

# 開削トンネルにおける合成土留壁構造の 設計概念と合成効果確認実験

大阪建設局 総務部 総務課 金 治 英 貞  
大阪建設局 建設企画部 調査第二課 前 川 和 彦  
神戸第二建設部 須磨工事事務所 佐 藤 奈 津 代

## 要 約

開削トンネルの構築に際し設置される仮設構造物としての土留壁鋼材の応力的に余裕のある部分を利用するために、トンネル本体側壁と土留壁鋼材を一体化する構造（合成土留壁構造）についての試設計を行ない、構造特性を把握した。また、鋼材と側壁との合成効果については、実物大試験体を製作し確認実験を行った。試設計により、都市内の近接構造物の変位抑制が条件となる地域で構築される開削トンネルにおいては、仮設構造物としての土留壁はその要求性能としての変位量に基づく必要剛性で決定されており、土留壁体に発生している応力はその許容値を大きく下回ることが示された。このため、土留壁を本体利用することによって後打ちのRC側壁厚の大幅な低減が図られることが認められた。しかしながら、その実用化に際しては、実物大試験体による合成効果の確認が必要とされた。本稿では、正負曲げ試験、せん断試験結果とともに、本構造がRC構造物として設計可能なことを示している。

キーワード：開削トンネル，土留壁，合成構造，工費縮減

## まえがき

近年、用地、道路環境上の制約から、阪神高速道路公団における計画・設計中の路線においては地下構造路線が増えてきた。それらの代表的な構造としては開削トンネル構造があり、掘削の際に仮設構造物としてSMW工法等による土留壁を構築することとなる。土留壁の設計に際しては、応力や変形に対して安全となるように設計するが、都市部においては近接する重要構造物の沈下を抑制するために、応力的には余裕のある断面となっている。そこで土留壁の応力材としての鋼材を高速道路本体側壁との合成構造（以下、合成土留壁構造と呼ぶ）として用いることにより、応力的に余裕のある鋼材を有効利用することが考えられる。さらに、地震時等の終局時には仮設時の先

行応力は無視しえる長所もある<sup>1)</sup>。

そのことにより、本体側壁部分の壁厚を薄くすることが可能となる。また、通常、土留壁と本体との間は、施工上の必要幅と、また地中構造物として防水工を施すための幅が確保されるが、土留壁と本体側壁とを一体化することでそれらの施工幅が削減される。このため、掘削土量、鉄筋コンクリート量、地盤改良量の削減による工費縮減、工期短縮および資源の有効利用や工事中の環境負荷軽減が期待される。さらに、開削施工幅が削減されることから、用地取得が必要な区間については、用地取得費の軽減も図られる。

そこで、淀川左岸線I期を対象として、同構造の試設計及び従来構造との工費比較、合成壁一般部における土留壁鋼材と後打ちRC側壁との合成効果確認実験を実施してきた<sup>2),3)</sup>。

本稿では、合成土留壁構造の試設計結果及び合成効果確認実験の結果について報告する。なお、平成11年度には「合成土留壁検討会(委員長 小野紘一京都大学教授)」を設立し、合成土留壁構造の実現を目的として種々の技術的問題について検討している。検討会では最終的に同構造の設計・施工指針(案)の策定を目的としている。

## 1. 設計概念と構造特性

### 1-1 構造概念

従来の土木構造物における土留壁の本体利用は、特殊箇所における割高となるRC地中連続壁によるものがほとんどであり、ソイルセメント系の地中連続壁による本体利用は建築構造物の一部として多少みられるのみである<sup>4)</sup>。開削トンネル構造物と建築構造物とは規模、要求性能が大きく異なるものの、その基本概念として、ソイルセメント系の地中連続壁に芯材としてH鋼芯材を利用することにより、工費縮減の目的が期待されることは変わらない。

そこで開削トンネルに対し、SMW工法あるいはTRD工法等によってソイルセメント系の連続壁を構築し、芯材としてH鋼を建て込み、ジベル筋を芯材に溶接して後打ちの鉄筋コンクリートと一体化を図る構造を提案し、その構造緒元を把握するために試設計を実施した。

### 1-2 設計の考え方

図-1の設計フローに示すように、仮設構造物設計(施工時)と本体構造物設計(完成時)の大きく2段階に分けた流れで試設計を行う。

#### (1) 施工時

土留壁として地中連続壁を施工し、施工時荷重に対して、弾塑性解析を実施する。近接構造物への影響を考慮して、変形と応力を満足させる構造とする。

#### (2) 完成時

常時においては、鋼材とRC側壁とをジベル筋を用いて一体化を図り完成時の荷重に対して十分な構造とする。施工時に利用した土留壁鋼材を、

完成後の本体構造物の一部として使用するため、残留応力の問題が生じる。これに対しては「トンネル標準示方書(開削工法編)・同解説」<sup>5)</sup>の連壁本体利用の逐次分離計算法に準拠する。逐次分離計算法とは、まず仮設時の応力計算を弾塑性法などにより算定する。さらに、本体構造物完成後に作用するであろう荷重の増分を考慮したフレーム解析等により算定した増加応力を仮設時の残留応力を付加する手法である。また鋼材とRC内壁とを一体化するジベル筋の計算も上記基準に準拠する。

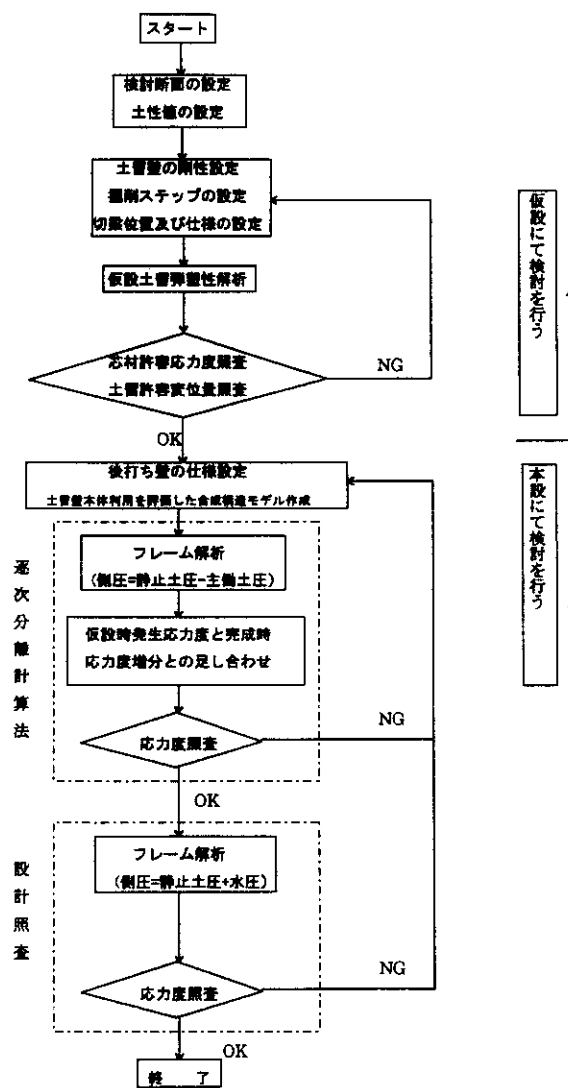


図-1 設計フロー

部材の応力度計算は部材断面の平面保持を前提とし、鋼材を鉄筋に置き換えてRC計算により算定を行う。ただし、上記の土留壁の残留応力を考慮した断面力の他に、完成形骨組に対して全荷重

を作用させた場合の断面力を算出し、厳しい方に  
て部材算定を行うこととする。

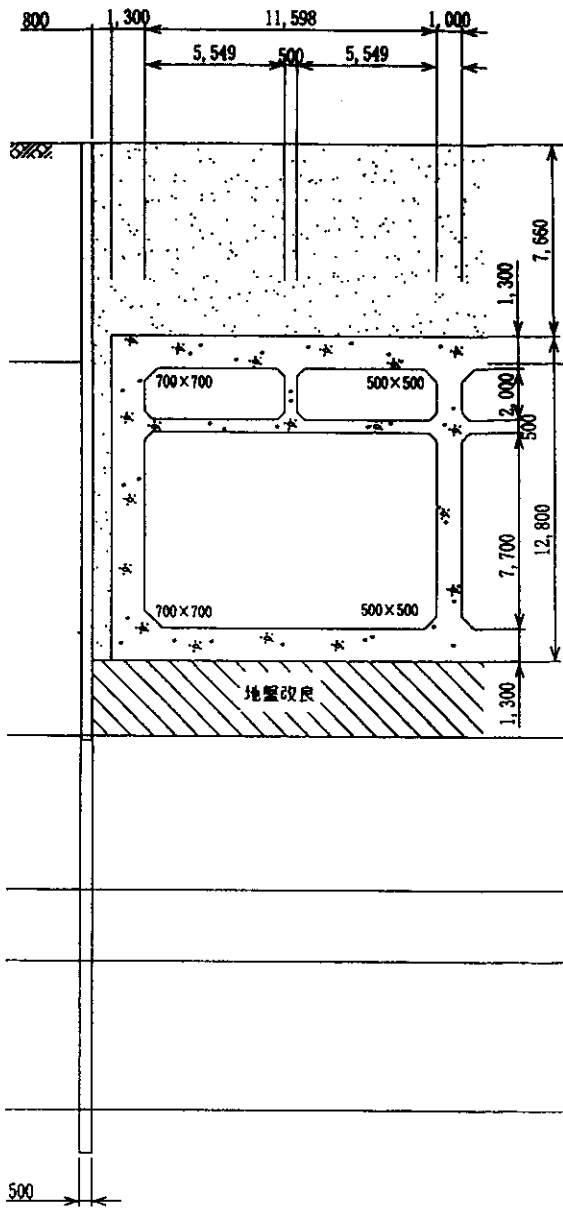


図-2 従来構造断面図

### 1-3 設計検討断面

試設計断面として、掘削深度による工費縮減率の比較を目的として3断面の試設計を実施している。ここではそのうち淀川左岸線I期の島屋工区(St.No.107)での試設計結果を述べる。従来構造による断面図を図-2に土質定数を図-3に示す。検討断面付近は市街地であり、近接する構造物の変位を抑制する必要がある。そこで、構造物下部の地盤に底盤改良を実施し、受働側の抵抗を上げて変位を抑制する。ここでは、近接構造物へ

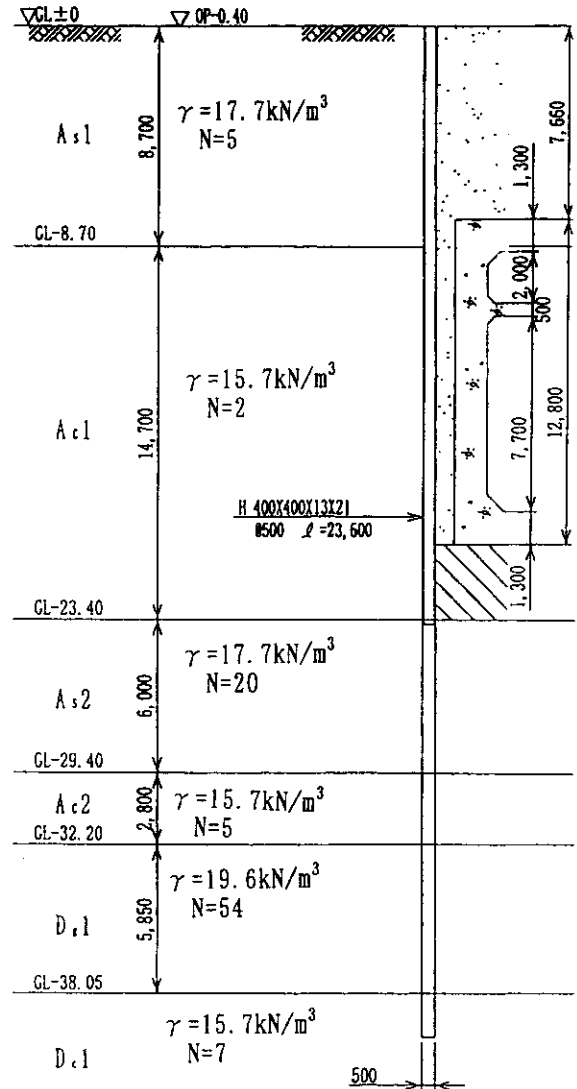


図-3 土質定数

の影響を考慮して背面地盤の最大沈下量を20 mmに抑えることを目的とするが、当該地区におけるFEM解析結果の傾向より、背面地盤の沈下量は土留壁水平変位の約40%となることから、土留壁の最大水平変位を50 mmと設定する。

### 1-4 設計結果と構造特性

#### (1) 施工時(弾塑性解析)

上記条件による弾塑性解析の結果、鋼材の寸法はH 400\*400、鋼材間隔は500 mm、根入れ長は13.54 mとなる。土留壁の本体利用部分における施工時の発生最大曲げモーメントは427 kN・m、発生応力は64 N/mm<sup>2</sup>となり、この値は許容曲げ応力度210 N/mm<sup>2</sup>の約30%である。結果として、背面地盤の沈下量を抑えるために土留壁の許容応力度に比べて応力的には余裕のある設計となつて

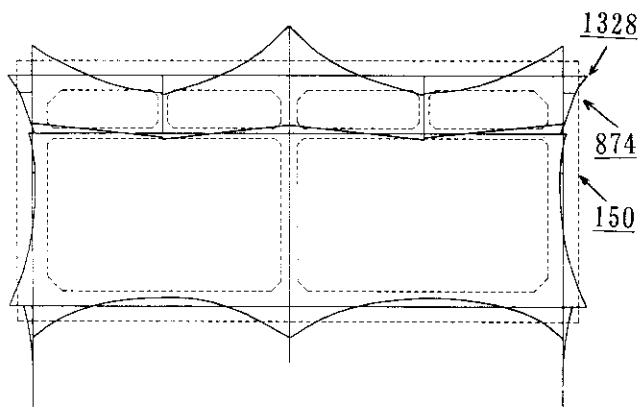


図-4 増加荷重によるモーメント (kN・m)

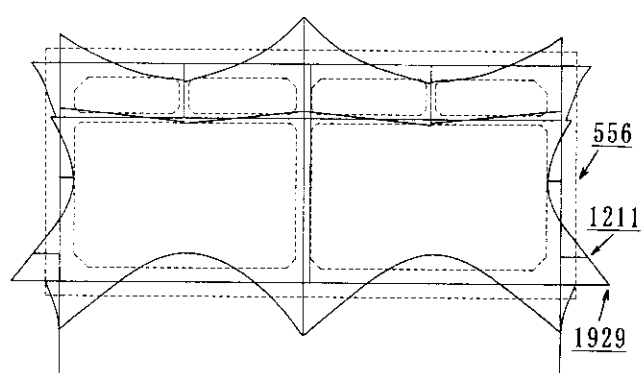


図-5 完成時荷重によるモーメント (kN・m)

いる。

(2) 完成時 (フレーム解析)

図-3に示す土質定数をもとに、躯体に作用させる荷重等については「開削トンネル設計指針(案)」<sup>6)</sup>(以下、「公団指針」)に従って決定した。逐次分離計算法における増加荷重(静止土圧-主動土圧)に対するモーメントを図-4に示す。完成時応力度増分に関しては、内壁コンクリートに引張力が生じる①側壁中央部と、鋼材側が引張となる②隅角部(ハンチなし)及び③隅角部(ハンチあり)に対して照査を行う。②、③の照査箇所設定は「公団指針」による。完成時の構造に対する照査を行ったときのモーメントを図-5に示す。図-4、5中の数値は応力度照査位置における発生モーメントである。応力度の照査結果を

表-1に示す。①についてはH鋼と鉄筋、②と③に対してはH鋼と鉄筋、及びコンクリートそれぞれの発生応力度が許容応力度以下になっているか照査する。いずれも許容応力度に比べて余裕のある結果となっているが、これはRC側壁にトンネル設備設置用の箱抜きを施す必要から、RC側壁厚として550mm確保していることによるものである。

(3) 土留壁と側壁の接合部

鋼材とRC内壁との一体化に関しては、「トンネル標準示方書[開削工法編]・同解説」の資料編「IV地下連続壁の本体利用に関する資料」における設計例をもとに、ジベル筋の必要本数及び配置を決定した。

つまり、接合面における全せん断耐力が接合面

表-1 応力度照査結果

(単位: N/mm<sup>2</sup>)

照査位置		逐次分離計算法による応力度			完成形の応力度	許容応力度	
		仮設時(1)	完成時(2)	合成(1)+(2)			
①側壁中央部	土留壁鋼材	37	9	46	49	140	
	RC側壁 鉄筋	-	-10	-10	-31	180	
②隅角部(ハンチ無し)	土留壁鋼材	-9	-32	-41	-85	140	
	RC側壁	鉄筋	-	40	40	69	180
		コンクリート	-	2	2	6	10
③隅角部(ハンチ有り)	土留壁鋼材	-26	-50	-76	-58	140	
	RC側壁	鉄筋	-	61	61	46	180
		コンクリート	-	4	4	4	10

に作用する全設計せん断力（内壁と土留壁の接合面に作用する鉛直せん断力と軸力，及び側壁に作用する曲げせん断力）を上回るように設計し，水平 250 mm ピッチ，鉛直 450 mm ピッチ配置のジベル筋 D 22（SD 345）が必要とされた。

以上より求められた合成土留壁構造の試設計断面図を図-6 に示す。

## 2. 合成効果確認実験

### 2-1 実験目的

前章で試設計を行った合成土留壁構造について，合成構造としての曲げ，せん断挙動に関する基本特性を把握するための実物大実験を行った。実験では，許容応力度レベルでの平面保持仮定の妥当性確認，および曲げ・せん断耐荷挙動と耐力算定方法の把握を目的とした。

### 2-2 実験方法

試験体は合計 3 体で，鋼材側が引張となる正曲げ試験体 (No. 1) (図-7)，RC 側が引張となる負曲げ試験体 (No. 2)，鋼材側が引張となる状態でせん断破壊に着目したせん断試験体 (No. 3) である。

試験体の諸元は標準的な開削トンネルの試設計を基に決定した。試験体幅は約 1 m で，土留壁用の鋼材を二本並べた幅とし，開削トンネルの壁厚に相当する試験体断面高さは約 1 m，スパン 7 m（全長 8 m）の単純合成梁である。No. 1 および No. 2 は中央の等曲げ区間 2 m が，No. 3 はせん

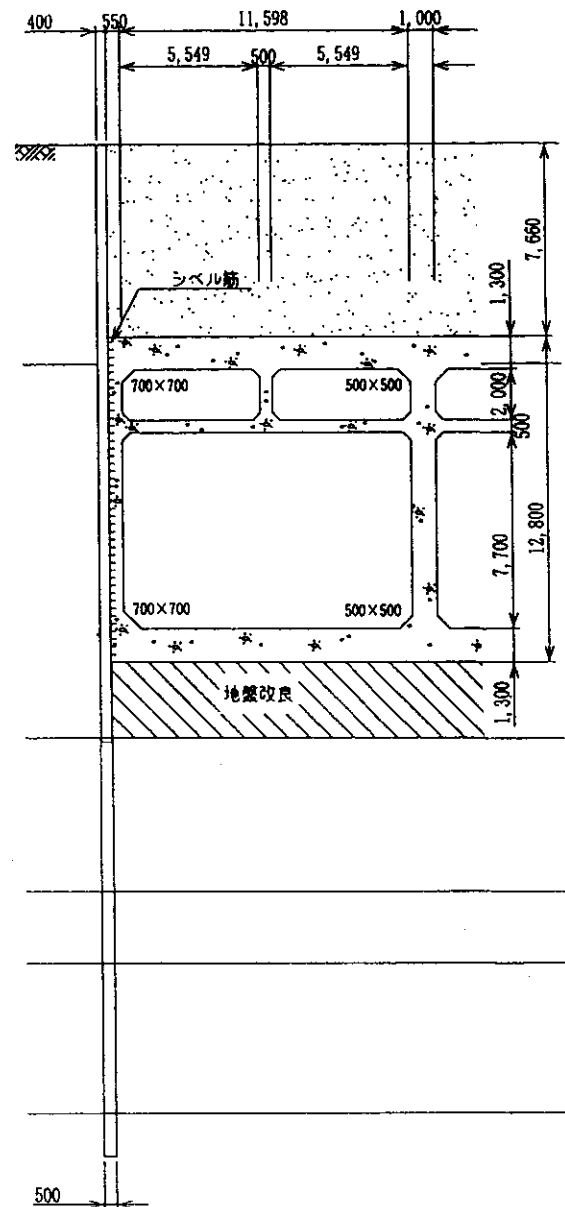


図-6 合成土留壁構造断面図

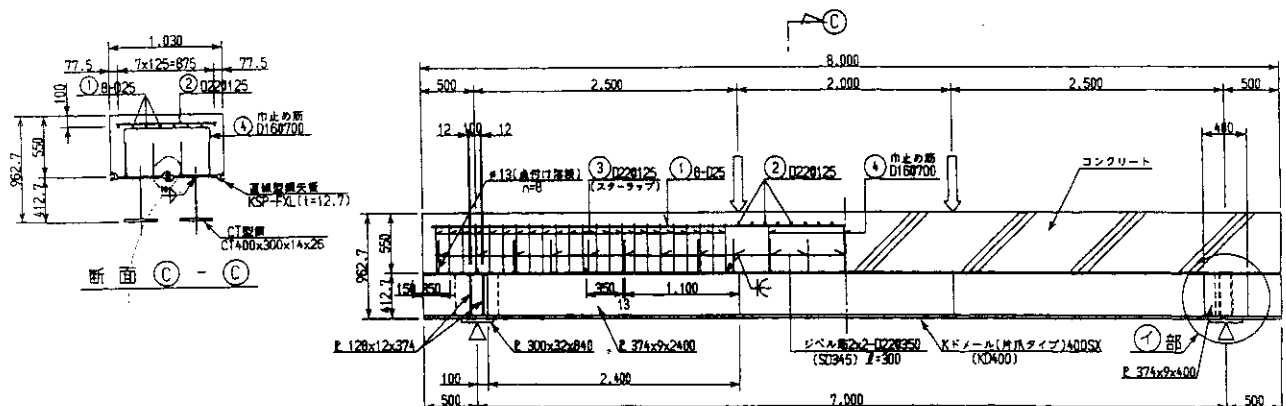


図-7 No. 1 試験体構造と載荷点

断スパン 2.5 m が試験区間となるためその他の区間は十分に補強した。コンクリートは呼び強度 30 N/m<sup>2</sup>、鉄筋は SD 345、鋼材は SS 400 相当を使用した。

### 2-3 実験結果

#### (1) 正曲げ試験体 (No. 1)

図-8 に示すように No. 1 では引張側に配置された鋼材の降伏後、圧縮縁コンクリートの圧壊により曲げ破壊した。No. 1 試験体の破壊モードを図-9 に示す。

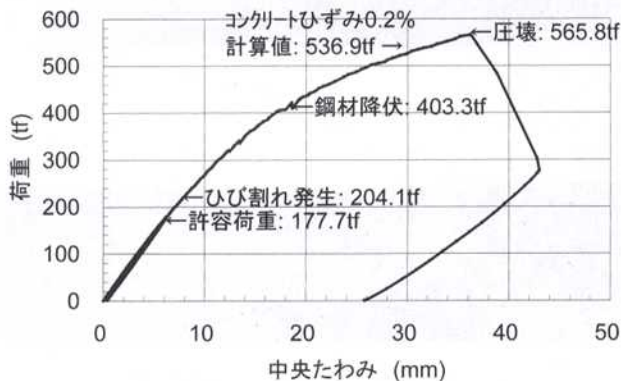


図-8 荷重～支間中央変位の関係 (No. 1 試験体)



図-9 破壊モード (No. 1 試験体)

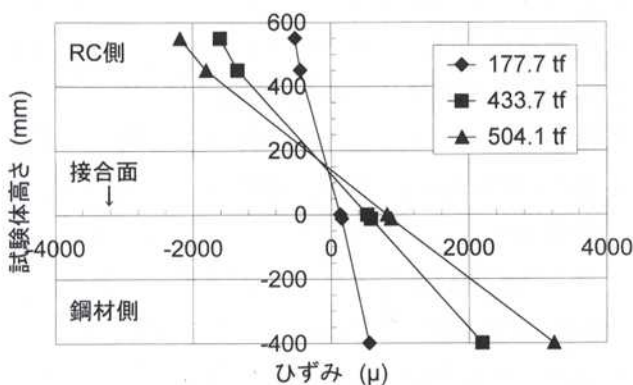


図-10 ひずみ分布図 (No. 1 試験体)

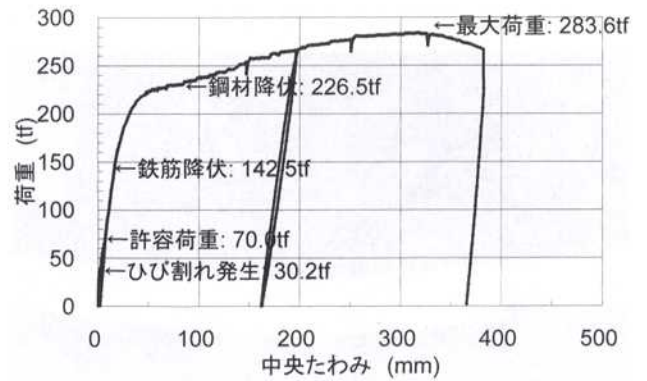


図-11 荷重～支間中央変位の関係 (No. 2 試験体)

図-10 に示すように同一断面内における鋼材、鉄筋およびコンクリートのひずみ分布を測定した結果、RC 構造を前提とした各材料の許容応力度に基づく許容荷重が 177.7 tf (1,743 kN) であるのに対して、鋼材引張降伏荷重 (実強度) 403.3 tf (3,955 kN) 程度まで断面のひずみ分布はほぼ直線的であった。

曲げ耐力は 565.8 tf (5,549 kN) であった。鋼材を鉄筋に置き換え、圧縮コンクリートの応力-ひずみ関係にスターラップによる拘束がない状態を想定すること、つまりコンクリートの圧縮ひずみを 0.2% とすることで、通常の RC 計算により実験値と同等の曲げ耐力計算値が得られることを確認した。

#### (2) 負曲げ試験体 (No. 2)

図-11 に示すように No. 2 では引張鉄筋の降伏後、圧縮鋼材が圧縮降伏し、ウェブおよびフランジの局部座屈を経てもなお最大耐力を持続した。最終的には鋼材とコンクリートの間が肌離れを起こして耐力が低下した。これは、曲げ変形の増大にともなってコンクリートの曲げひび割れ幅が増大し、ジベル筋の引き抜け耐力が低下したためと考えられる。No. 2 試験体の破壊モードを図-12 に示す。

図-13 に示すように同一断面内における鋼材、鉄筋およびコンクリートのひずみ分布を測定した結果、許容荷重が 70.0 tf (686 kN) であるのに対して、鉄筋引張降伏荷重 (実強度) 142.5 tf (1,397 kN) を超えて土留壁用鋼材の矢板部分の引張降伏荷重 (実強度) 226.5 tf (2,221 kN) 程度まで断



面のひずみ分布はほぼ直線的であった。



図-12 破壊モード (No. 2 試験体)

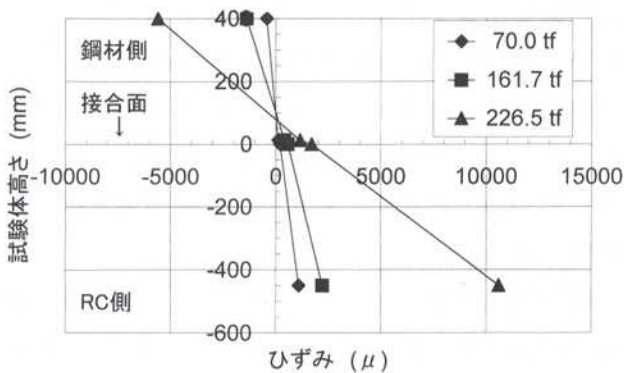


図-13 ひずみ分布図 (No. 2 試験体)

曲げ耐力は 283.6 tf (2,781 kN) であった。圧縮縁鋼材の限界圧縮ひずみを 20% とした時の曲げ耐力の計算値は 230 tf (2,256 kN) で、計算値は実験値の約 80% であり、鋼材を鉄筋に置き換えた通常の RC 計算により曲げ耐力はかなり安全側に評価できることを確認した。

### (3) せん断試験体 (No. 3)

図-14 に示すように No. 3 では、せん断スパンにおいて曲げひび割れから斜めひび割れに進展し、ジベル筋の降伏後、鋼材とコンクリートの間で合計数ミリ程度のずれが生じ、変形の増大に伴って最終的にはコンクリート部分に新たな斜めひび割れが発生して斜め引張破壊した。No. 3 試験体の破壊モードを図-15 に示す。

荷重 150 tf (1,471 kN) で、鋼材とコンクリートとの境界面で部分的に付着切れを起こしたが、これ以降はジベル筋がせん断力を分担し、せん断スパン区間においても同一断面内における鋼材、鉄筋およびコンクリートのひずみ分布を測定した

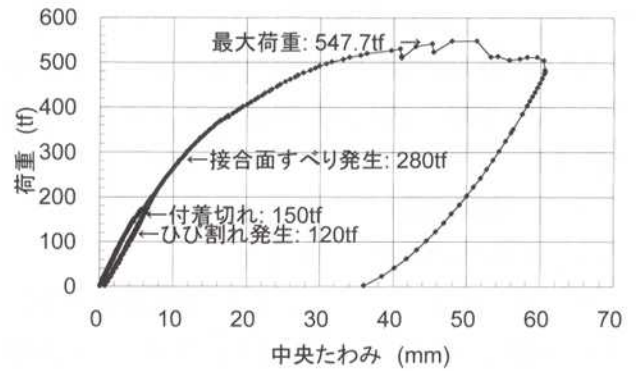


図-14 荷重～支間中央変位の関係 (No. 3 試験体)



図-15 破壊モード (No. 3 試験体)

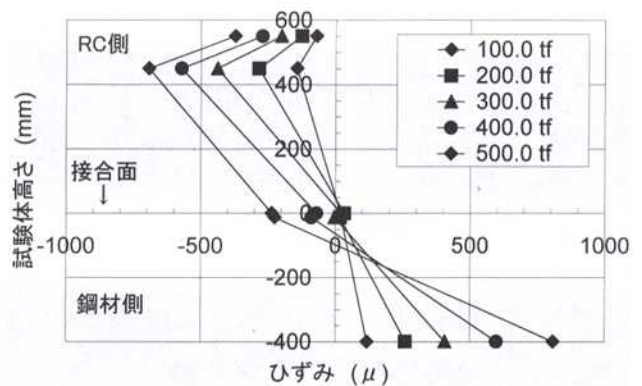


図-16 ひずみ分布図 (No. 3 試験体)

結果、図-16 に示すようにコンクリートの許容せん断応力を  $15 \text{ kgf/cm}^2$  ( $1.5 \text{ N/mm}^2$ ) とした許容せん断荷重 100 tf (980 kN) の約 4 倍の荷重まで、圧縮縁のコンクリートひずみを除き断面のひずみ分布はほぼ直線的であり、鋼材および RC 側壁を一体構造として設計可能であると考えられる。

せん断耐力は 547.7 tf (5,371 kN) であった。せん断耐力は鋼材を鉄筋に置き換え RC 部材として求めたせん断耐力の計算値に比べてかなり大きくなっている。RC 部分の斜め引張破壊後の残存

耐力は500 tf (4,904 kN) 程度と最大荷重の約9割であり、鋼材によるせん断力分担が非常に大きいと考えられる。

### 3. 結論および課題

試設計により、都市内の近接構造物の変位抑制が条件となり、仮設構造物としての土留壁の剛性が変位量によって左右されるような場合には、完成後の壁体に作用している応力度はその許容値を大きく下回ることが示された。これにより、後打ちのRC側壁厚の大幅な低減が図られ、工費縮減の観点から、合成土留壁構造実現に向けて検討を進めることが有効であると思われる。なお、試設計による合成土留壁構造と従来構造との概算工費比較を行ったところ、現段階では仮設時の土留壁鋼材の応力に余裕がある場合には約1割程度のコスト縮減が可能であることが分かった。

実物大実験からは、同一断面内における鋼材、鉄筋およびコンクリートのひずみ分布を測定した結果、いずれの試験体でも許容応力度レベル以上および引張鋼材降伏程度の荷重において、平面保持の仮定がほぼ成立することが確認された。したがって、土留壁用鋼材およびRC側壁を一体構造とした鉄筋コンクリート構造として設計可能であると考えられる。また、耐力は鋼材を鉄筋に置き換えたRC設計により安全側に推定できる見通しが得られた。

しかしながら、合成土留壁構造実現に向けては以下のような技術的課題が残されている。

- ・ 躯体上下に張り出した土留壁の地震時に及ぼす影響、正負交番の地震力がかかる隅角部の耐荷力確認等、合成土留壁構造の耐震性評価。
- ・ 土留壁鋼材を本設構造物として使用することから、そのソイルセメント中での経年劣化の評価。
- ・ RC側壁が土留壁と一体化され合成構造となることによる防水に関する対策、止水性の評価。
- ・ 側壁と一体化する土留壁が躯体底版よりも深く根入れすることによる支持機構の違いから予想される、躯体中央部のたわみの影響検討とそ

の対策。

- ・ 土留壁鋼材建て込み後のジベル筋の溶接や鉄筋工、防水工、コンクリート打設工などの施工性検討。
  - ・ 施工まで考慮した実際のコスト縮減率の確認。
- 上記の技術的問題点について、「合成土留壁検討会」で設計・施工指針（案）の策定に向けて検討を行っている。耐震性評価については、動的解析及び隅角部の耐荷力確認実験を実施し耐震設計方針の策定を目指している。また、止水対策や施工性、コスト縮減率については、さらに試験施工等により確認を行っていく必要がある。

### 謝辞

最後に本検討にあたりご助言を頂いた「合成土留壁検討会」の委員ならびに幹事をはじめとする関係各位に対し、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 土木学会：複合構造物設計・施工指針（案），平成9年10月
- 2) 佐藤，中村，金治：連続等厚土留壁の芯材と開削トンネル側壁の合成構造に関する実験，第11回日本道路会議一般論文集(B)，4051，pp188-189，平成11年
- 3) KANAJI, SUDA, ONO, "Feasibility-Study of a Proposed Cut and Cover Tunnel Structure Applying Steel-R/C Composite Wall", Proceedings of 6<sup>th</sup> ASCCS Conference, Vol.1 pp189-196, March, 2000
- 4) 佐藤，青木，丸岡，加倉井：ソイルセメント柱列壁の鋼材を用いた合成地下壁工法，基礎工，平成6年5月号 pp49-55
- 5) 土木学会：トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説，平成8年7月
- 6) 阪神高速道路公団：開削トンネル設計指針（案），平成11年3月