

ケーソン基礎の浮上り振動について

大阪市立大学

正員 倉田宗章

大阪工業大学

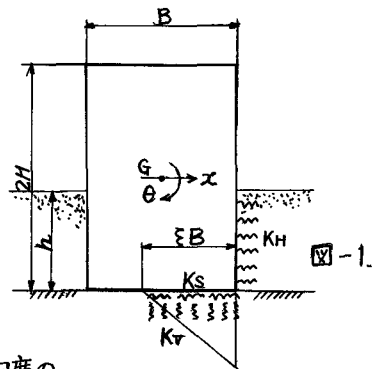
正員 岡村宏一

建設省近畿地方建設局 正員 〇多田浩彦

1) まえがき 海峡横断橋の基礎として用いられるような巨大なケーソンの設計を行うに際して上部工に及ぼす影響の点から、地震時における変位の評価が重要な問題の一つとなる。このような問題に対しては上部工との連成を考慮せねばならないが、主体をなすケーソン自体に限つても、その基礎地盤との結合条件の如何によつて設計上考慮すべき問題が残されている。強大な地震力を受けるケーソンの経済寸法を定めようとするれば、殆んどの場合、基礎底面の鉛直力の合力が校外に出る場合となり、基礎の浮上り側に底面の抵抗力が期待出来なくなり、ケーソンと地盤とは底面反力の分布巾が変動する非線形の結合となる。そこで主としてこのようなケーソンと地盤との結合状態がケーソンの動的応答にどのような影響を与えるかを調べることにした。調査の対象としたケーソンは、本州四国連絡橋の基礎として計画されたもののうちから寸法、根入、地盤等の異なる代表的なものを抽出し、これにそれぞれ強さを変えた4種類の地震波の作用させ、減衰係数を変え、ケーソン底面の浮上り側の引張抵抗と採る場合(線形結合)、採らない場合(非線形結合)の双方について合計130Caseの応答計算を行ないその結果を比較した。ケーソンの非線形過渡振動の計算に際しては、その非線形復元力持線曲線、および地震加速度曲線を折線近似させてこれらの諸特性を線形化する方法を採った。

2) ケーソンと地盤との結合条件

地盤を理想化して半無限弾性体と見做し、ケーソンとの結合条件としてバネ系を仮定した。バネ系は、有効根入り部分の水平抵抗バネ(K_H)、底面に於ける鉛直反力の分布域の鉛直抵抗バネ(K_V)ならびにせん断抵抗バネ(K_S)によつて構成されるものとし、それらの諸係数は実測データを参考にするに全時に Boussinesq, Vogt, 等の理論を用いて算定した。



3) 計算式

ケーソンの運動は並進と回転よりなるものとするれば、2自由度の運動方程式は次の様に書かれる。

$$\ddot{x} + \frac{C}{m} \dot{x} + \frac{P(x, \theta)}{m} = -\ddot{z},$$

$$\ddot{\theta} + \frac{C'}{I} \dot{\theta} - \frac{M_1(x, \theta)}{I} + \frac{M_2(\theta)}{I} = 0,$$

式中、 x : 並進変位、 θ : 回転変位、 $P(x, \theta)$: 水平方向復元力、 $M_1(x, \theta)$: 水平反力による復元モーメント、 $M_2(\theta)$: 鉛直反力による復元モーメント、 $\ddot{z}$: 地動の加速度、 m : ケーソンの質量、 $I = \frac{h^3 + B^3}{3}$, $B = \frac{B}{2}$ ケーソンのG点を中心とする回転半径、を示し、また C, C' はそれぞれ水平ならびに回転運動における減衰力の係数であるが、いまケーソンに働く任意方向の減衰力はその方向の速度ベクトルに比例すると仮定出来るような場合には水平ならびに角運動の関係から $\frac{C}{m} = \frac{C'}{I}$ なる関係を得る。

次に、運動方程式中に含まれる、それぞれの復元力は、図-1に仮定されたバネ系について、

$$P(x, \theta) = K_H R \{ x - H' \theta + \lambda m (x - H \theta) \xi \}$$

$$M_1(x, \theta) = K_H R \{ H' x - (H^2 - R H + \frac{R^2}{3}) \theta + \lambda m \xi (x - H \theta) H \}$$

$$M_2(\theta) = \frac{1}{2} n K_H m^2 R^3 (\frac{1}{2} - \frac{\xi}{3}) \xi^2 \theta$$

$$\text{ただし } H' = H - \frac{R}{2}, \quad m = \frac{B}{R}, \quad n = \frac{K_V}{K_H}, \quad \lambda = \frac{K_S}{K_H}$$

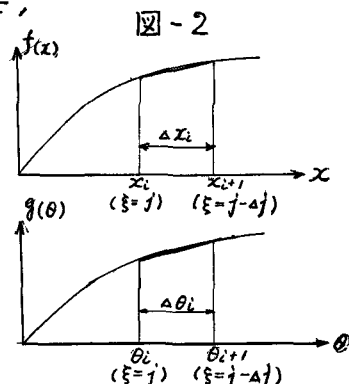
今、振動の非線形性状を表はすパラメータとして、ケーソンの中Bと、鉛直反力の分布中との比 ξ を用いれば、ケーソンの復元力特性曲線はその変形適合条件と力の釣合いを満足する次の2式を用いて画くことが出来る。

$$x = \frac{N}{K_H B} \left(l n^2 \xi^{-2} + \frac{u - m^2 n^2 \xi^{-2}}{m^2 + n^2 \xi} \right), \quad \theta = \frac{2N}{K_H B^2 n \xi^2},$$

$$\text{ただし } \frac{u}{2} \left(l - \frac{m^2}{m^2 + n^2 \xi} \right) = \left(\frac{1}{2} - \frac{\xi}{3} + \frac{2}{3} m^2 n^2 \xi^{-2} - \frac{1}{2} \frac{m^4 n^2 \xi^{-2}}{m^2 + n^2 \xi} \right)$$

$$N: \text{ケーソンに作用する鉛直力}, \quad l = \frac{2H}{B}, \quad n = \frac{K_S}{K_V}$$

今、パラメータ ξ は非線形振動時には x 、及び θ に対して、非線形の関係を有する。図-2に示すような $\xi = j$ から $\xi = j - \Delta j$ に変動する非線形区間に於て、復元力特性曲線に含まれる非線形項 $f(x)$ 、 $g(\theta)$ を図-2に示すように折線で近似させ、運動方程式を線形化すると次式が得られる。



$$\ddot{x} + \frac{C}{m} \dot{x} + \frac{K_H}{m} R \left[\{ (1 + \lambda m (j - \alpha_i)) x - \{ H' + \lambda m H (j - \beta_i) \} \theta + \lambda m (\alpha_i x_i - H \beta_i \theta_i) \} \right] = -\ddot{z}$$

$$\ddot{\theta} + \frac{C}{m} \dot{\theta} - \frac{K_H}{I} R \left[\{ H' + \lambda m H (j - \alpha_i) \} x - \{ H^2 + \frac{R^2}{12} + \lambda m H^2 (j - \beta_i) + \frac{n}{4} m^2 R^2 (j^2 - \gamma_i) - \frac{n}{6} m^2 R^2 (j^3 - \delta_i) \} \theta + \lambda m H (\alpha_i x_i - H \beta_i \theta_i) - \frac{n}{12} m^2 R^2 (3 \gamma_i \theta_i - 2 \delta_i \theta_i) \right] = 0$$

$$\text{ただし } \alpha_i = \frac{\Delta j}{\Delta x_i} x_{i+1}, \quad \beta_i = \frac{\Delta j}{\Delta \theta_i} \theta_{i+1}, \quad \gamma_i = \frac{2 \Delta j - (\Delta j)^2}{\Delta \theta_i} \theta_{i+1}, \quad \delta_i = \frac{3 \Delta j - 3 j (\Delta j)^2 + (\Delta j)^3}{\Delta \theta_i} \theta_{i+1},$$

また、線形振動の場合の運動方程式は $\xi = 1$ の場合の特殊形であって、次の様に書かれる。

$$\ddot{x} + \frac{C}{m} \dot{x} + \frac{K_H}{m} R \{ (1 + \lambda m) x - (H' + \lambda m H) \theta \} = -\ddot{z}$$

$$\ddot{\theta} + \frac{C}{m} \dot{\theta} - \frac{K_H}{I} R \left[\{ (H' + \lambda m H) x - \{ (H^2 + \lambda m H^2) - \frac{R^2}{12} (1 + n m^3) \} \theta \} \right] = 0$$

又、回転慣性を考慮しない場合は、1自由度の場合となつて簡略化され、次のようになる

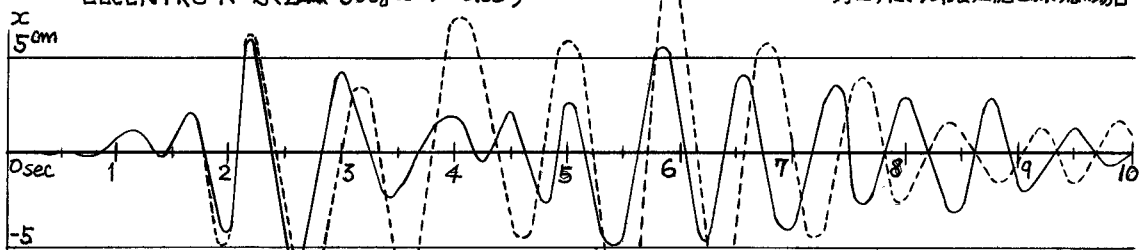
$$\ddot{x} + 2 \nu p \dot{x} + \beta^2 x = -\ddot{z} \quad \text{ただし } \beta^2 = \frac{R}{m}, \quad \nu = \frac{P(x, \theta)}{x}$$

4) 計算例

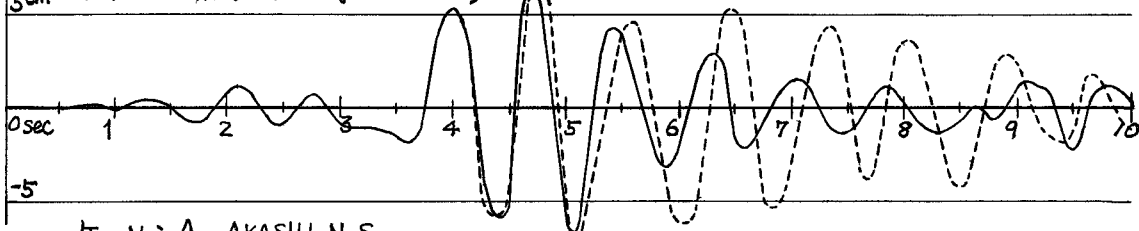
計算の対象としたケーソンは本州四国連絡橋の基礎として計画されたもののうちから、代表的なもの4個を抽出した。用いた地震波は ELCENTRO N-S, TAFT N21W, TAFT S69E, AKASHI N-S の4波でそれぞれ最大加速度を 200 gal, 300 gal に変化させた。以下に示すデータは1自由度系として計算したものであって、2自由度系の場合についても目下検討中である。以下に示す図ならびに表に示される資料は2種類の減衰係数を考えて約130 caseの応答計算を行った結果より抽出したもので、ケーソン底面の浮上り側の引張抵抗を採る場合、採らない場合の双方について比較されている。

ケーソンA (Data: 次表参照)
ELCENTRO N-S ($\ddot{Z}_{max}=300gal$ $\nu=0.05$)

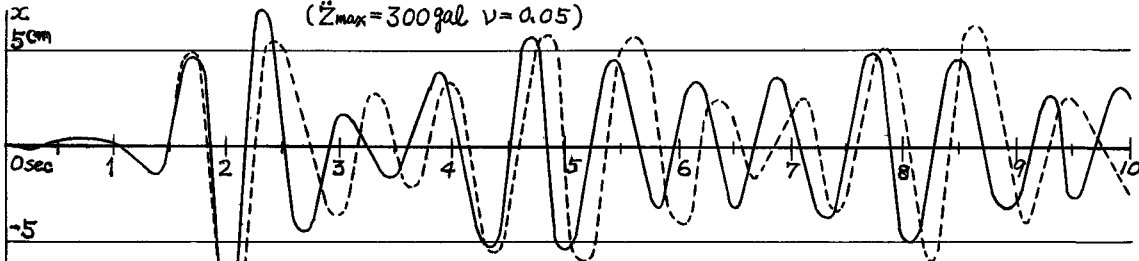
—— 浮上り側の引張抵抗を採る場合
----- 浮上り側の引張抵抗を採らない場合



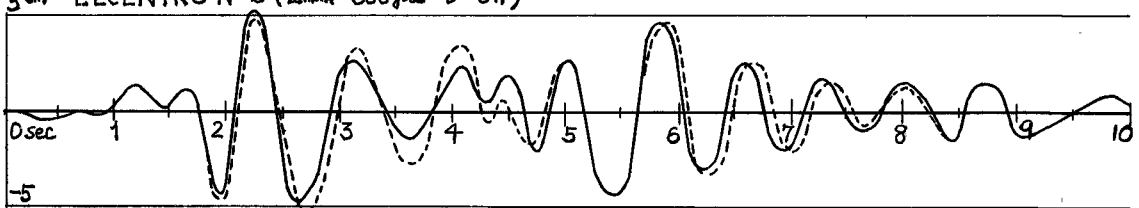
ケーソンA
TAFT S69E ($\ddot{Z}_{max}=300gal$ $\nu=0.05$)



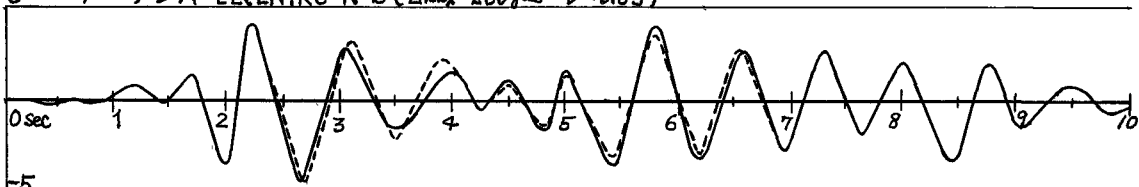
ケーソンA AKASHI N-S
($\ddot{Z}_{max}=300gal$ $\nu=0.05$)



ケーソンA
ELCENTRO N-S ($\ddot{Z}_{max}=300gal$ $\nu=0.1$)



ケーソンA ELCENTRO N-S ($\ddot{Z}_{max}=200gal$ $\nu=0.05$)



ケーソンA TAFT S69E
($\ddot{Z}_{max}=200gal$ $\nu=0.05$)



地震名	ケーソン	減衰係数	z max (gal)	線形C 非線形	比率 (1)	比率 (2)	比率 (3)	比率 (4)	地震名	ケーソン	減衰係数	z max (gal)	線形C 非線形	比率 (1)	比率 (2)	比率 (3)	比率 (4)
ELCENTRO N-S	(A) 高さ 47m 巾 28m 奥行 51m 根入 20m Kr 7.2×10 ⁵ kg Kv 1.9×10 ⁹ kg	0.1	200	○	100	100	100	100	TAKT N21W	A	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	96	96	96	110				300	●	101	96	100	109
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	99	97	97	128				300	●	101	91	100	128
	(B) 高さ 23m 巾 20m 奥行 51m 根入 5m Kr 2.7×10 ⁵ kg Kv 9.3×10 ⁹ kg	0.1	200	○	100	100	100	100		B	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	112	87	110	127				300	●	100	98	100	100
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	120	89	140	179				300	●	97	93	98	125
	(C) 高さ 47m 巾 27m 奥行 51m 根入 10m Kr 1.6×10 ⁵ kg Kv 2.6×10 ⁹ kg	0.1	200	○	100	100	100	100		C	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	73	73	73	174				300	●	105	95	104	123
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	118	52	117	266				300	●	110	87	110	161
AKASHI N-S	A	0.1	200	○	100	100	100	100	TAKT S69E	A	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	102	91	91	120				300	●	100	97	100	107
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	105	82	104	151				300	●	98	96	94	124
	B	0.1	200	○	100	100	100	100		B	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	104	86	106	127				300	●	106	93	107	119
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	107	75	106	167				300	●	110	82	109	153
	C	0.1	200	○	100	100	100	100		C	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	107	92	109	114				300	●	100	91	100	108
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	98	98	98	102				300	●	113	91	114	136
	A	0.1	200	○	100	100	100	100		A	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	109	93	103	122				300	●	150	93	155	187
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	100	100	100	100				300	●	102	93	161	122
	B	0.1	200	○	100	100	100	100		B	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	131	86	130	229				300	●	116	88	118	166
		0.05	200	○	100	100	100	100			0.05	200	○	100	100	100	100
			300	●	137	99	140	210				300	●	114	78	116	137
	C	0.1	200	○	100	100	100	100		C	0.1	200	○	100	100	100	100
			300	●	140	77	140	293				300	●	142	71	144	209

記号 ○ 浮上り側の引張抵抗を標する場合 ● 浮上り側の引張抵抗を標しない場合
 比率(1) 最大応答変位の比率(○の場合を100とする) 比率(2) 最大応答加速度の比率
 比率(3) 最大回転角の比率 比率(4) 全浮上り状態に対し 静的計算による○●の比較

5) 結 論

以上の解析の結果についての考察を要約すれば次のようになる。

- I) 全ケーソンでも作用する地震波の種類及び強さによって非線形応答性状を異にする。
- II) 本計算の範囲では最大加速度 200 gal の地震波の場合は 浮上りを発生してもその応答状態はケーソンと地盤と線形結合とした場合とあまり差異を生じないが 300 gal の場合は地震波により応答変位はかなり増大する場合がある。その増大の割合は 全浮上り状態における静的計算の場合の増大の比率に較べてかなり小さい。

目下、2自由度系としての資料についても検討中であり後日総括して報告したいと考えている。