

# 中詰めコンクリートを有する鋼製地中連続壁の 2 方向版利用の可能性

Experimental Study for Utilizing Steel/Composite Diaphragm Wall as Bi-directional Wall

酒井 邦 登 (さかい くにと)

東急建設株式会社土木技術部技術第二課 副参事

広 沢 規 行 (ひろさわ のりゆき)

新日本製鐵株式会社技術開発本部鉄鋼研究所  
鋼構造研究開発センター 主任研究員

毎 田 敏 郎 (まいだ としろう)

東急建設株式会社土木技術部長

龍 田 昌 毅 (たつた まさたか)

新日本製鐵株式会社建材開発技術部  
土木建材技術グループ 掛長

## 1. はじめに

近年、地下空間開発の活発化とともに、地下構造物は大深度化、大型化の傾向を強めてきている。これに対する重要な技術である RC 地中連続壁工法は施工管理が複雑になるだけでなく、壁厚増大による必要建設用地の増加といった新たな問題を抱えている。建設コストの中で地価の占める割合が大きいため、狭隘でしかも地価の高い都市部においては、その適用性について問題が生じる場合もある。

このような状況のもと開発された鋼製地中連続壁(図-1 参照)は、工場製作の鋼製エレメントによって壁体を構築するため、信頼性が高く、高剛性・高耐力であることからスレンダー化を実現することができる。しかも、プレファブ工法であるため施工の省力化・急速化を図ることも可能である。

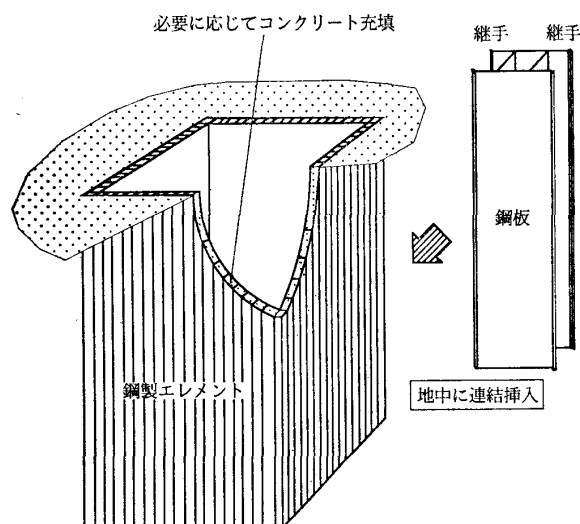


図-1 鋼製地中連続壁工法の概要

従来、土留め壁はその平面形状や形式、掘削深さ、支保構造のいかんにかかわらず、鉛直方向の二次元梁として設計されてきた。しかし、実際に用いられる土留め壁が RC 地中連続壁のように横方向剛性が非常に高い場合、土留め壁の横方向剛性による曲げ変形抑制効果を考慮すれば、合理的な設計ができるものと考えられる。2 方向版設計された地中連続壁による土留めでは、横方向剛性を考慮しているので、腹起こしを必要とせず、仮設コストの低減、さらに建設用地の有効利用や作業の急速化を図ることが可能となる。

鋼製地中連続壁も横方向に比較的丈夫な継手を有しているため、特に鋼製エレメント内部に中詰めコンクリートを打設した鋼・コンクリートサンドイッチ構造の鋼製地中連続壁は、壁に横方向剛性を期待できる可能性があると考えられる。

鋼製地中連続壁は、施工ガイドとしての嵌合タイプのエレメント間継手があり、面外曲げに抵抗する鋼材が不連続であることから、2 方向版利用にあたっては、詳細な検討が必要である。しかし、嵌合継手の場合でも、母材強度より大きな継手耐力を有していることから、フランジの単鉄筋とみなして横方向剛性を期待しても良いものと考えられる。

したがって、継手を持った鋼製地中連続壁の横方向曲げ耐力と横方向剛性を評価するため、水平方向の梁供試体による曲げ実験を実施した。

本報告は、曲げ実験結果に基づいて鋼製地中連続壁の 2 方向版利用について検討するものである。

## 2. 土留め壁の三次元効果

平面規模に対して深度の大きな立坑では、二次元で設計された土留め壁に比較して断面力、変位が小さくなる傾向がある。これは、地盤の三次元効果と構造の三次元効果とによるものと考えられる。

構造の三次元効果とは、実際に用いられる土留め壁がRC地中連続壁のように横方向剛性が非常に高い場合、元来、土留め壁が有している横方向剛性が曲げ変形抑制効果を発揮するため、二次元で設計された土留め壁に比較して断面力、変位を小さくする傾向をいう。したがって、元来、土留め壁が有している横方向剛性による曲げ変形抑制効果を形状効果として、設計に反映すれば、より合理的な設計ができるものと考えられる。

さて、弾塑性法や二次元有限要素法により土留めの2方向版利用を検討するためには、壁の水平方向曲げ変形抑制効果を評価する必要がある。これは、地盤反力係数あるいは変形係数で評価でき、土留め壁の構造から決定できると考えられる。

次に、地盤の三次元効果とは、平面規模の小さい立坑において地盤の水平方向アーチングによる三次元効果が発現し、二次元で設計された土留め壁に比較して、作用する主働土圧を小さく、受働土圧を大

きくする傾向をいう。本報告では、地盤の三次元効果は取り扱わないこととする。

## 3. 載荷試験

### 3.1 試験体

試験体は、表—1に示す3種類を製作した。Type-1, 2の直線矢板継手は圧縮嵌合され、Type-1の継手余裕部分にはモルタルを充填した。

図—2にType-1~3の形状寸法を示す。

### 3.2 使用材料

試験に用いるコンクリートの配合表を表—2に示す。コンクリートは7日強度で240kgf/cm<sup>2</sup>を目標としたため、混和剤に早強剤を使用した。

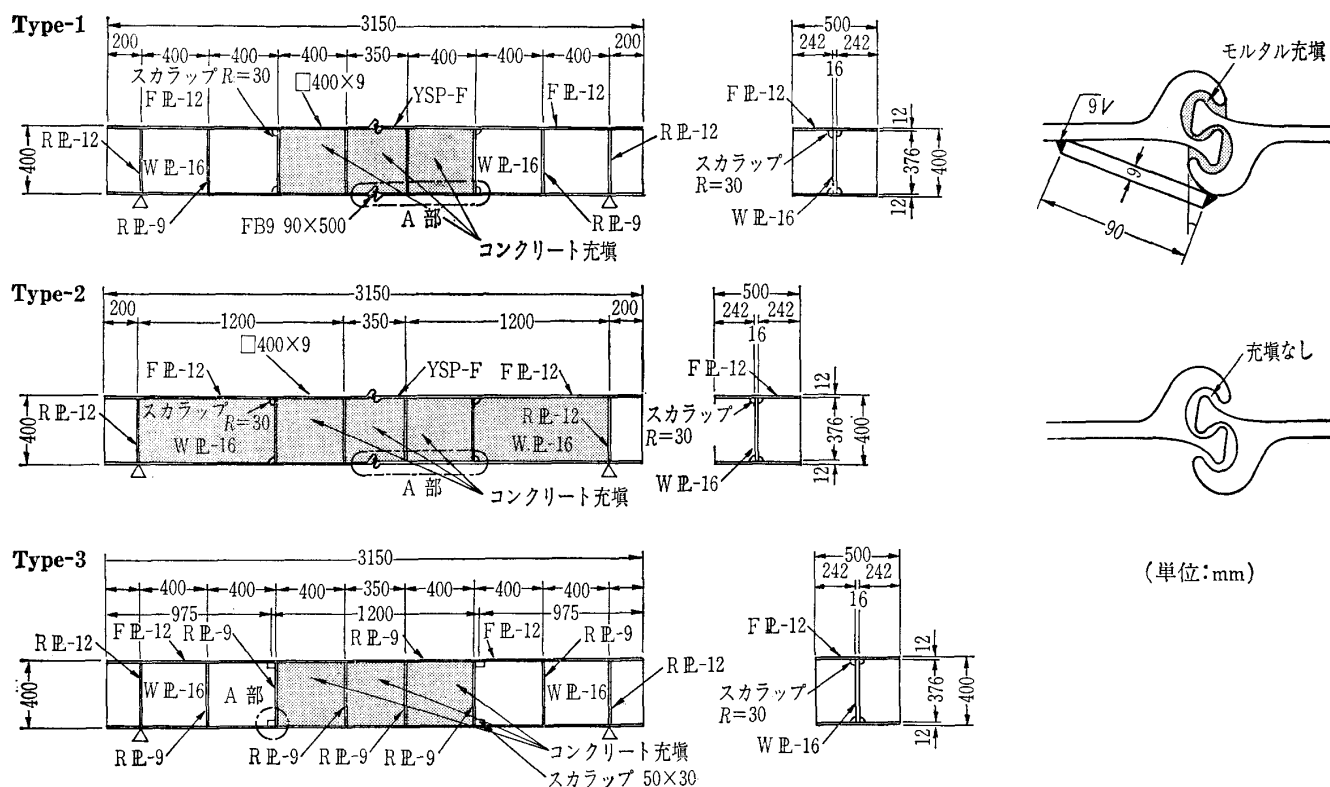
また、表—3には、試験当日確認したコンクリートの圧縮強度、弾性係数およびポアソン比を示す。試験体は各3体製作し、その平均値を使用した。表—4に使用した鋼材の種類と物性値を示す。

### 3.3 供試体製作

供試体は、角形鋼管、厚板、および直線矢板など

表—1 試験体一覧

| No.    | 供試体名 | 継手仕様        |
|--------|------|-------------|
| Type-1 | BX-A | 直線矢板継手嵌合部溶接 |
| Type-2 | BX-N | 直線矢板継手嵌合    |
| Type-3 | PL   | ビルトアップ(比較用) |



図—2 試験体の形状寸法

表-2 コンクリート配合表

| 粗骨材<br>最大寸法<br>(mm) | スランプ<br>(cm) | 水セメント比<br>(%) | 細骨材率<br>(%) | 単位体積重量 (kgf/cm <sup>3</sup> ) |     |      |      |      |
|---------------------|--------------|---------------|-------------|-------------------------------|-----|------|------|------|
|                     |              |               |             | セメントC                         | 水W  | 細骨材S | 粗骨材G | 混和剤  |
| 20                  | 18.0         | 48.0          | 43.7        | 373                           | 179 | 754  | 505  | 3.73 |

細骨材：千葉県天羽産山砂，粗骨材：高炉スラグ砕石，混和剤：ポゾリスNo. 75 (AE減水剤促進型)

表-3 使用したコンクリートの物性値

| No.                         | Type-1             | Type-2             | Type-3             |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 供試体名                        | BX-A               | BX-N               | PL                 |
| 打設日                         | 5月28日              | 6月9日               | 5月28日              |
| 試験日                         | 6月7日               | 6月16日              | 6月3日               |
| 圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )  | 253                | 266                | 224                |
| 静弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $2.15 \times 10^5$ | $2.22 \times 10^5$ | $2.15 \times 10^5$ |
| ポアソン比                       | 0.199              | 0.211              | 0.199              |

表-4 鋼材の種類と物性値

| 鋼材種類                            | 板厚<br>9mm<br>SS400 | 板厚<br>12mm<br>SS400 | 板厚<br>16mm<br>SS400 | 直線矢板<br>9.5mm<br>SY295 | 角形鋼管<br>9.0mm<br>STKR400 |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| 降伏点<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )   | 3230               | 3030                | 3010                | 3970                   | 3920                     |
|                                 | 3200               | 3070                | 2780                | 3850                   | 4030                     |
|                                 | 3215               | 3050                | 2895                | 3910                   | 3975                     |
| 引張り強さ<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 4240               | 4250                | 4200                | 5760                   | 4660                     |
|                                 | 4100               | 4200                | 4120                | 5720                   | 4720                     |
|                                 | 4170               | 4225                | 4160                | 5740                   | 4690                     |
| 伸び<br>(%)                       | 32                 | 34                  | 36                  | 25                     | 19                       |
|                                 | 33                 | 35                  | 36                  | 26                     | 19                       |

を気中にて溶接組み立てして製作し，コンクリート打設後，気中養生した。また，実施工での泥水付着を考慮して，鋼・コンクリートの付着を切るように鋼製エレメント内部にグリースを塗布した。

### 3.4 実験方法

#### (1) 荷重装置

曲げ試験には，300tf構造物試験機を使用し，支持条件は両端単純支持とし，2点荷重によって実施した(図-3参照)。

#### (2) 荷重方法

実施した試験供試体は荷重点のせん断の影響をできるだけ小さくするため，純曲げ区間をType-1, 2, 3ともに，900mmとした。

#### (3) 荷重サイクル

荷重は，支点や荷重点と供試体とをなじませるために3tfまで予備荷重し，除荷した。その後，本荷重として，弾性限界まで3tfピッチで段階的に荷重制御で荷重し，降伏域では変形制御で終局限界まで荷重した。

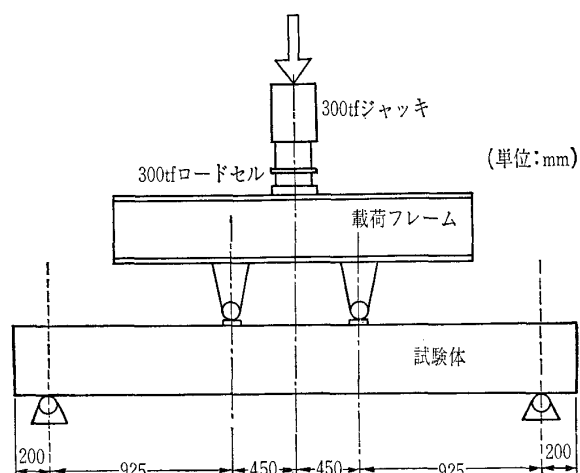


図-3 曲げ試験の荷重装置

表-5 測定項目および計器の基準仕様

| 測定項目      | 測定方法   | 精度         |
|-----------|--------|------------|
| 荷重荷重      | ロードセル  | 100 kgf 以下 |
| コンクリートひずみ | ひずみゲージ | $10^{-6}$  |
| 鋼板ひずみ     | ひずみゲージ | $10^{-6}$  |
| たわみ       | 変位計    | 1/100mm 以下 |
| ひび割れ分布    | 目視     |            |
| 破壊状況      | 目視     |            |

表-6 実験結果の一覧

|        |                             | Type-1 | Type-2 | Type-3 |
|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| 試験体寸法  | 試験体幅 $b$ (mm)               | 500    | 500    | 500    |
|        | 試験体高さ $h$ (mm)              | 400    | 400    | 400    |
|        | 有効高さ $d$ (mm)               | 395    | 395    | 396    |
|        | 試験体長さ $l$ (mm)              | 3150   | 3150   | 3150   |
|        | せん断スパン $a$ (mm)             | 925    | 925    | 925    |
|        | せん断スパン比 $a/d$               | 2.34   | 2.34   | 2.34   |
| 材料     | 使用鋼材                        | 直線矢板   | 厚板     |        |
|        | 厚さ (mm)                     | 9.5    | 9.5    | 9.0    |
|        | 材質                          | SY295  | SY295  | SS400  |
|        | 降伏点(kgf/cm <sup>2</sup> )   | 3910   | 3910   | 3215   |
|        | 引張り強さ(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 5740   | 5740   | 4170   |
| コンクリート | 圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )  | 253    | 266    | 224    |
|        | 縦弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 215000 | 222000 | 215000 |
|        | ポアソン比                       | 0.199  | 0.211  | 0.199  |
|        | 降伏荷重 (tf)                   | 120.0  | 111.0  | 84.0   |
| 諸荷重    | 作用荷重の最大値 (tf)               | 126.3  | 147.0  | 104.4  |
|        | ひび割れ発生荷重 (tf)               | 78.0   | 12.0   | 12.0   |

### 3.5 計測方法

#### (1) 計測項目および観察項目

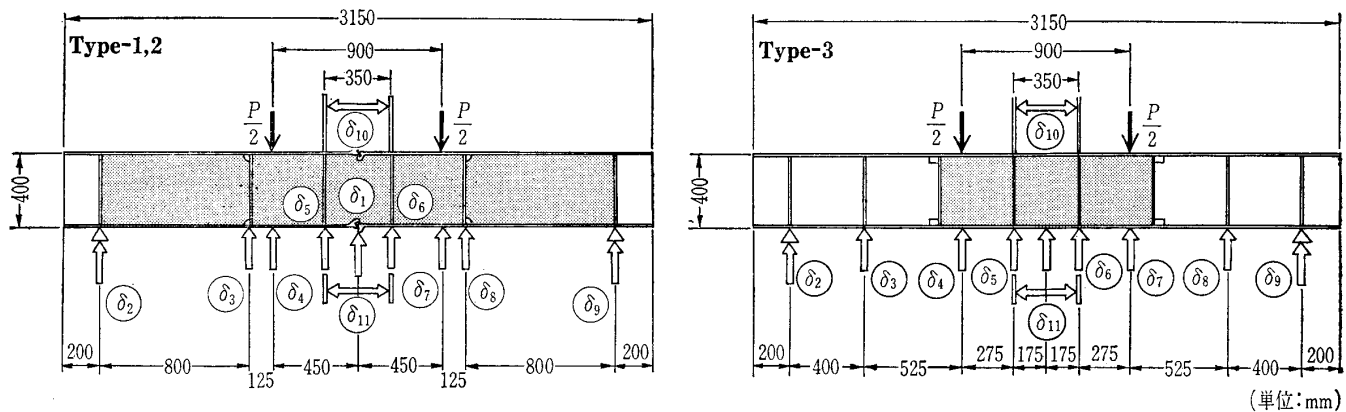


図-4 供試体の変位計測機器位置

計測および観察を行った項目を以下に示す。

- ① 中詰めコンクリートひずみ
- ② 鋼製エレメントひずみ
- ③ 変位
- ④ 中詰めコンクリートのひび割れ状況

測定項目および計器の仕様基準を表-5に示す。

#### (2) 計器の配置

図-4に Type-1, 3の供試体の変位計測位置を示す。Type-2については、Type-1と同じであるため省略する。

## 4. 実験結果

### 4.1 実験結果の一覧

表-6に実験結果の一覧を示す。

### 4.2 破壊状況

図-5(a)に、Type-1のひび割れ状況を示す。荷重 78.0 tf で引張り側継手上にひび割れが発生し、荷重 96.0 tf でその進展は止まった。その後、荷重 100.0 tf から圧縮側鋼材の曲げ変形が顕著となり、荷重 120.0 tf で圧縮側コンクリートに軸力によるひび割れが発生した。載荷とともに変形が進み、梁中央の変位が 60 mm 近くになったため、荷重を除荷し、試験を終了した。

図-5(b)に Type-2のひび割れ状況を示す。荷重 12.0 tf で引張り側継手上に曲げひび割れが発生し、その後、載荷とともにひび割れは進展したが、圧縮側鋼材まで到達しなかった。

荷重 111.0 tf で、圧縮側コンクリートに軸力によるひび割れが発生し、圧縮側鋼材の曲げ変形が著しくなった。その後、載荷とともに変形は進み、梁中央の変位が 90 mm を越えたため、荷重を除荷し、

試験を終了した。また、この供試体継手部は、モルタル充填無しの圧縮嵌合であったため、初期段階において引張り側継手部のがたによる変形(荷重 24.0 tf で梁中央変位 10.9 mm)が発生した。

図-5(c)に Type-3のひび割れ状況を示す。荷重 12.0 tf で、純曲げ区間内の下側フランジとウェブの境界から斜め方向にひび割れが発生した。その後、ひび割れは進展しなかったが、終局あたりでその部分のコンクリートが圧壊した。試験は載荷部直下の上フランジ鋼材が局部変形したとともに、純曲げ区間の引張り側鋼材の降伏が進み、ほとんど荷重が増加しないにもかかわらず、急激に変形が増大し始めたため、梁中央の変位が 70 mm で終了した。

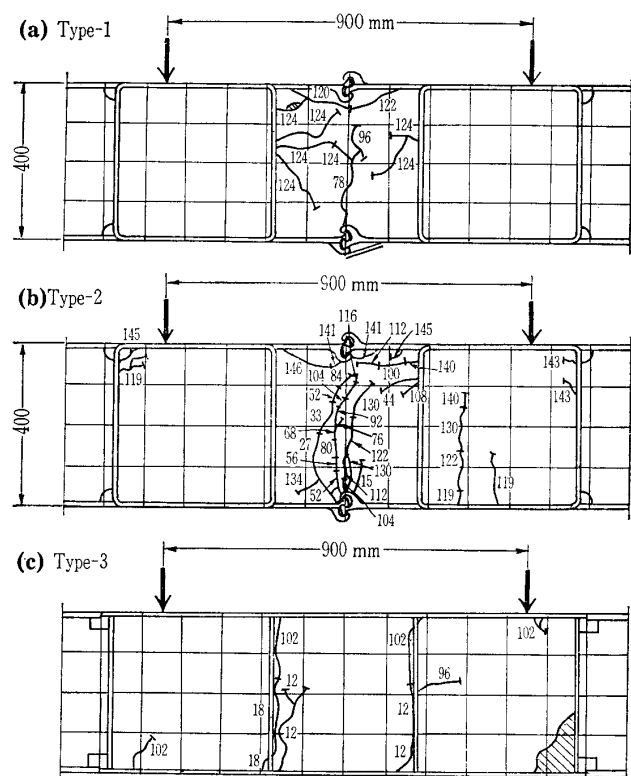
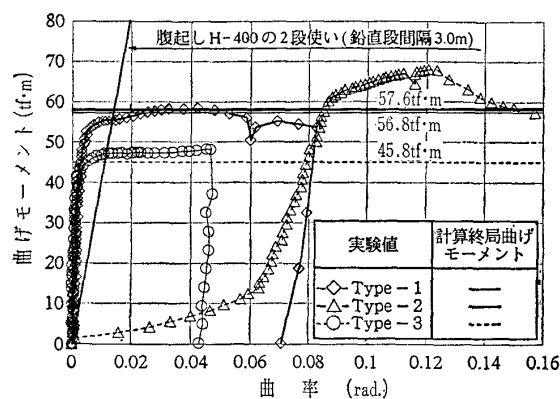
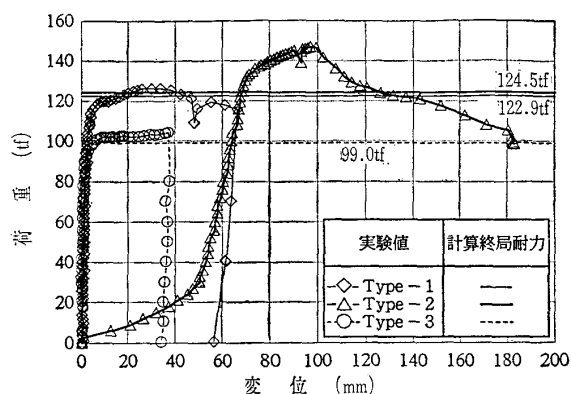


図-5 ひび割れ状況



図—6 曲げモーメントと曲率の関係



図—7 荷重と中央変位の関係

### 4.3 曲げ剛性の評価

計測された変位は全スパン等剛性のものではないので、そのまま剛性を評価することはできない。実際の全スパン等剛性の梁供試体について考察するためには、純曲げ区間の曲率から算出した曲げ剛性をもとに変位を修正する必要がある。そこで、実験により計測された载荷点変位および中央変位から曲率を算定した。

図—6 に Type-1, 2, 3 の曲げモーメントと純曲げ区間内の曲率との関係を示す。また、それぞれのグラフには、引張り側鋼材を補強鉄筋とする単鉄筋 RC 構造として算定した終局曲げモーメントも示す。なお、供試体は切梁間隔 2.75m で、掘削方向に単位幅 0.5m の壁体を取り出したものを想定している。

したがって、それぞれのグラフに、切梁水平間隔は同じとして、H-400×400×13×21 の腹起こしを 2 段使いで 3.0m の鉛直段間隔で配置した場合の理論値 ( $EI$  を 3 分の 1 に低減したもの) を示す。

全供試体の曲げ耐力は、計算終局曲げモーメントを上回っており、曲げ耐力は単鉄筋 RC 構造として算定できることが分かる。ただし、Type-2 については、初期の段階において、継手のがたによる剛性低下が見られるため、変形の照査が必要である。

### 4.4 曲げ耐力の評価

図—7 に Type-1, 2, 3 の荷重と供試体の中央変位との関係を示す。

ただし、ここに示す中央変位は、純曲げ区間の曲率から得られる  $EI$  を用いて、全スパン等剛性として算定したものである。つまり、実験で用いた供試体は全スパン等剛性ではないので、完全な鋼・コンクリートサンドイッチ構造の曲げ剛性を評価するた

めに、純曲げ区間の曲率から得られる  $EI$  を用いて、全スパン等剛性の中央変位に補正した。

また、引張り側フランジの単鉄筋 RC 断面として算定した場合の終局耐力を合わせて示す。これは、継手を有している供試体についても、直線矢板継手は引張りを受けても継手では破壊しない設計となっているため、継手部母材を全断面有効として計算したものである。

Type-1 の試験最大荷重は、RC 断面として算定された終局耐力をほぼ満足し、RC 部材と同等以上の耐力を確保できることが確認される。

Type-2 の試験最大荷重は、RC 断面として算定された終局耐力をほぼ満足し、RC 部材と同等以上の耐力を確保できることが確認される。しかし、Type-2 (圧縮嵌合継手) の場合、荷重 30.0 tf あたりまで、継手のがたによる変位が見られる。したがって、RC 部材として設計する際には、継手がたによる変位増分を考慮する必要がある。

Type-3 の試験最大荷重は、RC 断面として算定された終局耐力を満足し、RC 部材と同等以上の耐力を確保できることが確認される。

## 5. ま と め

継手条件の異なる三つの供試体による曲げ引張り試験により、中詰めコンクリートを有する地中連続壁の 2 方向版曲げ性能を確認した結果、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 掘削側継手を補強すれば、横方向の耐力や剛性を引張り側フランジの単鉄筋 RC 断面として評価でき、2 方向版としての性能を十分確保できる。実際には、掘削に伴って出現する掘削側

## 報文-2305

継手を溶接等により逐次補強する方法が考えられるが、施工過程ごとの照査が必要である (Type-1)。

(2) 直線矢板を嵌合させただけの鋼製エレメントでも、横方向耐力は引張り側フランジの単鉄筋とみなして評価できる (Type-2)。

(3) 直線矢板を嵌合させただけの鋼製エレメントでは、継手のがたによる変形が予想されるため、耐力だけでなく、変形の照査が重要である。また、変形の計算結果によっては、支保工間隔を調整すれば、2方向版としての性能を十分に確保できる (Type-2)。

## 6. おわりに

本実験では、中詰めコンクリートを有する鋼製地中連続壁においては水平方向断面の終局曲げモーメント、終局耐力ともに引張りフランジ鋼材を単鉄筋とする RC 断面とみなして評価でき、2方向版としての性能を十分期待できることが分かった。

いずれの実験結果においても、中詰めコンクリートは、曲げ圧縮を負担していることが明らかである。本実験では、鋼殻とコンクリートとのひずみも測定

しており、中詰めコンクリートの効果を調査できると考えられるが、誌面の都合から、他の機会に紹介することとした。今後、詳細な検討を加え、鋼・コンクリートサンドイッチ構造の地中連続壁の2方向版利用を進める所存である。

謝辞：なお、本研究は鋼製地中連続壁研究会（鋼製地中連続壁協会の前身）の活動の一環として行ったものである。ここに、記して、関係各位のご協力・ご指導に深甚の謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 鋼製地中連続壁協会：技術資料集13，2方向版曲げ試験報告書，東急建設㈱・新日本製鐵㈱，1992。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成3年度版)(施工編)，1991。
- 3) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)，コンクリートライブラリー73，1992。
- 4) 酒井邦登ほか：鋼製地中連続壁の水平方向はり曲げ試験の概要，土木学会第48回年次学術講演会，VI-263，1993。
- 5) 渋沢重彦ほか：面外曲げを受ける鋼製地中連続壁のひびわれおよび破壊状況，土木学会第48回年次学術講演会，VI-262，1993。
- 6) 宮崎 太ほか：鋼製地中連続壁の中詰めコンクリートおよび鋼材のひずみ，土木学会第48回年次学術講演会，VI-261，1993。

(原稿受理 1993.10.22)