

第4回（令和4年度第1回） 基礎地盤の変形評価に関する研究小委員会 議事録

1. 日時：2022年7月4日(月) 13:30~17:00
2. 場所：WEB会議（Cisco Webex Meetings）
3. 出席者
委員長： 谷（東京海洋大）
委員： 今林（九電）、大鳥（東京都市大）、岡田（電中研）、金戸（東電）、河井（東北工大）、岸田（京大）、古関（東大）、高尾（原エネ協議会）、壇（熊本大）、中村（日大）、橋（中電）、久田（工学院大）、三橋（構造計画）、山田（東北大）、吉見（産総研）、若井（群馬大）
幹事長： 澤田（電中研）
幹事： 石丸（電中研）、瀬川（北海道電、代理）、伊藤（九電）、伊藤（原電）、及川（東電）、家島（中国電）、加藤（大林）、工藤（日本原燃）、小早川（電中研）、小林（鹿島）、坂本、沢津橋（電中研）、徳永（九電）、中村（電中研）、中村（電源開発）、西本（北陸電）、橋本（東北電）、羽場（大成建設）、兵頭（東電設計）、山口、吉田（電中研）
常時出席： 磯谷（関電）、小川（東電）、菊池（東北電）、佐々（電源開発）、中村（中部電力）
4. 議事：
 - (1) 委員長あいさつ、前回議事録確認
 - (2) WG活動報告等
 - ・断層の数値解析WG
 - ・液状化の影響評価WG
 - ・基礎地盤の変形評価のクライテリアの検討
 - ・今後のスケジュールについて
 - (3) 話題提供
 - ・柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉 原子炉建屋等の基礎地盤及び周辺斜面の安定性について
 - ・水～土連成解析による液状化・再液状化現象のシミュレーションと地盤の速度依存性を考慮した変状地層の形成過程の推定
 - ・地震時の岩盤すべりのシミュレーション
 - (4) その他

※配付資料

資料 R4-1-1 議事次第

資料 R4-1-2 委員名簿

資料 R4-1-3 前回議事録

資料 R4-1-4-1 断層の数値解析WG活動報告

資料 R4-1-4-2 第1回断層の数値解析WG議事録

資料 R4-1-5 「液状化の影響評価WG」活動内容について

資料 R4-1-6 クライテリアの検討と事業者へのアンケート

資料 R4-1-7 小委員会スケジュールについて

資料 R4-1-8 話題提供1：柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉 原子炉建屋等の基礎地盤及び周辺斜面の安定性について

資料 R4-1-9 話題提供2：水～土連成解析による液状化・再液状化現象のシミュレーションと地盤の速度依存性を考慮した変状地層の形成過程の推定

資料 R4-1-10 話題提供3：地震時の岩盤すべりのシミュレーション

5. 議事内容

(1) 委員長あいさつ、前回議事録確認

谷委員長：本日は断層 WG と液状化 WG の他に、クライテリアに関するアンケートについての紹介を行う。小委員会は WG 中心の活動となり、今後のスケジュールについて議論を行う。その後、3 名の方に話題提供を頂く。

澤田幹事長より前回議事録が紹介され、承認された。

(2) WG 活動報告等

・断層の数値解析 WG

断層の数値解析 WG の活動について、澤田幹事長より説明があった。

・液状化の影響評価 WG

液状化の影響評価 WG の活動について、石丸幹事より説明があった。主な質疑、コメントについて以下に示す。

三橋委員：遠心力模型実験フィッティングの方が全体的に実験結果を再現するということが、どのような要因で良く合うのか？また、マルチスプリングで遠心力模型実験フィッティングの検討をされていて、カクテルグラスでも同様の検討をすると思うが、パラメータが増える。このあたりの懸念事項があれば教えて欲しい。

石丸幹事：2 点目のカクテルグラスモデルについては、要素試験を用いたもので実験結果を概ね再現できていると判断した。このため、遠心力模型実験を使ったフィッティングは必ずしも必要ではないと思っている。1 点目のマルチスプリングモデルについては、もともとダイラタンシーが強く発揮される材料は、うまく再現できないと考えており、その結果として P.14 の要素試験フィッティングでは保守的な評価となっている。遠心力模型実験フィッティングでは、液状化強度を過度に大きくし、解析手法のメカニズムを無視して設定している状況である。基本的には数値解析手法を高度化していく方が妥当だと思う。

谷委員長：P.5 の課題を見ると、液状化しにくい地盤での適用例が少ないとのことだが、一般的には過去に液状化などの変形が生じたところを対象に数値解析を行い、予測性能を示すことが多い。液状化しにくい地盤の場合、過去の大地震であまり変形が生じなかったもしくは全く生じなかったところを対象に検討をすることは考えられないか？模型地盤で洪積砂層のセメンテーション（年代効果）を再現するのはとても難しいと思う。

石丸幹事：岩ずりについては、北海道南西沖地震などの事例を対象にしたい。洪積砂については、新潟県中越沖地震時の柏崎刈羽のものでできるものがあると思っている。よい

題材を見つけていないというのが現状である。

河井委員：P.13 の要素試験フィッティングは、液状化強度曲線だけを見てフィッティングしているために負の過剰間隙水圧の発生を再現できていないだけで、水圧の低下スピードと、低下してからどれだけひずみが伸びるかを分けてフィッティングしていけば再現ができるのではないか？AもBも同じ解析コードを使っているならば、解析コードが持っている再現性能とパラメータ設定を別々に考えないと、見るべきものを見ないで設定するとこのようになるという話ではないか？土の特性のどこを合わせないとこの問題については合わない、という方針でまとめる方が良いと思う。また、P.14のスライド左の要素試験フィッティングでは、水圧がすぐに上がっているのに、剛性がやわらかくなって位相遅れが出て、加振初期から位相が異なっている。これは要素シミュレーションにおいて、有効応力の下がり方を要素試験結果と合わせても合わないのか。また、液状化強度試験は等方状態で実施する試験であるが遠心模型実験では異方状態のため、繰り返し载荷における水圧の上がり方が合わないのか。また、模型実験で地盤を作る時にハンマーで締め固めて履歴を与えると思うが、その与え方が要素試験での供試体作製方法と違うのか。といった形で、水圧が上がってしまえば位相遅れが出るのは当たり前なので、なぜ水圧について解析の方が早く上がるのか、こういったところを細かく見ないと要素試験でフィッティングするのが良いとか、遠心模型実験でフィッティングするのが良いとか、保守的だとかそういう話ではできないと思う。水圧が上がる方が保守的になるかというところでもない場合もあり、深いところに液状化層があり、上は不飽和層で非液状化層だと、液状化層が免震層となって上に入力をあげなくなるとそれが保守的にもならないので、保守的かどうかの判断も解析コードに付随するのではなくて実施した結果に付随してくる話である。解析コード自体が保守的であると判断できるのであれば使いやすくして良いが、現実はその簡単ではないので、そういったところに注意をした方が良いと思う。

石丸幹事：要素試験のシミュレーションの時、マルチスプリングモデルだと、基本的にはひずみの伸び方に着目してパラメータ設定をしたが、その場合水圧の上がり方をフィッティングすることが難しかったところに起因していると思う。カクテルグラスモデルで行うと、要素試験でフィッティングしたものでほぼ説明できる結果となっているので、現状のやり方自体はおかしくはないと考えている。

河井委員：FLIPのように、弾塑性構成式ではなくフィッティングするモデルならば、入っているパラメータ全部を調整すると水圧の上がり方とひずみの伸び方を別々に制御できないか？今回その設定の時、慣用的に動かしているパラメータだけをチェックしたのか、全部のパラメータをチェックしたのか気になった。

小林幹事：マルチスプリングモデルについて、基本的には変相角を除くすべてのパラメータの感度を試している。パラメータの指標値を超えた範囲での設定も試している。結果として、剛性の落ち方と水圧のところで、岩ずりのような材料の再現を全て両立するのは

無理だということにたどり着いている。カクテルグラスモデルだとダイラタンシーのところを細かく設定できるので良いのではないかと思っている。要素試験フィッティングも必ずしも要素試験の全てをフィッティングできているわけではないので、液状化に至るようなひずみののび方の最後のところを何となく合わせているのが A の方で、B は水圧を捨てて水平変位を合わせにしている。現象のある側面にだけそれぞれフィッティングしている形で、必ずしも A の方も要素試験を全て再現できているわけではない。

河井委員：変相角を変えていないということだが、礫と砂だと結構変相角が違っており、変相角を超えた後に膨張が始まるので、水圧のヒゲを出すには変相角が効いてくると思う。変形量にはもしかしたら効かないかもしれない。鉛直変位がほぼ加振中に出ているが、セメント改良盛土の沈下には、下の層が排水しつつ圧縮するのと、せん断によって横に移動する部分なのかという 2 つのメカニズムがあり、もし排水で沈下しているとしたら、非排水で実験した室内試験の結果をフィッティングしてもダメなのかと思う。両者の割合を確認できれば、P.14 で主張していることの裏付けができると思った。

石丸幹事：ご指摘の点を踏まえ、検討する。

・基礎地盤の変形評価のクライテリアの検討

基礎地盤の変形評価のクライテリアの検討について、小早川幹事より説明があった。

・今後のスケジュールについて

澤田幹事長より、活動の中心を WG とし、小委員会の開催頻度を 4 回/年から 3 回/年に減らすことが提案され、承認された。

(3) 話題提供 (1 件目)「柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 原子炉建屋等の基礎地盤及び周辺斜面の安定性について」

柏崎刈羽原子力発電所における基礎地盤、周辺斜面の安定性について、及川幹事から話題提供があった。主な質疑、コメントについて以下に示す。

三橋委員：P.56 で基礎地盤のすべりについて検討し、パラメータをふって最終的に一番厳しいすべり面を抽出している。どのような要因で 67.5 度のすべり面が抽出されたのか？

及川幹事：立上角度、立上位置の設定は、この範囲を網羅できる形である程度決め打ちをしている。結果として 67.5 度が一番厳しくなっているが、他のケースと比べてすべり安全率が大きく変わっているわけではない。結果としてそのようになっている。

三橋委員：設定を変えても大差はないか？

及川幹事：極端に変わるわけではなかったと思う。

羽場幹事：保守的な条件として基礎の抵抗を取り払う検討をしているが、事業者が自主的に

行って提示したものなのか？疑似 3 次元解析のどのような結果を規制として受け入れられてもらえるのかという点について興味がある。

及川幹事：奥行き方向に無限に続いてすべるわけではないので、抵抗があると思っている。側面の抵抗をある程度見込むのが現実的な評価となると思う。一方、2 次元解析ですべり安全率 1.5 が基本的な考えとしてあると思うが、3 次元的な断面で抵抗をみるということは、すべり安全率 1.5 とのセットで齟齬が出るのではないかというコメントが当時出ていた。それを受けて、側方の立上の抵抗をみない形で保守的な検討を実施したと聞いている。

羽場幹事：体系的に疑似 3 次元や 3 次元の基準があるわけではなく、いろいろ検討をしながら評価の方法を決めていったという理解でよいか？

及川幹事：そうであると思う。

家島幹事：P.58 で、3 次元的には最小すべり安全率が 1.6 となっているが、それぞれの 2 次元断面の結果がもしあるとすれば、建屋回りが厳しく、端にいくほど安全率が高くなる結果となるのか？

及川幹事：建屋回りは厳しい傾向ではあるが、断面によって安全率が極端に変わる傾向はなかったと思う。

兵頭幹事：疑似 3 次元のために地盤だけのすべりも出てきて、多少低いものはあった。大まかな傾向としては説明されたとおりで良いと思う。

河井委員：P.47 ですべり線形状のパターンの、両端を切る形で検討したこの範囲で、全体が動いたところで、接続されている構造物には影響がないのか？逆に、ずれが生じると困る構造物や接続部という観点ですべりブロックを設定すると、もっと狭い範囲の検討だけで良くなるのか？さらに、ダクトみたいなものが耐震ジョイントごとに大きくずれてもよいなら、限界値を決める時に耐震ジョイントの変位まで許すなどと限界値を決めやすいのでは。その時にこのスケールはこの中まるごと動いた場合には、相対的な位置関係が変わらなければ、影響が出ない範囲なのか、それとも影響が出るのか、影響が出ない範囲の観点ならもっと狭くできるのか？この図について補足をいただきたい。

及川幹事：ご指摘のとおりだと思います。建屋や建屋に付随する配管などに影響すると考えるのであれば、もっと狭くて良いと思うが、すべり線の設定範囲、立上の角度や位置、断層を通るラインなど、パラメータスタディをして一番厳しいケースで 1.5 を満足するところが基準の考え方の基本的ところであり、実際は影響が小さくても良いと思うが、審査する観点で言うとそれで良いというのは難しいと思う。

河井委員：恐らく、すべりの評価ありきということで、そもそもすべったところで機能にどのような影響があるかという話はずっとないのではないかと機能維持ではなく不安定化を起こさないという方針だから。将来、合理化の際に参考になればと思い、質問した。

岡田委員：F2 断層の物性は直接求めたのか？それとも他の断層から類推したのか？

及川幹事：正確には回答できないが、断層については試掘坑でブロックでサンプルを取って

きて、物性試験を行っている。F3 は粘土や破碎部などもっと大きいものを取ってそれで代表させて F-K 断層の物性値を設定していると思う。F2 ピンポイントで、あるいは断層ごとに変えているわけではない。F2 そのものではなかったと思う。

岡田委員：深いところに F2 があるのでできないだろうと思っていた。保守的なところをもってきているので、このようなところにも保守性があると理解した。

(3) 話題提供 (2 件目) 「水～土連成解析による液状化・再液状化現象のシミュレーションと地盤の速度依存性を考慮した変状地層の形成過程の推定」

液状化・再液状化シミュレーションおよび変状地層の形成過程推定について、山田委員から話題提供があった。主な質疑、コメントについて以下に示す。

小林幹事：P.18 の再液状化について、左下図の液状化の履歴の与え方において、応力状態が等方状態に戻ったところで a-e までであるが、右図で軸ひずみが 0 に戻っているのは、ひずみは特に戻さないが図示する時に 0 にセットして同じひずみで行っているという理解でよいか？

山田委員：そのようになる。最初の状態からみると、せん断開始時でもひずみが残っている状態となる。

小林幹事：P.19 で液状化履歴を与えてその後さらに液状化の試験を行う下図について、異方性が左右に両方あるのが興味深い。現実問題と照らし合わせて考えると、最初の地震で地震がどこで終わるかによって次の再液状化の強度が支配されるというのが本当にそうなるのか興味深い。余震がすぐに発生する状況だとありうると思うが、例えば 10 年や 20 年後に地震が起きる場合、その間の長い圧密の時間で異方性が少なくなるなど、現実問題と照らし合わせるとどうなのか興味深い。このあたりの見解はあるか？

山田委員：実地盤を対象とした問題の中でそのようなことが起きるかということを考えての水-土連成計算であった。1 回目と 2 回目の間に 1 日おいて、過剰間隙水圧がほぼ 0 まで消散させているが、解析上はそれ以上おいても何も変化しない。ただし、実際の問題として 10 年経つ間に、我々が知らない変化が起きるかもしれない。私が知っている力学の範囲では、10 年ぐらいであればそれほど変化しないと思う。

小林幹事：P.35 のモデルで、途中で複合負荷から Drucker-Prager 負荷に切り替わっている。それぞれの降伏曲面の負荷面の比を調整すると切り替わるタイミングが変わるのか？

山田委員：切り替わり自体は、途中で示した負荷基準に則って自動的に判定されるものとなる。ある状況でどちらの負荷がのっていくかという話となると、それはやわらかい応答を示す方の負荷にのりやすい。ゆっくり硬化する方にのりやすい性質がある。

小林幹事：一般的な応力経路になってもあうものなのか？ある程度一般性をもって設定できるものなのか？

山田委員：多様な実験をしてパラメータを決めていくと、がんばった分だけ合いやすい。但し、モデル化の思想としては、合わせた試験だけではなく、それ以外の境界値問題、その中でもかなり複雑な応答を示すものに耐えられるモデルを作りたいという発想で行っている。

古関委員：P.67 で、1 回目の液状化時に、残留ひずみはいくつぐらいになっているか？

山田委員：今すぐには分からないが、2 回目の応答を見る限り、図で言うと右側でとまっており、最大でも 8%以内だと思う。

古関委員：要素試験の結果からすると、どこで止まったかがその後の 2 回目の挙動が違くと理解した。そういった比較計算は行ったか？

山田委員：計算は 1 種類しか行っていない。そのあたりを調べてみたい。

河井委員：実務の観点で、履歴次第で液状化強度がこれだけ変わると、ばらつきが大きくなって評価しづらい。ただし、大きな変形の際は、繰り返し実験した時の初期ひずみを 0 に戻さずにどんどん重ねていくと、サイクリックモビリティが出ているところの変形にもう少し法則性があると予測できるのかと思った。0 に戻さずに終わったままのひずみから重ねた図は作成したか？

山田委員：P.67 で示した図は戻していない。このため、少し右に偏った図となっている。

河井委員：1 回目と 2 回目の図を見ると、2 回目は入力半分にも関わらず水圧がすぐに上がったが、一番左の図のひずみの幅は少し狭いか同じぐらい。すぐに液状化したからといって大きな変形が出るわけではない。軟化しているので位相遅れが生じてあまり揺れなくなっているところもあり、似たような結果となっている。履歴によって液状化に至るまでの強度が低下したからといって、液状化したら直ぐに変位が大きくなるということではなく、先に液状化して軟化してしまえばそれほど揺れも大きくなり、それまでに経験した振幅を超えて変形する時はモビリティが生じて変形が抑制されるなら、あまり実務で不利にならないかと思った。

山田委員：おっしゃるとおりである。液状化のしやすさは変わっていくが、一回あたりに発生するひずみは、密になっていくほど少なくなっていく。液状化してもあまり被害が大きくなるらないというのは、密度が上がることに关してはあるかと思う。

河井委員：盛り土について、左右の法先方向に残留変位が出る。幾何学的形状でどちらに止まるかが決まっています、例えば地震波形が対称な波形であれば、その方向に次の地震も変形するので、あまり気にしないで良いと思うが、極端に非対称な地震波形があつて液状化すると、右と左で変形量が極端に違う可能性があるか？そのような計算を行ったことがあるか？

山田委員：そのような計算は行っていないが、地震波形自体に片寄りがあれば、異方性がどちらかに片寄った状態で液状化が終了する可能性が高くなる気はする。

河井委員：実務で不利になることがあるとすれば、このようなことかと思った。

(3) 話題提供 (3 件目) 「地震時の岩盤すべりのシミュレーション」

地震時の岩盤すべりのシミュレーションについて、若井委員から話題提供があった。主な質疑、コメントについて以下に示す。

古関委員：連続体のため、モデル化はひずみベースだと思う。一面せん断は変位、実現象でも変位しか分からないが、その換算はどのように行ったのか？

若井委員：今回の場合、10 mm の厚さで平均せん断ということでひずみと変位を換算している。

澤田幹事長：有限変位で留まる場合、斜面の変形、変位は予測できるか？

若井委員：難しい。層理面に作用する繰り返し载荷による平均的な仕事と層理面を構成する材料の靱性を比較して評価するまでしかできないのではないか。すべり面が平面状であり、物性を測りやすい現場だったので、力学的な整理法でどこまで行えるかを試みたということである。考え方としては、与えられた力とどのくらいのねばり強さを持っているかの関係で許容できるかどうかという話である。

(4) その他

澤田幹事長：次回以降、可能であれば対面を基本とする形で小委員会を開催したい。

以上