

セル岸壁に働く地震時動土圧

京都大学工学部 正員 長尾義三
 京都大学工学部 学生員 〇上田 茂

1. まえがき

近年、わが国の経済成長は目ざましいものがあり、流通物質量は年を追って増大している。これに対し、港湾・駅等の起終点施設の整備が著しく立ち遅れているために、これらの輸送の転換の場は流通機構上の一つのあい路となっている。とくに貿易立国日本では、港湾の整備・増強はもっとも急を要する事業であり、事実水深の大きい岸壁の不足はバース待ちの現象を顕著ならしめている。ここに最近フローズアップされているセル構造物は、①大規模な施工施設を要しない。②工種が少ない。③工期が比較的短い。④水深・載荷重の大きい岸壁では他の形式より工費が安い、という利点をもち、わが国でも港湾構造物として広く利用を小始めている。しかしながらセル構造物を最初に使用した米国では、これを仮設の堤や造船台といった、いわゆる仮設構造物として設計・建設されているが、わが国においては永久構造物として設計・建設され、しかも地震の来襲が頻繁であるので、耐震性の検討は欠かすことができない。しかるに、いまの小規模の対象とする港湾構造物が受ける外力の内、水平合力は土圧がその大部分を占め、したがって地震時動土圧を知ることは極めて重要である。

本研究では、以上の観点よりセル型岸壁に作用する地震時動土圧を以下に記す仮定のもとに、円筒座標において三次元弾性体問題として解析し、これと実験結果とを比較検討し、今後の設計への足がかりとせんとするものである。仮定は、①セル構造物には上載荷重はない。②中詰土砂は完全弾性体と考え、間隙水は考慮しない。③中詰土砂の変位は微小である。④鋼板セルは剛体とし固い基礎にある。⑤地震力は地盤に水平な単振動である。

2. セル中詰土砂による内部土圧の基礎方程式とその解。

A). 固定支持の場合の解。

図-1のように地盤上に据えられたセル構造物が、 $A_0 \sin pt$ なる水平単弦振動を受けると、円筒座標系 (r, θ, z) において、セル中詰土砂の変位を (u_r, u_θ, u_z) とする。いま $u_\theta = u_z = 0$ と仮定し、 ρ を中詰土砂の密度、 λ, μ をLameの定数とすると次の基礎方程式を得る。

$$C_1^2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right) + C_2^2 \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + A_0 p^2 \sin pt \cos \theta = \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

境界条件: ① $z=0, u_r=0$, ② $z=b, \frac{\partial u_r}{\partial z}=0$, ③ $r=a, u_r=0$, ④ $\theta=0, \pi, \frac{\partial u_r}{\partial \theta}=0$.

いま、 $u_r = \sum_{m=0}^{\infty} \varphi_m(r) \sin\left(\frac{2m+1}{2b} z\right) \sin pt \cos \theta$, $A_0 p^2 \sin pt \cos \theta = \sum_{m=0}^{\infty} \psi_m(r) \sin\left(\frac{2m+1}{2b} z\right) \sin pt \cos \theta$

と展開し解を求めると、セル壁面、 $r=a$ における動土圧は

$$\begin{aligned} [\sigma_r]_{r=a} = & (\lambda + 2\mu) \left[\sum_{m=0}^{\infty} \frac{4A_0 p^2}{\lambda_m^2 C_1^2 \pi a (2m+1)} \cdot \int_0^{\frac{\pi a}{2}} \frac{J_0(\xi) d\xi}{J_0(\lambda_m a)} \cdot \sin\left(\frac{2m+1}{2b} z\right) \sin pt \cos \theta \right] \\ & + (\lambda + 2\mu) \left[\sum_{m=0}^{\infty} \frac{4A_0 p^2}{\lambda_m^2 C_1^2 \pi a (2m+1)} \cdot \int_0^{\frac{\pi a}{2}} \frac{I_0(\xi) d\xi}{I_0(\lambda_m a)} \cdot \sin\left(\frac{2m+1}{2b} z\right) \sin pt \cos \theta \right] \end{aligned} \quad (2.2)$$

ただし、 $\lambda_m^2 = \frac{1}{c^2} \{p^2 - C_2^2 (\frac{2m+1}{2b} \pi)^2\}$, $\lambda_m^2 = \frac{1}{c^2} \{C_2^2 (\frac{2m+1}{2b} \pi)^2 - p^2\}$, $\alpha^2 = 1 + \frac{C_2^2}{c^2}$, $C_2^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{p}$, $C_2^2 = \frac{\mu}{p}$, J_n, I_n はそれぞれ α 次のベッセル関数, α 次の変形ベッセル関数である。

B). 滑動を許す場合の解.

地盤とセルとの相対変位を, $B_0 \sin(pt - \delta)$, とするとつぎの基礎方程式を得る。これと前と同じ境界条件のもとに解く。(2.1)の解との合成を行なう。 δ は位相差である。

$$C_1^2 (\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}) + C_2^2 (\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) + B_0 p^2 \sin(pt - \delta) \cos \theta = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

$$\therefore [O_r]_{r=a} = (\lambda + 2\mu) \left[\sum_{m=0}^{\infty} \frac{4B_0 p^2}{\lambda_m^2 C_1^2 \pi a (2m+1)} \cdot \frac{\int_0^{\lambda_m a} I_n(s) s ds}{I_n(\lambda_m a)} \cdot \sin(\frac{2m+1}{2b} \pi) z \sin(pt - \delta) \cos \theta \right]$$

$$+ (\lambda + 2\mu) \left[\sum_{m=1}^{\infty} \frac{4B_0 p^2}{\lambda_m^2 C_1^2 \pi a (2m+1)} \cdot \frac{\int_{\lambda_m a}^{\lambda_m \infty} I_n(s) s ds}{I_n(\lambda_m a)} \cdot \sin(\frac{2m+1}{2b} \pi) z \sin(pt - \delta) \cos \theta \right] \quad (2.4)$$

C). 回転を許す場合の解.

セル底面の $z=0$, $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ を中心として回転するものとし、その振幅を $C_0 z \sin(pt - \epsilon)$, とし、A), B), と同様にして解く。ただし ϵ は位相差である。

$$C_1^2 (\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}) + C_2^2 (\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) + C_0 z p^2 \sin(pt - \epsilon) \cos \theta = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

$$\therefore [O_r]_{r=a} = (\lambda + 2\mu) \left[\sum_{m=0}^{\infty} \frac{8C_0 p^2 b}{\lambda_m^2 C_1^2 \pi a (2m+1)} \cdot \frac{\int_0^{\lambda_m a} I_n(s) s ds}{I_n(\lambda_m a)} \cdot \sin(\frac{2m+1}{2b} \pi) z \sin(pt - \epsilon) \cos \theta \right]$$

$$+ (\lambda + 2\mu) \left[\sum_{m=1}^{\infty} \frac{8C_0 p^2 b}{\lambda_m^2 C_1^2 \pi a (2m+1)} \cdot \frac{\int_{\lambda_m a}^{\lambda_m \infty} I_n(s) s ds}{I_n(\lambda_m a)} \cdot \sin(\frac{2m+1}{2b} \pi) z \sin(pt - \epsilon) \cos \theta \right] \quad (2.6)$$

D). 一般の運動の場合.

以上の結果は、地震時動土圧を、固定、滑動、回転の支持条件のもとに独立に解いたものである。しかし実際の現象は二以上の挙動が、同時に起っているものであり、かかる場合の動土圧は、(2.2), (2.4), (2.6) の動土圧式を合成することによって得られる。

図は固定支持の場合の若干の計算例と実験結果を示したものである。これによると、地震時動土圧は上の近似解でかなりよく説明されることかわかる。その他の支持方式についての数値解析は、現在実験と併行して行なっているので、詳しくは講演時に発表する。

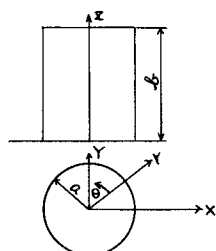


図-1 円筒座標

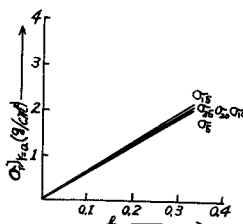


図-2 内部動土圧理論値

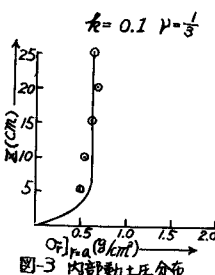


図-3 内部動土圧分布

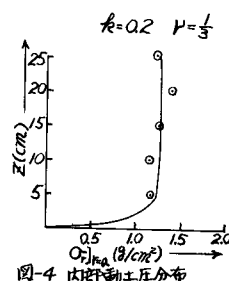


図-4 内部動土圧分布

参考文献 1. 大原資生: 岸壁に作用する地震時土圧. 九大工学集報 第29巻2号, 第30巻1号.

2. Sokolnikoff: Mathematical Theory of Elasticity. New York Mc Graw-Hill (1946).