

(104) 側方流動による洞道・杭基礎系への外力

(財)電力中央研究所 正員 大友敬三

1. はじめに

本報告は側方流動による洞道・杭基礎系の外力について検討したものである。筆者はこれまでに洞道・杭基礎系に作用する外力特性の把握を目的とした模型振動実験を実施し、杭体に作用する外力は側方流動速度に依存することを示した(大友, 1994)。しかし、側方流動の影響は洞道側壁に作用する水平土圧にも認められたので、今回、水平土圧の発生状況とそれが杭体断面力に及ぼす影響、ならびに杭体外力との関係について検討を加えた。

2. 模型振動実験の概要

本実験では、鋼製土槽(幅300cm, 高さ100cm, 奥行き100cm)に地表面勾配2%の飽和砂地盤を作成し、この地盤中に洞道・杭基礎模型を設置した。実物洞道は標準断面内で2本の杭基礎で支持される形式を想定した。洞道模型は厚さ2cmの亚克力板で組立てた。洞道寸法は、幅30cm, 高さ20cm, 奥行き40cmである。以下、洞道模型を単に洞道と呼ぶことにする。杭基礎模型には外径2.5cmのアルミとステンレスの中空管を採用した。これら中空管の肉厚を調整することにより、3種類の曲げ剛性を持つ杭基礎模型を用意した。以下では、杭基礎模型を単に杭と呼ぶ。杭の曲げ剛性はケース1; $5.91 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$, ケース2; $6.38 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$, ケース3; $2.13 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ である。これらの杭はIai (1989) が提案した地盤・構造物・流体連成系の相似則に基づき、相似比を20として設計した。杭頭、杭先端の境界条件は完全固定となるように、鋼製キャップに差し込んで洞道と土槽底部にそれぞれ固定した。

地盤内の計測項目は、①加速度、②過剰間隙水圧、③側方流動、などである。洞道と杭の計測項目は; ①洞道の加速度、②洞道側壁の水平土圧、③洞道上下面のせん断力、④洞道上面および側壁の曲げひずみ、⑤杭の曲げひずみ、などである。これらの計測は図1に示す配置で行った。なお、本実験では、側方流動は図1で右側から左側に生じていたので、洞道側壁の右側、左側をそれぞれ上流側、下流側というようにに区別することにする。振動台による加振は振動数10Hzの正弦波を20波加えることにより行った。ただし、加振波形前後にそれぞれ3波のテーパをつけたので、加振時間は2.6秒となる。最大加速度振幅は400Gal程度を目標に設定した。

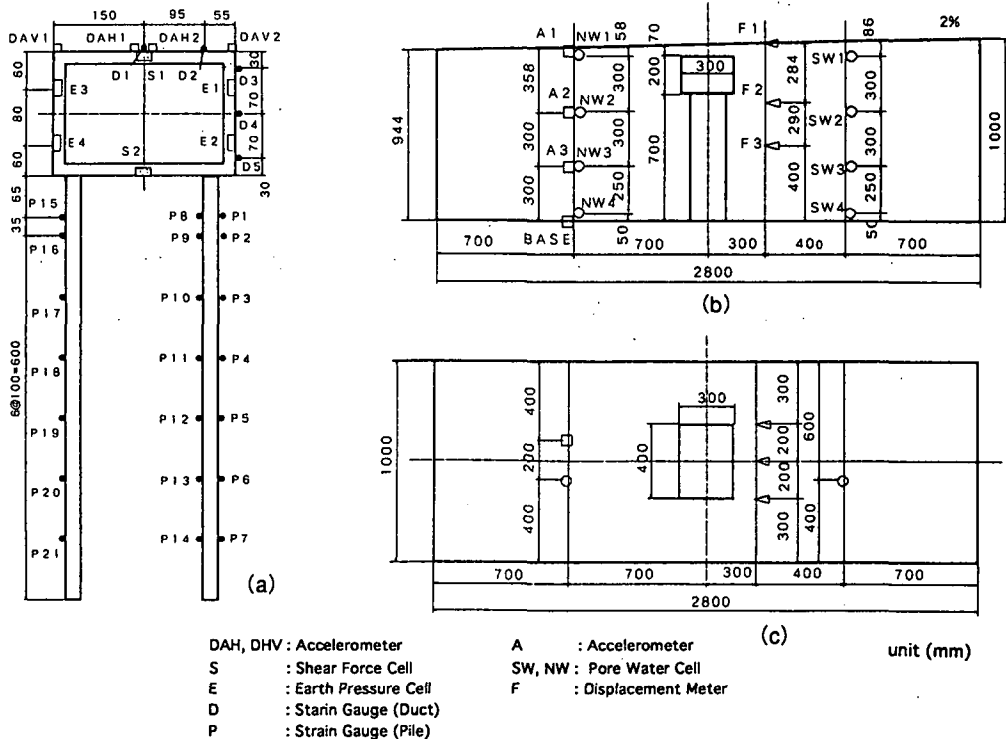


図1 計測点配置 (a) 洞道・杭, (b) 地盤 (平面), (c) 地盤 (側面)

3. 水平土圧の発生状況

洞道側壁の水平土圧は液状化とともに増加した。これは土圧係数の増大によるものと考えられる。しかし、上流側と下流側で発生状況に違いが現れた。この状況を示したものが図2である。同図はケース1の例であり、深さ28.4cmにおける側方流動(F2)、上流側水平土圧(E2)、下流側水平土圧(E4)、杭頭より6.5cm下がった位置の杭の曲げモーメント(P1)のそれぞれに関する時刻歴を示している。これらの時刻歴は振動台加振の影響による振動成分を取り除いた中立軸の移動である。また、本報告で扱う水平土圧の計測値は有効土圧と間隙水圧の和、すなわち全土圧を意味する。図2の▼印で示したようにE2の最大値はP1がピークをとる時刻と一致する。一方、E4は側方流動が進展するにつれて減少し始め、P1が最大値をとる時刻まで減少し続ける。その後はまた、増加に転ずる。側方流動による杭の曲げモーメントと杭頭変位の時刻歴は対応すると考えて良い。したがって、洞道側壁の上流側と下流側水平土圧の発生状況は杭の変位に伴う洞道の水平移動により影響を受けることが明らかである。なお、他のケースでも同様な傾向が現れている。

図2の▼印で示したような時間断面、すなわち杭の曲げモーメントが最大値となる時間断面を対象にして以下、ケース1～3の洞道水平土圧や杭体外力の分析を進めることにする。

洞道側壁上流面と下流面の水平土圧分布は図3に示すようなものとなった。ここで示した水平土圧は振動台加振直前の値に図2で示したような液状化に伴う増分を加算したものである。液状化した砂地盤の飽和単位体積重量を 1.8g/cm^3 、土圧係数 $K=1.0$ と仮定した、いわゆる泥水圧と実験値を比較すると以下のことがわかる。①計測データの範囲内では概ね泥水圧を上回る。②同じケースの水平土圧は上流面の方が下流面よりも大きい。③杭の曲げ剛性が小さいケースほど全体的に水平土圧は大きい。このように、側方流動による洞道側壁の水平土圧は剛壁などに作用する泥水圧とは異なっている。

洞道の水平移動、すなわち杭頭変位は杭の曲げ剛性に依存している。そこで、杭の曲げ剛性 EI と洞道側壁に作用した水平土圧強度 P との関係を検討した。ここで、 P は図3で示した上流面と下流面の水平土圧をそれぞれ、 $p_u(z)$ 、 $p_l(z)$ として

$$P = \int_0^H \{p_u(z) - p_l(z)\} dz \dots\dots\dots (1)$$

定義した。 $p_u(z)$ 、 $p_l(z)$ は洞道側壁に沿って実験値の勾配で直線的に変化するものと仮定した。 H は洞道の高さ(20cm)である。 z は洞道上面を原点にとり、鉛直下向きを正とする。図4に見られるように P は EI が大きいほど

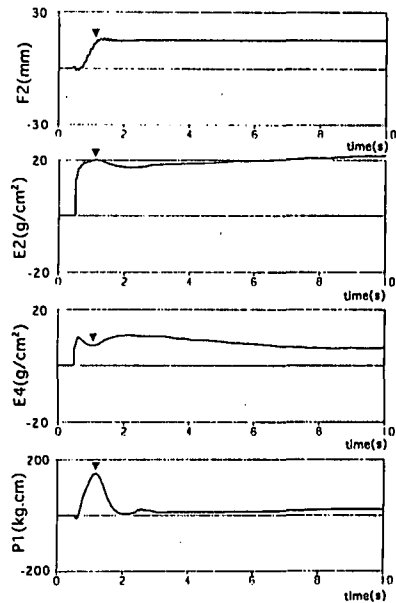


図2 側方流動、洞道側壁の水平土圧ならびに杭の曲げモーメントの時刻歴(ケース1)

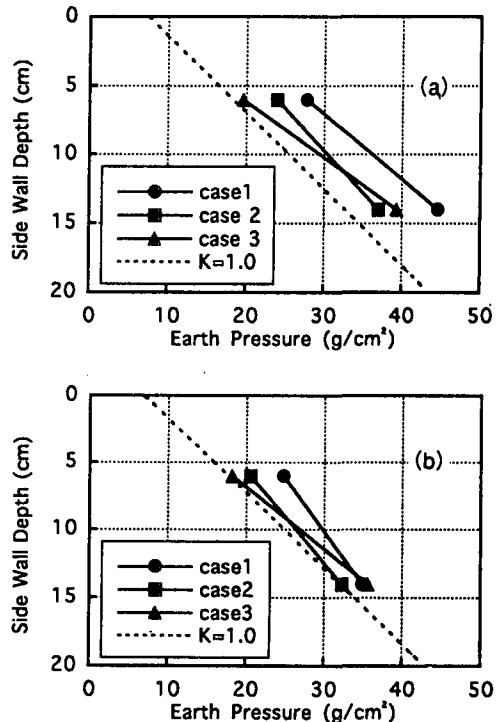


図3 洞道側壁の水平土圧分布と泥水圧の比較 (a) 上流側、(b) 下流側

小さくなる傾向が認められる。今回の実験条件からは、

$$P = 870 EI^{-0.4} \dots\dots\dots(2)$$

という回帰式が得られた。

4. 杭体断面力への影響

水平土圧強度 P の杭体断面力への影響を調べるため、 P のみを側方流動の外力として洞道・杭基礎系に作用させた場合の杭の曲げモーメントを算定し、模型振動実験から得られたものと比較した。曲げモーメントの算定にあたって、杭は洞道底面と完全固定なので杭頭は回転拘束として水平方向のみに自由度を持つ一端固定のはりにモデル化した。このモデルに P を杭頭水平荷重として載荷した。このような条件によって杭体断面力が妥当に評価できることは静的載荷試験結果との対比を通じて確認している。

図5に各ケースの杭体曲げモーメントに及ぼす P の影響を示す。 P による曲げモーメントは直線的な分布形であり、放物線的な実験値の分布形とは若干異なっている。しかし、この違いはわずかである。したがって、分布形の相違にこだわらなければ、 P が杭体曲げモーメントに占める割合は各ケースに共通して実験値の約40%である。このことから、側方流動を受ける洞道・杭系における杭体断面力を検討する場合には、洞道側壁の水平土圧だけでなく杭体外力を別途考慮する必要があることを示唆している。

5. 杭体外力

杭体外力 q は図5に示した実験値の曲げモーメントから P の寄与分を差し引いた曲げモーメントに基づいて推定できる。図5に示した分布形から杭体外力は分布荷重であることは容易に想像できよう。そこで、ここでは、杭体外力のみによる曲げモーメントを図6のように回帰曲線で近似して、杭の軸方向に関する2回微分することにより杭体外力を推定した。図6はケース1の例であるが、2次の回帰分析結果は回帰係数をみてもきわめて良好である。他のケースでも同様な回帰結果が得られている。

q は等分布荷重として求められた。その値はケース1；0.058kg/cm、である。ケース2；0.028kg/cm、ケース3；0.014kg/cm、などとなった。これらは明らかに曲げ剛性 EI に関して反比例的である。 P の場合と同様に q と EI の関係を整理したものが図7である。回帰分析の結果から、

$$q = 210 EI^{-0.65} \dots\dots\dots(3)$$

という関係が得られた。

次に、 P と q の関係を検討してみよう。図4と図7から、 P と q はそれぞれ、 EI の影響が含まれている。ここで

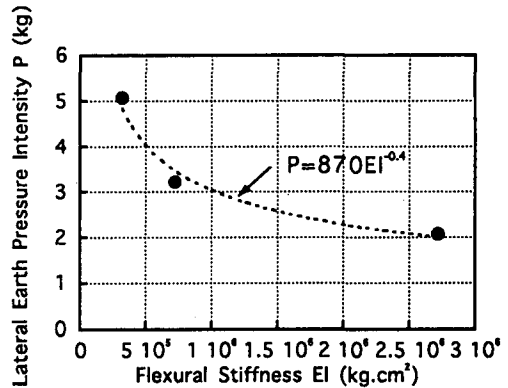


図4 杭の曲げ剛性と水平土圧強度の関係

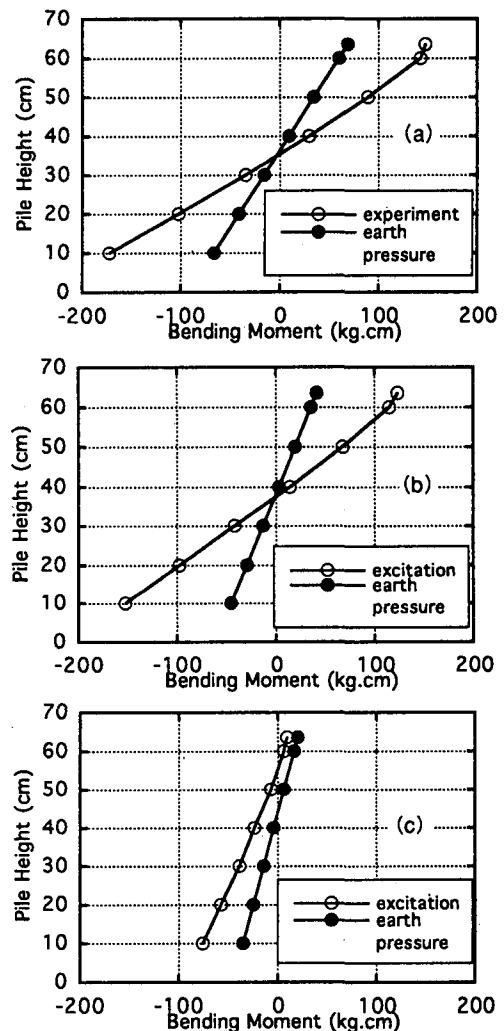


図5 杭体曲げモーメントに及ぼす水平土圧の影響
(a) ケース1、(b) ケース2、(c) ケース3

は、これらを Pl^2/EI , ql^3/EI などと無次元化した。ここで、 l は杭の長さ (70cm) である。両者の関係は図8に示すように正比例関係になっていることがわかる。

これは、いずれかの外力がゼロであれば、杭・洞道系への外力はゼロとなることを意味しており、図2で最初に示したように杭・洞道系の変位は側方流動が発生してから生ずるので、実験事実をうまく説明できていると判断される。さらに、この関係を利用すれば、杭体外力と水平土圧強度のどちらかが決められれば、外力設定が可能になることを示している。本実験結果からは、水平土圧強度は泥水圧を割増せば比較的簡易に推定することが可能であり、杭体外力を求めるよりも簡単といえよう。限られた実験データではあるが、この知見は側方流動の影響を考慮した洞道・杭系の耐震設計を検討する場合、有益と考えられる。

杭の耐震設計に液状化の影響を考慮しているものとして道路橋示方書 (1992) があげられる。同示方書は完全液状化すると判定された土層の土質定数はゼロとして取り扱っている。一方、本実験では、側方流動によって曲げモーメントが最大値をとる時間断面では、周辺地盤の水平抵抗が期待できない、いわゆる突出杭の状況に近いことが明らかになっている (大友, 1994)。したがって、同示方書の液状化の影響の考え方は本実験結果と基本的に一致するものである。今後、側方流動が杭に及ぼす影響を詳細に検討していく場合には杭体外力の評価が重要になってくるとと思われる。

6. まとめ

側方流動によって生じた洞道側壁の水平土圧と杭体外力について模型振動実験に基づいて検討した。得られた結果は以下ようになる。

- 1) 洞道側壁の水平土圧は洞道・杭系が最大変位に達するに伴って、上流側面では増加し、下流側面では減少した。これらを泥水圧と比較すると、上流側面ではそれを上回る。
- 2) 洞道側壁の水平土圧強度が杭体曲げモーメントに占める割合は40%程度であった。この結果は側方流動を受ける洞道・杭系に対しては杭体外力も作用することを裏付けた。
- 3) 水平土圧強度と杭体外力の間には正比例の関係があることが示された。これを利用すれば、簡易に側方流動の外力設定が可能になる。

参考文献

- Iai, S. (1989) " Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field.", Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.105-118.
- 大友敬三 (1994) " 地中洞道・杭基礎系に作用する側方流動の外力について", 第49回土木学会年次学術講演概要集第1部 (B), pp.840-841.
- 日本道路協会 (1990) " 道路橋示方書・同解説V, 耐震設計編"

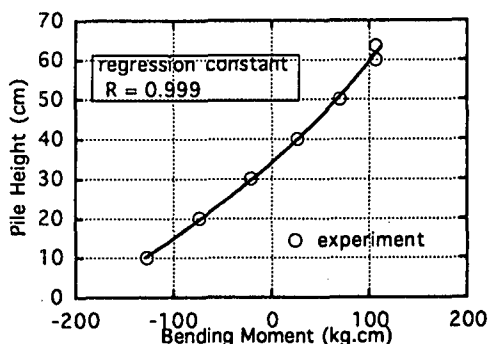


図6 杭体外力による曲げモーメント (ケース1)

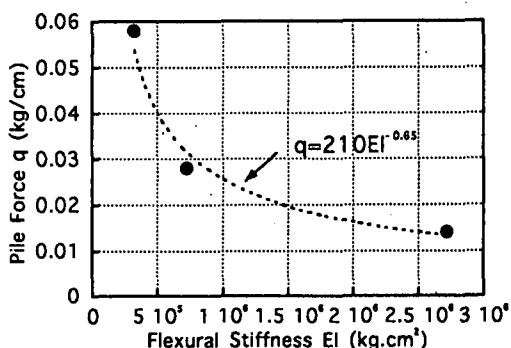


図7 杭の曲げ剛性と杭体外力の関係

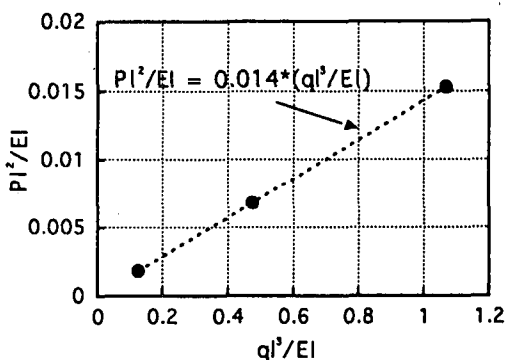


図8 Pl^2/EI と ql^3/EI の関係