

(Ⅲ - 40) 作業気圧低下時のケーソン掘削底面の浸透流解析

(株)白石 正会員 ○ 阿部慎太郎 鈴木敬太
広島大学 正会員 日下部 治

1. はじめに：橋脚基礎施工中の平面寸法 $7.7 \times 20.2\text{m}$ のニューマチックケーソン内において載荷試験（載荷幅 $B = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$ ）を実施したが、試験地盤を飽和状態とするため作業気圧を調節し地下水位を試験地盤面に一致させた。地盤は冲積砂層で固結度が小さく、作業気圧の低下速度が大きいと透水力により地盤を乱すことが懸念されたため、地盤整形と気圧調整には慎重を期した。本文では、浸透流解析により試験地盤の安定性を検討した結果を報告する。

2. 試験地盤の状況：図-1に試験地盤の状況を示す。載荷試験地盤は平均粒径0.19mm、細粒分 3.5%、均等係数2.3 の細砂である。載荷板は試験前日に設置したが、浸透破壊に対して上かぶり圧の効果を期待するために載荷板の周囲に高さ20cmの地山を残し、試験当日に地下水位を上昇させてからこれを撤去した。作業気圧の制御には、微調整が可能な圧力制御装置を用いた。載荷試験に先だってブロックサンプリングにより不攪乱試料を採取し、土質試験を実施した。

3. 解析手法：上向き浸透流による地盤の構造物に対する安定性の検討は、土粒子骨格の破壊現象と関係づけて考えると、せん断破壊に着目した解析が必要となる¹⁾。しかし設計実務では、浮遊状態にある土粒子の鉛直方向の力の釣合いから導ける限界動水勾配を用いて判定するのが、簡単・明快であるため一般的となっている。ここでもこれにならない、試験地盤の強度も、上向き浸透流で発生するせん断応力も無視した。

(1) 浸透破壊の発生位置：浸透流 FEM 解析により各要素の鉛直上向きの流速 v_{yi} を求め、単位体積あたりの透水力 $i_{yi} \cdot \gamma_w$ ($i_{yi} = v_{yi} / k_y$, γ_w : 水の単位重量) が土の水中単位重量 γ を上まわる要素が、浸透破壊発生とする。

(2) 土かぶり圧の評価: 図-2に示すように、任意の深さまでの鉛直土柱を考える。これに有効重量と土かぶり重量の和 ΣW が鉛直下向きに、浸透流解析で得た透水力の和 ΣU が上向きに作用する。両者の比 F_s を安全率とする。

4. 解析条件：図-3に計算ケースとモデルを示す。ボーリング調査は刃口高から深さ 12.25mまで実施されているが、それ以上の深の土質状況は不明なため、不透水境界を刃口高から 12.25m および40mとし、軸対称と鉛直二次元条件で計算した。要素数は 246で、鋼矢板は不透水とした。不攪乱試料の変水位透水試験で得た透水係数は $k_x, k_y = 6.9, 7.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ と異方性が小さく、平均し $k = 7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ とした。試験当日、図-4

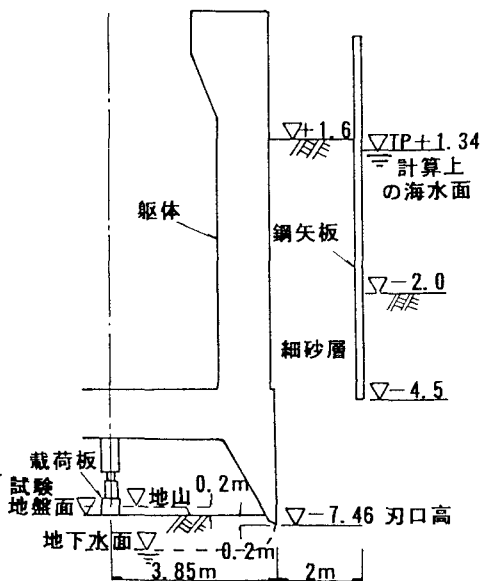


図-1 試験地盤の状況

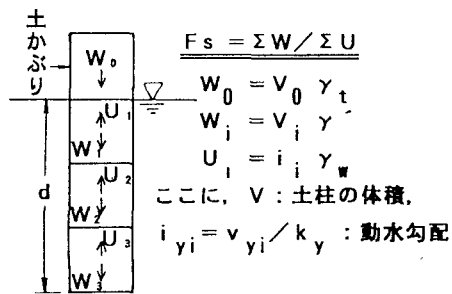


図-2 土かぶり圧の評価の手法

(2) 土かぶり圧の評価: 図-2に示すように、任意の深さまでの鉛直土柱を考える。これに有効重量と土かぶり重量の和 ΣW が鉛直下向きに、浸透流解析で得た透水力の和 ΣU が上向きに作用する。両者の比 F_s を安全率とする。

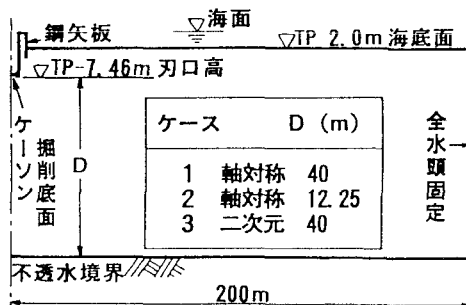


図-3 計算ケースとモデル

に示すように作業気圧を徐々に低下させた。作業気圧の計測精度は設計精度、表示がそれぞれ0.04、0.01kgf/cm²で、実際の作業気圧の変化はより緩やかである。試験地盤面が非定常境界となる。作業気圧低下初期の試験地盤は不飽和状態だが、プログラム(PC-UNSAF, 土質工学会中国支部, 1987)は圧気圧下の不飽和を表現できず、初期から飽和状態とした。ケーソンは海岸の築島内に設置され、1m前後の潮位変動は周囲の間隙水圧に影響するが、解析ではこれを無視した。 γ は不攪乱試料の三軸試験供試体12本の平均値0.92tf/m³(変動係数0.025)を、 γ_L はブロックサンプリング時の平均値1.62tf/m³を用いた。

5. 解析結果 (1) 浸透破壊の発生位置：計算の結果、265分後に動水勾配が最大となった。浸透破壊が発生する範囲は図-5(a)の斜線部で、鉛直二次元が刃口から0.35mまでなのに対し、軸対称は0.85mまでとなった。しかし、いずれの場合も、試験の影響範囲には浸透破壊は発生していない。

(2) 土かぶり圧の評価：図-5(b)は上柱の深さdを載荷幅($B = 0.2\text{m}$)として F_s を計算した結果である。 F_s は、土かぶり圧を考慮すると大きくなり、ケーソン中央に向かって大きくなる。良好な試験地盤を確保するために位置を中央部としてかつ地山を残したが、この方法は妥当であった。解析モデルについては、仮締切りのボーリング解析で指摘されているように²⁾、軸対称条件および不透水境界のより深いモデルの方が安全側の計算となる。

(3) 観察との比較：解析では刃口付近で浸透破壊が発生するが、作業室内の目視では認められなかった。両者の相違は、刃口付近の地盤はケーソン自重による鉛直応力が浸透破壊を抑える効果があるためと考える。自然地盤では上の非均質性から生じる進行性破壊など考慮すべき点が多い。杉井ら³⁾は自然地盤の非均質性を考慮し、確率論を導入した局所安全率を提案しているが、これによれば、載荷試験の影響範囲内において、マクロ安全率は $d = B \sim 2B$ としたとき5～3.5以上と十分大きいものの、局所安全率が1を下回る領域が全体で20～25%出現する可能性があると考えられる。しかし、載荷試験断面の試験は数箇所範囲も狭いが、浸透流による局所的な乱れは観察されなかった。前述した地盤のせん断破壊⁴⁾については、掘削と浸透流による応力経路を一次元除荷と仮定し、Alpanの式⁴⁾で K_0 (OC)を求めモール・クーロンの破壊基準線に至るかを計算した。CD三軸試験から粘着力は0.5tf/m²程度と推定しているが、これを用いると土かぶり圧を無視しても地盤は十分強度を有していることを確認している。

6. おわりに：観察と同様に、解析結果からも載荷試験はほぼ良好な地盤状態で実施されたと推測できる。載荷試験の結果については、今後別に報告する予定である。

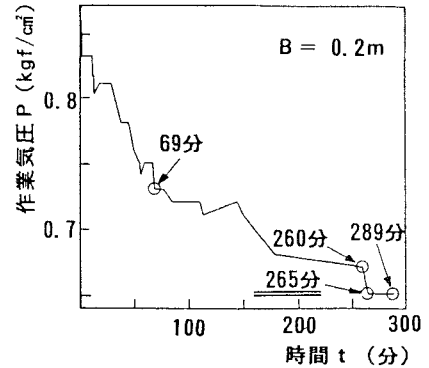


図-4 作業気圧と時間の関係

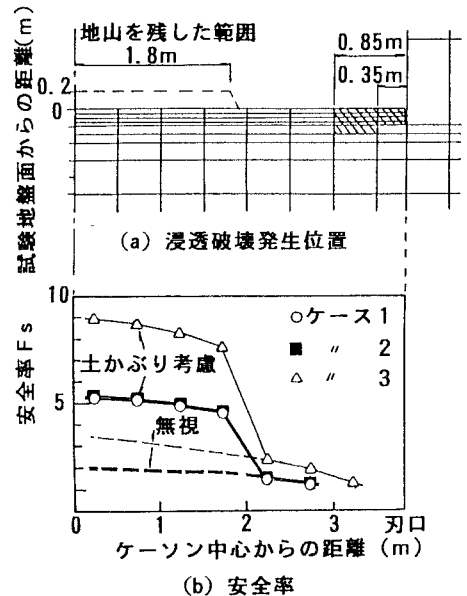


図-5 解析結果 ($t = 265$ 分)

参考文献 1) 日下部治・河合伸由：上向き浸透流による基礎の支持力低下と沈下，土と基礎，Vol. 37, No. 6, pp. 57～62, 1989年 2) 三浦均也・高橋一彦・古川美典・今福守：橋梁下部締切り工のボーリングに対する安全性解析，第27回土質工学研究発表会，pp. 2005～2008, 1992年 3) 杉井俊夫・佐藤健・宇野尚雄・山田謹吾：浸透破壊発生のプロセスと土の非均質性，土と基礎，Vol. 37, No. 6, pp. 17～22, 1989年 4) Alpan, I.: The Empirical Evaluation Of the Coefficients K_0 and K_{0p} , Soils and Foundations, Vol. 7, No. 1, pp. 31～40, 1967