

## 論文の内容の要旨

論文題目 内部侵食の発生メカニズムとその定量的評価に関する研究  
(Study on progress of internal erosion and its effects  
on mechanical properties)

氏 名 佐藤 真理

内部侵食は土粒子が水の浸透により流出していく現象であり、ソイルパイプの拡大や堤体破壊など様々な災害を引き起こす危険性がある。内部侵食そのものによってこれらの災害が直接的に引き起こされる場合に関しては、ダム構造物のコア材とフィルター材という観点から、主として非粘性土と粘性土に分けた上で、粒度分布や動水勾配の観点から現在研究が進んでいる。しかしながらそうした大規模破壊を伴わない、小規模な内部侵食が土構造物内で発生する際のメカニズム・影響は殆ど明らかになっていない。また小規模な内部侵食が降雨浸透の繰り返し等により継続的に発生した場合、密度低下と土骨格構造の劣化により強度低下が引き起こされる可能性がある。本研究では小規模な内部侵食の発生プロセス、地盤の強度への影響を明らかにするため数種類の実験を実施した。その際小規模な内部侵食の侵食量の評価が実地盤において困難である状況を踏まえ、排水の濁度を測定する事で侵食の定量的評価が可能であるかを検討した。

具体的には特にこれまで扱われてこなかった少量の侵食が継続的に発生する状況を想定し、①内部侵食プロセスの解明 ②内部侵食が強度に及ぼす影響 ③内部侵食が地盤に及ぼすその他の影響（水みち形成や地中構造物の存在、地盤変形、不飽和地盤における空気圧縮など）について明らかにする事を目指した。その為に4種類の実験：1)一次元円筒侵食実験 2)三軸侵食実験 3)円筒入り模型実験 4)一次元円筒空気圧上昇実験 を実施した。

一次元円筒侵食実験は、アクリル円筒底部に5mm径の複数の穴の空いた底板と1mm径のメッシュを設置し、上部から一定の動水勾配を与えることで底部から侵食を発生させる

実験である。地盤材料や動水勾配条件を様々に変化させ、侵食状況の変化を観察した。実験の結果、内部侵食はある動水勾配を超えると発生し、濁度が急激に上昇する事が明らかとなった。この限界動水勾配は密度により大きく変化し、また間隙比と限界動水勾配をもとに侵食が発生する限界流速を算出した所、実験条件によらず同一材料ならばほぼ一定となった。底板から排出された土砂の粒度分布を調べた結果、侵食発生直後は細粒分の流出割合が非常に高く、侵食が継続するにつれこの割合が減少していく事が示された。侵食量は動水勾配の大小に依存する部分が大きかったものの、長時間浸透流を与えたケースでは一定時間における侵食量や排水濁度が徐々に上昇していく傾向がみられた。ただし底面メッシュ径を 1mm から 4mm に変えて実施したケースでは、侵食量が非常に大きくなり、排出土砂の粒度分布も細粒分含有率が低い結果となった。底面の拘束が殆ど無く、底面付近から集中して土砂が抜け出ていると考えられる。侵食実験終了後は一部の試験で貫入抵抗を測定した。その結果侵食量に比例して貫入抵抗が減少していく傾向がみられ、この傾向は特に地盤下部で顕著であった。濁度と侵食量はよく相関があり、濁度を侵食量推定の目安として用いる事が可能である事が示された。

三軸侵食実験は、通常用いられる三軸試験装置を改良し、供試体内で侵食が発生することを可能とした装置である。1)一次元円筒侵食実験と同様、底面に 5mm 径の穴が複数空いた底板が設置されている。実験はまず供試体底面から水を浸透させ地下水下状態を模擬した後、供試体上下と水タンクを接続し、下部の水タンクに負圧を掛ける事で下向き浸透流を発生させた。侵食の有無、侵食量は底板の上に敷いたフィルター材のメッシュ径、下向き浸透流量の違いにより調整をした。下向き浸透流終了後排水条件でせん断を行った。フィルター径の大きさの違いにより、侵食量にはかなりの差がみられた。また実験中水の浸透前、浸透後、下向き浸透流終了後（せん断前）の 3 回微小ひずみ繰り返し実験を行いヤング率とポアソン比を測定した。また一部条件ではせん断前に再圧密を加え拘束圧を上昇させた。密度は全実験条件でほぼ同一となるように調整した。

実験の結果、侵食量によらず残留強度は同一密度、拘束圧条件ならば全実験条件でほぼ一定であった。ピーク強度に関しては、侵食が全く発生していないケースと侵食量が 1%程度のケースを比較すると、両ケースで侵食後の密度に殆ど差がないにも関わらず、侵食が発生したケースでは約 5%ピーク強度の低下がみられた。偏差応力の低下は特に軸ひずみが 5%程度以内までの範囲で顕著であり、軸ひずみの増加に比例して偏差応力の低下は線形的に解消した。偏差応力の低下程度と侵食量には相関がみられた。具体的には 1%程度の侵食量で約 20%偏差応力が低下した。また密度低下による偏差応力の低下とその密度低下に相当する土が侵食を受けた場合を比較すると、2.5 倍程度偏差応力の減少程度は大きかった。侵食による強度の低下が、単なる密度低下のみにより評価が行えるものではない事を示している。ヤング率は侵食が発生したケースにおいてのみ浸透流終了後に低下がみられた。侵食前後でひずみは鉛直方向では殆ど変化が無かったが、管周方向と体積ひずみは下部に

においては排砂率に比例して増加し、上部においては殆ど変化をしない結果となった。またまたせん断終了後供試体の断面を電子顕微鏡により観察した結果侵食が発生した供試体においては、特に下部において約 0.2mm~0.4mm の空隙が観察され、侵食により地盤内部が乱された事が明らかとなった。

円筒入り模型実験においては、底部に幅 5mm のスリット状の開口部をもつアクリル土槽において地中構造物を模擬した円筒を模型地盤内に設置し、地盤上面から一定量の水を浸透させ開口部からの侵食とそれに伴う地盤変形の様子を明らかにした。その結果浸透流は円筒の存在によって変化し、円筒周囲で浸透流が集中し地盤変形、空洞形成が引き起こされることが示された。また細粒分まじり砂と均質砂では、変形の様子は殆ど変わらないものの、細粒分まじり砂では変形が発生していない範囲でも貫入抵抗が低下しているのに対して、均質砂では変形した範囲でのみ著しく貫入抵抗が低下した。細粒分混じり砂では地盤の広い範囲で細粒分の抜け出しが発生したものと考えられる。

一次元円筒空気圧上昇実験においては、不飽和地盤に置いて急激な浸透が発生した場合、侵食と共に空気地盤内での封入が起こり、空気圧による表層地盤の破壊が起こる可能性を基礎的な実験で検討した。地盤表層部からの降雨浸透と地下水位上昇が同時に発生した状況を想定し、アクリル円筒内で表層部の含水比が高い状態で円筒下部からの浸透流を発生させた。その際地盤表層部の変位と円筒内で空気圧上昇を計測した。実験の結果上向き浸透流の発生により表層の飽和地盤が持ち上がる現象が観察された。また表層地盤が持ち上がり始める空気圧は、表層地盤の重量とほぼ一致した。実地盤でも、急激な降雨により表層地盤が乱され侵食を助長している可能性が示唆された。

以上の実験により、既往の研究を参照する事で侵食には 2 つの機構：①底面からの抜け出し ②地盤内部の細粒分の抜け出し がある事が示唆された。①底面からの抜け出しは流出口と地盤の粒径の比に影響されると考えられ、場合によっては目詰まりが発生すると考えられる ②細粒分の抜け出しは広範な範囲で発生し、土骨格構造を劣化させ地盤の強度に影響を与える。ただし既往の研究で示唆されるように材料の粒度分布によって侵食発生可能性の有無がきまると考えられる。2 つの機構の相乗効果によって流出口付近から徐々に侵食が発生し、目に見えない土骨格構造の劣化が引き起こされ広範な範囲で強度の低下が発生すると考えられる。

また粒径により分けると、侵食は a)シルト分以上の侵食 b) 粘土分の侵食に分けて発生していると本研究では考察した。b)は主に底面付近で発生し、地盤内に大きな空隙や乱れを引き起こす。ただし三軸試験条件においては拘束圧がかかっている為にある程度圧縮され、インターロッキング効果が発現していると考えられる。b)粘土分の侵食は供試体全体で発生していると考えられ、供試体全体でのヤング率、割線剛性の低下を引き起こしていると考えられる。

えられる。

本研究の知見をまとめると以下の様になる。

- これまで着目されてこなかった小規模な内部浸食についての実態把握を試みた。
- 排水濁度と排砂量には相関があり、濁度による簡易な評価が可能であった。また、目視での判断が難しい濁りも数値化し評価する事ができる事が示唆された。
- 内部浸食はある動水勾配を超えると発生し始め、この動水勾配は密度により大きく変化した。ただし間隙内流速に換算すると同一地盤材料においては地盤条件によらずほぼ一定の値となった。
- 長期的な浸透流で侵食量は徐々に増加し、大きな粒子が抜け出すようになる現象がみられた。
- 粘土分をある程度含む地盤においては、健全な土構造物ならば透水性が低く侵食発生可能性は極めて低い。ただしゆるみ、ソイルパイプや空洞が存在する場合は危険性が高まる。具体例としては地中構造物の影響により浸透流が集中した場合や、空気の封入により表層地盤の乱れが生じた場合に、動水勾配の局所の上昇やゆるみが引き起こされる事が挙げられる。
- 侵食量 1%に満たない小規模な侵食でも、せん断強度・剛性は、軸ひずみが 5%までの範囲で明らかに低下し、この低下程度は単なる密度低下を大きく上回っていた。侵食による土骨格構造の変化によると考えられる。これまでは単純な密度低下のみ影響として考えられてきたが、実際は侵食履歴の影響を考慮しなければならない事が示唆された。本研究では江戸崎砂によるこの現象の簡易な定式化を行った。今後は異なる材料や密度条件で実験を行い、式のパラメータが如何にして決定されるかを検討する必要がある。
- 侵食による土骨格構造の劣化は浸透流が発生した広範な範囲で発生し目視での観察は不可能であった。また供試体内で一様ではなくバラつきがある事が示唆された。
- 上記構造変化はせん断や圧密により解消されるが、逆に言えば手を加えなければ侵食により発生した土構造物の劣化は不可逆的であると考えられる。
- 模型実験において、地中構造物が侵食による地盤変形に影響を与える事が確認された。また粒径の揃った材料においては変形箇所でのみ貫入抵抗が減少したが、ギャップ粒径を用いた場合変形箇所以外でも広範な範囲で貫入抵抗の減少が確認された。細粒分の流出によると考えられる。
- 表層部に飽和層を作り、下部の不飽和層から水を送り込む次元円筒実験を実施した。この結果不飽和層の空気が水の流入により圧縮され、空気圧が上昇する事で地盤の破壊が起きる現象が確認された。測定した空気圧のデータと、水の流入量から推測した空気圧のデータは破壊の発生まで概ね一致した。破壊の発生後は水の流入量に比例して変位が拡大し、こちらも計算値と概ね一致した。