

(108) 水—地盤—構造物系における有効応力 解析法の適用性の検討

運輸省 港湾技術研究所 正員 松永 康男
同 上 正員 井合 進

1. まえがき 近年、液状化を考慮した地盤・構造物系の有効応力解析が、各方面で試みられるようになってきた。しかし、その適用性に関しては、必ずしも十分な検討が実施されていない。特に、矢板式岸壁のように、水—地盤—構造物の相互作用が関係し、かつ、地震発生前においてもすでに土の要素が降伏状態に近い状態となっている場合には、特に数値解析上困難な問題が現れる場合が少なくない。著者らは、岸壁の液状化対策の検討を目的とした一連の模型振動実験を実施してきたが、本研究では、まず手始めに、その内の一つのケースを取り上げ、実験結果の有効応力解析を試み、有効応力解析法の適用性に関する検討を実施することとした。

2. 振動実験の概要 解析の対象として取り上げた実験は、地震動による模型岸壁の変形量および地盤の挙動を実験的に把握するために行った室内振動実験である。振動箱は、H1.2m×L3m×W3mの鉄製で、内側に摩擦軽減のため高分子ポリエチレン板を張り付け、

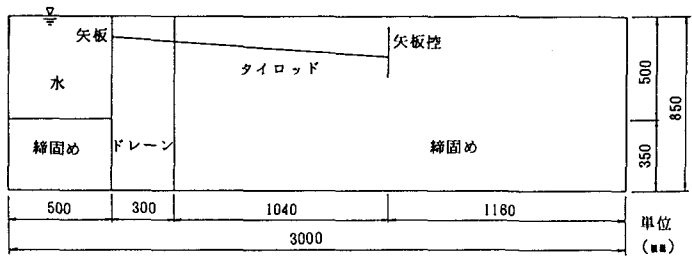


図-1 実験断面

底部には摩擦係数を大きくするために、砂を接着した木製合板を取り付けた。実験には、再現性を調べるためにこの振動箱を振動方向に2分割して、一度に2つの模型を作成して実験を行っている。実験は延べ34ケース行ったが、今回はその中で矢板式岸壁の実験ケース(図-1)を取り上げる。模型地盤の縮尺は1/25であり、矢板の前面・後面ともに締固め改良地盤である。締固め砂の相対密度は、矢板前面で約87%、後面で約82%であった。矢板は厚さ6mmのアルミ板、タイロッドは直径0.82mmの鋼棒である。タイロッドは、矢板にヒンジ結合され、矢板控に固定されている。砂は秋田港外港地区で採取されたもので、74 μ 以下の細粒分を取り除き、均等係数は1.4前後、平均粒径は0.16mm前後になっている。ドレーン材は、2~6mmの玉砂利を用いている。入力地震波には、1968年の十勝沖地震時に八戸港で記録された強震記録のN-S成分を用い、その波形の目標最大加速度を70Gal~350Galまで5段階に分けて加振を行った。実際に得られた振動台の最大加速度は、それぞれ57, 125, 187, 253, 324Galであった。加振は、強震記録の0~150秒間を数値化したものを1/8.2に時間縮尺して行った。

3. 有効応力解析 有効応力解析を行うためには、応力—ひずみ関係と過剰間隙水圧のモデルが必要となる。このうち、応力—ひずみ関係には、東畑・石原¹⁾による任意方向せん断面の双曲線型モデルを用いている。ただし、履歴ループの大きさを任意に調節可能

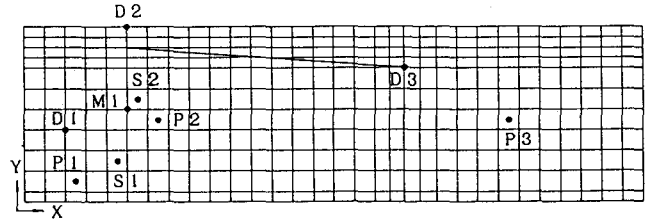


図-2 メッシュ分割図

なように拡張した。また、過剰間隙水圧のモデルには、井合²⁾によるモデルを用いている。この間隙水圧モデルでは、過剰間隙水圧を、塑性せん断仕事およびせん断応力比の関数として与えている。解析は、実験断面をメッシュ分割し(図-2)、有限要素法を用いて非線形動的解析を行っている。砂は非線形平面要素、矢板・タイロッドは線形梁要素でモデル化している。ただし、タイロッドは矢板にヒンジ結合し、便宜的に密度0としている。また、矢板と砂の境界面にはローラーを設け摩擦力が働かないようにしている。解析は、

自重解析を行った後、実際の台加速度で5段階に分けて解析を行い、それぞれ解析が終了した状態を次の解析の初期状態としている。また、砂を足で踏み固めて締め固め地盤を作成しているために、砂が過圧密状態になっていると思われる。したがって、自重解析においては、これを考慮するために下向きに10倍の重力をかけた後、除荷し、最終的に $9.8(\text{m/s}^2)$ の重力加速度が慣性力としては下向きにかかるようにしている。入力地震波形は、実験に用いたものと同等のものを用い、材料定数は、実験から得られた値を用いている。地震応答解析は、非排水状態で実施し、積分はWilson- θ 法($\theta=1.4$)、時間間隔は $\Delta t=0.01\text{s}$ 、そしてレイレ-減衰($\alpha=0$, $\beta=0.005$)を用いた。

4. 実験結果と解析結果 (1) 矢板のモーメント・・・ 図-3に実験結果と解析結果のモーメントの比較を示す(57Galの場合は変化が少なかったので省略)。両者とも加振加速度を上げる度に、徐々に残留モーメントが増加し、矢板下部における負のモーメント領域が減少するとともに最大モーメントの発生する点が徐々に下側に移動しており、海側への全体的なはらみ出しが見られる。両者の間にはタイロッド取り付け点および矢板下部のモーメント分布においてやや違いがみられるが、これは、タイロッド取り付け点においては、タイロッドのボルトの締めつけ具合の影響のため、矢板下部においては、踏み固めによって砂がドレーン側に移動したために解析結果との違いが出たものと思われる。しかしながら、全体的にある程度的一致がみられている。また、図-4に加振加速度253Gal(図-5)の場合の、点M1におけるモーメントの時間変化を示す。これによっても、加振とともにモーメントが徐々に増加していることが分かる。(2) 変位・・・ 矢板の前面への変位(図-6)については、矢板のモーメントと同様、実験、解析とも加振

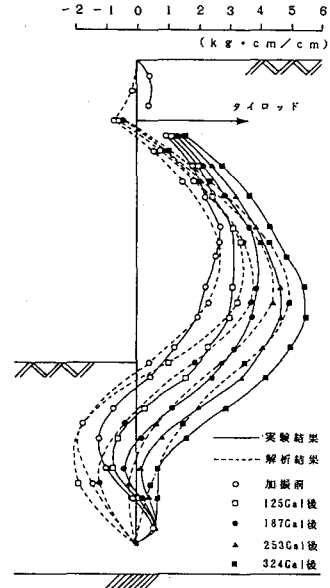


図-3 矢板のモーメント

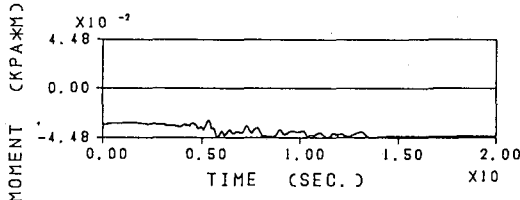


図-4 点M1のモーメント

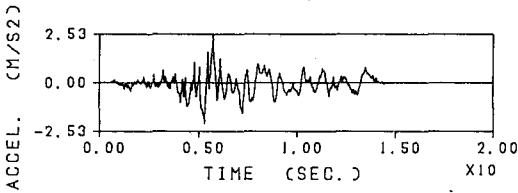


図-5 加速度波形(253Gal)

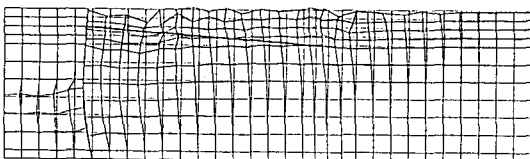


図-7 全体変形図(253Gal後)

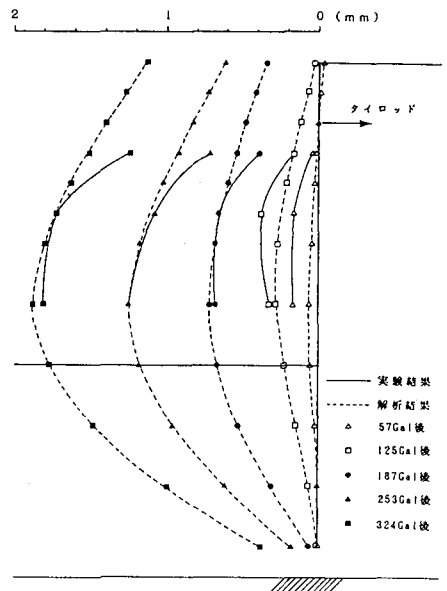


図-6 矢板の変形

とともに海側へ変形が進み、324Gal後には最大で約1.8mm程度の変位が生じている。そして、両者の間にはかなりの一致がみられている。また、253Gal後の全体変形図(図-7)を見ても、矢板背後地盤の変形に伴う矢板のせり出しが見られる。253Gal後の解析による点D1,D2,D3の変位(図-8)についてみると、全体的に徐々に海側への変位がみられる他、矢板前面では盛り上がり、矢板背後では沈下、控え矢板タイロッド取り付け点ではやや沈下する傾向が得られている。同様の結果が実験からも得られているが、いずれも変位量は微小であり、加速度が急激に変化する点において(図-5)において変位も大きく変化している。

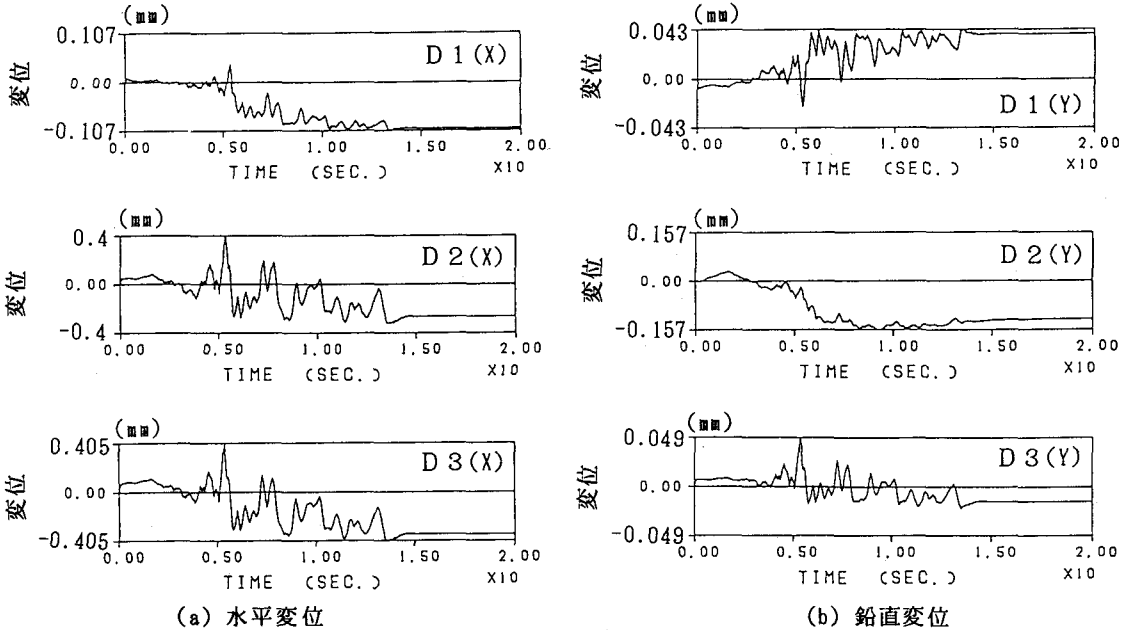


図-8 点D1,D2,D3における変位の時刻歴

(3) 過剰間隙水圧 …… 図-9, 10に点P1,P2,P3の間隙圧の時刻歴を示す。実験においては、加速度が最大になる点において瞬間的に間隙圧が大きく変化するがすぐに消散する。ただし、値そのものは小さい。これは地盤がかなり締め固められているためと思われる。ところが、解析結果では、概して振動とともに間隙圧が徐々に上昇し、その大きさも大きく、残留する間隙圧も大きいという結果となった。これは、解析が非排水状態で実施されているということなどのためと思われる。この点に関しては、今後検討する予定である。

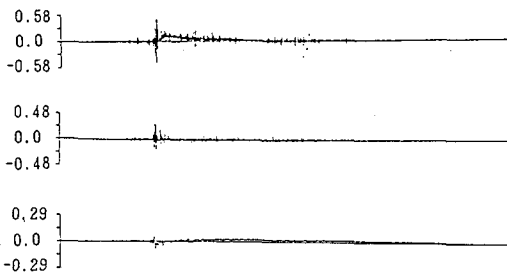


図-9 実験による過剰間隙圧比(P1,P2,P3)

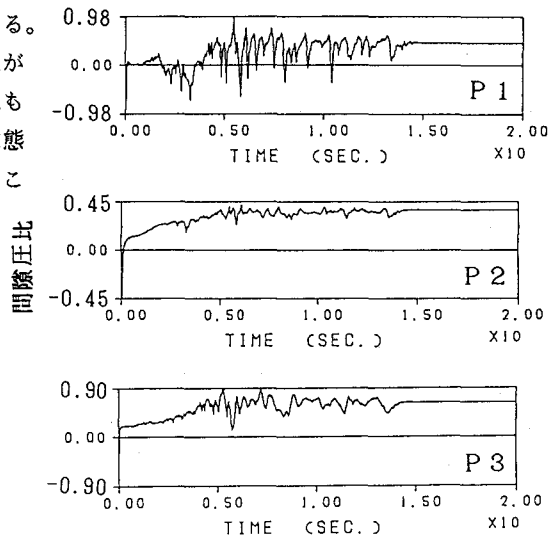


図-10 解析による過剰間隙圧比(P1,P2,P3)

(4) 応力-ひずみ関係 . . . 図-11に地盤の代表点S1, S2 におけるせん断力-平均有効応力、軸差応力-軸差ひずみ、せん断力-せん断ひずみの関係を示す。矢板前面においては、始めはダイレイタンスの影響で有効応力が上昇するが、その後一気に低下し、後は振動とともにひずみが増加していきただけである。矢板背後においては、振動とともに有効応力は徐々に低下するが、せん断力の低下は少なく、ひずみは矢板前面に比較してかなり小さい。

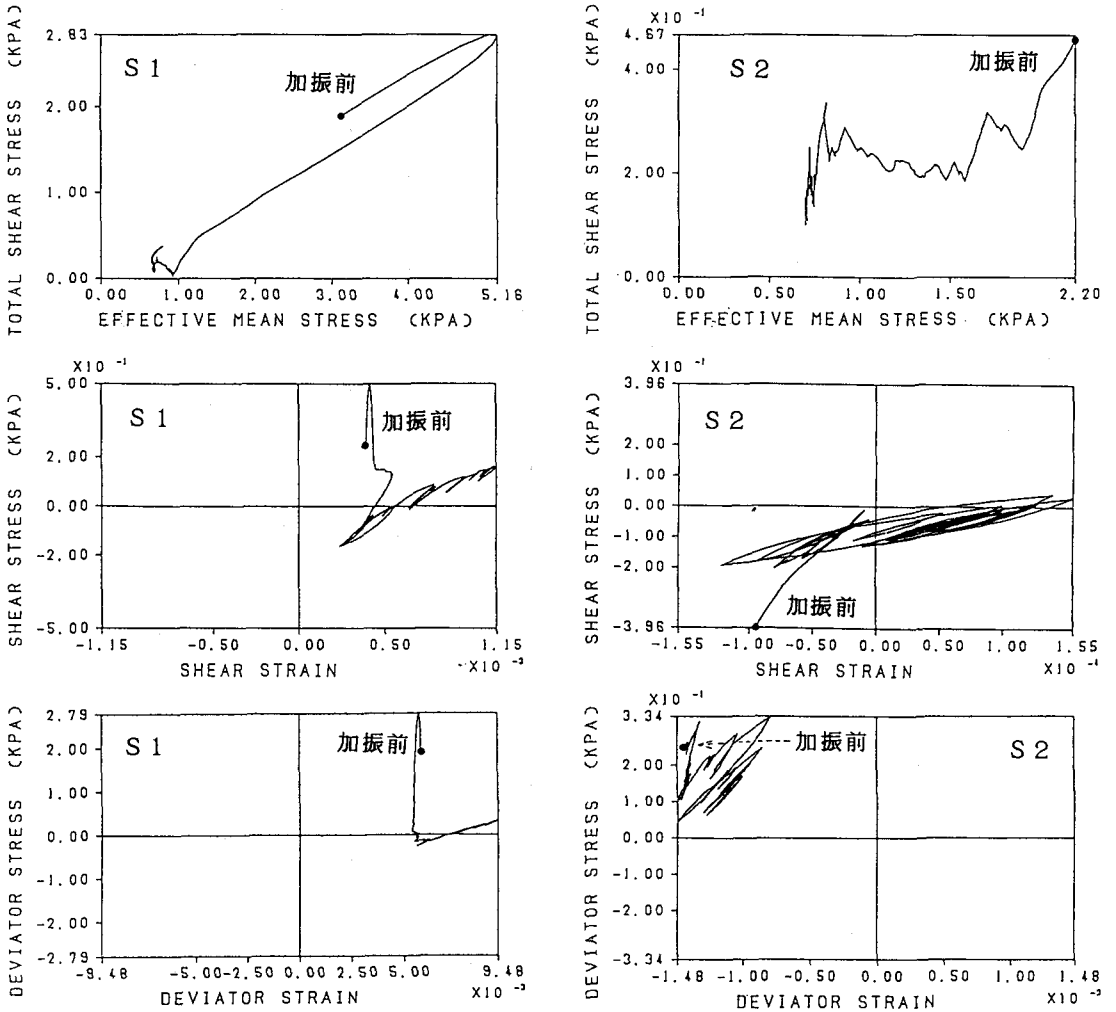


図-11 点S1, S2 における応力-ひずみ関係

5. 結論 振動台による実験結果と有効応力解析を比較した結果、次のような結論が得られた。

1) 有効応力解析を行った結果、矢板のモーメント、矢板の前面への変位が加振とともに徐々に増大していく傾向が現れ、実験結果をかなりの精度でシミュレートできることがわかった。これにより、地震時における矢板等の変位量がある程度予測することが可能となることが分かった。

2) 過剰間隙水圧については、解析結果の方がやや大きい値を示す結果となった。

参考文献

1) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behaviour under principal stress axes rotation, Proc. 5th International conference on numerical methods in geomechanics, Nagoya, pp.523-530, April, 1985. 2) 井合 進: 液状化の二次元有効応力解析において破綻しないための工夫をした一つのモデル, 土木学会第43回年次学術講演会, 3部, pp.418-419, 昭和63年10月.