

SC合成地中連続壁工法の開発

東野光男¹・武田篤史²・石澤毅³・恩田邦彦⁴

- ¹正会員 大林組 東京本社土木技術本部設計一部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
²正会員 工修 大林組 東京本社八王子谷野町工事事務所（〒193-0016 東京都八王子市谷野町208-16）
³正会員 工修 JFEスチール 建材センター建材技術部（〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-3）
⁴正会員 工修 JFE技研 土木・建築研究部（〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田1-1）

「SC合成地中連続壁工法」は、H形鋼のフランジ内面に突起を設けてコンクリートと一体化したSC合成構造による新しい連壁工法である。都市部での厳しい用地条件下での大規模地下空間建設に対応した工法で、従来のRC連壁に比べて薄い壁厚で高耐力・高剛性とすることが可能である。壁厚削減により地下壁自体のコストダウンと用地費削減が図られると共に、鉄筋籠製作が不要で作業ヤードの問題も解消可能である。本論文では、工法の概要、構造性能実験（付着、正負交番曲げ）および施工実証実験の結果、合成壁の設計法等について報告する。

キーワード： 地中連続壁，合成構造，付着性能，コストダウン，大規模掘削

1. はじめに

都市部の地下においては地下鉄、道路トンネルなどの都市基盤施設が輻輳し、新たに計画される地下施設は大深度化する傾向にある。また、地上の用地確保も年々厳しくなっていることから、経済的かつ省スペース化が可能な地下空間構築技術が求められている。

地中連続壁工法は大深度でも高精度な掘削が可能であり、構造性能に優れた信頼性の高い地下壁構築工法として豊富な実績を有している。しかし、従来のRC連壁では地下構造物の大深度化・大規模化に伴って厚壁化、過密配筋化の傾向にあり、建設用地の問題や施工性の面での問題が生じている。さらに、都市部では鉄筋籠製作等に必要な作業ヤードの確保も難しい場合が多い。

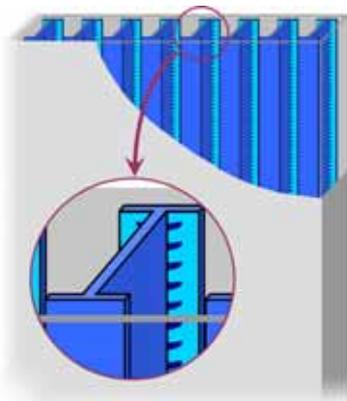


図-1 SC合成地中連続壁工法

「SC合成地中連続壁工法」（以下、SC合成連壁とする）は、このような問題を解決するために開発したもので、薄い壁厚で高耐力・高剛性とすることが可能である。写真-1に示すように、フランジ内面に突起を設けた合成構造用の特殊H形鋼（以下、内リブH形鋼とする）を用いてコンクリートと一体化させたSC合成構造の壁体としており、都市部での厳しい用地条件下での大規模掘削に対応した経済的な連壁工法である。

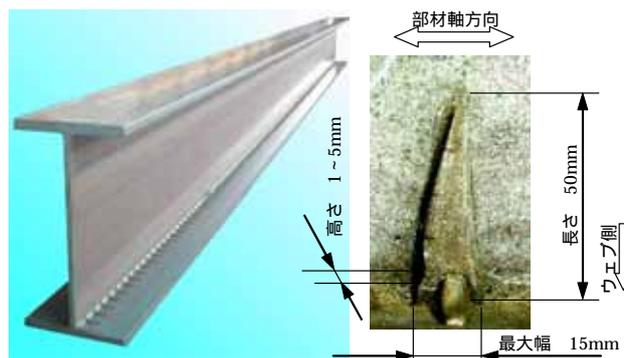


写真-1 内リブH形鋼

2. 工法の概要

(1) 壁厚削減によるコストダウンの実現

図-2に示すように、壁厚900mmのSC合成連壁は壁厚1400～1500mmのRC連壁と同等の抵抗モーメントを発揮することが可能で、剛性でも壁厚1100mm

のRC連壁と同等とできる。また、SC構造として高い靱性を有しており、耐震性能が要求される本体構造としても適用できる。

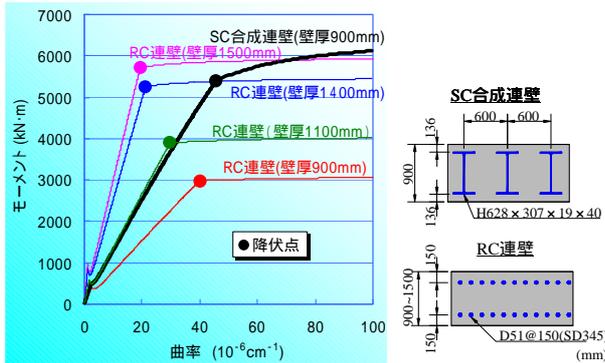


図-2 壁厚削減の程度

地下壁が耐力で決まる場合は大幅な壁厚削減が可能であり、地下壁構築費としても20～30%程度のコストダウンが可能である。また、近接施工等で仮土留め壁の変位制限が厳しく地下壁が剛性で決まる場合は20cm程度の壁厚削減でほぼ同程度のコストであるが、それ以外に壁厚が薄くなることにより用地費が削減されるなど、特に都市部の地下空間建設においてはメリットが大きい。

(2) 内面リブによるコンクリートとの一体化

フランジ内面に突起を設けることによりウェブ反力による拘束効果が発揮され、最大強度以降も粘りのある付着性状を示す。また、付着特性は突起がコンクリートに引っかかる支圧型であるため、泥水中のコンクリート打設でも十分な耐力が得られる。

一体化のための補強鉄筋が不要な上、鉄骨1本ずつの建込みも可能であるため、鉄筋籠製作等に必要な作業ヤードの問題が解消される。

(3) 圧延成形による突起加工

内リブH形鋼の突起の形成は圧延方式によるものであり、図-3に示すように水平ロールのコーナー部から側面に溝を加工しておき、これを圧延でH形鋼フランジ内面に転写する。この方式により、ビルトアップ等の方法により合成構造用鋼材を製造する場合に比べてコストダウンが可能となる。

3. 付着性能

本工法のような合成構造壁においては、コンクリートと鋼材の一体化がもっとも大きな問題となる。

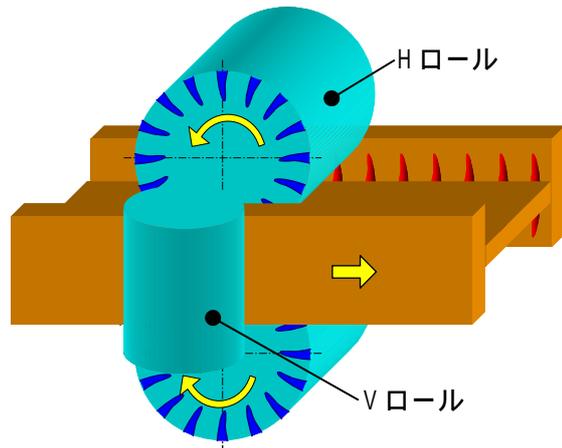


図-3 フランジ内面突起付H形鋼の成形方法

内リブH形鋼の付着特性に関しては、まずフランジ内面に形成する最適な突起形状の検討を行い、その上で実際に圧延したH形鋼を用いた押し抜き実験を実施し、コンクリートとの付着性能評価を行った。

(1) 最適突起形状の選定

本工法においては、先に述べたようにコストダウンの観点からH形鋼のロール成形時に突起を形成させることとし、Hロールの側面に加工した溝を、鋼材を送り出しながら転写させるようにした。よって、図-4に示すように一度成形された突起が、つぶされないように三日月状とする必要がある。また、Vロールからの圧力のみで転写するため、突起寸法については以下の条件で最適化を検討することとした。

- 平均突起高さ：3mm以下
- 突起長さ：50mm以下
- 突起幅：12.5mm以上
- 突起ピッチ：50mm以上

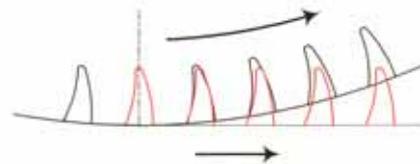


図-4 フランジ内面突起の成形方法

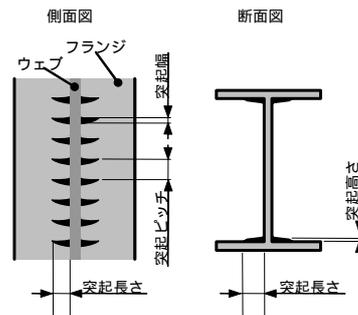


図-5 突起諸元の定義

ここで突起高さとは長さは、大きいほど支圧面積が増え付着性状が向上すると想定される。よって、それぞれ最大の3mm, 50mmを最適形状とした。突起幅は、大きいとコンクリートの一面せん断面積が減少し、また12.5mmであれば鋼材のせん断破壊は考え難いため、最小値の12.5mmとした。

突起ピッチについては、大きい場合には部材長さ当たりの支圧面積が減少するものの、コンクリートの一面せん断面積は増加する。小さい場合はその逆となることから、突起ピッチを50, 100, 150mmと変化させた付着実験を行った。その結果、最大付着力は突起ピッチが大きいものほど大きく、付着剛性については突起ピッチが小さいものほど大きいことがわかった。

さらに、想定している合成構造部材として、どのような付着特性が最適であるのかを、非線形2次元FEM解析により検討した。実験で得られた付着応力度すべり変位関係をもとに部材のせん断スパン比を変えた解析を行った結果、付着剛性の大きなケースが最も完全付着に近くなったことから、突起ピッチは50mmとすることとした。

(2) 押し抜き付着実験

a) 実験方法

載荷方法は変位制御による押し抜き単調載荷とした。載荷の模式図を図-6に示す。内リブH形鋼のフランジおよびウェブの下端50mmを予め箱抜きにしてコンクリートがH形鋼の内面とのみ接するように製作した試験体により、H形鋼上端の載荷に伴う鋼材とコンクリートとの相対ずれ量を計測して、付着特性を評価することとした。本工法においては、ウェブ反力による拘束がある状態での付着性状が問題となるため、試験体はH形鋼断面とした。また、地中連続壁部材としたとき、H形鋼の弱軸方向（連壁延長方向）にはコンクリートのひずみが生じないため、当該方向は治具により変形を拘束し、境界条件を地

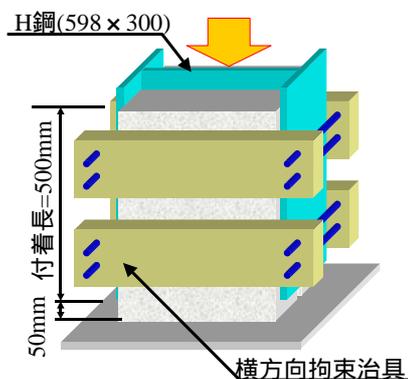


図-6 押し抜き付着実験要領

中連続壁部材と等価にした。なお、この拘束治具は付着力によって生じる変形を拘束するためのものであるため、有意な初期緊張は与えていない。

なお、コンクリート打設に際しては、実際の地下壁体構築が泥水中でのコンクリート打設となり、鋼材表面とコンクリートとの付着性が低下する可能性を考慮し、鋼材表面に予め剥離材を塗布した。

b) 実験結果

H形鋼フランジ内面突起の付着特性

図-7に示すように内リブH形鋼の最大付着応力度は4.4~4.8 N/mm²と突起無しの場合と比較して20倍以上の高い値を示した。さらに、最大値以降もウェブ反力による拘束効果のため、付着力が脆性的に低下することはなかった。また、同様の実験条件にあるCASE-1およびCASE-2の付着特性は良く一致しており、良好な再現性があることが確認できた。載荷終了後の破壊面の状況を確認したところ、突起がコンクリート面上を上滑りしたような形跡はなく概ねせん断破壊（突起先端部付近で一部局部圧壊）しており、突起とコンクリートとは良く噛み合い一体化していた。

突起に対する加力方向の影響

三日月状の突起に対する載荷方向を変えたCASE-2とCASE-3の比較においても有意な差はなく、突起の向きによる付着特性の違いはないといえる。

表-1 試験体条件および実験結果概要

CASE	試験体条件		実験結果		
	突起形状	コンクリート c (N/mm ²)	載荷重 P_{max} (kN)	P_{max} 時のずれ量 (mm)	σ_{max} (N/mm ²)
1	突起有	35.6	1301	5.5	4.53
2	突起有	35.6	1282	5.2	4.45
3	突起有・逆	36.2	1377	5.4	4.78
4	突起有	25.2	1074	6.3	3.73
5	突起有	50.2	1673	7.1	5.81
6	突起なし	29.0	54	1.4	0.19

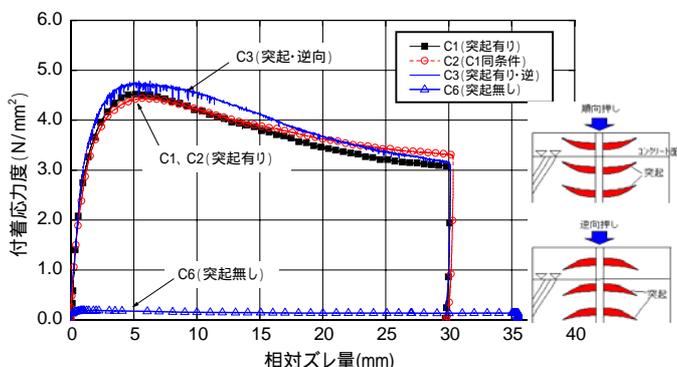


図-7 付着応力度 変位関係 (突起の有無, 方向)

コンクリート強度の影響

図-8よりコンクリート圧縮強度によらず、付着応力度 - すべり変位関係の曲線形状は同様であり、付着性状に大きな差がないことがわかる。付着強度はコンクリート圧縮強度の増加とともに増加し、図-9に示すように、コンクリート圧縮強度 c と最大付着応力度 max の関係は1次式 ($max=0.0848 c + 1.526$) により、よく近似できることが示された。

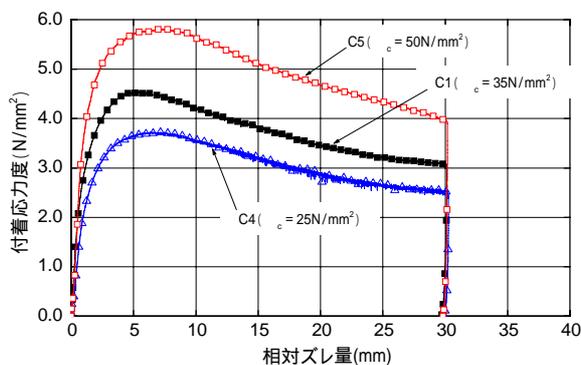


図-8 付着応力度 変位関係 (コンクリート強度)

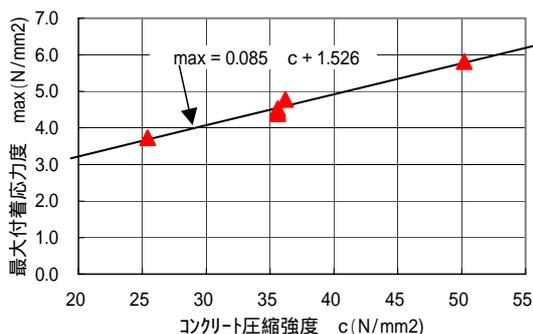


図-9 コンクリート強度と付着強度の関係

4. 曲げ性能

内リブH形鋼が優れた付着性能を有することが判明したことから、実大サイズの梁曲げによる正負交番繰り返し載荷実験を行い、鋼・コンクリート合成部材として挙動することを確認した。

(1) 実験方法

載荷方法は図-10に示すように、1点載荷による正負交番繰り返し載荷とした。試験体は図-12に示すように、高さが80cm、幅は地中連続壁におけるH形鋼の標準的な配置ピッチとして60cmとした。支点から載荷点までの距離(せん断スパン)は2.5mとした。なお、実際の地下壁体ではH形鋼が横方向に連続的に配置されコンクリートの横方向のひずみが拘束されることから、角型鋼管を用いた拘

束治具で試験体を挟みこみ試験体の側方変形をできるだけ拘束するようにした。荷重の制御については、降伏変位 y を基準として、10 y に至るまで1 y 、2 y 、3 y 、4 y ・・・と1 y ずつ変位を大きくし、繰り返し回数は4 y までは1ステップあたり3サイクルとし、それ以降は1ステップあたり1サイクルとした。10 y 以降は3 y ピッチで変位を増加し、試験機の制約内で可能な限り継続した。なお、降伏変位 y ($=11\text{mm}$) は、H型鋼フランジ部(載荷点引張り縁)が降伏応力度(材料強度試験値)に達した時の載荷点変位とした。

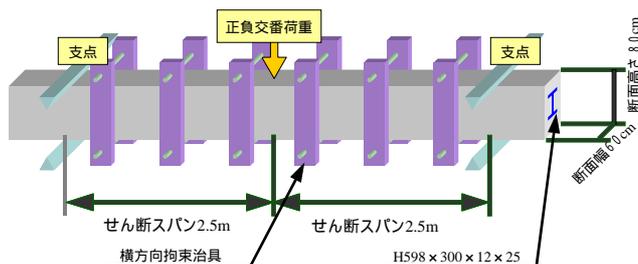


図-10 梁曲げ実験要領

(2) 実験結果

図-11に載荷点位置での荷重 変位関係を示すが、変位量13 y ($=143\text{mm}$ 、回転角0.057rad)まで載荷しても荷重低下は生じなかった。また、変形が進んだ後も明瞭な紡錘型の載荷ループ形状を示し、優れたエネルギー吸収能を有していることが確認された。先に行った付着実験で得られた鋼材フランジ~コンクリート間の付着特性を用いたFEM解析値と実験結果の包絡線は、初期剛性、二次勾配および耐力ともに良く一致するとともに、H形鋼単体の全塑性荷重を大きく上回っており、合成構造として期待通りの挙動を示した。

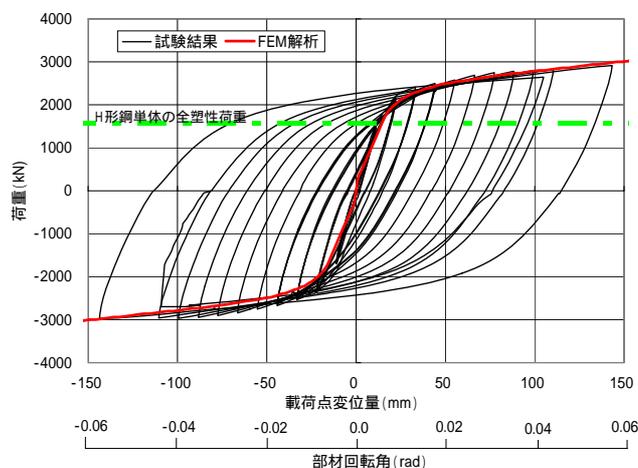


図-11 荷重 変位関係

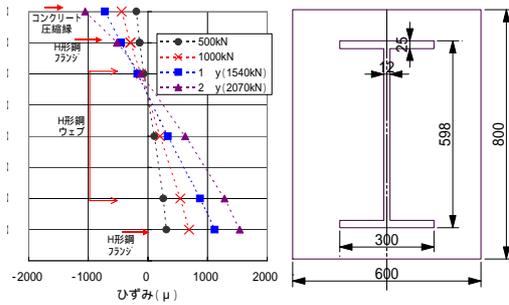


図-12 断面内ひずみ分布

図-12に載荷点から1000mm位置での断面内の材軸方向のひずみ分布を示す．中立軸は試験体断面中央より圧縮縁側に位置しており，荷重レベルが大きくなるにつれて圧縮縁端方向に移行している．この結果からも合成の効果を確認できる．

5．合成壁の設計法

付着および梁曲げ実験の結果を踏まえ，合成壁の設計法を提案した．主な点は以下の通りである．

内リブH形鋼とコンクリートとの付着に対する照査を行う．

曲げ断面照査は鋼材を鉄筋に換算したRC断面として行う．

せん断耐力はコンクリート負担分と鋼材ウェブ負担分の合計とする．

仮設時の剛性は $(EI)_d = 0.6 E_c I_c + E_s I_s$ とする．ここに、 E_c 、 I_c ：コンクリートのヤング係数・断面2次モーメント、 E_s 、 I_s ：それぞれ内リブH形鋼のヤング係数・断面2次モーメント。

(1) 付着に対する照査

微小区間におけるコンクリート軸方向応力の変化分は，付着により内リブH形鋼へ伝達されるため，局所的な応答付着力度 τ_b は(1a)式により求めることができる．

$$\tau_b = \frac{\Delta N_c}{U \cdot \Delta x} = \frac{\Delta M / \Delta x}{U \cdot \Delta M / \Delta N_c} = \frac{V}{U \cdot \Delta M / \Delta N_c} \quad (1a)$$

ここに、 V ：応答せん断力， U ：付着周長， ΔM ：照査断面から部材軸方向に微小距離 Δx 離れた断面におけるモーメントの増分量， ΔN_c ：照査断面から部材軸方向に微小距離 Δx 離れた断面における断面内のコンクリートの軸方向応力の合計の増分量．

(2) 曲げ特性の評価

a) 断面の解析モデル

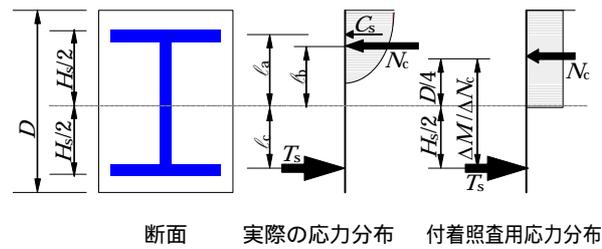


図-13 付着照査用の断面応力分布

図-11 に示すようにFEM解析結果と梁曲げ実験結果が良く一致していることから，合成部材の曲げ特性に与える付着すべりの影響を解析的に検討した．フランジ厚やせん断スパンを種々に変動させ，付着すべりを考慮した解析と完全付着の解析の比較を行ったところ，付着すべりの影響は少なく降伏剛性の差は最大でも数%であった．したがって，本構造の断面の解析モデルは，完全付着および平面保持を仮定して，内リブH形鋼を鉄筋に換算したRC断面としてよいと考えられる．

b) 変形性能に対する設計

梁曲げ実験の結果より，部材回転角が5%を超えても荷重-部材角曲線はエネルギー吸収のよい紡錘形であった．また，部材回転角5%の時点においてコンクリートの圧壊は生じているものの鉄骨の座屈は見られなかった．H形鋼は座屈しなければ非常に大きな部材角まで変形できること，本構造はコンクリートが座屈を拘束すること等を考えると，大きな変形性能は本構造の特性と考えられる．

一方，地中構造物は地盤変形に追従して変形するため，必要な変形性能はせいぜい1~3%程度であることから，通常の地盤変形に対しては本構造の変形性能を照査する必要はないと考えられる．

(3) せん断耐力

せん断耐力は，既往の指針¹⁾を参考に，コンクリート負担分 V_c と、内リブH形鋼ウェブ負担分 V_{d} の和とした。

(4) 仮設時の曲げ剛性

RC連壁の仮設時の設計では，壁の断面剛性に対する鉄筋の影響が小さいことから，一般にひび割れを考慮したコンクリート断面の剛性 ($0.6 E_c I_c$) を評価することとしている²⁾．本構造でも基本的にコンクリート断面に関しては同様の評価とするが，高鋼材量であることから鋼材の剛性を加えて評価することとする．

6. 施工実証実験

SC合成連壁は2003年に「中之島新線整備事業のうち開削工事影響調査」において施工実証工事を行い、芯材の建込みやコンクリート打設等の施工性と連壁の造成状況を確認した。芯材は図-14に示すように、スペーサーにより壁厚方向と延長方向の位置を固定しながら1本ずつ建て込みを行った。コンクリートは、各芯材間にトレミー管を挿入して打設した。写真-3の通り、連壁の造成状況は漏水もなく大変良好で、コンクリートが十分に回り込んでいることが確認された。



写真-2 現場全景

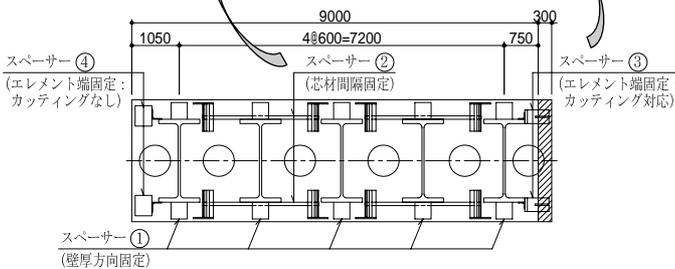


図-14 芯材およびスペーサー配置



写真-3 壁体仕上り状況 (GL-16.0m付近)

7. まとめ

内リブH形鋼は粘りのある付着特性を示し、それを用いたSC合成連壁は鋼・コンクリートの合成構造部材として優れた性能を有することを実験的に確認した。その実験結果をもとに、付着の照査を行った上で鋼材を鉄筋に換算しRC断面として設計する簡易な設計法を提案した。さらに、施工実証実験を行い良好な結果を得たことにより、本工法を実用化する目途を得た。

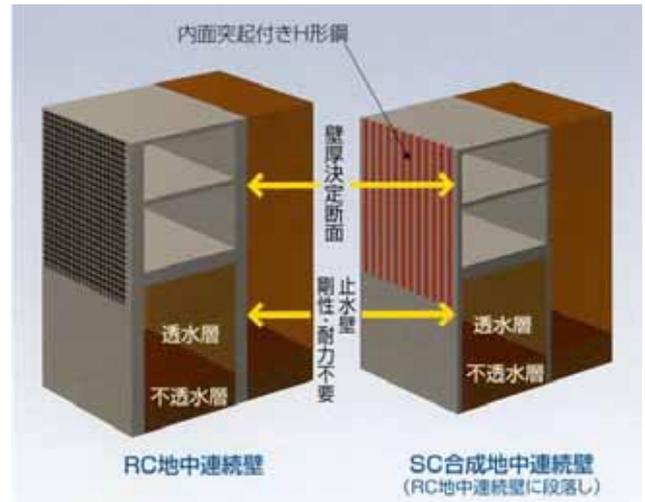


図-15 SC合成連壁の適用例

SC合成連壁は圧延成形による経済的な合成構造用鋼材を用い、薄い壁厚で高耐力・高剛性を発揮できる連壁工法であり、用地条件の厳しい都市部における大規模掘削に適している。特に、遮水壁として連壁の根入れが長くなり、応力的に厚い壁が不要な区間が多い場合(図-15)は壁厚削減の効果が大きいといえる。さらに、大きな変形性能を有することから、地震時の地盤変形の大きな場所での本体地下壁にも適用可能である。また、鉄筋籠製作ヤードが不要である等、仮設ヤード確保の問題解消も可能である。今後、実工事への適用を図ると共に、コンクリート打設等、更なる施工方法の改善を検討していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造物の性能照査指針(案)，pp. 76-77，2002.10.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書[開削工法 編]・同解説，pp. 135，1996.5.