

1. はじめに コンクリート中に埋め込まれたアンカーボルトに軸直角方向の水平力およびモーメントが作用する場合、道路橋、鉄道橋などの設計では、アンカーボルトの水平抵抗力は其の埋込長が直径の10倍以上あることを前提として、ボルトの許容せん断抵抗力から求める方式をとっているようである。従って、地震時における橋脚上の桁の落下防止工として太い鋼棒、H鋼などを橋脚面部コンクリートに深く埋め込んだ場合、これら部材の水平抵抗力はアンカーボルトに準じて求めることはできず、落下防止工の埋込深さ、剛性、コンクリートの強度などに応じて適用できる弾性解析式を求め、これにより変位、応力などを計算して理学的許容応力度法に基いた設計方式によるのが妥当と思われる。

2. アンカーボルトの弾性解析式

頭部に水平力 H_0 およびモーメント M_0 をうける図-1のアンカーボルトの弾性変形式を導くためつぎの仮定を設ける。

1) ボルト側面のコンクリートの水平ばね係数は深さ方向に一定、2) ボルト底面にコンクリートによる回転ばね ν とせん断ばね S がある。3) ボルトは其の剛性が深さ方向に一定であり、曲げ変形およびせん断変形を生ずる。

得たわみ曲線は

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = -\frac{1}{EI} \left\{ M + \frac{KEI}{AG} (-f_y b y) \right\} \dots \dots \dots (1) \quad \frac{d^2 M}{dx^2} = f_y b y \dots \dots \dots (2)$$

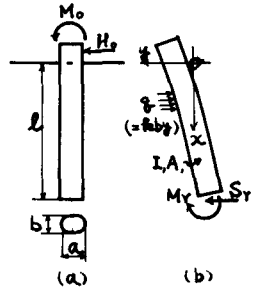


図-1 力学モデル

ここに、 EI : ボルトの曲げ剛性、 M : 曲げモーメント、 K : 断面重心におけるせん断応力と平均せん断応力との比、 A : 断面積、 G : せん断弾性係数、 f_y : ボルト側面の単位面積あたりばね係数、 b : ボルト幅

$$(1), (2) \text{より} \quad \frac{d^4 y}{dx^4} - \frac{KEI}{AG} \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{f_y b}{EI} y = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\beta = \sqrt{\frac{KEI}{AG}}$ 、 $\alpha = \sqrt{\beta^2 - \frac{KEI}{AG}}$ 、(ただし、 $\beta^2 \geq \frac{KEI}{AG}$ の場合)、 $\gamma = \sqrt{\beta^2 + \frac{KEI}{AG}}$ とおくと、(3)式解は

$$y = e^{\beta x} (C_1 \cos \alpha x + C_2 \sin \alpha x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \alpha x + C_4 \sin \alpha x) \dots \dots \dots (4)$$

(4)式から $\frac{dy}{dx}$ 、 $\frac{d^2 y}{dx^2}$ 、...が求められ、ボルトの曲げモーメント M およびせん断力 S は、(6)式から、またボルト頭部および底部における境界条件らつぎの(7)~(10)式が得られる。

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{KEI}{AG} f_y b y \dots \dots \dots (5)$$

$$S = \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} + \frac{KEI}{AG} f_y b \frac{dy}{dx} \dots \dots \dots (6)$$

$$x = 0 \text{ で、} M_{x=0} = -EI \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{x=0} + \frac{KEI}{AG} f_y b y_{x=0} = -M_0 \dots \dots \dots (7) \quad S_{x=0} = -EI \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right)_{x=0} + \frac{KEI}{AG} f_y b \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=0} = -H_0 \dots \dots \dots (8)$$

$$x = l \text{ で、} M_{x=l} = M_r = I \nu \left\{ \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=l} - \frac{K(S)}{AG} x \right\} \dots \dots \dots (9) \quad S_{x=l} = S_r = -(S)_{x=l} A \cdot S \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 ν : ボルト底における単位面積あたり軸方向ばね定数、 S : ボルト底における単位面積あたりせん断ばね定数、従って、(7)~(10)式から未定係数 C_1, C_2, C_3, C_4 を決定するつぎの連立方程式が得られる。

$$(-\alpha^2 + \gamma^2 - \frac{KEI}{AG}) C_1 + 2\alpha\gamma C_2 + (-\alpha^2 + \gamma^2 - \frac{KEI}{AG}) C_3 - 2\alpha\gamma C_4 = \frac{M_0}{EI} \dots \dots \dots (11)$$

$$(-3\alpha^2\gamma + \gamma^2 - \frac{KEI}{AG}) C_1 + (3\alpha\gamma^2 - \alpha^2 - \frac{KEI}{AG}) C_2 + (3\alpha^2\gamma - \gamma^2 + \frac{KEI}{AG}) C_3 + (3\alpha\gamma^2 - \alpha^2 - \frac{KEI}{AG}) C_4 = \frac{H_0}{EI} \dots \dots \dots (12)$$

$$e^{\beta l} \left[(-\alpha^2 + \gamma^2 + \frac{\nu}{EI} + \frac{KVS}{GE} - \frac{KEI}{AG}) \cos \alpha l - (2\alpha\gamma + \alpha \frac{\nu}{EI}) \sin \alpha l \right] C_1 + e^{\beta l} \left[(2\alpha\gamma + \alpha \frac{\nu}{EI}) \cos \alpha l + (-\alpha^2 + \gamma^2 + \frac{\nu}{EI} + \frac{KVS}{GE} - \frac{KEI}{AG}) \sin \alpha l \right] C_2 \\ + e^{-\beta l} \left[(-\alpha^2 + \gamma^2 - \frac{\nu}{EI} + \frac{KVS}{GE} - \frac{KEI}{AG}) \cos \alpha l + (2\alpha\gamma - \alpha \frac{\nu}{EI}) \sin \alpha l \right] C_3 + e^{-\beta l} \left[(2\alpha\gamma - \alpha \frac{\nu}{EI}) \cos \alpha l + (-\alpha^2 + \gamma^2 - \frac{\nu}{EI} + \frac{KVS}{GE} - \frac{KEI}{AG}) \sin \alpha l \right] C_4 = 0 \dots \dots \dots (13)$$

$$e^{\beta l} \left[(\gamma^2 - 3\alpha^2\gamma - \frac{KEI}{AG} \gamma - \frac{AS}{EI}) \cos \alpha l + (-3\alpha\gamma^2 + \alpha^2 + \frac{KEI}{AG}) \sin \alpha l \right] C_1 + e^{\beta l} \left[(3\alpha\gamma^2 - \alpha^2 - \frac{KEI}{AG}) \cos \alpha l + (\gamma^2 - 3\alpha^2\gamma - \frac{KEI}{AG} \gamma - \frac{AS}{EI}) \sin \alpha l \right] C_2 \\ + e^{-\beta l} \left[(-\gamma^2 + 3\alpha^2\gamma + \frac{KEI}{AG} \gamma - \frac{AS}{EI}) \cos \alpha l + (-3\alpha\gamma^2 + \alpha^2 + \frac{KEI}{AG}) \sin \alpha l \right] C_3 + e^{-\beta l} \left[(3\alpha\gamma^2 - \alpha^2 - \frac{KEI}{AG}) \cos \alpha l + (-\gamma^2 + 3\alpha^2\gamma + \frac{KEI}{AG} \gamma - \frac{AS}{EI}) \sin \alpha l \right] C_4 = 0 \dots \dots \dots (14)$$

3. セン断変形を無視したアンカーボルトの弾性解析式

2. の各式の $G \rightarrow \infty$ とおくとつぎの各式が得られる。

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{Rb}{EI} y = 0 \quad \dots \dots (15)$$

$$\therefore y = C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x + C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x \quad \dots \dots (16)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Rb}{4EI}}$$

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad \dots \dots (17) \quad S = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \quad \dots \dots (18)$$

未定係数決定のための連立方程式

$$C_2 - C_4 = \frac{M_0}{2\beta^2 EI} \quad \dots \dots (19) \quad -C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = \frac{H_0}{2\beta^3 EI} \quad \dots \dots (20)$$

$$C_1 \left[\frac{\beta^2}{EI} \cos \beta l - (2\beta^3 + \frac{\beta^2}{EI}) \sin \beta l \right] + C_2 \left[\frac{\beta^2}{EI} \cos \beta l + \frac{\beta^2}{EI} \sin \beta l \right] + C_3 \left[-\frac{\beta^2}{EI} \cos \beta l + (2\beta^3 - \frac{\beta^2}{EI}) \sin \beta l \right] + C_4 \left[\frac{\beta^2}{EI} \cos \beta l - (2\beta^3 + \frac{\beta^2}{EI}) \sin \beta l \right] \cdot C_4 = 0 \quad \dots (21)$$

$$C_1 \left[(-2\beta^3 - \frac{\beta^2}{EI}) \cos \beta l - 2\beta^3 \sin \beta l \right] + C_2 \left[\frac{\beta^2}{EI} \cos \beta l - (2\beta^3 + \frac{\beta^2}{EI}) \sin \beta l \right] + C_3 \left[\frac{\beta^2}{EI} \cos \beta l - (2\beta^3 - \frac{\beta^2}{EI}) \sin \beta l \right] + C_4 \left[\frac{\beta^2}{EI} \cos \beta l + (2\beta^3 + \frac{\beta^2}{EI}) \sin \beta l \right] \cdot C_4 = 0 \quad \dots (22)$$

4. 数値計算例

前提条件: コンクリート: $G_c = 180 \text{ kg/cm}^2$, $E_c = 2.4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

アンカーボルト: $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $G = 8.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

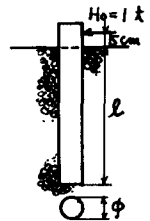


図-2 ボルトの応力外力

アンカーボルト		ばね定数 (kg/cm)			d_1 (cm)	β (cm)	γ (cm)	βl
直径 (φ)	埋込長 (l)	R_c	ν	S				
7.5 cm	25.0 cm	20,000	99,000	36,000	0.0965671	0.103549	0.110089	2.58873
7.5	15.0	25,000	99,000	36,000	0.101200	0.109490	0.117194	1.64235

計算結果

φ 7.5 x 25 cm アンカーボルト

項目 位置 (x)	変位 y ($\times 10^4$ cm)			モーメント M (kg cm)			せん断力 S (kg)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0 cm	21.789	20.863	20.955	-5,000	-5,000	-5,000	-1,000	-1,000	-1,000
5	8.490	8.753	8.742	-6,855	-6,922	-6,911	91.9	79.5	82.5
10	1.498	1.736	1.612	-5,327	-5,399	-5,382	432.5	442.5	440.5
15	-1.192	-1.189	-1.434	-3,102	-3,095	-3,119	424.0	442.6	426.9
20	-1.618	-1.715	-2.058	-1,255	-1,164	-1,319	309.8	323.8	285.6
25	-1.260	-1.309	-1.622	8.5	153.	-259	200.4	208.2	144.2

φ 7.5 x 15 cm アンカーボルト

項目 位置 (x)	変位 y ($\times 10^4$ cm)			モーメント M (kg cm)			せん断力 S (kg)		
	A	B	D	A	B	D	A	B	D
0 cm	20.365	19.563	14.668	-5,000	-5,000	-5,000	-1,000	-1,000	-1,000
5	7.485	7.865	8.596	-6,373	-6,423	-7,037	249.7	247.8	90.5
10	0.656	0.848	2.525	-3,999	-3,971	-5,044	594.3	624.0	611.8
15	-2.970	-3.153	-3.546	-1,192	-1,002	-1,867	472.4	501.4	564.

注: A: 曲が変形およびせん断変形を考慮した計算式

B: 曲が変形のみを考慮した計算式

C: 曲が変形のみを考慮し、ボルト長を半無限長と仮定した計算式

D: ボルトの変形を無視し、剛体と仮定した計算式

5. まとめ

アンカーボルトの埋込長が直径の10倍以上の場合には、曲が変形のみを考慮した半無限長の計算式と2.による計算式とで差は少ないが、埋込長が2倍程度の場合には数パーセントの差が生ずる。コンクリートの支圧、せん断などの諸性状、終局強度設計のための鋼とコンクリートの耐力、変形の挙動と解析式の研究が必要である。