膨張変位吸収孔による凍結膨張圧低減に関する基礎的研究

Fundamental study on reduction of freezing pressure by absorption of displacement due to expansion

北海道大学工学部環境社会工学科	○	学生員	野間悠二朗	(Yujiro Noma)
北海道大学大学院工学院		学生員	落合凌	(Ryo Ochiai)
株式会社精研凍結本部技術営業部		正会員	小椋浩	(Hiroshi Ogura)
北海道大学大学院工学研究院		正会員	鄭好	(Hao Zheng)
北海道大学大学院工学研究院		フェロー	蟹江俊仁	(Shunji Kanie)

1.はじめに

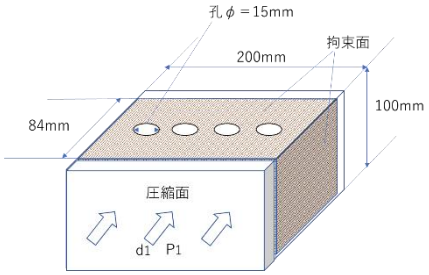
近年，地盤凍結工法を利用した建設工事が地下空間で盛んにおこなわれている．地盤凍結工法は地盤を人工的に凍結させ，土木工事をより安全で確実に行う工法である．都市部の工事の大深度化に伴い，地盤凍結工法の重要性は高まる一方で，地盤を凍結させる際に発生する凍結膨張圧が周辺の構造物に与える影響は無視できない．この凍結膨張圧を低減させるために，膨張による変位を吸収する対策や凍上量を減らす対策が施工現場で取られている．前者の代表的なものとして，地山抜取孔方式，膨張溝対策方式，砂置換帯方式の 3 つが挙げられる．これらの効果は確認されているものの，経験則に基づくものが多く，体系的な設計手法が確立されていない．本研究では，特に地山抜取孔方式について凍結膨張圧の低減効果とその適切な設計手法を数値解析により得ることを目的としている．地山抜取孔方式はボーリングマシンにより抜取孔を開け，それが膨張変位を吸収するような仕組みであるが，膨張変位が吸収されるとそれに伴い凍結膨張圧が減少し，周囲の構造物に対する影響が緩和される．その効果としては，地盤の強度，抜取孔の大きさ，孔の間隔などにより決定される．抜取孔の配置として，一列式と千鳥式が存在する（図－1）．しかし，それらがもたらす効果の違いや，適切な配置方法などは数値的に得られていない．既往の研究で地山抜取孔方式のモデル実験が行われており，一列式と千鳥式の凍結膨張圧低減効果を含めて，有限要素法を用いて数値解析的に検証する．

一列式　　千鳥式

図－1　孔の配列

2.既往の実験

地山抜取孔方式に関して，すでに地山抜取孔の応力低減，崩壊圧力についての室内のモデル実験 [1]がなされている（図－2）．その手法を以下に示す．スラリー上の藤の森青粘土を 400kN/m^2 で圧密し，直方体試料土を作製する．試料土の一軸圧縮強さは 230kN/m^2 である．この試料土に直径 15mm の孔を一列式，千鳥式の 2 種類の配置方法で開け，その間隔の度合いを孔直径 ϕ と孔中心間の距離 L の比，開孔率 ϕ/L で定義した．直方体試料土の上下面及び側面変位を拘束し，前後面から約 0.1mm/min の速度で変位 d_1 を与えられるものとする．開孔率は 0.30，0.56，0.68 の 3 パターンでその際の試料土の圧縮面にかかる圧力 P_1 を計測した．



図－2　モデル実験の模式図

3.数値解析

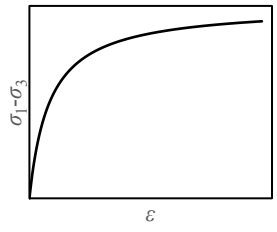
実験では，実際の施工のスケールで行うことは難しく，また局地的なデータしか得られない場合も多い．そこで，実際の施工現場の条件やスケールに柔軟に対応でき，全体的な挙動を把握することが可能になる数値解析を行うことで，これまで経験則に頼っていた設計手法や，凍結膨張による変位吸収の予測などを，合理的かつ簡潔に求めることができる．

3.1. 解析の妥当性の検証

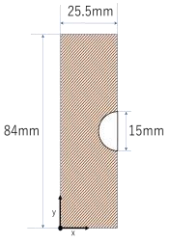
本研究で用いる解析が適切かどうかを検証するために，前章の既往の実験に則して，二次元有限要素法による解析を行った．試料土の応力ひずみ関係には Duncan - Chang モデル [2]（式(1)）を採用した．

E：弾性係数，E_0：初期弾性係数，σ_1：最大主応力，σ_3：最小主応力，σ_f：圧縮強さ，ε：ひずみを表す．

$$E = \left(1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_f}\right) \times E_0 \qquad (1)$$

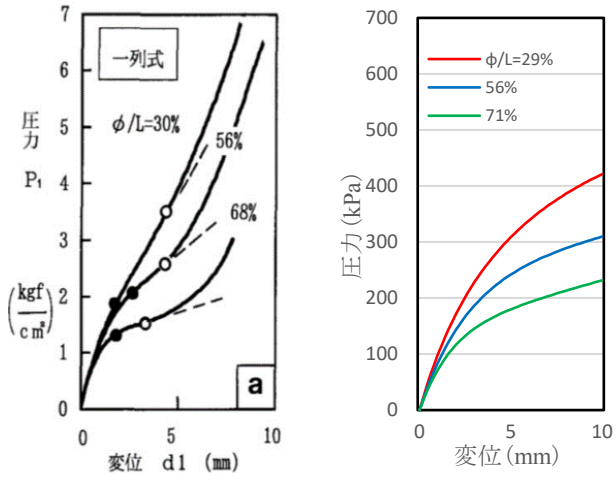


図－3　応力ひずみ曲線



図－4　解析モデル

図－3 はこの解析における応力ひずみ曲線を表している．解析モデルは前章の実験諸元に基づき作成した．円形の部分を抜き取り孔（図－4 白色部），その周囲を土質部分（図－4 茶色部）に見立てた．それらに対し与える物性値を初期弾性係数のみを変えて設定した．初期弾性係数を土質部分は実験値をもとに 8.0×10^6 N/m^2 とし，抜き取り孔部分は 8.0×10^4 N/m^2 とする．上端は y 軸方向に固定し，両端をともに x 軸方向に固定する．この解析においては，変位制御で下端に 10mm まで与えることとする．解析モデルの上端の要素の応力を解析し，発生圧力として扱う．与えた変位と発生圧力の関係を前章の実験結果とともに以下に示す（図－5）．実験結果の●は崩壊開始圧力，○は崩壊完了圧力を示している．



実験結果　　解析結果

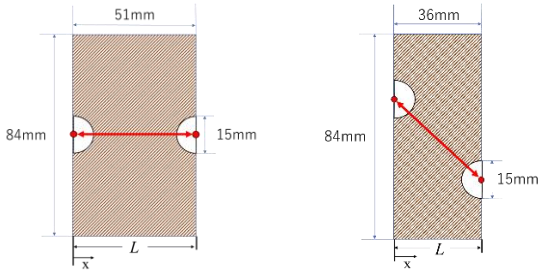
図－5　発生圧力と変位の関係

解析結果より，圧縮により圧力が上昇し，次第にその増加量は緩やかになることがわかる．開孔率が大きいほど圧力が低減され，それぞれの開孔率において，孔壁が崩壊し始めるまでの実験での挙動と概ね一致する．一方で，実験では崩壊が開始された後に直線的に圧力が増加し，崩壊完了後はさらに圧力増加が加速する．これは圧縮により孔が圧力を吸収すると同時に変形し，次第に孔壁が崩壊していくことを表している．しかし，今回の数値解析では孔壁の崩壊が完了した後の挙動は解析対象としておらず，孔壁の変形による応力緩和の効果を検討する．従って，解析結果としては妥当であるといえる．

3.2.　抜き取り孔による応力低減効果

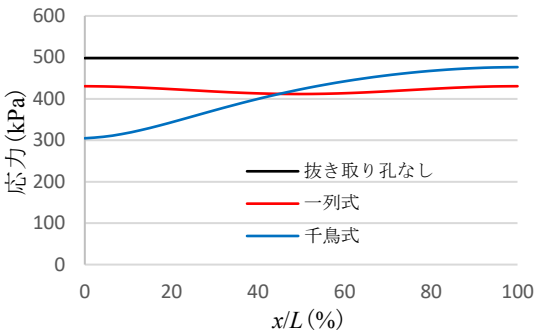
次に抜き取り孔による応力低減効果がどれほど得られるかを確認する．これまでの施工事例により，凍結膨張対策工としての抜き取り孔の効果は経験的に得られている．ここではその応力低減効果を解析的に求め，より合理的な孔の配置方法について検討する．

孔間距離が同一の一列式・千鳥式の解析モデルを図－6 に示す．図中において赤い箇所の長さが等しい．千鳥式は，孔の中心を結ぶ軸を一列式から 45 度傾けて設定し前章と同じ条件を与える．10mm まで変位させたときの，解析モデルの上端の要素の応力を，抜き取り孔がない場合・一列式・千鳥式について比較する．（図－7）



一列式　　千鳥式

図－6　解析モデル



図－7　抜取孔による応力低減効果

一列式，千鳥式ともに抜取孔がない場合より応力の低減がみられる．一列式において，応力が約 15%均等に低減される一方で，千鳥式においては，最大 39%の低減効果があるが，場所によって応力の低減がほぼ見られない箇所がある．これは解析モデルの上端の要素に近い孔の影響が大きく現れており，遠い孔の影響はほぼ受けていないと考えられる．低減効果は不均一であるが，全体的な応力の低減という点では，千鳥式においても孔の効果は大きいといえる．千鳥式は，一列式に比べ同じ幅に対し多くの孔を配置できるというメリットがあるため，孔間距離を縮めることでより多くの孔を配置することが可能となる．

4.まとめと今後の展望

これまで地盤凍結工法において，凍結膨張圧の低減は大きな課題であったものの，その対策は経験則に頼るしかなかった．今回の研究では，物理法則に則った数値解析により，凍結膨張圧を低減させることを解析的に説明できた．だが，実験のスケールで解析モデルの上端の要素のみに着目して解析を行ったため，不十分である．今後，局所的に応力が集中すると予想される孔壁周辺の応力の大きさ，破壊の有無など，解析モデル全体にわたる応力分布の分析を行いたいと考えている．現状，モデル実験に則した規模でしか解析が行えていないため，実際の施工現場でのスケールを再現することで，より実用的かつ合理的な設計が可能となると考えられる．

参考文献

1)　伊豆田久雄，上田保司，生瀬孝博：凍結膨張吸収孔に関する室内モデル実験(3)，土木学会第 49 回年次学術講演会，1994.
2)　川本眺万，林正夫：地盤工学における有限要素解析，培風館，pp66-70，1978.