

地下連続壁を本体に利用する場合の設計法について
—計測データを基にした地盤バネ算定法に関する考察—
Considerations on the Method Used to Calculate Ground Spring When
Designing Underground Diaphragm Walls for a Main Structure

石川 幸彦*・小坂 彰洋**・村松 泰***・村田 基代彦****
ISHIKAWA Yukihiro, KOSAKA Akihiro, MURAMATSU Yasushi, MURATA Kiyohiko

We checked the accuracy of the method used to calculate ground spring when designing an underground diaphragm wall used as a main underground structure. This was done by comparing frame analysis values with field measurements. We found that the results obtained with the method currently being used tend to be larger than measured values for downward deformation of the middle portion of the bottom slab. We closely examined and adjusted the ground spring constant between the slab (or the diaphragm wall) and the ground. By doing so we were able to obtain analytical results that were close to the results obtained by actual measurement.

Keywords: underground diaphragm wall, utilization of underground diaphragm wall for a main structure, ground spring, frame analysis, field measurements

1. まえがき

本研究は、壁式地下連続壁（以下、連壁）を本体に利用する構造を対象に、現場計測データとの比較を通じて、骨組み解析に用いる地盤バネの算定方法に関して検討するものである。

営団は、平成4年に「連壁の本体利用設計要領（案）」（以下、要領案）を作成し、連壁を本体に利用する構造物の設計に地盤バネを用いた手法を取り入れた。

一方、営団は有楽町線新富町～新木場間、南北線赤羽岩淵～四谷間の開削部で、土留め工の挙動把握を主目的とした現場計測を行ってきたが、本体構築完成後の埋め戻し時の内部応力測定結果から側壁・床版の断面力の実測値を算定することが可能である。

今回、連壁を本体利用している南北線後楽園駅の計測結果が取りまとめられたことから、同じく連壁本体利用を行っている有楽町線辰巳駅、南北線志茂駅の計測結果も含め、埋め戻し荷重載荷時の計算値と実測値との比較を行った。本稿は、その比較結果を紹介するとともに、そこで現れた問題点を改善するための検討を行い、連壁本体利用構造の設計に用いる地盤バネの算定方法について提案するものである。

* フェロ-会員 帝都高速度交通営団建設本部
** 正会員 //
*** //
****正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）人事部

2. 管団の連壁本体利用設計方法

2・1 現行の設計方法

管団が現在採用している設計方法、つまり要領案では、連壁本体利用構造の骨組み解析を図－1に示す構造計算モデルにより行うよう定めている。図中の地盤バネは、「国鉄建造物設計標準解説・基礎構造物・抗土圧構造物」（以下、基礎・抗土圧標準）¹⁾に基づき、以下のとおり求めている。

・連壁根入れ部の鉛直方向地盤バネ定数 (kgf/cm²)

$$K_v = K_{v1} \cdot b \text{ -----(1)}$$

$$K_{v1} = 0.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B_{v1}^{-3/4} \text{ -----(2)}$$

$$B_{v1} = (b \cdot \ell)^{1/2} \text{ -----(3)}$$

$$\ell = 10 \cdot b \text{ cm}$$

b : 連壁厚 (cm)

α : 補正係数 (=1.0)

E_0 : 地盤変形係数 (kgf/cm²)

・下床版部の鉛直方向地盤バネ定数 (kgf/cm³)

$$K_{v2} = \begin{cases} 0.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B_{v2}^{-1/2} & (\text{砂質土}) \\ 0.5 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B_{v2}^{-3/4} & (\text{互層}) \\ 1.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B_{v2}^{-1} & (\text{粘性土}) \end{cases} \text{ -----(4)}$$

$$B_{v2} = B \text{ -----(5)}$$

α 、 E_0 : 前述

B : 下床版幅 (cm)、ただし20mを上限とする。

・連壁と背面地山との間の鉛直せん断バネ定数 (kgf/cm³)

$$K_s = \lambda \cdot K_h \text{ -----(6)}$$

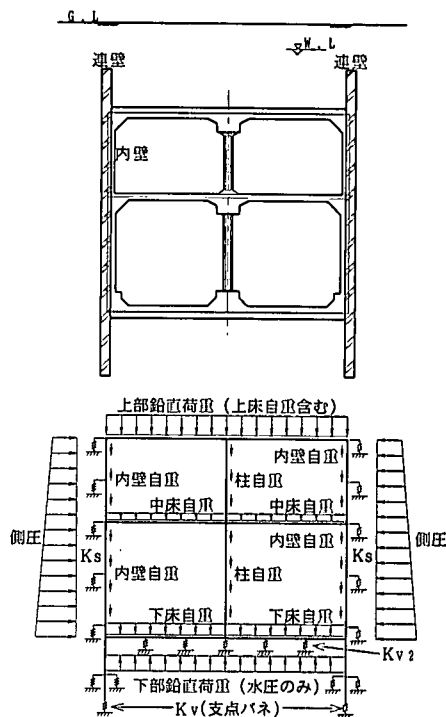
$$K_h = 0.5 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B_h^{-3/4} \text{ -----(7)}$$

$$B_h = h \text{ -----(8)}$$

λ : 補正係数 (=1/3)

α 、 E_0 : 前述

h : 側壁高さ (cm)、ただし20mを上限とする。



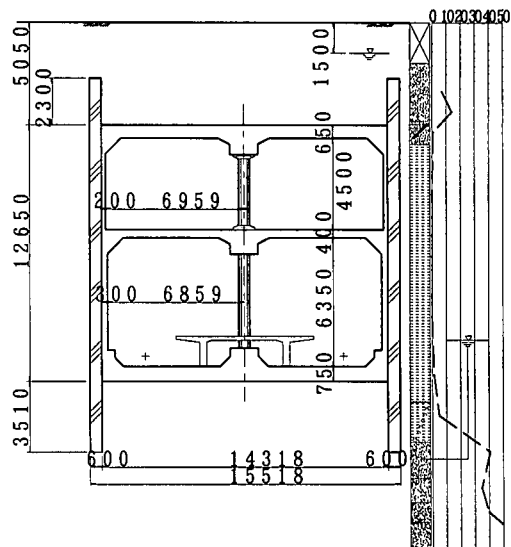
図－1 連壁本体利用の構造と計算モデル図

なお、バネの種類をわかりやすくするため、図－1では連壁の根入れ部を線材として表現したが、実際の計算においては根入れ部はモデル化せず、 K_v と根入れ部に分布する K_s の合計値を集中バネとして下床版隅角部に設置している。従前の計算モデル（以下、慣用法）との相違点は、連壁側壁部・根入れ部及び下床版部において地盤バネにより構築と地盤の相互作用を考慮していること、及び、それと関連して下床版にかかる鉛直上向きの荷重を水圧のみとしたことである。

2・2 現行の設計方法による計算例

今回検討した3駅の横断面、地質を図－2～4に示す。ここでは、南北線志茂駅を例にとり、要領案の計算について具体的に紹介する。図－2に示すとおり、志茂駅の躯体は、軟弱な有楽町層の中に構築されているが、連壁根入れ先端は埋没段丘礫層に達している。骨組み解析の計算モデルは図－5の右側に示す通りで、前述のとおり連壁根入れ部に分布する地盤バネは隅角部にまとめて設置している。設計荷重作用時の発生曲げモーメントの計算結果を図－6に示す。慣用法の計算では、通常の箱形トンネルと同様、節点で負（外側引っ張り）、部材中央で正（内側引っ張り）の曲げモーメント分布が得られる。それに対し、要領案による計算では、下床隅角部の曲げモーメントが正側に転じ、中柱下の負の曲げモーメントが慣用法に比べ著しく

この比較計算を有楽町線辰巳駅、南北線後楽園駅についても行った。辰巳駅は志茂駅と同様、沖積層に位置しているが、根入れは洪積層に到達していない。計算の結果、辰巳駅も志茂駅と同じ下床版のふら下がり傾向が明確に示された。後楽園駅は構築全体が洪積層に位置しているため、下床版のふら下がり傾向はあまり明確でなく、曲げモーメントの分布形状は慣用法の計算結果と同様であった。後楽園駅では、掘削底面がN値50以上の固い砂質土であるため、中柱下付近の底面地山からも大きな反力を得ているためと考える。



Technical drawing of a three-story building facade. The drawing shows a symmetrical structure with a central vertical axis. The facade is divided into three horizontal levels, each with a central rectangular opening and two side rectangular openings. The dimensions are as follows:

- Overall Height:** 10 000 (Total height from ground level to the top of the facade).
- Overall Width:** 16 850 (Total width of the facade).
- Level 1 (Ground Floor):**
 - Central opening width: 15 250
 - Side opening width: 1 600
 - Side opening height: 7 000
- Level 2 (Second Floor):**
 - Central opening width: 15 250
 - Side opening width: 1 600
 - Side opening height: 7 325
- Level 3 (Third Floor):**
 - Central opening width: 15 250
 - Side opening width: 1 600
 - Side opening height: 7 425
- Roof/Top Section:**
 - Central opening width: 15 250
 - Side opening width: 1 600
 - Side opening height: 4 000

The drawing includes a scale bar at the bottom right, indicating a scale of 1:100. The drawing is labeled with '10 000' and '16 850' at the bottom, and '10 000' and '16 850' at the top right.

QL 7 105 99

0.000000

5400
1400
7200
400
8850
31914
6951

7400
14287
7950
200

200
7200
7858
200
200
7200
7858
200
200
6158
200
6808
200
8808
7258
600
600
600

慣用法

3.938 ¹ / ₂ %	12.495 ¹ / ₂ %
2.000 ¹ / ₂ %	0.727 ¹ / ₂ %
1.735 ¹ / ₂ %	2.000 ¹ / ₂ %
2.250 ¹ / ₂ %	1.735 ¹ / ₂ %
0.579 ¹ / ₂ %	2.250 ¹ / ₂ %
15.804 ¹ / ₂ %	15.804 ¹ / ₂ %
21.863 ¹ / ₂ %	21.863 ¹ / ₂ %

要領案

注) $Kv' = Kv + I(\text{相入れ部 } Ks)$

1 2 4 9 5 1%	
0.500 1%	0.727 1%
1.735 1%	1.735 1%
0.750 1%	0.579 1%
5.575 1%	5.575 1%

$Kv_1 = 1347.0 \frac{1}{\text{g}}$
 $Kv_2 = 180.0 \frac{1}{\text{g}}$

$Ks_1 = 53.3 \frac{1}{\text{g}}$
 $Ks_2 = 118.7 \frac{1}{\text{g}}$

$2.200 \frac{1}{\text{g}}$

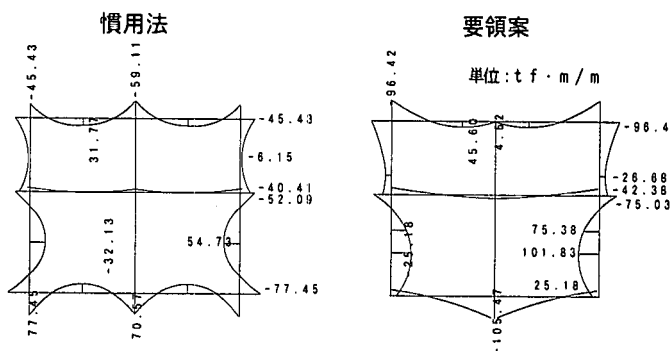


図-6 発生曲げモーメントの比較図 (志茂駅、設計荷重作用時)

	慣用法 (単位: $t \cdot f \cdot m / m$)	要領案 (単位: $t \cdot f \cdot m / m$)
志茂駅	・: 実測値	・: 実測値
辰巳駅		
後楽園駅		

図-7 発生曲げモーメントの計算値と実測値の比較 (埋め戻し荷重作用時)

2・3 現場計測結果との比較

計算手法の妥当性をチェックするため、埋め戻し開始から完了までの増加荷重により発生する断面力について、計算値と実測値との比較を行った。比較の結果を図-7に示す。志茂駅、辰巳駅の計算結果をみると、下床版については、慣用法、要領案とも実測値との整合は良くない。辰巳駅の実測値では、下床版のぶら下がり傾向が確認できるが、その程度は要領案の計算結果ほど大きいものではない。両駅の計算結果を全体的にみると、実測値は、慣用法と要領案の中間的な値をとっているものと判断される。なお、後樂園駅については、実測値が極めて小さく、計算手法の是非を判断できるほどの結果は得られなかった。

3. 計算モデルの改良に関する検討

3・1 想定される問題点

現場計測結果との比較の結果、要領案の計算方法では、下床版のぶら下がり傾向が過大にでるという問題点を発見した。これは、連壁が根入れ部および背面地山から受けている上向きの地盤反力と、下床版が底面地山から受けている地盤反力のバランスが悪い—前者が大きすぎる—ためと考えられる。筆者らがその原因として想定したものは以下の二つである。

ア)下床版と底面地山との間の鉛直方向バネ定数((4)式の Kv_2 、以下、 Kv_2)を過小に設定している。

イ)連壁と背面地山との間の鉛直方向せん断バネ定数((6)式の Ks 、以下、 Ks)を過大に設定している。

推察した根拠は、以下の通りである。

ア)(4)式は、換算幅(Bv_2)という変数を含んでいるが、地下鉄構造物のような構造物の場合この決定方法が難しい。本来ならば、長さの長いカルバートではこの値を有限要素解析等により検討することが適当である¹⁾。要領案では、計算の簡便性を重視し、換算幅として構築幅(B)をとることとしているが、この値が適当かどうかは十分検討されていない。

イ)連壁のコンクリートは泥水中で打設されるため、連壁と側方地山との間にはマッドケーキ等が残留し、地山と連壁との間のせん断抵抗は大きく低減されている可能性がある。また、ア)と同様、換算幅(Bh)の決定方法が明確でない。

3・2 検討ケース

前節の想定をもとに、 Bv_2 と、 Ks の値を変化させ5ケースの計算を行った。検討ケースの一覧を表-1に示す。

表-1 検討ケース一覧表

	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	備考
Bv_2 (換算幅)	構築幅		中柱(壁)下の縦桁の幅			
Ks	50%	0%	100%	50%	0%	要領案の計算値に対する比率

3・3 検討結果

計算結果を比較したところ、 Bv_2 を中柱(壁)下の桁幅とし、 Ks を要領案による算定値の50%で評価した解析値(Case-4)と実測値との整合が良いことがわかった。ケース4における埋め戻し増加荷重による発生曲げモーメントの計算結果と実測値の比較を図-8に示す。また、ケース4のモデルで設計荷重作用時の曲げモーメントを計算した結果を図-9に示す。この結果を要領案での計算結果(図-6参照)と比較すると、中柱下に発生する曲げモーメントが105tmf/mから74tmf/mに大幅に減少していることがわかる。

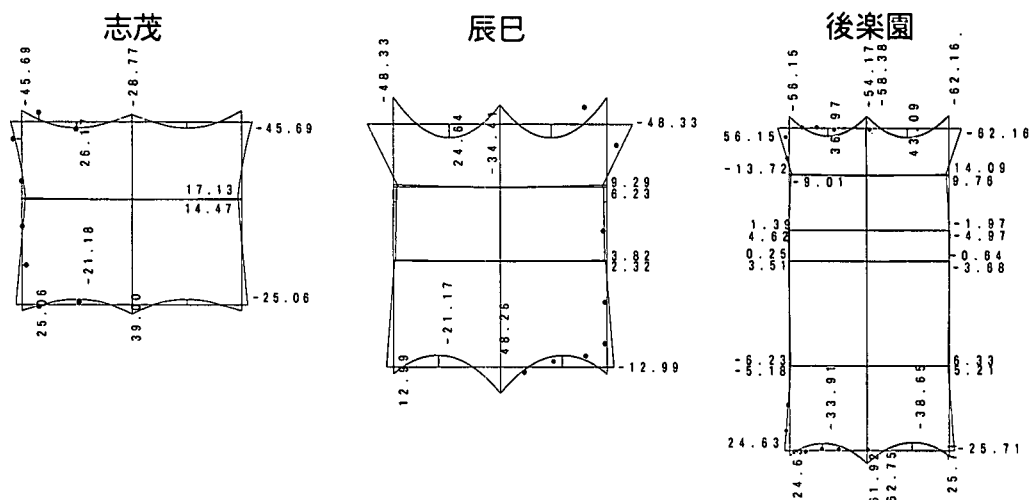


図-8 ケース4の計算結果と実測値との比較（埋め戻し荷重作用時）

4. あとがき

本稿に提示した改良を行えば、現行の計算手法よりも合理的な設計を行うことが可能である。現行の設計では、中柱下で発生している比較的大きな負の曲げモーメントが下床版の厚さを決定する要素となっているが、本稿で提案した計算方法では、その位置の曲げモーメントを適切に算出できるため、下床版厚さを合理的な厚さに（薄く）することができる。また、鉄筋量についても合理的に（低減）できる。ただし、当面営団は要領案による設計を継続する予定である。これは、今回の検討に用いた計測データ数が少ないこと、改善点に対する理論的検証が不十分であること、及び、現在の設計が安全側であることによる。今後、さらに計測データを充実し、今回の研究をフォローしていきたいと考えている。

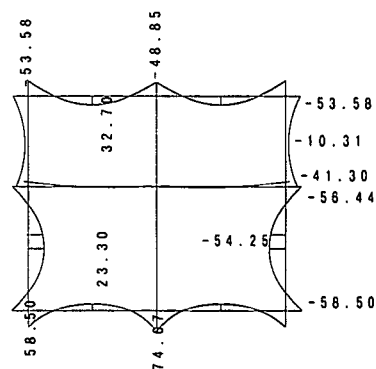


図-9 ケース4による曲げモーメント
（志茂駅、設計荷重作用時）

5. 参考文献

- 1) 基礎構造物及び坑土圧構造物設計標準に関する研究委員会：国鉄建造物設計標準解説・基礎構造物・抗土圧構造物，p.317，土木学会，1986.3
- 2) 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回年次学術講演会講演概要集，pp.892～893，1989.10
- 3) 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回年次学術講演会講演概要集，pp.994～995，1990.9
- 4) 入江 健二・西村 高明・渡辺 浩史：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，トンネル工学研究発表会論文・報告集，pp.287～292，1991.12