

III-168 基礎の一工法-多柱式工法-について

建設省

本州四国連絡道路調査事務所

正員

多田 浩考

山下 理雄

1. 概要

本州四国連絡橋の架橋地は諸外国の長大吊橋架橋地と比べても類をみないほど厳しい自然条件のもとにおかれている。下部構造の工法もその施工の可能性から考えて、海上作業は迅速に行うものとし水中作業と共にできるだけ少くする。²現場の地形地質を努めて利用できる工法とし海底掘削量を最小とする。³工期が数年に及ぶことも考えられるので施工の各段階で潮流台風季節風波浪などに耐えられる工法であること、等の條件に特に留意して選定しなければならない。ここで提案する多柱式工法とは水深が深く底質の固いような所に一辺が50~60mにもおよぶ大型基礎を掘削沈下させることはとうてい不可能であり、直径10m程度の小型基礎にしてはじめてそれが可能であるという施工上の見解から、まず柱となる数々の小型基礎を築造しこれを海面上の頂版をもって剛結して一体となし基礎構造とする工法をいう。鉄骨コンクリートを主とした構造として施工することとするが、この型式は地震力が作用した場合水平変位が大きくなる傾向がありこのことは長大な上部構造に致命的な悪影響を及ぼすことになる。支持筋の上の不連続性の軟弱地層があるような場合は小型基礎を不連続地層まで根入れした後水を替えて海底炭坑の要領で気中で底部を拡大連続させて底版をつくる構造とすることもできる。このような構造とすれば耐震安定性は著しく良好となり、前者を多柱式A、後者をBと名付けることとする。

図1 多柱式A

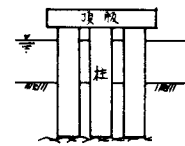
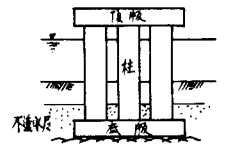


図2 多柱式B



2 多柱式Aの計算式の誘導

多柱式Aは地盤に根入れされた地中部柱を弾性基礎杭とし地表部の柱と頂版をラーメンとして、弾性基礎杭に直結されたラーメンとみなして解析することができる。

2.1 地中部の計算式

今地中部柱を弾性床に支えられた杭と考えると分割法を用い図-3を参照して次の3つの釣合が成り立つ。

(1) 水平力 $\Sigma H = 0$

$$H' + \frac{3L}{2} - \frac{P_1 + 2P_2 + 2P_3 + P_4}{2} a = 0 \quad \dots\dots (1)$$

(2) モーメント $\Sigma M = 0$

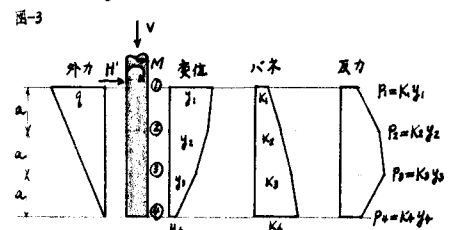
$$M - \frac{3L^2}{6} + \frac{P_1 a^2}{2} + \frac{2(P_2 - P_1)a^2}{6} + \frac{3P_2 a^2}{2} + \frac{5(P_3 - P_2)a^2}{6} + \frac{5P_3 a^2}{2} + \frac{7(P_4 - P_3)a^2}{6} = 0 \quad \dots\dots (2)$$

(3) 撓みと撓み角の釣合

(4)~(3) 区間

$$M_x = \frac{3x^2}{6L} - \frac{P_0 x^2}{2} - \frac{(P_3 - P_4)x^2}{6a} \quad \dots\dots (3)$$

$$E I \theta_x = -\frac{3x^3}{24L} - \frac{P_0 x^3}{6} - \frac{(P_3 - P_4)x^3}{24a} + C$$



$$EI y_2 = \frac{8x^3}{120L} - \frac{P_2 x^4}{24} - \frac{(P_2 - P_1)x^5}{120a} + c_1 x + d_1$$

③~②, ②~① についての同様に考えると

$$(k_2 + \frac{120EI}{a^4})y_2 + (28k_3 - 24 \frac{120EI}{a^4})y_3 + (41k_4 + \frac{120EI}{a^4})y_4 = 10\gamma \quad \dots (4)$$

$$(k_1 + \frac{120EI}{a^4})y_1 + (27k_2 - \frac{120EI}{a^4})y_2 + (147k_3 - \frac{120EI}{a^4})y_3 + (141k_4 + \frac{120EI}{a^4})y_4 = 70\gamma \quad \dots (5)$$

また地中群柱の地表における撓み角は次のようにえられる。

$$15K_1 y_1 + 210K_2 y_2 + (747K_3 - 3 \times \frac{120EI}{a^4})y_3 + (633K_4 + 3 \times \frac{120EI}{a^4})y_4 = 404\gamma - \frac{360EI}{a^3} \theta_1 \quad \dots (6)$$

2.2 地表部の計算式

地表部ラーメンについて撓み撓度法を適用すると図-4を参照し(節点エーメントを次式のように表はすことができる。

$$M_{AB} = (2\varphi_A + \varphi_B + \psi_1) + \omega_{AB} \quad \dots (7)$$

$$M_{BA} = (2\varphi_B + \varphi_A + \psi_1) + \omega_{BA}$$

$$M_{BC} = K(2\varphi_B + \varphi_C + \psi_2) + \omega_{BC}$$

$$M_{CB} = K(2\varphi_C + \varphi_B + \psi_2) + \omega_{CB}$$

$$M_{CD} = K(2\varphi_C + \varphi_D + \psi_3) + \omega_{CD}$$

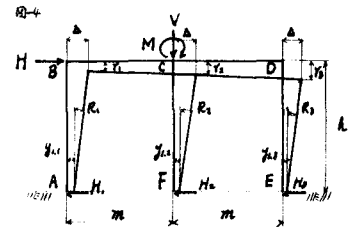
$$M_{DC} = K(2\varphi_D + \varphi_C + \psi_3) + \omega_{DC}$$

$$M_{DE} = (2\varphi_D + \varphi_E + \psi_3) + \omega_{DE}$$

$$M_{ED} = (2\varphi_E + \varphi_D + \psi_3) + \omega_{ED}$$

$$M_{CF} = (2\varphi_C + \varphi_F + \psi_4) + \omega_{CF}$$

$$M_{FC} = (2\varphi_F + \varphi_C + \psi_4) + \omega_{FC}$$



記号の説明

y : 地中群柱の地表面水平変位

ψ : " " 撓角

γ : " " 鉛直変位

Δ : 地上部マウ 天端変位

R : " " 部材回転角

θ : " " 節点回転角

I : 地上部ラーメン柱の断面二次モーメント

I' : " " 梁 "

E : ヤング率

$$\text{ここで } \varphi = \frac{4EI}{h} \theta, \quad \psi = -\frac{6EI}{h} \theta, \quad K = \frac{12EI}{h^3} m$$

$$\text{さらに } R_1 = \frac{\Delta_1 - y_1}{h}, \quad R_2 = \frac{\Delta_2 - y_2}{h}, \quad R_3 = \frac{\Delta_3 - y_3}{h}, \quad R_4 = \frac{y_1 - y_2}{m}, \quad R_5 = \frac{y_2 - y_3}{m} \quad \dots (8)$$

節点方程式はB, C, D において次のように立てられる。

$$M_{BA} + M_{BC} = 0 \quad \dots (9)$$

$$M_{CB} + M_{CD} + M_{CF} = M$$

$$M_{DC} + M_{DE} = 0$$

節点方程式(1)の(2)柱の地表面における水平反力 H_1, H_2, H_3 は

$$\sum H = H_1 + H_2 + H_3 = -\frac{1}{h} (M_{AB} + M_{BA} + M_{FC} + M_{CF} + M_{ED} + M_{DE}) + \omega_{AB} \psi_1 + \omega_{ED} \quad \dots (10)$$

次に地表面における鉛直反力は

$$V_1 = -\frac{1}{h} (M_{BC} + M_{CB}) + R_1 + V_{AB} \quad \dots (11)$$

$$V_2 = \frac{1}{m} (M_{CD} + M_{DC}) - \frac{1}{h} (M_{CB} + M_{BC}) + \omega_{BC} + R_2 + V_{CF} + V$$

$$V_3 = \frac{1}{m} (M_{DE} + M_{ED}) + \omega_{DE} + V_{DC}$$

今考えている型式は根入れに対して十分な断面をもつ地中群柱とみなすことができ、この鉛直反力が直接支持地盤に伝えられるものとすれば

$$V_1 = \frac{V_1}{h}, \quad V_2 = \frac{V_2}{h}, \quad V_3 = \frac{V_3}{h} \quad \dots (12)$$

ここで h : 鉛直方向地盤バネ係数

2.3 地中部と地底部とを一体化した計算式

地表面で地中砂柱と地表鉄フレームとが一体となっているという境界条件から次の諸式が成立する

モメントについて

$$M_1 = -M_{AB} \quad M_2 = -M_{FC} \quad M_3 = -M_{ED} \quad \dots \dots (3)$$

また水平力について

$$H_1' = H_1 \quad H_2' = H_2 \quad H_3' = H_3 \quad \dots \dots (14)$$

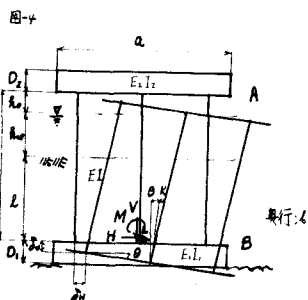
また撓角について

$$\dot{\psi}_{1,1} = -\theta_A \quad \dot{\psi}_{1,2} = -\theta_E \quad \dot{\psi}_{1,3} = -\theta_E \quad \dots \dots \dots (15)$$

2.1で求めた(1),(2),(6)式にこれらの境界条件を入れ、と池中部と池表部を一体にした連立微分方程式が求まる。

	y_9	y_8	y_7	y_6	y_5	y_4	y_3	y_2	y_1	y_0	足数 C
1	1	242K	K		$\frac{1}{2}K$				$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
2	2	K	244K	K	1	$\frac{1}{2}K$			$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
3	3		K	242K	1	$\frac{1}{2}K$			$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
4	4	$\frac{1}{2}$	212	$\frac{1}{2}K$	212	$\frac{1}{2}K$			$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
5	5	3K	3K						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
6	6	3K		-3K					$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
7	7		3K	3K					$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
8	8								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
9	9								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
10	10								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
11	11								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
12	12								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
13	13								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
14	14	$\frac{1}{2}K$	$\frac{1}{2}K$						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
15	15	$\frac{1}{2}K$	$\frac{1}{2}K$						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
16	16	$\frac{1}{2}K$	$\frac{1}{2}K$						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
17	17	$\frac{1}{2}K$	$\frac{1}{2}K$						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
18	18	$\frac{1}{2}K$	$\frac{1}{2}K$						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
19	19	$\frac{1}{2}K$	$\frac{1}{2}K$						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
20	20	$\frac{1}{2}K$	$\frac{1}{2}K$						$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
21	21								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$
22	22								$\frac{1}{2}K$		$\frac{1}{2}K$

表一



θ: 圓軌角

R: 柱の部材回転角

E: 柱のヤング率

E: 頂版のP/V率

1: 柱1本の断面二次モーメント

 I_z : 頂板の断面二次モーメント

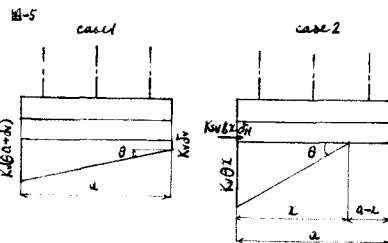
I_1 : 底版の断面二次モーメント

 n : 柱の本数

K_r : 鉛直方向地盤係數

K_H : 水平方向

K_{SV} : 底板下の地盤剪断バネ係数



3. 多柱式Bの計算式の誘導

多柱式Aか地中で底板とつなぐ型式は、頂版・柱・底板で構成されたラーメン構造が土の中に埋められた状態で回転を生ずる場合として取扱うことができる。計算式を誘導する上で簡便のため次の仮定を設ける。すなわち柱の作用荷重は各柱に均等に分担される。⁴柱の曲げ剛度は各柱共等しい。²頂版および底板は柱の間隔に対して十分厚く曲げ変形を無視してさしつかえない程度に剛である。⁴柱の変位は部材回転角によるものが曲げ変形によるものより⁴はるかに大きい。柱の曲げ変形により地盤反力に生ずる変化は2次時であり無視しうるものとする。

この型式全体の平衡方程式は外力と外力による変位によって地盤のバネが発生する抵抗力との釣り合いから解くことができる。抵抗力としては地盤反力状態が異なる case1, case2 について図-4.5を参照して次のように与えられる。K_Hは地表面を0とし深さに比例して強くなるものと仮定する。

抵抗水平力 ($P_1 + P_2 + R_d + S$)

$$P_1 = \frac{K_H b a^2 L^2}{6} (\theta + R) \quad P_2 = \frac{K_H b a L^2}{2} (3\theta + D, \theta) \quad R_d = \frac{K_H b D_1}{2} (23\theta + D, \theta)$$

$$S = \begin{cases} K_{SV} a b \delta H & \text{case 1} \\ K_{SV} 2 b \delta H & \text{case 2} \end{cases} \quad (16)$$

抵抗モーメント ($M_{P1} + M_{P2} + M_{Rd} + M_S$)

$$M_{P1} = \left(\frac{2}{3} + D, \right) P_1 \quad M_{P2} = \left(\frac{2}{3} + D, \right) P_2 \quad M_{Rd} = \frac{K_H b D_1^2}{6} (33\theta + 2D, \theta)$$

$$M_S = \begin{cases} \frac{K_H b a^2}{12} \theta & \text{case 1} \\ \frac{K_H b a^2}{12} (3a - 2L) \theta & \text{case 2} \end{cases} \quad (17)$$

これらについて

$$\sum H = 0 \quad \sum V = 0 \quad \sum M = 0 \quad (18)$$

さらに先の仮定から柱について次の方程式が成立する。

$$\sum M_{AB} = -\frac{6EI R}{h} \pi + \sum C_{AB} \quad \sum M_{BA} = -\frac{6EI R}{h} \pi + \sum C_{BA}$$

$$\therefore M' - M'' = -\frac{12EI R}{h} \pi - \sum C_{AB} - \sum C_{BA} \quad (19)$$

ここで M' : B端における全作用モーメント

M'' : B端における全抵抗モーメント

b : 底板の奥行

b_0 : 柱の直径

(18), (19)式から θ, R について連立解式が得られる。

4. 設計計算例

上部工中央支間長 1100 m

主塔基礎

地質

Y, ϕ , C, Ee

沖積砂 1.9 35 0 9,000

三重 1.9 30 30 24,000

花崗岩 A 2.2 37 8 45,000

花崗岩 B 2.5 45 4 300,000

単位 (T, m)

図-6

