

堤体の地震時安定性の評価法の問題点、新しい評価法

Problems for Evaluating the Seismic Stability of Small Earth-dams and a Proposal of New Approaches

田 中 忠 次 (たなか ただつぐ)

東京大学名誉教授 Nonsolan 研究会

1. はじめに

コンピューターが導入される以前は、構造物に作用する地震波のように複雑な外力をそのまま扱うことは困難であったため、一定の無限時間に渡り作用する加速度、すなわち震度に置換えることが行われてきた。地震波から震度に置き換える定式化された方法は必ずしも明確ではないため、構造物の被害状況を判断しつつ経験的に震度の決定が行われてきた。ため池・アースダム堤体の安定性を評価する設計法としての震度法もこのような経緯をへて現在に至っていると言えよう。これまでの地震災害の調査などから適切に設計・施工されたアースダム（通常堤高が15 m 以上をダム、15 m 以下の場合のはため池と分類することが多いが、築造された歴史的経緯から15 m 以上でもため池として扱うこともある）は相当な地震にも耐え得ることが知られている。しかし、兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では、ビル、橋梁などの構造物の被害が著しく、震度法では対応できないケースが多く発生した。そのため地震時における動的な外力に対してため池・アースダムの変形挙動を検討する事は重要な課題となっている。今回の東日本大震災のように異常な長時間にわたる強い揺れにより被災したため池もかなりの数に上り、アースダムにおいても沈下、クラックの発生が見られ、藤沼湖のように決壊した例もある¹⁾。長時間にわたる揺れにより、繰返し载荷による間隙水圧の上昇、あるいは揺すりこみによる変形が進行的に生じたと思われるケースが多い。上述のようにアースダム設計に適用されている震度法は経験の蓄積の上に用いられてきた方法であり、レベルⅡの地震に適用するには一定の限界がある。ため池・アースダムの地震時における繰返し载荷による土・地盤材料の挙動を解明し、間隙水圧の評価、塑性変形を表現できる手法の開発に繋げていくことが必要である。

ため池・アースダムの安定性には、極限平衡法が適用され、実務設計では円弧を仮定した分割法が用いられる。しかし、極限平衡法では力の平衡条件しか考慮されていないため、解の妥当性について不安が残る。さらに多くのため池・アースダムでは入り組んだゾーン構成もまれではない。したがって、堤体の破壊形状についても単純な円弧などで近似できないこともあり、またすべり面上で動員される強度を一定と仮定しているため、局所的に

強度が低下し徐々に破壊が起こるいわゆる進行性破壊について評価することが難しい。しかし、現在のところレベルⅠ地震動に対しては、震度法が適用されるため、その精緻化を図っていくことは大事である。

2. 土の応力-ひずみ関係について

ため池・フィルダム堤体、地盤の崩壊は、地盤材料のピーク強度のみで決まるとは限らないため、ピーク以降の応力-ひずみ関係も解析に取り入れなければならない。また、ピークを越えひずみ軟化状態に入ると一定の厚さを有するすべり層、すなわちせん断帯が発生する。いわゆる変形の局所化が起こり、せん断の進行に伴いすべり層が生じた場合、スケール効果が現れる。このスケール効果は構造物のサイズが大きくなればそれだけ破壊し易くなるという効果であるから、注意が必要となる。もちろん材料の残留強度を用いた場合より低下することはなく、下限は存在するが、実材料の力学特性を反映した解析を行うためにはせん断帯の発生の効果を直接的あるいは間接的に取り入れた解析法の確立が必要となる。粒状材料の場合、せん断帯の厚さは平均粒径に依存しており、15～20倍である。粘土についてはまだ十分研究されていないため、単純に粒子径（粘土では土粒子の形状は板状であることが一般的である）の何倍とは言えないが、いずれにしろ厚さを有する帯状領域にひずみは局所化する。ピーク強度を越え、ひずみ軟化を示す地盤材料の場合、この厚さを無視することができない。もちろん、地盤材料が破壊に到れば一定強度を示すという単純化を行えば（完全塑性の仮定）、せん断帯の厚さを無視して「せん断面」という扱いを行ってもかまわない。従来のすべり面を仮定する古典解法ではこのような単純化を行っている。しかし、仮定の妥当性あるいはその限界を見極めた上で適用する（安全率でカバーする）ことが大事であろう。

変形の局所化が起こり、せん断の進行に伴いすべり層が生じた場合についてさらに敷衍したい。室内実験のような小スケールのモデルダムと原型のフィルダムでは、その挙動が異なることは実務技術者にも直感的あるいは経験的に理解されている。しかし、スケール効果は規模が大きくなるに従い応力が増え、平均応力が増すにつれ粒子破碎などによりフィル材の内部摩擦角が減少するという現象に帰着させることはできない。もし平均応力

よる内部摩擦角の低減で扱えるなら、すべり面の位置を考慮し、対応する拘束圧を与えた要素実験で得られた強度パラメータを用いれば良いし、古典解が使えない複雑なケースでは遠心載荷実験でシミュレートすることが可能であろう。ところが、ひずみ軟化を示す材料では、せん断帯の厚さ（粒子径）が重要な役割を果たすため、遠心載荷実験による再現性も一定の限界がある。

3. 数値解析の適用性

アースダム築堤時の変形解析、粘性土から成るコア材の圧密による沈下の解析に有限要素法が適用され、実測結果と比較し得るような良好な結果が得られている例も少なくない。さらに堤体の破壊解析に有限要素法に代表される数値解析が有効であり、単に変形を求めるのみでなく、崩壊に至るまでの変形すなわち安定問題までを視野に入れた解析が可能になってきている。

さて、上述のようにひずみ軟化が生じるとせん断帯、即ちひずみの局所化が起こる。この局所化が原因となり、通常の弾塑性有限要素解析を適用して、締固めた土質・地盤材料のようなひずみ軟化を示す材料の計算を行うと、客観性のある解が得られなくなるという深刻な困難が存在することが分かってきた。有限要素法では解を得るためにメッシュを用いた計算を行う。このメッシュ分割の精粗は多くの場合、解析者の経験・主観によって決められるものであるが、一定以上に細分化されたメッシュを用いれば、通常の弾性問題などでは解がメッシュに依存しない、すなわち客観性が保証された解が得られる。しかし、ひずみ軟化を生じる材料ではこの客観性が失われる。解析において客観性を得るためには、例えばせん断帯に関わる特性長さを導入してこの問題を克服しなければならない。いわゆるスケール効果はこのようなひずみ軟化を伴う進行性破壊によることも明らかにされてきている²⁾。

また、地盤関係では三軸試験、平面ひずみ試験を有限要素法でシミュレート（応力の一様性を前提とすれば、1要素でも可）して構成関係を確認し、そのまま実在のアースダム、地盤などに適用している例も見られるが、この方法には注意が必要である。弾塑性挙動を境界値問題に適用する場合、用いる要素に各種のロッキング現象が生じるため、弾性問題に用いられている多くの有限要素が不適格となるからである。多要素を用いた境界値問題としての検証が必要となる所以である。

4. レベルⅡ地震への対応

冒頭に述べたように、阪神・淡路大震災の構造物・地盤に関わる設計に与えたインパクトは大きく、重要構造物・基礎地盤に関わる設計においては、レベルⅡ地震動への対応という課題を達成することが求められるようになった。しかし、従来のように材料試験の結果から設計値を決める場合にも、安全性の視点から設計の各段階で最小値を採用していくことはもはや困難になりつつある。各判断レベルで安全性を考慮して低い値を採用していけ

ば、トータルとしては不経済な設計となってしまう。材料の力学特性を、要素試験を行って精密に測定し、材料特性を最大限に生かし、尚かつ安全性を設計上からも確保していくためには、ピーク強度から残留強度までを合理的に取り入れた解析法の開発・適用が重要となる。

粒子骨格の変形と間隙水の静的な連成（相互作用）問題が圧密であり、圧密解析は最終沈下（変形）にいたる時間的変化過程を明らかにすることが主たる目的であるため、排水が速やかに生じる砂質土、粒状材の場合は圧密解析の必要性はない。ところが、地震時のような相対的に短時間の現象では、砂質土の場合でも排水が生じ得ないため間隙水圧が発生し、動的な土粒子・水の連成解析が必要となる。地盤材料では土粒子骨格の変形のみではなく、水との相互作用が重要であり、それだけに扱いは複雑となる。地盤材料は静的に作用する荷重に対しては上述のように非線形特性を示すが、地震力を受ける際にも当然のことながら非線形挙動を示す。したがって、動的解析を適用するに当たっても材料の非線形特性を取り入れることは以前から試みられている。しかし、地盤材料の繰返し載荷条件での非線形特性を厳密に扱うことが著しく難しいことから、非線形特性を線形化して扱うことも行われている。等価線形化法とすべり面安定解析を組み合わせたニューマーク法による変形解析がかなり以前から試みられているが、ため池・アースダムでは繰返し載荷による強度低下を取り入れない方法ではクリティカルな場合への適用性はほとんどないと言える³⁾。ニューマーク法の修正が必要とされる所以である。なお、修正されたニューマーク法はその手法の特性から全応力解析となり、この場合はせん断帯の発生と破壊時のダイレイタンシー特性は陰的に考慮されなければならない。ただし、全応力解析は非排水状態で実施する必要があるが、間隙水圧の消散は扱えない。

5. 構成式・動的解析に必要とされる条件

予想を超えた巨大地震に対する堤体の安全性を確保していくためには、繰返し特性を扱える弾塑性構成式を適用した有効応力による動的解析も有望であり、解析手法の開発とその検証が課題となる。もちろん、検証にあたっては、1g重力場、遠心場での動的模型実験あるいは被害ダムの詳細な調査などを通じて経験的な蓄積を進めていくことが必要であることは言うまでもない。ここで、解析に用いられる土の応力-ひずみ関係、すなわち構成式は静的から動的解析まで一貫して使用できるものでなければならないという視点は重要である。まず、三軸試験あるいは平面ひずみ試験で物理的根拠をもって構成関係式のパラメータを決定し、これを基本に静的境界値問題から、間隙水圧の発生を取り入れた解析などの動的解析までを実施することが望まれる。しかし、これまでの経緯をみると強度定数と言われるせん断抵抗角も、実際には応力レベル依存性、異方性などのため複雑な様相を呈し、多くの構成モデルが提案され、問題に応じてアド・ホックなパラメータが設定され、必ずしも一貫しな

論 説

いという実態がある。要素試験レベルでのパラメータ設定においてキャリブレーションなどによるパラメータの微調整は必要なことではあるが、構成モデルは静的と動的に区別するのではなく一貫して物理特性を明確にしつつ、適用していくことが必要であり、このことによって始めて解析経験の蓄積も可能となる。実際に用いられる解析コードは賽の河原の石積みのようなパラメータ設定を回避することが肝要であろう。

橋梁など構造工学関係では耐震解析の一手法として、ブッシュ・オーバー解析（漸増載荷解析法）も実施されている。この解析は、構造物の複雑な地震時の非線形応答特性を考慮した解析モデルに対して、地震荷重を静的に漸増載荷して荷重と変位の関係を得ることで、破壊過程の確認や保有耐力の算定を行う方法である。これは複雑な動的解析においても少なくとも限界状態は押さえておこうとするものであろう。ため池・アースダムの解析においても、震度法と動的解析における崩壊条件には調和・整合性が必要となろう。

6. 弾塑性構成モデルによる非排水挙動

動的有効応力解析の視点から、等方硬化降伏面、すなわち境界面の内部における非線形挙動を異方硬化弾塑性で表現した構成モデルの開発とモデル実験への適用などを行ってきたのでその紹介を簡明に行いたい⁴⁾。境界面内における弾塑性繰返し挙動を表現する構成モデルの定式化の要点は境界面、硬化関数及び塑性体積変化である。本モデルでは境界面、境界面内部の塑性硬化関数及びビストレスダイレイタンスをを表す方程式を要素実験に基づいて物理的に決定できる構成モデルであり、地震時の貯水状態におけるアースダム、ため池堤体の挙動解析への適用を目的とする。また、異方硬化構成モデルに加えて比較的単純ではあるが頑健な構成モデル（弾塑性とエンドクロニック理論を組み合わせた動的応答解析手法）も有効応力解析に有用であろう。有効応力による非排水挙動解析は破壊時のダイレイタンス特性、ひずみ軟化率及びせん断帯幅が明示的に与えられなければならない。ここでは、スペースの関係で1要素を用いて構成関係の挙動例を示すが、用いている要素は多要素解析に適用できる要素であることは確認している。すなわち、アイソパラメトリック一次要素に一点積分を適用し、アウアグラス・コントロールを施したロッキング・フリー（せん断、ダイレイタンスの両挙動に対して）要素であり、非線形解法には動的緩和法を適用している。

図-1は異方硬化構成モデルによる排水条件における応力-ひずみ関係（平面ひずみ試験の解析、応力、ひずみは鉛直方向の垂直応力、垂直ひずみ）の解析結果である。载荷の初期にわずかの繰返し载荷を与えてある。図-2は体積変化とひずみの関係である。

図-3は非排水条件における主応力差とひずみの関係を示し、図-4は同じ条件における主応力差と有効平均応力の関係を示す。応力差は100 kPaで上限に達し、ひずみは無限大に至る（図-3には5%を越えるひずみは

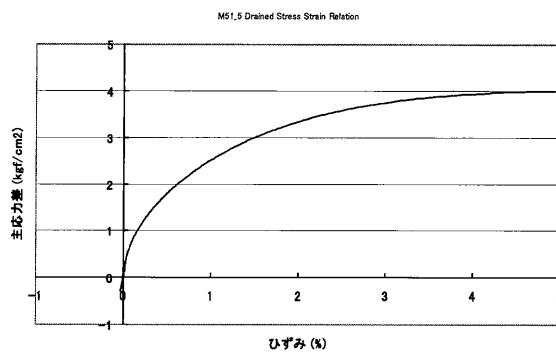


図-1 異方硬化弾塑性構成モデルの排水条件における主応力差とひずみの関係（平面ひずみ条件）

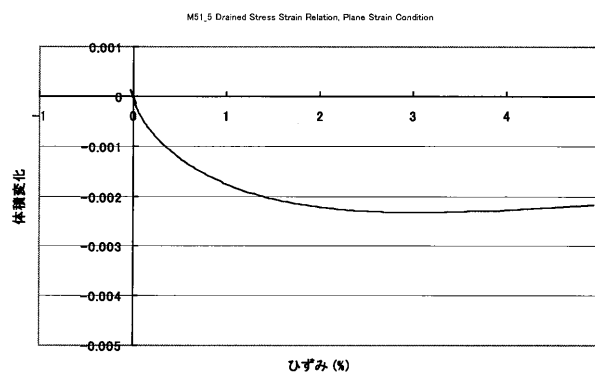


図-2 異方硬化弾塑性構成モデルの排水条件における体積変化とひずみの関係（平面ひずみ条件）

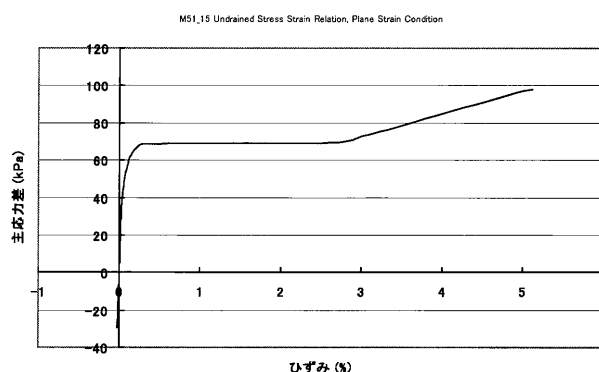


図-3 異方硬化弾塑性構成モデルの非排水条件における主応力差とひずみの関係（平面ひずみ条件）

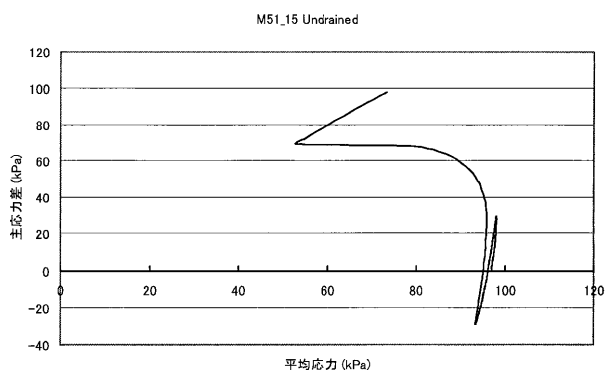
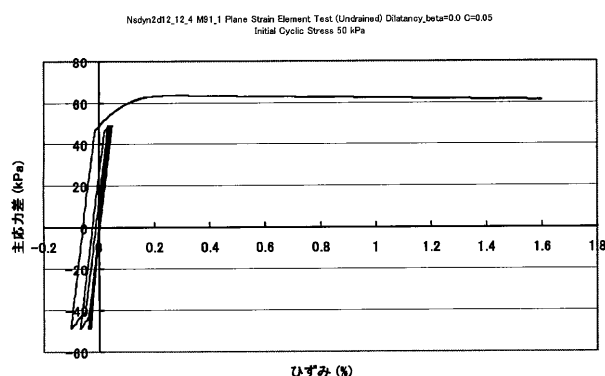
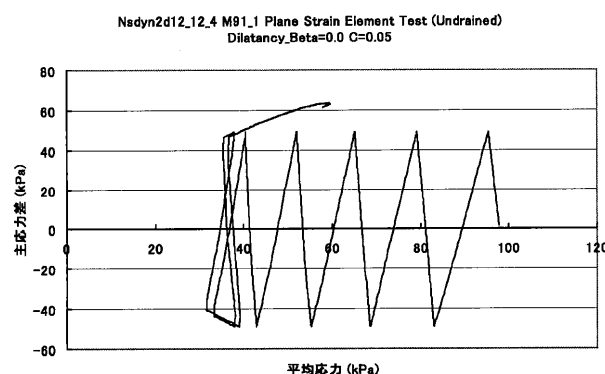


図-4 異方硬化弾塑性構成モデルの非排水条件における主応力差と有効平均応力の関係（平面ひずみ条件）



図—5 単純な弾塑性構成モデルの非排水条件における繰返し載荷とその後の単調載荷による主応力差とひずみの関係（平面ひずみ条件）



図—6 単純な弾塑性構成モデルの非排水条件における繰返し載荷とその後の単調載荷による主応力差と平均有効応力の関係（平面ひずみ条件）

示してない。また、せん断帯の厚さは 3 mm に設定)。このように異方硬化弾塑性構成モデルは砂の非排水挙動を初期の繰返し載荷から非排水条件下の破壊までを表現し得ると言える。

なお、簡便な手法として、弾塑性構成式とエンドクロニック理論を組み合わせた有効応力解析手法も可能性を有する。図—5 は非排水条件における繰返し載荷と単調載荷による応力とひずみの関係を示し、図—6 は同条件における主応力差と平均有効応力の関係を示す。本手法では非排水条件において繰返し載荷による間隙水圧上

昇を表現し、その後の単調載荷による非排水限界荷重も求めることが可能である。比較的単純な弾塑性モデルを用いて破壊条件に達したらひずみ軟化が生じ、最終的には残留強度に至り、体積変化が 0 となるモデルになっている。せん断帯を伴うひずみ軟化過程から残留状態に至るまでの間隙水圧挙動を表現でき、ロバスト（頑健）な実用手法として有望と言えよう。

6. おわりに

地盤材料の解析は、静的な場合でも適切な非線形解法、ロッキングを生じない要素を用いなければ限界荷重が得られないことはよく知られており、アースダム・ため池の非線形動的応答解析の前段階の解析としてプッシュ・オーバー解析のような検討は有効であろう。例えば、水平震度を漸増させ堤体のすべり破壊までの加速度を求め、震度法によるすべり面安定解析との比較・検討を実施することなどである。あるいは斜面問題と異なるが、静的フーチングの限界荷重を求めることが可能な解析法、構成モデルを用いているかというような検証である。1 要素を用いたシミュレーションで精度よく要素試験を再現し得たとしても、実際のため池・アースダムの多要素による解析への適用性は別に検討すべき問題であることは再度強調しておかなければならない。

参 考 文 献

- 1) 田中忠次・龍岡文夫・毛利栄征：東北地方太平洋沖地震による藤沼湖の決壊原因調査について，ダム工学，Vol. 23, No. 2, pp. 99～114, 2013.
- 2) Siddiquee M. S. A., Tanaka T., Tatsuoka F., Tani K. and Morimoto R.: Numerical simulation of bearing capacity characteristics of strip footings on sand, Soils and Foundations, Vol. 39, No. 4, pp. 93-109, 1999.
- 3) Seed H. B.: Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams, Geotechnique 29, No. 3, pp. 215-263, 1979.
- 4) Tanaka T., Mohri Y., Ueno K.: Dynamic response analysis for unsaturated embankment dam by elasto-plastic constitutive relation, 5th Int. Geotechnical Symposium-Incheon, pp. 24-29, 2013.

(原稿受理 2014.11.25)