

小型井筒の強制振動試験

国鉄 構造物設計事務所 正員 ○田村浩一

〃 〃 神谷良陳

〃 〃 西村昭彦

1 概要

軟弱地盤中にある井筒の耐震性を検討するため

図-1に示す砂質シルト、ピートなどの軟弱層(N=0)を貫いて洪積砂層に基礎をおく、直径や根入の異なる7基の井筒を佐倉客貨車区構内に設置した。各井筒は中空

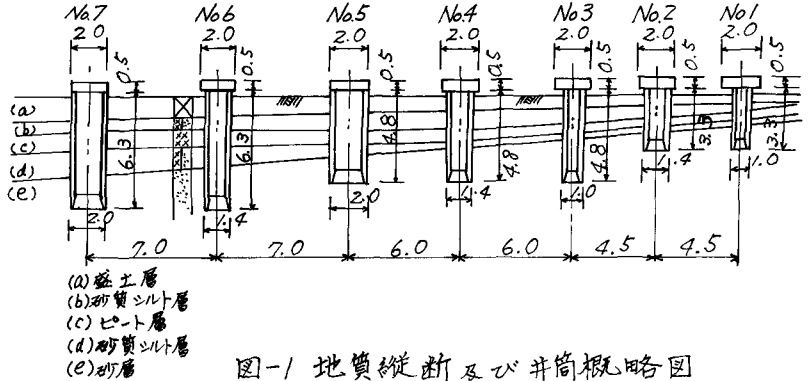


図-1 地質縦断及び井筒概略図

円形断面鉄筋コンクリート造で 頂部に0.6m角のマンホールをあげた2×2×0.5mのコンクリート版をとりつけ刃口には底コンクリートを打った。

プレシオメーター試験による土の変形係数は表層で4.5~10 kg/cm²、基盤砂層で13 kg/cm²以上であり、表層の1軸圧縮強度は0.1~0.3 kg/cm²、基盤はφ=36°、C=0.1 kg/cm²程度である。3軸圧縮試験において土が崩壊に相当する側圧を加えてひずみ1%および破壊強さの1/2に相当するひずみに対応した資料の変形係数は、砂質シルトで10~15 kg/cm²、砂層上部で20 kg/cm²前後、砂で40 kg/cm²以上である。動的3軸試験による変形係数は砂質シルトで90 kg/cm²前後、砂で370 kg/cm²以上である。

弾性波試験による波速度およびヤング率はそれぞれ表層0~2mにおいて62~66 m/sおよび183~219 kg/cm²、深さ2~9.5mの層において230~240 m/s、2630~3120 kg/cm²である。

2 予備水平載荷試験

予備水平載荷試験は各試験の前後における地盤強度の変動を知る目的で、天端の変位を5mm以下かつ試験の振幅以下におさえて水平力と変位との関係を等速変位載荷により測定した。測定値は10t起振試験後を除いて各井筒ごとにほぼ一定の値であり、地盤条件の変化は小さい。強制振動振幅にほぼ等しい変位に対応する各井筒天端のばね定数から、井筒は剛体、側面の地盤係数は深さ方向に一定、底面は鉛直およびせん断ばねで支持されるものとし、クズにより各井筒のばね定数を推定した。

K_H : 水平地盤係数 K_V : 鉛直地盤係数 K_S : せん断地盤係数

A : 底面積 I : 底面断面2次モーメント

並進による水平合力作用位置 $d_0 = \frac{dK_H \frac{l^2}{2} + K_S A l}{K_H d l + K_S A}$

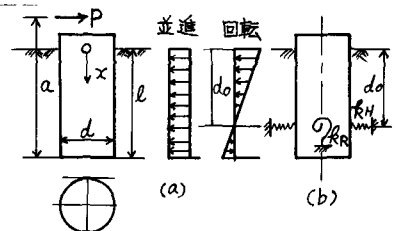


図-2 剛体の変位と地盤反力

水平ばね定数: $R_H = dK_H l + K_S A$

回転ばね定数: $R_R = d \int_0^l K_H (d_0 - x)^2 dx + K_V I + K_S A (l - d_0)^2$

水平力 P が作用したとき荷重点における変位量を δ とすると

$$\delta = \frac{P}{K_H} + \frac{(a-l-d_0)^2 P}{K_R} \quad \therefore \frac{P}{\delta} = \frac{1}{\frac{1}{d K_H l + K_S A} + \frac{(a-l+d_0)^2}{d K_H (d_0 l - d_0 l^2 + \frac{l^3}{3}) + K_V I + K_S A (l-d_0)^2}} \quad (1)$$

道路橋下部構造設計指針の解説によると砂質土の支持地盤において

$$K_V = \frac{\alpha E_{ov} \frac{30}{B_v} \left(\frac{B_v + 30}{60} \right)^2}{(1-\mu^2) B_v \cdot I_P} \quad K_H = \frac{0.43 \alpha B_H^{\frac{1}{2}} E_{oh}}{(1-\mu^2) B_H \cdot I_P} \quad \therefore \frac{K_V}{K_H} = \frac{E_{ov}}{E_{oh}} \frac{(1 + \frac{30}{B_v})^2 B_H^{\frac{3}{2}}}{51.6} \quad (2)$$

ここに E_{ov} : 鉛直方向の地盤の変形係数 B_v : 鉛直方向截荷面積の平方根

E_{oh} : 水平方向の地盤の変形係数 B_H : 水平方向截荷面積の平方根

$$\frac{E_{ov}}{E_{oh}} = 4, K_S = \frac{K_V}{2} \text{ と仮定すると (1) 式より } K_H = \frac{P}{\delta} \left[\frac{1}{d l + 2A} + \frac{(a-l+d_0)^2}{d (d_0 l - d_0 l^2 + \frac{l^3}{3}) + 4I + 2A (l-d_0)^2} \right] \quad (3)$$

予備水平截荷試験の頂版における荷重・変位

表-1 静的地盤係数

の測定値から(2), (3)式により求めた K_H , K_V を表-1に示す。なお、井筒側面の面積としては、荷重方向に投影した井筒地中部の前後面積の和を考えた。

井筒	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7
δ (mm)	2.6~3.5	1.2~1.5	1.6~2.7	≒ 5.0	3.9~4.5	3.8~4.1	1.9~2.3
P/δ (t/mm)	0.78	1.52	1.26	1.41	1.89	1.96	4.41
$2K_H$ (t/cm)	1.00	1.30	1.05	0.81	0.71	0.85	1.27
K_V (t/cm)	4.42	5.60	5.31	4.02	3.54	4.66	7.07

3 強制振動試験

昭和44年度に最大出力20tのローゼンハウゼン起振機の水平加振による振動試験を実施したが出力の関係上大きな井筒の振幅が小さく特にNo7では共振点があり得なかった。No4~7井筒に対し東京電力の10t起振機により昭和45年に再試験を行った。試験にあたり井筒の天端およびその内部の深さ方向数箇所に加速度計(共和電業)20A-2D、容量2g)を設置し、さらに変位計、土圧計、鉄筋ひずみ計などによる同時測定を行った。以下では主として加速度計による測定および解析について述べる。

共振曲線の一例を図-3に、また各井筒の変位共振曲線から求めた共振時の振動数、天端振幅、減衰定数を表-2に示す。強制振動時の井筒の振動モードは縦方向に数点設置した加速度計記録を同時刻対応で変位に換算して求めると、井筒の弾性変形は無視できる程度であり、回転中心は振動数に応じた1サイクル中でも上下に移動する傾向があるが、刃口から上の2~1.5mの範囲にあり、解析では最大変位に対応した回転中心を対象と考えた。

4 解析

4.1 予備水平截荷試験から求めたばねによる井筒のロッ

キング振動

2自由度の、井筒の剛体ロッキング振動計算において、減衰定数を0.2とし井筒の共振時の天端振幅を実測値とほぼ一致させるために必要とされる地盤のばねを表-1の静的ばねを基準として倍率であらわした数値および共振振動数を合わせるために井筒の地中部分の周囲に円筒状に考えた土の付加

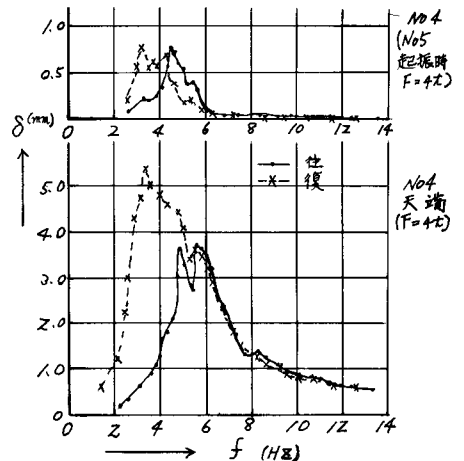


図-3 No4 K_H-F=4t 変位共振曲線

荷量の倍率を表-2に示した。ばねの倍率から動的ばねに対応したばねを静的測定から求めるには、予想動的変位に対し約 $\frac{1}{4} \sim 1$ 倍の静的変位に応じた地盤係数を用いればよいものと推定され、また道路協会的方式に従って土の変形係数から地盤係数を求める場合、フレンシメーターによる実測値は大幅3倍、3軸試験におけるひずみ1%または破壊強度の $\frac{1}{2}$ に相当するひずみに対応した資料の変形係数から求めた地盤係数は大略1.5倍の値を用いれば、本実験の場合には実測と計算とがほぼ一致する結果となる。

なお上述のばねを用いて共振振動数を実測値と合わせるには表-2から井筒外径の約1.5~2.7倍の土の付加質量が必要とされ、その数値は井筒の寸法が大型になると小さくなる傾向がある。

4.2 各井筒の共振時の状態から求めた地盤のばね定数と慣性モーメント

正弦波強制力をつけ0点を中心とした線型剛体ロッキング振動は

$$I_j \ddot{\theta}_j + C_j \dot{\theta}_j + K_{Rj} \theta_j = m_0 r \omega^2 e^{i\omega t} (l + z_j) \quad \text{--- (4)}$$

$$C_j / I_j = 2\zeta_j \omega_j, \quad \omega_j^2 = \frac{K_{Rj}}{I_j} \quad \text{と} \quad \ddot{\theta}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{\theta}_j + \omega_j^2 \theta_j = \frac{m_0 r \omega^2}{I_j} (l + z_j) e^{i\omega t} \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 ω : 起振機の円振動数、 θ_j : 0点まわりの回転角、 C_j : 粘性係数

I_j : 0点まわりの慣性モーメント、 K_{Rj} : 0点まわりの回転ばね定数

$m_0 r \omega^2$: ω における起振機出力

従って

$$\theta_j = \frac{m_0 r \omega^2 (l + z_j)}{I_j \omega_j^2} \frac{e^{i(\omega t - \varphi_j)}}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2\right]^2 + 4\zeta_j^2 \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2} \quad \varphi_j = \tan^{-1} \frac{2\zeta_j \frac{\omega}{\omega_j}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2}$$

共振時の回転角最大値を θ_{rm} 、共振振動数を f_r (Hz) とすると $K_{Rj} = I_j \omega_j^2 = \frac{l + z_j}{\frac{\theta_{rm}}{m_0 r \omega^2} \left(1 - \frac{1}{1 - 2\zeta_j^2} + \frac{4\zeta_j^2}{1 - 2\zeta_j^2}\right)^{1/2}} \quad \text{--- (6)}$

$$I_j = \frac{K_{Rj}}{\omega_j^2} = \frac{K_{Rj}}{(1 - 2\zeta_j^2) + 4\pi^2 f_r^2} \quad \text{--- (7)}$$

各井筒の共振時の振動数、先端変位、回転中心、起振機出力と作用位置および減衰定数から、井筒がノ自由度剛体ロッキング振動をすると仮定した場合、(6)、(7)式によりばね定数および慣性モーメントが求められ、それらの

数値を表-2に示す。また図-5, 6は得られた数値と回転角との関係画いたものである。

図によると慣性モーメントはばらつきはあるが各井筒ごとに例外を除きほぼ一定値を平すのに対し、回転ばね定数は回転角が増大すると減少する塑性的性状をあらわしている。このばね定数から

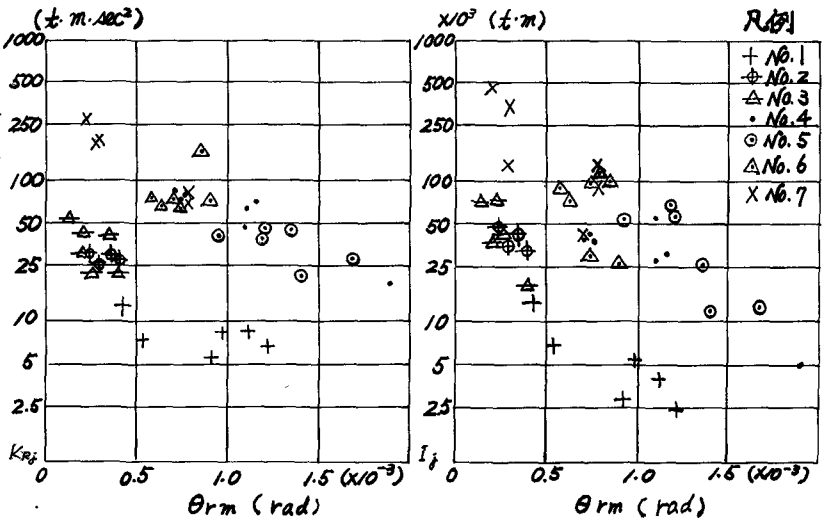


図-5 θ_{rm} と K_{Rj}

図-6 θ_{rm} と I_j

井筒底面の実測地盤係数を用いて側面地盤係数を一定と仮定して水平ばねを算出するとこの計算から求めた水平地盤係数とほぼ等しい値が得られた。

ただし10セ起振時の3~4Hz付近の共振時における大きな振幅を用いた K_R, I_R は他のケースに比し異常に小さく、地盤の共振との連成振動と考えられるので更に検討を要する。

5 むすび

軟弱地盤に設置した小型井筒の強制振動試験における共振点に注目して、単純のため弾性振動の範囲で実測値と計算値とを比較してみた。その結果この程度の規模の井筒と地盤の条件においては、井筒は剛体、地盤のばねは変位に応じた強さをもつ線型ばね、減衰定数は0.2、土の付加質量は井筒外径の約2倍程度と考えたロッキング振動として解析することにより、試験結果を説明することが可能と思われる。

以上の解析は非線型振動を線型におきかえ、また地盤の振動も無視した極く概算的なものであり、更に他の測定値とも合わせて検討を進めている。

本試験は国鉄本社の重要技術課題として行われ、土木学会の橋りょう下部構造の耐震設計研究委員会、国鉄本社、東京第一工務局、鉄道技術研究所、構造物設計事務所の各位の御指導ならびに御協力によるものである。また10セ起振機は東京電力技術開発研究所の御厚意によるものであり、あわせ深く謝意を表します。

表-2 井筒の共振実測値と解析数値

井筒	出力共振 振動発生	強制振動試験			ロッキング ばね定数	慣性 モーメント	ばね 定数K	付加 質量
		Hz	mm	回転角 rad				
				$\times 10^{-3}$	$\times 10^3$	$\times 10^{-2}$	倍率	倍率
1	20°	5.4	1.55	0.4195	0.19	14.10	1.24	1.75
		5.0	1.74	0.5431	0.22	6.92	0.95	1.5
	40°	4.3	3.42	0.9757	0.24	5.49	0.50	1.5
		4.0	3.23	0.9229	0.30	2.88	0.55	1.5
	50°	3.7	4.13	1.1222	0.25	4.13	0.73	1.5
		3.4	4.48	1.2185	0.31	2.43	0.59	1.5
2	30°	6.2	1.01	0.2886	0.20	36.14	25.89	2.5
		6.5	0.93	0.2491	0.20	49.00	30.02	2.6
	40°	6.3	1.36	0.3590	0.20	42.72	29.63	2.5
		5.8	1.48	0.3877	0.20	33.34	27.29	2.35
	20°	6.0	0.66	0.1396	0.17	73.77	55.09	3.0
		8.2	1.12	0.2323	0.19	74.65	30.31	2.1
3	10°	7.2	1.21	0.2573	0.24	40.63	22.44	1.69
		5.3	1.03	0.2144	0.17	38.17	36.53	2.0
		5.2	1.69	0.3521	0.21	36.18	35.78	2.25
	40°	4.9	1.90	0.3958	0.22	19.74	23.06	1.9
		4.83	3.69	0.7118	0.17	77.09	88.86	2.75
		5.63	3.75	0.7253	0.17	86.94	73.75	2.5
	4±	3.43	5.43	1.1040	0.16	25.77	58.46	2.0
		5.53	3.69	0.7425	0.16	84.67	73.90	2.4
		3.45	5.59	1.1555	0.14	32.41	71.77	2.25
	10±	2.85	7.70	1.892	0.29	5.03	18.84	2.5
		5.63	4.63	1.097	0.29	54.77	47.57	1.9
		6.00	3.68	0.9485	0.17	52.80	39.43	1.5
4	10±	3.97	4.94	1.3994	0.25	12.67	23.28	1.6
		3.76	5.59	1.3373	0.18	25.23	43.58	1.6
		6.42	4.40	1.1796	0.18	67.97	44.67	1.85
	4±	6.33	4.43	1.2038	0.20	57.33	39.39	1.85
		3.47	6.34	1.6772	0.20	12.61	28.84	1.5
		5.67	3.57	0.6352	0.235	74.35	65.86	2.2
	10±	3.62	4.26	0.7383	0.23	30.72	70.24	2.0
		5.70	3.25	0.5783	0.21	91.07	77.87	2.2
		4.03	4.88	0.8458	0.10	99.15	57.80	2.0
	6±	6.06	4.55	0.7886	0.20	114.55	85.88	2.25
		3.20	5.58	0.9118	0.22	26.04	71.31	2.25
		5.65	4.23	0.7331	0.22	95.90	84.25	2.0
7	4±	7.56	1.22	0.2202	0.12	462.22	210.61	1.96
		4.60	1.64	0.2857	0.23	135.92	181.13	2.5
		6.87	1.81	0.3073	0.12	340.47	182.14	1.85
	10±	6.40	3.10	0.7824	0.17	130.68	85.77	1.6
		3.85	3.76	0.7041	0.23	41.21	78.76	1.75
		6.10	4.03	0.7765	0.29	96.59	72.80	1.75