

地中連続壁基礎の支持機構

A BEARING MECHANISM OF THE DIAPHRAGM WALL FOUNDATION

岡原 美知夫* 高木 章次** 茶林 一彦***

By Michio Okahara, Shoji Takagi and Kazuhiko Chabayashi

The diaphragm wall foundation has recently been developed in Japan. Each element of reinforced concrete walls is rigidly connected by specially invented joints to be a box-shaped form. In order to know the characteristics of its bearing mechanism from the view point of the practical design, studies on the friction mobilizing on its wall and ground spring constants has been made through the analysis of FEM and practical formulas to obtain ground spring constants are proposed here.

1. はじめに

地中連続壁（以下、連壁）は従来より主に、土留壁や止水壁などの仮設構造物として利用されてきた。しかし、連壁は基本的に場所打ち杭工法で施工されるため、①周辺地盤を乱すことなく施工できる ②優れた耐久性を有するなどの特徴を有しており、最近では建築物の地下外壁や低振動・低騒音の低公害工法であることなどから都市部の橋梁基礎などの本体構造物として用いられるようになってきた。

地中連続壁基礎（以下、連壁基礎）はこのような連壁を特殊な鉛直継手を用いて連結し、高い剛性を持たせた基礎形式であり50年代前半より、主に道路橋、鉄道橋の基礎として用いられるようになってきた比較的新しい基礎形式である。連壁基礎はケーソン基礎と同様の高い剛性を期待できるという特徴の他に各エレメントの大きさ、数を調整することにより自由な形状を選定できるという特徴も有しており、今後、その実績が増加するものと思われる。連壁基礎に関する実験、研究は各機関により数多くなされているが設計法として確立したものはまだなく、連壁基礎に関し先行しているJRの設計手法があるのみであり、既設の基礎のほとんどがこの手法によっているのが現状である。そこで、現在日本道路協会において設計法について審議中であるが、基礎研究室においても59年度より連壁基礎の設計法に関する実験、解析をすすめており、本論文は62年度に実施した解析の結果を報告するものである。

JRの設計法では、基礎本体を剛体として取り扱い、地盤バネは基礎内部地盤のものも含め8種類の地盤バネを設定している。さらに、それぞれの地盤バネに地盤反力度の上限值を設け、バイリニアな弾塑性解析をおこなうというものであるため、かなり複雑な計算法となっている。土中に構築された基礎の支持機構は地盤の3次元的なひろがりにより本来複雑にならざるを得ないものであるが、もう少しは簡略化できるもの

* 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室 室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)
 ** 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室 主任研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)
 *** 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

と思われる。

基礎研究室では61年度までにJRの設計法をもとに各種のパラメータ解析を実施し、各地盤バネ相互の影響について研究を行った結果、

- ① 基礎本体は弾性体として取り扱う。
- ② 地盤バネは基礎前面の水平バネ、側面の水平せん断バネ、基礎底面の鉛直バネおよびせん断バネの4種類の地盤バネ考慮する。

という設計法を提案している。しかし、これらの結果はJRの設計法をもとにしたものであり、基礎の抵抗機構を把握したうえで各地盤反力係数を提案するに至っていない。

そこで、62年度は連壁基礎の鉛直および水平方向の抵抗機構に着目して検討を行い、各種地盤反力係数算定式の提案を行ったので報告する。

抵抗機構に関する検討は以下の3点についてFEM解析により行った。

- ① 基礎前背面地盤と側面地盤の水平抵抗の分担比
- ② 内部土を含めた鉛直方向の支持機構
- ③ 基礎底面の水平方向の支持機構

2. 基礎前背面と側面地盤の水平抵抗の分担比

(1) 検討目的

連壁基礎はケーソン基礎と異なり基礎周面の摩擦力を期待でき、その割合が比較的大きい。そこで、地中に構築された基礎に水平力やモーメントが作用した場合の基礎前背面および側面地盤（中間地盤）の水平抵抗機構を判断することを目的として検討した。 中間地盤においては地盤中の応力のZ方向の変化は少ないという前提のもとに図-1に示す基礎の中間部を薄くスライスして、その部分（図中ΔZ部分）を平面歪み状態として2次元のFEM計算を行う。ここで行う計算は局所的な応力集中とか局所的な地盤の塑性化というような問題を扱うのではない。

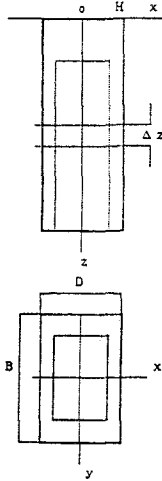


図-1 基礎形状

主目的は基礎前背面の水平地盤抵抗と側面の水平地盤抵抗（せん断抵抗）の分担比を大略つかむことである。そこで、地盤は弾性体として基礎周面の応力分布を比較的細かく計算した。

(2) 計算条件および検討ケース

計算条件および検討ケースを表-1に示す。ここで、HAモデルは図-2に示すとおり基礎外周面において基礎と地盤が常に密着している（変位の連続条件を保つ）としたものであり、HBモデルは基礎背面（基礎と地盤の間に引張地盤反力が働く面）

表-1 計算条件および検討ケース

名前	基礎前面幅 B (m)	基礎側面幅 D (m)	スライス厚 ΔZ (m)	変形係数 E ₀ (kg/cm ²)	ヤング係数 E (t/m ²)	ポアソン比	
						地盤 ν ₀	基礎 ν
HA-1	6.0	2.0	1.0	1120	2.7×10 ⁶	0.4	0.15
HA-2		6.0					
HA-3		18.0					
HB-1		2.0					
HB-2		6.0					
HB-3		18.0					

において地盤が基礎の動きに追従せず地盤と基礎の間に空隙が生ずると考えた場合の計算モデルである。

(3) 計算結果

(3)-1 HAモデルについて

HA-1モデルにおいて計算した結果、基礎のX方向の変位の最小値(δ_x)_{min}と最大値(δ_x)_{max}の比は(δ_x)_{min}/(δ_x)_{max}=0.98となり、基礎は地盤に対しほぼ剛体として働いていると考えてよいと思われる。

①前背面の水平地盤反力係数と側面の水平方向せん断バネ係数の関係

基礎の前背面の水平地盤反力係数k_h及び側面の水平バネ係数k_tは次式のように表すことができる。

$$k_h = 6x / \delta_x \quad k_t = \tau_{xy} / \delta_x$$

ここで、 σ_x :前背面の
垂直応力 τ_{xy} :側面の
せん断応力 δ_x :X方向
の変位

図-3にFEM解析結
果の一例を示す。(HA-
2、HB-2)

図に示すように基礎断
面の角で応力集中により
大きな値を示すが、こ
こでは応力集中を問題に

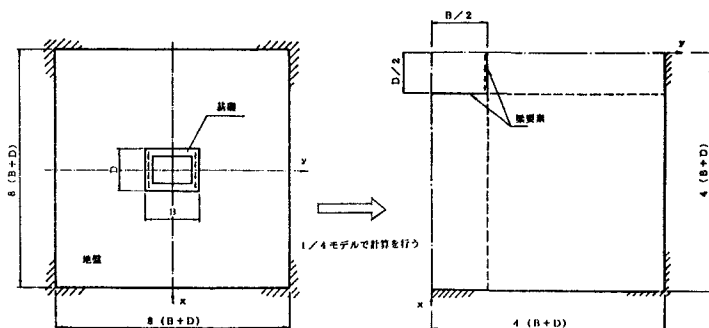


図-2 FEM平面モデル

しているわけではないのでそれを平均化して扱う。その平均値をそれぞれ $(k_h)_m$ および $(k_f)_m$ で表すと
比 λ_f は次式となる。 $\lambda_f = (k_f)_m / (k_h)_m$

λ_f と D/B の関係を図-4に示す。(HBモデルも併記)

図に示すように λ_f と D/B の関係は両対数でよい直線関係にあり、

$$\lambda_f = 0.65 (D/B)^{-0.376} \quad (\text{HAモデル})$$

であらわせる。したがって、前背面の水平方向地盤反力係数 k_h が求
まった場合、それに λ_f を乗ずれば側面の水平せん断バネ係数を求める
ことができる。

②前背面の地盤反力係数と D/B の関係

前背面の平均地盤反力係数 $(k_h)_m$ は D/B が増加するにつれて減
少する。これは D が増大するにつれて側面のせん断抵抗が増大するの
で図-5に示すように基礎の前背面の抵抗幅が見掛け上大きくなるた
めと考えられる。そこで、見掛けの抵抗幅を B^* とすると、

$B^* = (1 + \xi) B$ であり、 $B = B_0$ で $D = 0$ の地盤反力係
数 k_{h0} とすると弾性解析の場合の一般解は、

$$k_h = k_{h0} \{ (1 + \xi) B / B_0 \}^{-1} \quad \text{となる。}$$

この式を ξ について解くと

$$\xi = (k_{h0} / k_h) (B_0 / B) - 1 \quad \text{となる。}$$

次に ξ と D/B の関係を図-6に示す。その関係を両対数
で2次曲線と仮定すると次式であらわせる。

$$\xi = 0.52 (D/B)^{-0.37109 (D/B) + 0.85}$$

また、簡略化を考え、図-6を直線と仮定すると、

$$\xi = 0.5 (D/B)^{0.9} \quad \text{とあらわせる。}$$

以上の検討より、前背面の水平地盤反力係数 k_h は地盤抵抗
の拡がり率 ξ を考慮し、側面の水平方向せん断バネは前面バネに対する比 λ_f を計算することで各々求められる
ことがわかる。また、それぞれの値は前面幅および側面幅の影響を受けることがわかる。

(3)-2 HBモデルについて

背面バネの影響を考慮しないHBモデルの地盤反力係数は図-3に示している。これより、HBモデルは
HAモデルに比較し、後背面端部で大きな値を示すがその他の部分はあまり差がない。

前背面の平均地盤反力係数 $(k_h^*)_m$ と側面の平均せん断バネ係数 $(k_f^*)_m$ との比と D/B の関係は図-
4に示される。HAモデルと比較すると前背面の平均水平地盤反力係数はほとんど差がないが、側面の平均

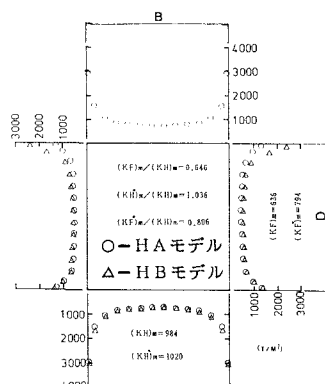


図-3 基礎外周面の地盤反力係数の分布

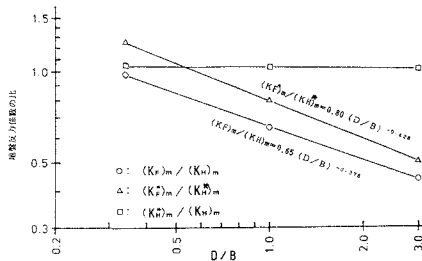
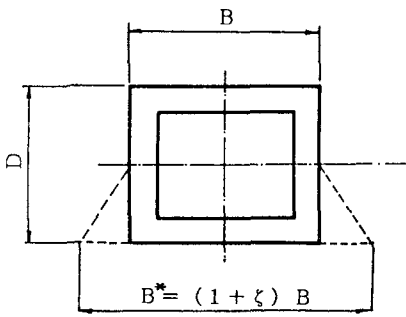
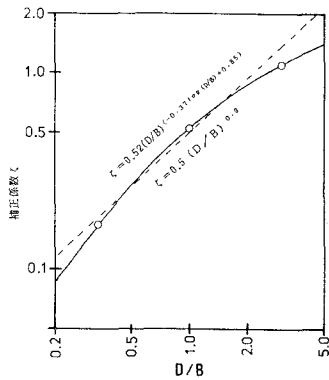


図-4 地盤反力係数の比と D/B の関係

せん断バネ係数はやや大きい。これは、図－３に示すようにせん断バネ係数が大きい背面側端部の影響であることがわかる。実際には、地盤の塑性化を考慮して設計を行うため、この程度の地盤反力係数の差が与える影響は少ないと考えられる。



図－５ 見掛けの荷荷幅

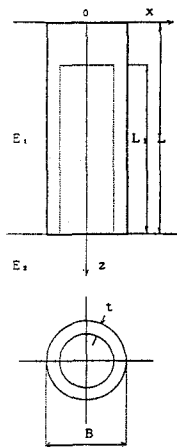


図－６ 補正係数ζと(D／B)の関係

３．鉛直方向の支持機構

(１) 検討目的

連壁基礎は鉛直方向の支持力についても基礎周面の摩擦力が期待できる。また、ケーソン基礎と異なり基礎底面に底版を施工しないため、連壁で囲まれた内部に内部土が存在する。連壁基礎は鉛直力に対し、基礎内外周面の摩擦力および底面地盤に支持されることとなるが、その分担率を含めた支持機構については不明な点が多い。ここでは、図－７に示すような地中に構築された軸対称の基礎に鉛直荷重を載荷した場合についてFEM解析を行い、内外周面の鉛直方向の摩擦抵抗機構と強度比および鉛直支持に及ぼす内部土の影響を調べるとともに、基礎底面の鉛直地盤反力係数等の提案を行うものである。



図－７ 基礎形状

(２) 計算条件および検討ケース

計算条件および検討ケースを表－２に示す。その他の条件は表－１と同一とする。

計算モデルは図－８に示すとおりである。頂版下には空隙があるが、その他の面では基礎と地盤は常に密着していると仮定する。

(３) 計算結果

(３)－１ 内部土の支持力について

図－９に基礎内外周面および底面の地盤反力分布の計算結果の一例を示す。他のケースも同様の結果となっているが、内部土底面の垂直応力は基礎底面の垂直応力に比較して非常に小さいことがわかる。また、内周面のせん断応力の鉛直方向の分布は基礎底面付近を除いてゼロに近く、外周面のせん断応力に対する強度比は非常に小さい。内部土底面の地盤反力が全地盤反力に占める割合と内部土の高さを内部土の半径で割った値 (L_i / r_i) との関係を図－１０に示す。内周面のせん断抵抗力と内部土の底面の鉛直地盤反力は等しく、その割合は L_i / r_i にあまり関係なく約５％

表－２ 計算条件および検討ケース

名前	基礎幅 B (m)	掘入れ長さ L (m)	壁厚 t (m)	地盤変形係数 (kg/cm ²)	
				上層 E ₁	下層 E ₂
VA-1	5.0	9.0	0.8	280	2240
VA-2			1.2	560	
VA-3			0.8		
VA-4			1.2		
VB-1		18.0	0.8	280	
VB-2			1.2	560	
VB-3			0.8		
VB-4			1.2		
VC-1		27.0	0.8	280	
VC-2			1.2	560	
VC-3			0.8		
VC-4			1.2		

でかなり小さい。したがって、鉛直支持に関する抵抗要素として、基礎部底面の鉛直支持および基礎外周面と一部の内周面のせん断抵抗を考慮したモデルを考えるのが妥当と思われる。

(3) - 2 基礎底面の鉛直地盤反力係数

鉛直地盤反力係数に影響を及ぼすパラメータとしては剛体円板の場合の基礎幅に相当するもの、根入れ長および上層地盤のN値等が考えられるが、それぞれについて k_v との関係について検討を行った。その結果および図-10に示されるように内部土底面の支持分担率はわずかであるという結果より、鉛直地盤反力係数に関するパラメータとして壁厚 t を選定し、以下の検討を行った。

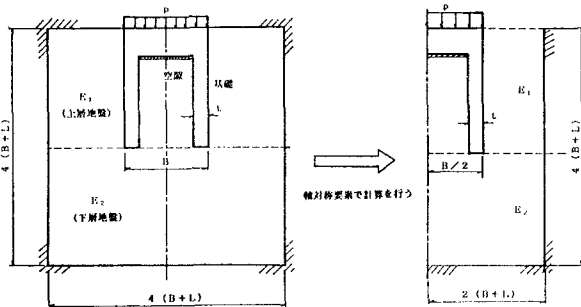


図-8 FEM軸対称モデル

見掛けの壁厚 $t^* = t \cdot \eta$ とすると地盤反力係数は弾性体を前提として

$$k_v = \bar{k}_{vo} (\eta t / t_o)^{-1} \quad \text{とあらわせる。}$$

ここで、 $\bar{k}_{vo}$ はこの下層地盤と同じ地盤に対する幅 t_o の剛体無限板による載荷試験の値に相当する地盤反力係数である。

この式を η について解くと、 $\eta = (\bar{k}_{vo} / k_v) (t_o / t)$ となる。

各モデルについて計算した η と (B/t) 、 (L/B) 、 (N/N_o) の関係を調べた結果、 (L/B) は他のパラメータに比較し、あまり影響を及ぼさないことがわかり、 η は次式であらわされる。

$$\eta = a (B/t)^{0.44} (N/N_o)^{0.16}$$

ここに、 N/N_o は上層地盤と支持地盤のN値の比である。

各モデルについて計算した a の平均と標準偏差は、

$$a = 1.496 \pm 0.043 \quad \text{となる。}$$

したがって、直径30cmの剛体円盤による平板載荷試験の値に相当する鉛直方向の地盤反力係数を k_{vo} とし、地盤の非弾性を考慮すると、

$$k_v = \alpha_v k_{vo} (\eta t / 30)^{-0.75} \quad \eta = 1.5 (B/t)^{0.44} (N/N_o)^{0.16}$$

とあらわされる。ここで α_v は掘削による底面地盤の乱れの影響をあらわす補正係数である。

(3) - 3 基礎外周面の鉛直方向のせん断バネ係数

図-11に基礎外周面のせん断抵抗が全抵抗力に占める割合と根入れ長との関係を示す。基礎の根入れ長が長くなるにつれて、また上層地盤のN値が大きくなるにつれて、全抵抗力に占める外周面のせん断抵抗が大きくなる。外周面のせん断バネ係数 k_{sv} を

$$k_{sv} = \alpha_{sv} \cdot k_v \quad \text{とあらわす。}$$

α_{sv} に影響を及ぼすパラメータとして壁厚 (t) 、根入れ長 (L) 、および上層地盤のN値 (N) を考え、それぞれについて α_{sv} との関係を検討した結果 α_{sv} は次式であらわすことができる。

$$\alpha_{sv} = b (B/t)^{-0.5} (L/B)^{-0.34} (N/N_o)^{1.03}$$

各モデルについて計算した b の平均値と標準偏差は、

$$b = 1.104 \pm 0.071 \quad \text{となる。}$$

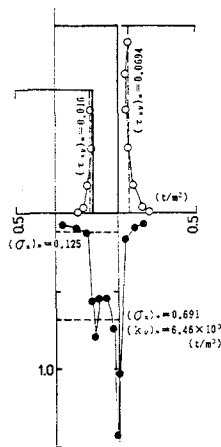


図-9 地盤反力分布 (VA-4)

図-10 内部土底面の鉛直地盤反力が全地盤反力に占める割合と L/r_i の関係

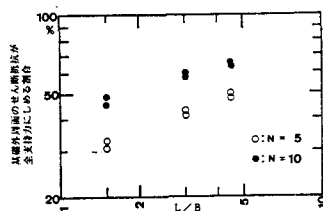


図-11 基礎外周面のせん断抵抗が全抵抗力に占める割合と L/B の関係

したがって α_{sv} は、

$$\alpha_{sv} = 1.1(B/t)^{-0.5}(L/B)^{-0.34}(N/N_o)^{1.03}$$

とあらわすことができる。

表－3 計算条件および検討ケース

名前	基礎幅 B (m)	根入れ長さ L (m)	壁厚 t (m)	地盤変形係数(kg/cm ²)	
				上層 E ₁	下層 E ₂
SA-1	6.0	9.0	0.8	280	2240
SA-2			1.2		
SA-3			0.8		
SA-4			1.2		
SB-1		18.0	0.8	280	
SB-2			1.2		
SB-3			0.8		
SB-4			1.2		
SC-1	27.0	0.8	280		
SC-2		1.2			
SC-3		0.8			
SC-4		1.2			

4. 基礎底面における水平方向の支持機構

(1) 検討目的

鉛直支持機構の検討では内部土の抵抗はほとんど期待できないことがわかった。しかし、水平抵抗機構は基礎底面と支持地盤および内部土のせん断抵抗が主体となるため、内部土の影響は鉛直支持に比べ大きくなると思われる。ここでは、連壁基礎に水平方向の変位を与えた場合の支持機構を検討するため、図－12に示すような地中に構築された基礎に水平方向の強制変位をあたえた場合についてFEM解析を行い、基礎底面および内部土底面のせん断バネ係数の提案を行うものである。

(2) 計算条件および検討ケース

計算条件および検討ケースを表－3に示す。ここでも、その他の条件は表－1と同じである。計算モデルは図－13に示すとおりであり、頂版の下面は空隙があるが、その他の面は地盤と密着しているものとする。

(3) 計算結果

基礎全体に水平方向の強制変位を1cm与えた場合について解析を行った。

その結果基礎底面と内部土底面の地盤の水平方向のせん断力、基礎外周面と内周面の地盤の水平方向の垂直応力の分布の一例を図－14に示す。

(3)－1 基礎底面のせん断バネ係数

基礎底面のせん断バネ係数と鉛直地盤反力係数の比 (k_s/k_v) を α_s とすると、

$$k_s = \alpha_s \cdot k_v \quad \text{である。}$$

係数 α_s に影響を及ぼすパラメータは壁厚 (t)、根入れ長 (L)、および上層地盤の N 値 (N) が考えられる。それぞれについて α_s に及ぼす影響を検討した結果、壁厚は他のパラメータに比較して、ほとんど係数に影響を及ぼさないことがわかった。したがって、基礎幅を B 、下層地盤の N 値を N_o とすると、 α_s は次式であらわすことができる。

$$\alpha_s = b (L/B)^{-0.2} (N/N_o)^{-0.1}$$

各モデルについて計算した b の平均と標準偏差は、

$$b = 0.437 \pm 0.0046 \quad \text{となる。}$$

したがって、 α_s は次式であらわされる。

$$\alpha_s = 0.44 (L/B)^{-0.2} (N/N_o)^{-0.1}$$

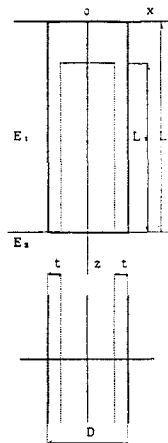
α_s について試算した結果を表－4に示すが $\alpha_s = 1/3 \sim 1/2$ となり、一般的な値によく対応している。

(3)－2 内部土底面のせん断バネ係数

内部土底面のせん断抵抗が全せん断抵抗に占める割合を図－15に示す。その割合は鉛直支持の場合に比べてかなり大きいことがわかる。

内部土および基礎底面のせん断バネ係数の比 (k_{si}/k_s) を α_{si} とすると、

$$k_{si} = \alpha_{si} \cdot k_i \quad \text{となる。}$$



図－12 基礎形状

表－4 α_s の試算

		N / N _o	
		0.125	0.250
L / B	1	0.542	0.505
	2	0.472	0.440
	3	0.393	0.366

検討の結果、 α_{si} に影響を及ぼすパラメータとしては壁厚(t)、上層地盤の N 値(N)とがあり、根入れ長(L)は他に比べ、ほとんど影響を及ぼさないことがわかった。

したがって、 α_{si} は

$$\alpha_{si} = c(t/B)^{0.5}(N/N_0)^{0.42}$$

とあらわされる。

各モデルについて計算した c の平均と標準偏差は $c = 1.07 \pm 0.0096$ となり

$$\alpha_{si} = 1.1(t/B)^{0.5}(N/N_0)^{0.42} \quad \text{となった。}$$

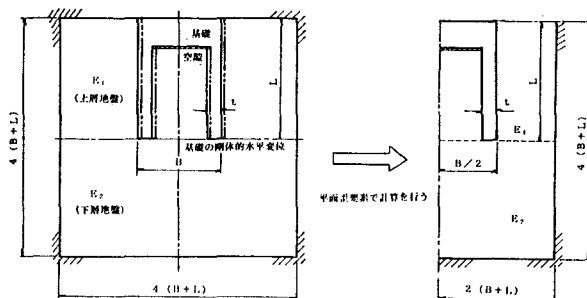


図-13 FEM平面歪モデル

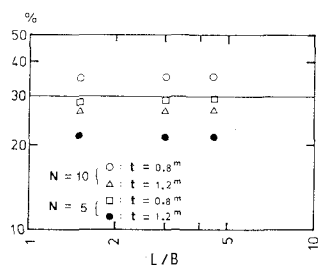


図-15 基礎底面と内部土のせん断抵抗の比率と L/B の関係

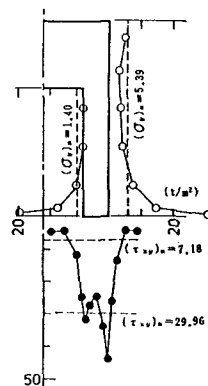


図-14 地盤反力分布 (SA-4)

5. おわりに

以上のとおり、連壁基礎の支持機構について2次元のFEM解析を行い、鉛直および水平方向の支持機構について明らかにし、各抵抗要素に対して地盤反力係数を提案することができた。

支持機構に対してまとめると以下のとおりである。

- ① 水平方向の支持に対し、基礎側面の摩擦抵抗のしめる割合は大きい。
- ② 鉛直方向の支持に対し、内部土の効果はほとんど期待できない。
- ③ 水平支持に対しては、基礎底面のせん断抵抗だけでなく、内部土底面のせん断抵抗もかなりの割合で有効に働く。

以上の結果を踏まえ、各地盤反力係数を提案したが、設計法に反映する場合、その式はかなり複雑である。今後、従来より運用されている一般的な k 値算定式との関係を試設計を通して検討していきたい。

参考文献

- 1) 田口、岡原、福井、船越 「地中連続壁の設計法に関する検討」第22土質工学研究発表会
- 2) 田口、岡原、福井、船越 「地中連続壁の設計計算手法に関する一提案」第42土木学会年次学術講演会
(1988年10月12日受付)