

地下連続壁の本体利用に関する計測結果と 設計手法について

A STUDY ON DESIGN METHOD FOR USE OF CAST IN PLACE DIAPHRAGM FOR PERMANENT
STRUCTURE ON THE STRENGTH OF FIELD MEASUREMENT RESULT

入江健二*・西村高明*・渡辺浩史**

Kenji IRIE, Takaaki NISHIMURA, Hiroshi WATANABE

Recently in case of use cast in place diaphragm as temporary earth retaining wall on deep excavation work in city, it is often used for a part of permanent structure concerning economic matters. But the design method is not established yet.

In the circumstances, various measurements were carried out on the subway construction site with cast in place diaphragm was adopted on. Then design method, ex. insurance of unification or calculation of sectional forces, are verified and proposed on the strength of the measurement result in this paper.

key words: cast in place diaphragm for permanent structure, earth retaining wall, site measurement, shear friction

1. はじめに

地下連続壁工法は、土留め工として大きな剛性と耐力を有し、また低騒音・低振動と環境面でも優れた工法であり、特に都市部で深い掘削を行う場合には、大きな土圧に抵抗するためと周辺への影響を抑えるため、近年使用頻度が増加している。

地下連続壁は、これまで主として仮設土留め壁として用いられてきたが、近年の施工技術の進歩や、コンクリートの品質の向上によって、本体構造として利用してもその強度、精度が確保できるようになり、工事費低減のために本体構造物の一部として使用することについても、その合理性・経済性が認識されつつある。

しかし、地下連続壁は、掘削中に土圧・水圧等の施工時外力によって大きな応力・変形が発生し、この応力・変形は、完成後も残留することが考えられるので、本体構築の応力状態は複雑なものとなり、近年地下連続壁の本体利用の機会が増えているにも拘らず、その設計法が未だ確立されているとは言い難い。

本文では、以上のような観点に立ち、現場における計測結果をもとに、地下連続壁を本体利用する場合の内壁との一体性の確保、断面力の算定などの設計手法について検証及び提案を行うものである。

* 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 7号線麻布工事所

** 正会員 パシフィックコンサルタンツ㈱ 鉄道部

2. 本体利用する場合の設計方法

2・1 残留応力の設計上の取扱い方

地下連続壁の設計において、残留応力に対する考え方には次の2種類がある。

(a) 仮設設計と本体設計を分離して考える方法（慣用応力計算法）

仮設設計と本体設計とを無関係に進める方法で、換言すれば残留応力を無視する方法である。すなわち、仮設設計は仮設土留め壁として地下連続壁を設計し、本体構造の設計は、その構造すべてが完成したものとして、完成形に最終設計荷重を作用させて断面力を求めるものである。

(b) 仮設設計から本体設計へと連続して考える方法（逐次応力計算法）

この方法は残留応力を考慮して設計するものであり、仮設設計は弾塑性法や連続梁法によって行い、引き続き本体構造の施工順序に合わせて、構造の変化と荷重の変化を逐次追いかけて断面力を求めるものである。

(a)(b)の方法には、それぞれ一長一短があるが、旧国鉄で行われた合成梁の実験¹⁾では、残留応力は梁の最終耐力に影響を与えないことが報告されており、耐荷力に対する必要な安全度は確保できるものと考え、また連壁に残留する応力は内側引張が大きく本体壁合成後は耐久性上の問題もなくなると考えて、ここでは(a)の慣用応力計算法によって設計計算を行うこととする。

2・2 一体化のための接合面の設計

地下連続壁と内壁とが一体となって曲げモーメントに抵抗するためには、接合面に発生する応力（せん断力）を確実に伝達できるようにしておくことが必要であり、伝達方法としてジベル鉄筋を用いることが多い。

地下連続壁と内壁との間に作用するせん断力に抵抗するのは、その接合面における付着力と摩擦力であるが、付着力は一度その限度をこえるせん断力が作用すると、それ以降は付着力を考慮出来なくなるので、設計上は摩擦力のみで抵抗できるように考えるべきである。ただし、この場合の摩擦力は接合面にジベル鉄筋が存在するため、一般的な摩擦抵抗とは異なったものであり、接合面のずれに対して鉄筋も考慮しなければならない。この計算法については、せん断摩擦説に基礎をおいたACIの基準²⁾を参考に設計する方法があり、土木学会昭和61年制定のコンクリート標準示方書³⁾にも同様の算定式が提示されている。

(a) 発生せん断力

接合面に発生するせん断力は、図-1に示したように、内壁から地下連続壁に伝達される鉛直力によって生ずる鉛直せん断力と一体壁に作用する曲げ応力による曲げせん断力を考える必要があり、次式で算定できる。

$\tau_d = \tau_o + \tau_b$ ----- (1)

$S_o = \beta_l \cdot N_l - \beta_u \cdot N_u$ ----- (2)

$\tau_o = S_o / f$ ----- (3)

ここに

- τ_d : 設計せん断応力度 (kgf/cm²)
- τ_o : 鉛直せん断応力度 (kgf/cm²)
- τ_b : 曲げせん断応力度 (kgf/cm²)
- S_o : 鉛直せん断力 (kgf/cm)
- N_u : 節点より上側で一体壁に作用している軸力 (kg)
- N_l : " 下側 "
- β_u : 床版節点より上側の土留め壁の軸力分担率
- β_l : " 下側 "
- f : 分布幅 (cm)

ただし

$\beta_u = E_1 \cdot A_{1u} / (E_1 \cdot A_{1u} + E_2 \cdot A_{2u})$ --- (4)

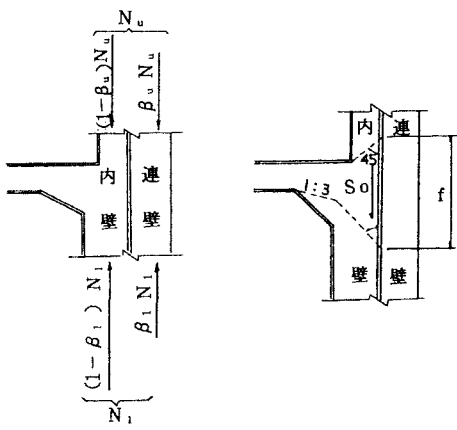


図-1 接合面に作用する鉛直力

$$\beta_1 = E_1 \cdot A_{11} / (E_1 \cdot A_{11} + E_2 \cdot A_{21}) \quad \cdots (5)$$

(b) 許容せん断応力度

接合面の許容せん断応力度の設定は、ACIの基準を参考にせん断摩擦説により設定する。この考え方は、接合面のせん断強度を摩擦抵抗としてとらえるものであり、接合面に鉄筋が配置されている場合には、この鉄筋の抵抗を接合面の圧縮力の増大として算定するものである。すなわち、接合面がずれようとするとき、接合面の微小な凹部が凸部を乗り越えようとし、接合面は開口しようとするが、鉄筋の抵抗（接合面を拘束する圧縮力として作用する）によって抑えられる。接合面の凹凸の程度は摩擦係数によって評価し、圧縮力の増加は配置した鉄筋の降伏応力まで考慮することとして、接合面の許容せん断応力度は次式で算定できる。

$$\tau_a = \mu (p_s \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n) \times \phi / \gamma \quad \cdots (6)$$

$$\sigma_n = N_s / f \quad \cdots (7)$$

ここに、

τ_a : ジベル鉄筋を考えた許容せん断応力度 (kgf/cm²)

μ : 摩擦係数 (チップングの場合 1.0、重ね打ちの場合 0.8)

p_s : ジベル鉄筋比

σ_{sy} : 接合面に作用する直応力度 (kgf/cm²)

N_s : 床版の軸力 (kgf/cm)

f : 分布幅 (cm)

ϕ : 耐力の低減係数 (ACIに準ずると 0.85)

γ : 側圧の荷重係数 (" 1.7)

ここに示した安全係数の値は、終局強度設計法を採用しているACIの基準値であり、そのまま許容応力度設計法の中に取り込む場合には検討が必要であるが、安全率としては2.0が確保できる形となっているので、ここではこの方法にしたがって設計を行った。

3. 地下鉄工事における現場計測結果とその考察

最近での地下連続壁の本体利用の施工例として、営団地下鉄有楽町線辰巳駅と南北線志茂駅がある。この両現場はいずれも軟弱地盤における施工であったが、地下連続壁、内壁及び接合面部等に種々の計測機器を設置して計測を行った。

以下に、計測概要と計測データに対する解析的検討結果並びにその考察について述べる。

3.1 施工概要

(a) 辰巳駅の施工

土質は図-2に示すように、東京湾に近接した超軟弱な粘性土地盤である。掘削面側の地盤は、土留め壁の変形抑制とトラフィカビリティの確保を目的として、生石灰杭による地盤改良を施した。地下連続壁は80cm厚として、その内面に本体壁を設けて、地下1、2、3階とも一体壁としている。地下連続壁と内壁の接合はジベル鉄筋によって行

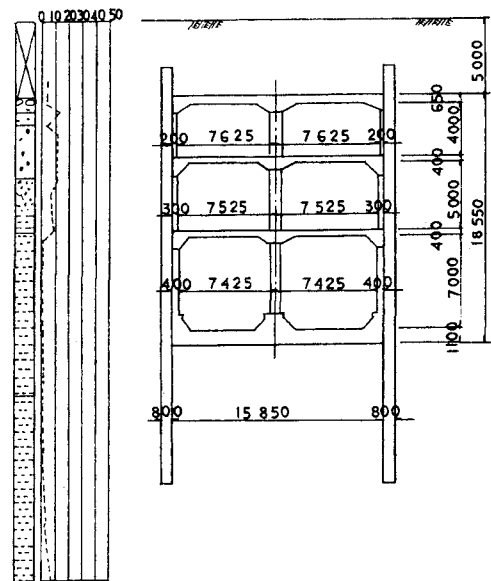


図-2 辰巳駅横断面図

い、一体化を図った。また、地下連続壁と床版との接合は、連続壁施工時にネジフシ鉄筋を埋め込み、カップラーにより床版主鉄筋と接合した。

(b) 志茂駅の施工

土質は図-3に示すように、N=0の軟弱シルト層（下部有楽町層）が主体で、連続壁の先端部にN=40の洪積層（埋没段丘礫層）が現れる。地下連続壁の厚さは60cmで、上・中床版を逆巻き施工した。また、辰巳駅と同様の目的で、生石灰杭による地盤改良を行った。

3.2 計測内容

両現場ともに、軟弱地盤での施工であり、掘削中の土留め工の挙動を把握するためと、地下連続壁と本体床版及び内壁との一体性を確認するため、下記のような計器を取り付けて計測を行った。

表-1 計測項目一覧表

項 目	計 器（容量）
鉄筋応力度	鉄筋計(3000kgf/cm ²)
切梁軸力	測温付歪計(±1000μ)
接合面ずれ変位	2方向コンクリート歪計
床版コンクリート温度	コンクリート温度計

3.3 測定結果

(a) 地下連続壁と内壁の一体性の確保について

7. 歪み分布

同一深さに配置した、地下連続壁と内壁の鉄筋計の、切梁撤去時あるいは埋戻し時の応力変化時期における歪み分布の変化量は、図-4に示すように概ね平面保持が成立している。

イ. ずれ歪計の挙動

地下連続壁と内壁の接合面に設置したずれ歪計の計測値より、接合面のせん断歪みは次式で算定できる。

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 \quad (8)$$

$$\tau = \varepsilon_s \cdot E_s / (1 + \nu_c) \quad (9)$$

ここに

ε_s : せん断歪み

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: ずれ歪計による2方向の計測歪み

τ : 接合面せん断応力度(kgf/cm²)

E_s : コンクリートのヤング率(2.55×10^5 kgf/cm²)

ν_c : コンクリートのポアソン比(0.2)

両駅における接合面のせん断応力度を、式(9)によって算出し、その変化分を図-5に

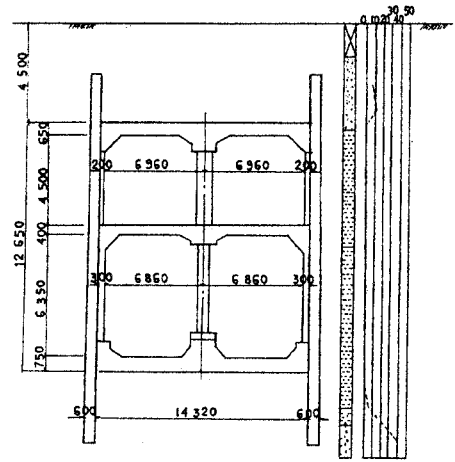


図-3 志茂駅横断面図

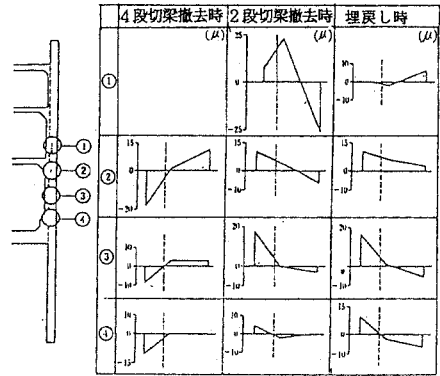


図-4 歪み分布図(辰巳駅)

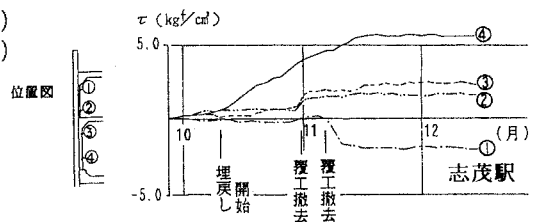
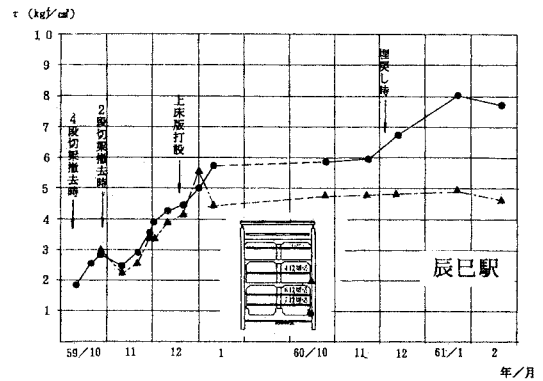


図-5 せん断応力度経時変化図

示す。接合面の許容せん断応力度は、式(6)、(7)により計算すると、 $\tau_a \approx 7.5 \text{ kgf/cm}^2$ となるが、発生せん断応力度はこれより小さく、せん断伝達は確実に行われているものと判断される。

(b) 埋め戻し荷重による断面力

鉄筋の計測歪みから、図-6に示す応力～歪み関係を用いて換算した曲げモーメントの分布を、図-7に示す。このような曲げモーメントの分布形状を説明するため、地下連続壁と下床版の分担支持機構を考慮し、図-7に示すような①地下連続壁の周面に摩擦抵抗用のせん断バネを配置、②地下連続壁下端と下床版に鉛直支持バネを配置した構造計算モデルによって解析を行った。

地盤のパネ値は、国鉄建造物設計標準（基礎構造物）を参考に下式により求めた。

$$K_v = 0.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B^{-1/2} \quad [\text{砂質土}] \quad \cdots (10)$$

$$K_v = 1.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B^{-1} \quad [\text{粘性土}] \quad \cdots (11)$$

$$K_s = \lambda \cdot K_v \quad \lambda = 1/3 \quad \cdots (12)$$

ここに

K_v : 鉛直方向地盤パネ定数

K_s : せん断地盤パネ定数

α : 補正係数（ここでは1.0）

E_0 : 地盤の変形係数（砂質土 25N, 粘性土 210C）

B : 換算幅

解析結果は図-7に示すとおりであるが、計測鉄筋応力度からの逆算曲げモーメントと比較して、分布形状が良い一致をみており、上記の地盤パネを考慮した計算モデルの妥当性が確認できた。

(c) 床版打設時の応力状態

床版コンクリート打設時の温度変化（硬化時）により床版は収縮するが、地下連続壁を本体利用することによりこの収縮が拘束されるため、床版に引張応力が発生する。この現象は、図-8に示すように、辰巳駅の下床版のような部材が厚い場合（厚さ 110cm）に顕著にあらわれる。

一方、志茂駅においては、下床版が75cmと比較的厚い部材であるが、上記のような引張応力が発生していない。これは、下床版のコンクリート打設が、既に逆巻きで施工された上・中床版により、外気と遮断された状態で行われたため、急激な温度変化が生じなかったためと考え

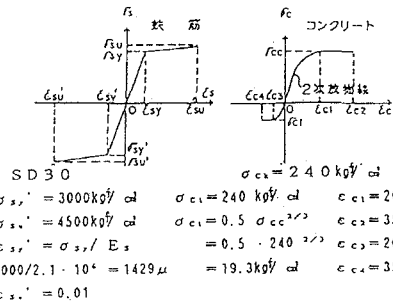


図-6 応力-歪み関係図

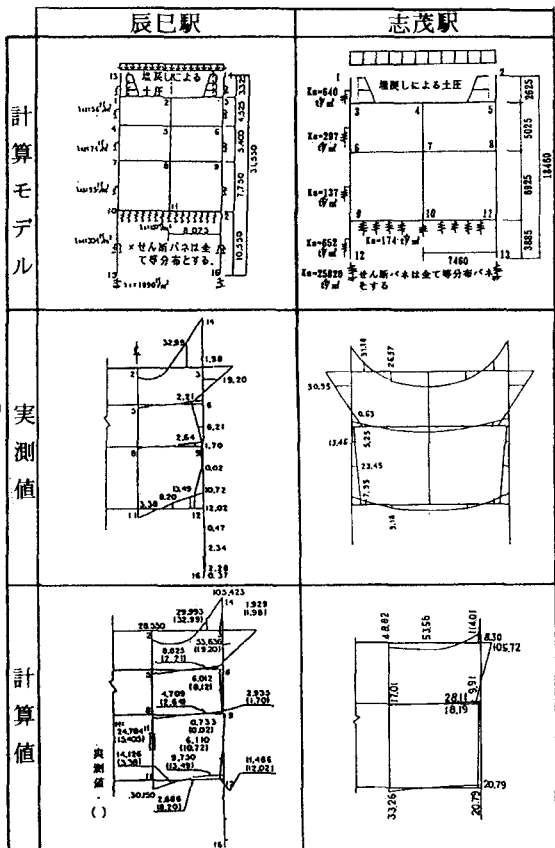


図-7 両駅における発生曲げモーメントの実測値と計算値の比較図

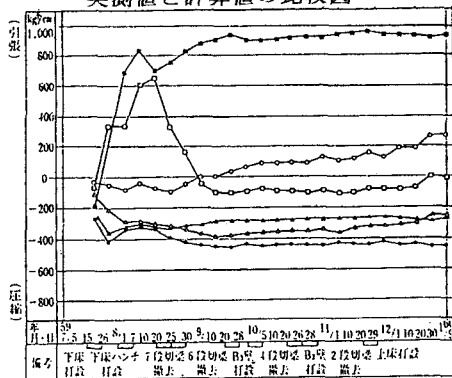


図-8 鉄筋応力度経時変化図（辰巳駅）

られる。

4. まとめ

地下連続壁は、従来から本体利用の研究が進められ、地下連続壁施工技術の進歩に伴い、設計上の考え方も徐々に変化してきた。

すなわち、仮設土留め壁、遮水壁としてのみの機能で考えることから、本体構造物として少しでも利用しようとする重ね壁方式のような考え方へ移り、現在では、地下連続壁と内壁を完全に一体化する考え方が主流となっている。しかしながら、泥水置換される地下連続壁鉄筋コンクリートの強度特性、仮設構造物として使用した地下連続壁の応力履歴に不明確な点があることなどから、許容応力度または有効厚さを低減するなどして、中間的な設計をしているのが現状である。

このような状況のなかで、現場での計測を行った結果、下記のことに付いて明らかとなった。

- ①地下連続壁と内壁の接合部の設計は、せん断摩擦説に従って行えば、一体性が十分確保できる。
- ②構造物の鉛直荷重に対する支持機構は、地下連続壁の周面と先端、並びに下床版下の地盤状況によって異なったものとなるため、地下連続壁の抵抗を考慮することが必要であり、地盤の反力バネを配置した計算モデルを用いて構造解析を行うことにより、計測された応力状態を説明できる。
この場合、特に下床版の応力状態が、従来の地下連続壁を無視した構造計算結果とは全く逆となるので、注意が必要である。
- ③床版等のコンクリートの硬化収縮が地下連続壁によって拘束され、このために床版に付加応力が作用する。
特に、床版が厚い場合には、温度ひびわれの発生が懸念されるので、外気を遮断するなど急激な温度変化が生じない環境下で施工を行う必要がある。

今回は、両現場とも軟弱地盤における施工での計測結果であったが、硬質地盤においても内壁と一体構造で設計した地下連続壁を施工中であり、ここでも計測を予定している。

今後は、これらの計測結果を基に、種々の地盤条件下における地下連続壁や床版の挙動について研究し、地下連続壁一体化のさらなる合理的・経済的設計手法を確立していきたいと考えている。

5. 参考文献

- 1) 佐藤 勉・半谷哲夫・瀧田正一：地下連続壁の本体利用に関する実験その1（合成壁の耐力），土木学会第37回年次学術講演会，pp.369～370，1982.9.
- 2) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)
- 3) 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書 設計編．
- 4) 中村信義・渡邊吉教・中村兵次：地下連続壁の本体利用に関する計測結果と設計手法について（8号湾岸線辰巳停車場），土木学会第41回年次学術講演会，pp.453～454，1986.11.
- 5) 中村信義・中島 信・中村兵次：地下連続壁の本体利用に関する計測結果と設計方法について（続報），土木学会第44回年次学術講演会，pp.892～893，1989.10.
- 6) 渡邊吉教・中島 信・入江健二：地下連続壁の本体利用に関する計測結果と設計方法について（その3），土木学会第45回年次学術講演会，pp.994～995，1990.9.