2) 木下智裕ほか. 角形鋼管を用いた切梁構造の実大載荷実験. 日本建築学会学術講演会. 2016.



福川 丈雄



藤本 正貴