リサイクル人工ドレーン材を用いた液状化対策（ポリベイン工法）の対策効果

Effects on the Artificial Drain Method using Recycle Material (Poly-Vein Method) against Liquefaction

佐藤　靖彦*　　萩原　敏行*
Yasuhio Sato　　Toshiyuki Hagiwara
平野　孝行**　　小宮　隆之**
Takayuki Hirano　　Takayuki Komiya

要　約

プラスチックのリサイクル材を原料とした新しい人工ドレーン材を用いた液状化対策工法（ポリベイン工法）を開発した．本工法は過剰間隙水圧消散工法であり，既設構造物基礎の対策に適している．本工法の排水性能および液状化対策効果を確認，検証するために，振動台模型実験および解析的な検討を行った．その結果，過剰間隙水圧の発生を抑制し速やかに消散させる効果を確認するとともに，護岸等の基礎構造物に対する変形抑制効果も大きいことが確認された．

目　次

§１．はじめに
§２．工法概要
§３．模型振動実験による対策効果の検証
§４．解析による検討
§５．おわりに

§１．はじめに

地震時の地盤の液状化による被害は，新潟地震（1964年）をはじめ，それ以降日本海中部地震，兵庫県南部地震（1995年）など臨海部や埋立地で多くの被害を生じた．また，新潟中越地震（2004年）など内陸地震においても液状化によりマンホールの浮き上りなど下水道等に多大な被害が生じた．地盤の液状化は構造物本体の被害のほか，ライフラインの機能停止など社会的に大きな影響にもつながるため，重要構造物・施設等の場合には未然に被害を防止する液状化対策を施す必要がある．

当社では，液状化対策工法の中の一つとして，リサイクル材料による新しい人工ドレーン材を用いた液状化対策工法（ポリベイン工法）を開発した．本工法はプラスチックのリサイクル材を原料とした人工ドレーン材を用いた過剰間隙水圧消散工法であり，循環型社会にも適用する工法である．また，本工法は小型の施工機械を使用するため，既設構造物基礎の液状化対策に適している．本報文では，ポリベイン工法の概要をはじめに述べるほか，振動台模型実験を実施して得られた液状化抑止効果ならびに設計解析上の検討の結果について述べる．

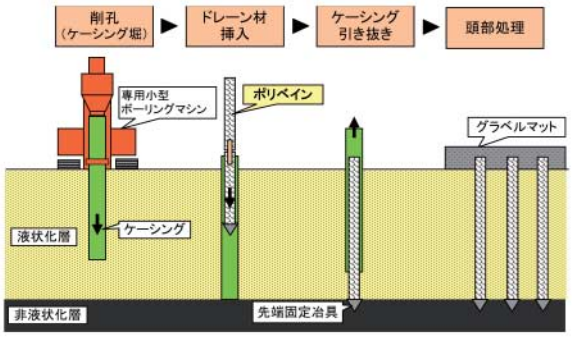
§２．工法概要

ポリベイン工法は，液状化の可能の高い地盤に円筒状のドレーン材を打設し，地震時に生ずる過剰間隙水圧を消散させて液状化を抑止する工法である．本工法で用いるドレーン材は，廃プラスチックのリサイクル材を原料とし，**写真ー1**のように線状プラスチックを重ねた円筒形で，外周にフィルターを巻いて使用する．ドレーン材の寸法は直径100mm，内径60mmで，材質はポリプロピレンを基本とする．基本長さは4m程度であり，専用

写真ー1　ポリベインドレーン材

*　技術研究所技術研究部土木技術研究課
**土木設計部設計課

ジョイントで継ぎ足して所定深度の地盤内まで設置する．本工法の施工フローを**図−1** に示す．



図−1　施工フロー

本工法の特徴は以下のとおりである．

①ドレーン材にはリサイクル原料を使用し環境に優しい工法である．

②施工機械が従来工法に比べコンパクトなため，狭小狭隘な場所や高さ制限のある場所等でも施工可能であり，既設構造物に近接して施工可能である．

③ドレーン材は地震時の揺れに対しても柔軟に対応でき，長期にわたって優れた排水効果が持続する．

④ドレーン材の圧縮強度が大きく，土圧に対して安全性が高い．

⑤ドレーン材の透水係数が高いため，ウェルレジスタンスは小さい．

⑥低騒音，低振動で施工できる．

§ 3．模型振動実験による対策効果の検証

3－1　ドレーン材特性

本ドレーン材の基本仕様および性能を**表−1** に示す．

表−1　ドレーン材の仕様，性能

項　目	仕様，性能
直　　径	外径：100mm，内径 60mm
質　　量	950g/m
開 孔 率	90～95%
空 隙 率	85%±5%
圧縮強度	縦　1800～2000N/20cm 片 横　800～1000N/20cm 片
透水係数	900cm/sec （動水勾配 0.25 の場合）

圧縮強度については，新材のドレーンと同等の強度を有していることを確認した．また，ドレーン材の透水係数は非常に大きく，その結果，ウェルレジスタンスが小さく排水性能が優れることを確認した．

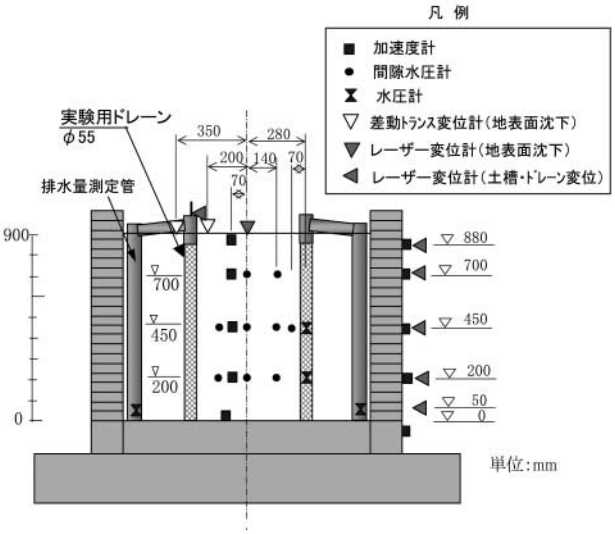
3－2　円形土槽実験

(1)　実験概要

はじめにドレーン材の排水特性および構造物を含まない液状化地盤のみの対策効果を把握するために，円形せん断土槽を用いた振動台模型実験を実施した[1),2)]．

実験システム概要を**図−2** に示す．テーブル寸法 5.5m×5.5m の大型振動台と直径 1.2m，高さ 1.0m の円形せん断土槽を使用し，土槽内にドレーン材を配置してから深さ 900mm の飽和砂地盤を作成した．模型実験用のドレーン材は，土槽寸法との関係上，実物よりも小さな外径 55mm，内径 20mm のものを使用し，ナイロンメッシュ状のフィルターを外周に巻いた．地盤材料には豊浦砂（$\rho s = 2.65 g/cm^3$，$D_{50} = 0.18mm$，$e_{max} = 0.979$，$e_{min} = 0.606$）を使用し，相対密度 60% となるよう水中落下法により模型地盤を作成した．地下水位は，地表面レベルとした．

入力波形は，周波数 2Hz，加速度 100gal および 150gal の正弦波で 10 秒間とした．実験中の計測は，地盤内の加速度，間隙水圧，地表面変位，土槽水平変位，ドレーン内水圧を測定した．また，実験中にドレーンから上昇排水される水を集水するシステムを設置し，ドレーンからの排水量も測定した．



図−2　実験システム（ドレーン対角断面）

表−2　実験ケース

実　験 コード	相対密度 (%)	加速度 (gal)	ドレーン 本数
PB-1	65.7	150	無
PB-2	59.7	150	1
PB-3	64.0	150	4
PB-4	64.6	100	無
PB-5	62.0	100	4
PB-6	62.8	100	1

表−2 に実験ケースを示す．無対策，ドレーン 1 本を土槽中央に配置したケース，ドレーン 4 本を 400mm 間隔で正方形に配置したケースを，それぞれ入力加速度を変えて行った．

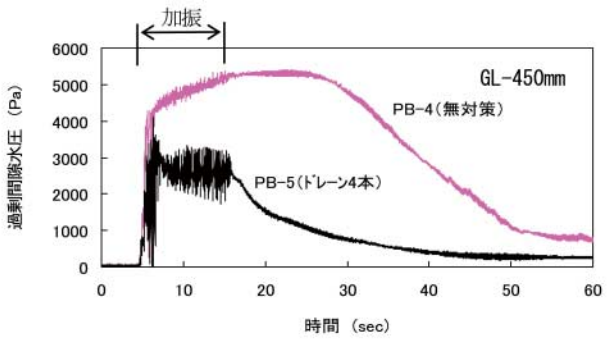
(2)　実験結果

図−3 に地盤中央部における過剰間隙水圧の経時変化を示す．無対策（PB-4）の場合には，加振初期から初

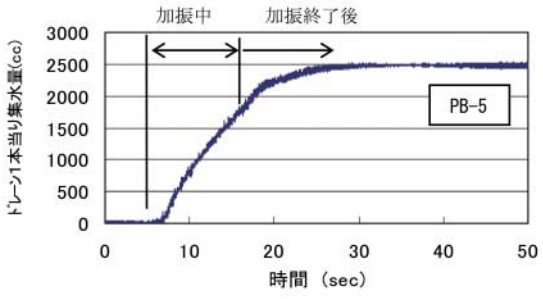
期有効応力の大きさに達して完全液状化し，加振終了後もかなり長く液状化状態が続いている．これに対してドレーンが有る（PB-5）場合には，加振開始初期の 2～3 秒間は完全液状化の 6～8 割程度の水圧を示すが，その後は振動が継続しているにも拘わらず，消散の性状が認められる．加振終了後はただちに過剰間隙水圧が消散し，無対策と比べて消散が非常に早い．

図－4 はドレーン 1 本当りの集水量の計測結果である．図のように排水は早くから始まり加振中に多量の間隙水が排水されること，加振終了後にも排水があることがわかった．これらは**図－3** の過剰間隙水圧の挙動と連動している．このようにリサイクル人工ドレーン材は加振中の発生間隙水圧の蓄積を抑え，速やかに消散させる効果のあることが確認された．

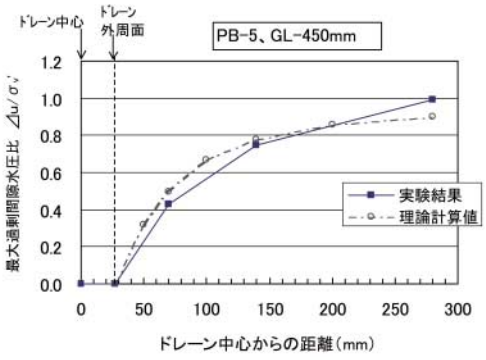
図－5 は深さ 450mm 位置における最大過剰間隙水圧比の分布である．最大過剰間隙水圧比は，ドレーン中心から 70mm 位置で 0.4 程度に抑制されている．ドレーンからの距離が大きくなるに伴い，過剰間隙水圧の抑制効果は小さくなり，ドレーン中心から 280mm で水圧比が 1.0 となっている．半径方向の過剰間隙水圧の分布は Seed による理論計算値と比較すると，ほぼ同様の結果となった．



図－3　過剰間隙水圧の経時変化



図－4　間隙水の排水過程



図－5　半径方向の最大過剰間隙水圧分布

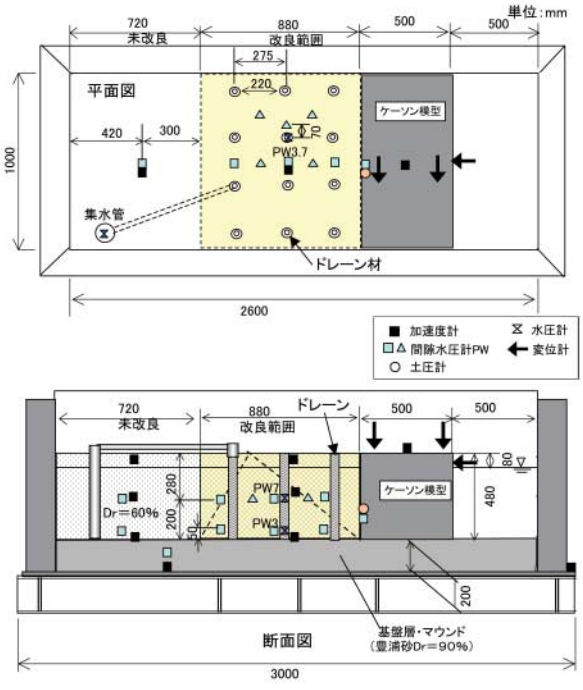
3－3　ケーソン護岸模型振動実験

(1)　実験概要

ポリベイン工法の構造物に対する変形抑制効果ならびに，レベル 2 地震を含む地震レベルに応じたポリベイン工法の排水効果を確認するために，対象構造物にケーソン護岸を選び，ケーソン護岸模型の振動台模型実験を実施した[3]．

護岸模型実験の概要を**図－6** に示す．剛土槽（長さ 2.6 m，奥行 1.0m，高さ 1.0m）を使用して，ケーソン護岸模型は幅 50cm，高さ 48cm とした．地盤材料には豊浦砂を使用した．地盤モデルは，液状化層による影響の変形モードを単純化するため基盤層とマウンドは一定層厚 20cm の密地盤（Dr＝90%）とし，ケーソン背面の液状化地盤は層厚 48cm で Dr＝60% とした．液状化層の地盤作製は水中落下法により行い，基盤層はバイブレーターで締固めた．ドレーン材は模型実験用の外径 55mm のものを使用し，改良範囲は主働崩壊面＋境界部[4]として，ケーソンから 880mm の範囲内にドレーンを設置した．

表－3 に実験ケースを示す．入力地震動は，**図－7** に示すように八戸波 S-252NS 成分（1968 年十勝沖地震，最大加速度 232gal）を用いて最大加速度 150，230，400，570gal の 4 レベルとし，2～3 レベルを段階的に加振を行った．なお時間軸は，香川の相似則にしたがい時間縮尺を 1/5 とし 4 秒間の波形としている．相似比（実物/模型）λ は 8.55，変位の縮尺は 1/25 となる．実験は背

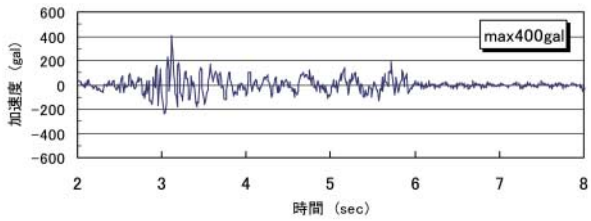


図－6　実験システム（b/a=5.65 のケース）

面地盤を無対策，ドレーン対策，液状化を生じない密地盤のケースで行った．ドレーンの設置ピッチはb/a＝5.65および4.1（b：ドレーン等価有効円の半径，a：ドレーン半径）とした．

表−3　実験ケース

実験コード	実験条件	相対密度 Dr(%)		入力最大加速度（gal）
		液状化層	基盤層	
PBCA-4	無対策	59.1	97.9	150，230，400
PBCA-3	密地盤	83.1	85.7	150，230，400
PBCA-2	ドレーン b/a=5.65	59.1	91.4	150，230，400
PBCA-5	ドレーン b/a=5.65	61.3	95.5	230，570
PBCA-6	ドレーン b/a=4.1	57.8	96.8	230，570



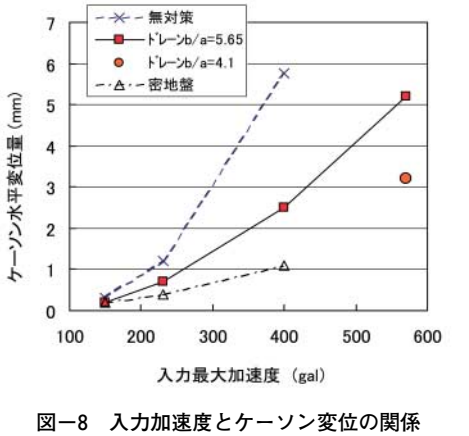
図−7　入力地震動（八戸 NS 波，400gal のケース）

(2)　実験結果

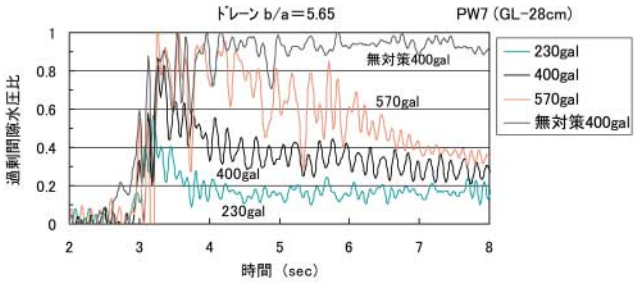
図−8 に地震レベル（入力最大加速度）とケーソン水平変位の関係を示す．図のようにドレーンにより対策した場合は，無対策に比べて変位が半分以下に低減される．また，加速度の増加に伴い変位が増大する傾向にあるが，b/a＝4.1のように打設ピッチを小さくすると，加速度570galのレベル2地震相当でもケーソン変位がb/a＝5.65に比べて約60%に低減される．このように背面地盤にドレーンを打設することは，ケーソン護岸構造物の変位低減に有効であることが認められた．

その効果について過剰間隙水圧とケーソン変位の時刻歴から以下に考察する．**図−9** には入力加速度に応じたドレーン改良地盤（b/a＝5.65）内の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す．無対策の場合は終始1に近い高い水圧比が続く．これに対して，ドレーン設置の場合には，230galでは水圧比がほとんど上昇せず，400gal以上では初期の数波において一時的な水圧上昇があるものの，その後ただちに水圧消散効果が進み水圧比は低下する．打設ピッチをb/a＝4.1に小さくすると570galの加振でもさらに消散が早まる．**図−10** にケーソン水平変位の時刻歴を示す．ドレーン有りのケースでは加振途中で変位の進行が止まる挙動を示し，その挙動は過剰間隙水圧の消散と連動していることからケーソン変位抑止の効果につながっていると言える．

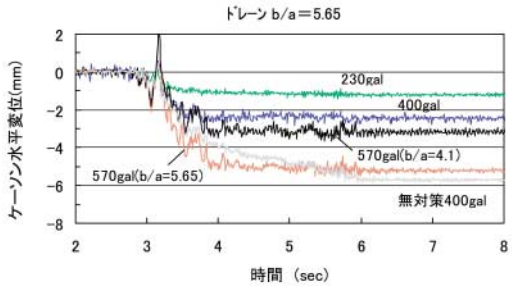
なお，**図−8** のように密地盤でも慣性力，動土圧の影響でケーソンは多少の変位を生ずる．そこで密地盤と無対策地盤を基準として，液状化によって生ずる変位量に対するドレーンの効果を**表−4** のように変位低減率で表した．その結果，ドレーンによる液状化に対する変位抑制効果は60〜70%とかなり高いことがわかる．



図−8　入力加速度とケーソン変位の関係



図−9　入力加速度による過剰間隙水圧の比較



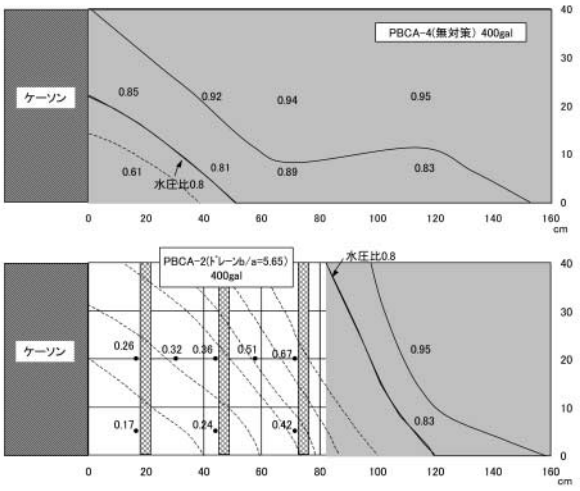
図−10　入力加速度によるケーソン変位時刻歴の比較

表−4　ドレーンによるケーソン変位抑制効果（b/a=5.65）

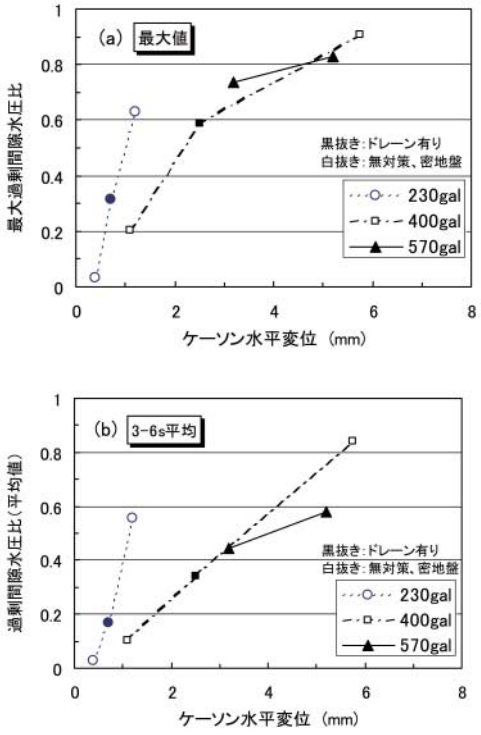
入力加速度	ケーソン変位量			変位低減率 $\frac{⊿1-⊿2}{⊿1-⊿3}$
	無対策時の変位⊿1	ドレーン対策時の変位⊿2	非液状化地盤の変位⊿3	
230gal	1.2mm	0.7mm	0.4mm	63%
400gal	5.75mm	2.5mm	1.1mm	69%

図−11 は護岸背面の過剰間隙水圧比の分布をコンターにして，土槽断面での分布をドレーン打設ケースと無対策ケースについて示した．図中の数字は間隙水圧計の測定値を表す．網掛け部分は過剰間隙水圧比が0.8以上の部分で完全液状化またはそれに近い状態である．無対策の場合はケーソン際までの全面的に高い水圧を生じている．これに対してドレーンの打設範囲内では過剰間隙水圧比は抑えられており，特にケーソン側での水圧低下が大きく，ドレーンによる消散効果が顕著である．こ

れによりケーソンに作用する動水圧が低減されると考えられる．なお，全体的にケーソンに近いほど過剰間隙水圧が低くなる傾向にあり，ケーソン移動にともなう影響とみられる．



図－11　土槽断面の過剰間隙水圧比の分布



図－12　過剰間隙水圧比とケーソン変位の関係

図－12 は無対策，ドレーン対策，密地盤の全てのケースを対象に過剰間隙水圧比とケーソン水平変位の関係に整理した．図(a)は水圧比の最大値を，図(b)はドレーン改良地盤の過剰間隙水圧が**図－9** のように加振中で時間的に変化するため，間隙水圧の発生から振動終了までの時刻 3～6 秒間おける水圧比の平均をとった．各加速度レベルにおいて過剰間隙水圧が大きくなるとケーソン変位が増大する関係にある．水圧比を最大値で整理した図(a)では水圧比とケーソン変位の関係は非線形的な関係にあり，時間平均で整理した図(b)では線形的な関係となった．また，同じ過剰間隙水圧比に対しては 230gal よりも 400，570gal と加速度レベルが大きいほどケーソン変位量が大きくなる傾向にあり，慣性力や動土圧なども影響しているものと考えられる．

§4. 解析による検討

4－1　設計法の適用性

過剰間隙水圧消散工法による液状化対策の設計は，Seed らによる理論を基本にした手法で行われることが多い．本ポリベイン工法においても，Seed らの理論を基本とした設計法を用いる．そこで，本工法の同設計法の適用性について，模型振動実験等の結果をもとに検討した．

地震時の地盤中の過剰間隙水圧は，Seed らが提案した過剰間隙水圧の発生項を考慮した式(1)を基本方程式とした浸透流解析で求める．

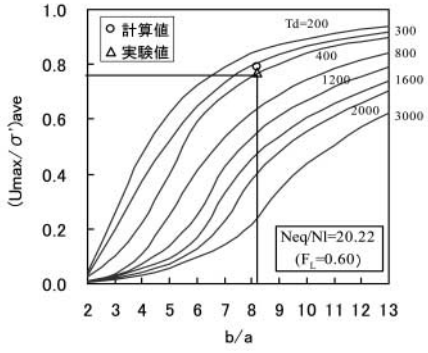
$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{k_s}{\rho_w \cdot g \cdot m_v}\cdot\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial u}{\partial r}\right)+\frac{\partial u_g}{\partial N}\cdot\frac{\partial N}{\partial t} \quad (1)$$

ここに，u：過剰間隙水圧，t：時間，k_s：地盤の水平方向透水係数，ρ_w：水の密度，m_v：土の体積圧縮係数，r：排水材の集水領域の半径，u_g：繰返しせん断により発生した過剰間隙水圧，N：せん断応力の繰返し回数である．

過剰間隙水圧の増加特性は，式(2)のデアルバらによる実験式により与える．

$$\frac{u_g}{\sigma'_0}=\frac{2}{\pi}\cdot\sin^{-1}\left(\frac{N}{N_l}\right)^{1/2\alpha} \quad (2)$$

ここに，σ'_0：初期平均有効応力，α：係数（＝0.7），N_l：過剰間隙水圧比が 100% に達するまでの繰返し回数である．排水材中の透水係数を無限大として有限要素法で解析し，排水材の径 a と影響半径 b の比 b/a, Neq/Nl, 時間係数 Td，平均過剰間隙水圧比（umax/σ'_0）ave の関係チャートを用いて，排水材の打設間隔を決定する．**図－13** は液状化抵抗率 F_L＝0.6（Td＝200～3000）に対する最大過剰間隙水圧比と b/a の関係を示す．円形土槽実験の実験条件の b/a，Td に対して，測定された最



図－13　設計チャート図（F_L=0.6 の場合）

大過剰間隙水圧比はほぼ設計チャートの値と同じとなった．このことから，リサイクルドレーン材を用いたポリベイン工法も同設計法を適用できることが確認された．

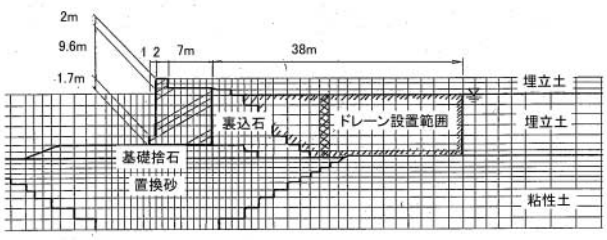
4－2　地盤変形解析

次に，六甲アイランド岸壁（RF3 岸壁）をモデルとして，背後地盤をドレーンで改良した場合の変形抑制効果について解析的な検討を行った．解析には FLIP を用いて，ドレーンの排水効果をせん断応力比～繰り返し載荷回数 N の関係において考慮した[5]．入力波形にはポートアイランド GL-32m の観測記録を用いた．

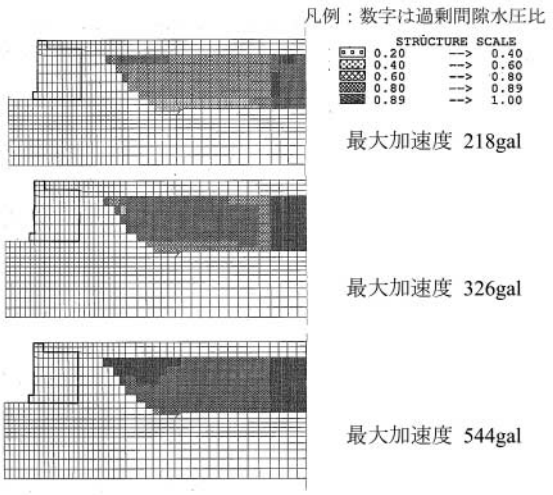
図－14 に解析モデルを，**図－15，16** に解析結果を示す．**図－15** は岸壁背面地盤の過剰間隙水圧比の分布であり，無対策の背後地盤では水圧比が 0.9 以上と液状化しているのに対して，ドレーン改良範囲では過剰間隙水圧比が 0.4～0.7 に抑えられている．**図－16** は入力最大加速度と過剰間隙水圧比，ドレーン改良効果によるケーソン変位低減率の関係を整理したものである．

図－16 によれば，過剰間隙水圧比が低いほど変位低減率が大きく（変位が小さく）なっており，せん断ひずみが抑えられた効果とみられる．ドレーンのピッチを密にした条件では過剰間隙水圧比はさらに低減される．

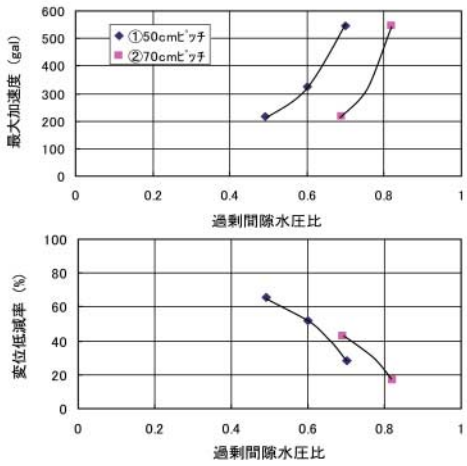
この解析結果は実験結果と同様の傾向を示しており，変形照査として一つの目安になるものと考えられる．



図－14　解析モデル



図－15　過剰間隙水圧分布（解析値）



図－16　過剰間隙水圧比と変位低減率の関係（解析値）

§5．おわりに

リサイクル人工ドレーン材を用いた液状化対策工法（ポリベイン工法）の排水性能および液状化対策効果を確認，検証するために，振動台模型実験および解析的な検討を行った．その結果，以下の点が確認検証できた．

①過剰間隙水圧の発生を抑制し速やかに消散させる効果を確認するとともに，護岸等の基礎構造物に対する変形抑制効果も大きいことが確認された．

②現行の間隙水圧消散工法の設計法が適用できること，また解析的に変形照査を行う方法の適用性が確認された．

謝辞：本工法は西松建設(株)，日特建設(株)，(株)ナムコ・エコロテックとの共同開発によるものである．さらに(独)港湾空港技術研究所と(財)沿岸開発技術研究センターとの共同研究としても実施し，動土質研究室の山崎室長，白石部長のご指導を頂きました．また，中央大学・石原研而教授にもいろいろとご指導賜りました．関係各位に深く感謝いたします．

参考文献

1）萩原，佐藤：リサイクル材を用いた人工ドレーン材による液状化対策に関する模型振動実験，平成 14 年度近畿地方整備局管内技術発表会，2002.

2）佐藤，萩原，平野他：リサイクル人工ドレーン材を用いた液状化対策工法に関する模型振動実験，第 38 回地盤工学研究発表会，pp. 1983–1984，2003.

3）萩原，佐藤，山崎他：リサイクル人工ドレーン材を用いた液状化対策工法のケーソン護岸模型振動実験（その 1）（その 2），関する模型振動実験，第 39 回地盤工学研究発表会，pp. 1945–1948，2004.

4）沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），1997.

5）竹島・澤田他：非排水有効応力解析によるドレーン改良地盤のモデル化に関する検討，第 38 回地盤工学研究発表会，2003.