

変位を生じる可能性のある岩盤不連続面の直上ないし近傍における地盤設計の考え方

谷 和夫^{1*}

¹ (独) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

*E-mail: tani@bosai.go.jp

発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる新安全基準では、「Sクラスの建物・構築物等は、活動性のある断層等の露頭が無い地盤に設置する」ことが求められるようになった。活動性のある断層等があると判断されると立地が制限されるという世界に類を見ない極端に厳しい規定である。この論文では、断層変位や周辺地盤の変形のモデル化、設計計算の方法、安全性の判断基準、さらに不確かさに関する配慮等、構造物の安全性に関する照査においてポイントとなる事項について考察した。そして、性能設計の原則に基づいて、新安全基準は適切に修正すべきことを論じた。

Key Words : *fault rupture, active fault, geotechnical design, earthquake*

1. はじめに

構造物が設置される地盤中に将来活動する可能性のある岩盤不連続面が発見された場合に、この岩盤不連続面に沿う変位（ずれ）を設計で考慮する必要がある。しかし、被災事例や対策が検証された事例が限られているため、設計の考え方が確立されていないし、設計基準類も整備されていない。したがって、このような岩盤不連続面の直上ないし近傍に立地する構造物の安全性を照査する際には、地震時に懸念される地表地震断層やその周辺の変状を設計でどのように考慮するか等、重要な工学的判断が設計者に求められてきた。この論文では、断層変位や周辺地盤の変形のモデル化、設計計算の方法、安全性の判断基準、さらに不確かさに関する配慮等、安全性に関する照査においてポイントとなる事項について考察した内容を記す。

2. 地盤設計で考慮する作用としての特徴

地震の発生に伴って、動的な地盤挙動である地震動と静的な地盤挙動である地殻変動が生じる。後者の地殻変動は、断層変位が震源から地表に伝播して表層地盤に生じる変形であり、地盤設計の観点から、広域に生じる隆起・沈降及び水平変位（狭義の地殻変動）と、地表地震

断層とその周辺地盤の変状（表層地盤の局所的な変形）に区別して考慮される。構造物が立地する地盤に活断層が存在する場合には、地盤設計で考慮すべき作用は後者であり、その主な特徴は以下の4点である。

- 1) わが国では内陸地殻内地震が原因で発生し、活動度が高いものでも頻度は千年に一度と非常に低い。主要活断層帯については長期評価による発生確率値等の情報が地震調査研究推進本部より示されているが、それ以外の小規模な活断層に関する情報は少なく、調査したとしても信頼度の高い結果を得ることは難しい。
- 2) 発生する場所は、長さが数～百数十キロメートルの活断層の位置に沿う幅が数～百数十メートルの帯状の領域に限定される。
- 3) 構造物への作用は、地盤の局所的（多くの場合は不連続）なせん断変形である。マグニチュードMwが7を超える大地震では、数十センチメートル～数メートルの断層変位によって、地中のトンネル・管路や地表の基礎が横断する位置でずれたり（極端な場合には破断や座屈したり）傾斜したりする。
- 4) 地殻中の破壊の伝播速度は2～3km/sで、せん断波（S波）の伝播速度 V_s よりやや遅い。地表地震断層は震源断層の延長上（震央の近傍）に位置するため、S波の到達直後（数秒以内）に生じる。よって、地震早期警戒システムによる構造物への影響の軽減はほとんど期待できない。なお、変位速度は数m/sで、飽和し

た地盤は非排水状態でせん断される。

3. 安全性に関する照査のポイント

(1) 断層変位や周辺地盤の変形のモデル化

地表地震断層とその周辺地盤の変状は、地盤設計の観点から、「不連続な変形」と「連続な変形」に分けられる。「不連続な変形」は地表地震断層に沿う変位（ずれ）で、「連続な変形」はその周辺で見られる撓曲（表層地盤の滑らかな曲げ変形）である。断層変位や周辺地盤の変形のモデル化においては、この2種類の変形について、以下の3点に留意する必要がある。

「不連続な変形」は、深さ3～20数キロメートルの地震発生層にある震源断層から地殻内を上方に伝播する岩盤のせん断破壊面（断層）の形成による。震源断層は単一の平面でモデル化されることが多いが、その延長上に発達する断層は平面ないし曲面（下に凸が多い）で、途中で分岐・尖滅することもある。分岐する断層のセンス（せん断方向）は、震源断層と近い方向に発達していれば同一であるが、大きく異なる方向（共役な断層）であれば逆となる。一般に、震源断層から滑らかに地表に連続する主断層に沿う変位（ずれ）が最も顕著で、大規模な活断層では数メートルに及ぶ場合もある。しかし、主断層の両端部を除けば、その他の断層（副断層や構造的に關係する断層とも呼ばれる）に沿う変位（ずれ）は相対的に小さく、1mを超えることは極めて稀である。

地表に硬岩が露頭する場合には、震源断層の変位（ずれ）の相当部分が地表に伝播してほぼ線状の地表地震断層が発達する。一方、相対的に軟弱な地層が基盤を被覆する場合には、断層が分岐・尖滅しながら伝播して小規模な亀裂や撓曲が帯状の範囲に発達するか、顕著な変状が認められない。この「不連続な変形」から「連続な変形」への転換は、脆性破壊が特徴の硬質（剛）な基盤（コンピテント層）との対比で定義される延性破壊が特徴の軟質（柔）な表層地盤（インコンピテント層）の内部で生じ、表層地盤の「座布団効果」と呼ばれる。インコンピテント層を V_s が700m/s未満の表層地盤と定義すると、その厚さが50メートルを超えると顕著な地表地震断層は観察されない¹⁾。

上記に記したように破壊が上方に伝播する途中でせん断破壊面（断層）は分岐するので、単調な構造（多くは単一の平面）の震源断層の延長上に複雑な構造（その形状から樹状構造（tree structure）あるいは花弁状構造（flower structure）と呼ばれる）の断層群が発達することがある。特に横ずれ断層（斜めずれ断層も含む）の場合、表層地盤中に複数の種類の断層が震源

断層の走向に沿って周期的に発達し、地表には特徴的な網目状構造を有する断層群が形成されることがある²⁾。このような複雑な変形構造を精度良く推測することは容易ではないが、その発達段階には法則性があり、将来の地震による変状を予測する上で参考となる。最終の発達段階では、単一の大規模な断層（主断層）に変形が集中する傾向があることは重要である。この主断層は、一般に平面ないし緩やかな曲面で震源と地表を結ぶ延長が短い単純な構造である。これが形成された後に発生する地震による断層変位はこの主断層に沿う狭い範囲に集中するので、地表に累積した変位はいわゆる活断層による変動地形として認識される。よって、長さが数キロメートルを超えて主断層が十分に発達している活断層では、主断層と共役な断層（Back thrust）を除けば、主断層と位置や走向あるいはセンスが異なる近傍の断層の活動度は低く、それらの断層変位は小さく、過去の断層で生じた変位を超えることはほとんどない。また、設計上考慮する変形帯（せん断ひずみ $<1/500$ ）の幅が100mを超えることは稀である¹⁾。

(2) 設計計算の方法と経験則に基づく推定

設計計算の方法は、地殻を均質・一様で、等方な半無限の線形弾性体と仮定する食い違い断層理論によることが多い。数百メートル～数十キロメートル・オーダーの広域な地表面の「連続な変形」（狭義の地殻変動）については、近年の大地震についてその妥当性が示されている³⁾。しかし、構造物のスケールを考慮した数百メートル以下の狭域な地表面の変形、特に「不連続な変形」の計算精度は高くない。よって、構造物が地表地震断層から数百メートル以内に立地する場合には、FEM等の手法と組み合わせるハイブリッド解析等の適用が考えられる³⁾。これらの解析では「不連続な変形」（破壊面の形成と伝播等）のモデル化が重要であり、複雑な地質構造（特に断層の構造）や横ずれによる変形メカニズムを適切に考慮するために3次元モデルの適用が望まれる。数値解析手法の高度化（計算の効率化と精度の向上）と妥当性の検証のための継続的な研究と、地下深部の地質構造（特に断層の3次元構造）を精度良く調べる探査技術の開発が重要である。

地震動による構造物の挙動に関する設計計算に比べて、地表地震断層とその周辺地盤の変状に関する数値解析の計算精度は相対的に低い。しかし、外力等の作用の推定に不確かさが大きいことを理由に、活断層の直上ないし横切るように立地する建築物や構造物の安全性能の照査（設計行為）が不可能であると結論することは正しくない。不確かさは外力等の作用の推定にのみ存在するわけではなく、抵抗力の推定等、設計行為の各段階に存在する。これらの不確かさを総合的に評価して、対象とする

建築物や構造物が要求する安全性能が満足されるかどうかを判断することが性能設計の原則である。したがって、推定される外力等の作用の大きさが要求性能を遥かに上回ることが自明な場合にのみ設計が不可能であると解されるのであって、作用の推定の不確かさが大きくても、作用自体の大きさが要求性能を超えることがない程度に十分に小さいと考えることに合理性がある場合には照査（設計行為）は十分に可能である。

このような観点から、過去の地震によって得られた地表地震断層の規模に関する情報、特にその上限を把握することは重要である。地震の M_w と震源断層の特性等によって、地表地震断層とその周辺地盤の変状の範囲や程度の上限や概略の性状を既往の知見（経験則）に基づいて推定することができる¹⁾。例えば、 M_w が6.0未満であれば地表地震断層は出現せず、5.5未満であれば撓曲の発生も無視できる。地表地震断層（主断層）の最大のずれは M_w が7.0で鉛直方向も水平方向も6mより小さく、分岐断層であれば主断層の数分の1と小さいことが分かっている。すなわち、各活断層で発生し得る地震の M_w に基づいて照査（設計行為）の可能性を議論することができると考える。

(3) 構造的な対処

可撓性を有する管路等の大変形を許容できる構造物の場合は問題ないが、一般には構造物への作用を可能な限り小さくするための対策を施すことが望ましい。地盤設計の考え方としては、地盤の変形を構造物に伝達させない方法（作用の遮断・免変形）と地盤の変形自体を緩和（低減）する方法（作用の緩和・制変形）の2つに分けられる。前者は構造物と地盤との固定度を低くする（極端には浮体とする）ことにより実現することができるが、縦ずれ成分への対処が容易ではない。一方、後者は3章(1)節に記した軟質（柔）な表層地盤（インコンピテント層）の「座布団効果」と同等で、断層変位（地盤中の局所的なせん断変形）を分散、連続化、平滑化することにより実現することができる⁴⁾。

(4) 安全性の判断基準

大きな断層変位（1m以上）を考慮すると、従来の地震動等に対する構造物の設計の考え方は、多くの場合に適用が困難となる。大規模な活断層は限定されており、その位置も特定できるので、大きな断層変位が想定される場合には立地を避けることが好ましい。一方、それより小さな断層変位（1m未満）であれば、3章(3)節に記した構造的な対処を施していれば、特別に厳しい要求性能でない限り、従来の考え方で設計することが可能な構造物は多いと思われる。

安全性の判断基準としては、基礎の場合には、縦ずれ

に対しては傾斜と段差が考えられるが、横ずれに対する基礎地盤の水平面内のせん断変形にも留意する必要がある。また、線状構造物の場合には、軸に直交する変位成分だけでなく軸方向の伸縮も考慮する必要がある。

ここで問題となるのが、高速道路や高速鉄道等の高速旅客輸送を担うネットワークインフラである。規模が大きい活断層を横断することが避けられない場合、特に横断地点が硬岩中のトンネルである場合には極めて厳しい設計条件となる。構造的な対処を合理的に可能な限り施すとしても、その目標性能（安全性）を横断部以外に対して設定されているものよりも低く設定しないと、設計が成り立たないことが懸念される。人命の安全確保（人命保護、life-safe）が基本であることは論を俟たないが、終局限界として一般的な人命保護の代わりに、特別終局限界として多数の死傷者に繋がる壊滅的な事故（大脱線、多重衝突）の防止を新たに設定することも考えられる。あるいは、断層変位の大きさについて2段階に設定し、前者（一般的な人命保護）を第一終局限界、後者（壊滅的な事故の防止）を第二終局限界とすることも考えられる。いずれにせよ、安全性に対する新たな考え方について社会的な合意を得るために更なる議論が必要である。

(5) 不確かさに関する配慮

地表地震断層とその周辺地盤の変状は、現象自体のランダム性（不確定性）、不規則性、多様性が高く、将来の挙動を精度良く予測することは容易ではない。さらに、地震動や津波に比べて地表地震断層による被災事例は少ないので知見は限られているし、また、個々の活断層について予測を検証することも発生頻度が低いために難しい。解析手法の不確かさも含めて予測全体に係る不確かさに対処するために、照査における設計計算では計算の条件を十分に幅広く（保守的に・安全側に）設定し、また確率論的な評価手法を活用することが適切である。さらに、想定を超えた事象に備えて危機耐性（危機的な状況に至る可能性を十分に小さくする性能）を確保することも重要である⁵⁾。

4. 土地利用規制に関する論点

(1) 性能設計の原則に照らして考慮する場合の論点

防災対策として活断層上（沿い）の土地利用を規制する法律が存在する⁶⁾。規模が大きい活断層（延長が数キロメートル以上の主断層）の場合には妥当な考え方であると思われる。一方、規模が小さい活断層について、さらに3章4節に記した高速旅客輸送を担うネットワークインフラや既設の重要インフラについてまで、立地制限を

導入することについては慎重でありたい。構造物の重要度、既設か新設か、立地選択の自由度、活断層や地盤の特性等を考慮して、可能な限り丁寧に工学的に対処することが望ましい。

(2) 性能設計の原則を無視する場合の論点

以上の議論は、建築物や構造物を設計する際の性能設計の原則に則って行なったものである。その一方で、原子力規制委員会が2013年6月19日に正式決定した発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる新安全基準では、この問題に対して極端に厳しい立地制限の規定が盛り込まれた。この新安全基準の骨子の1つとして、地震の揺れに加えて地盤の「ずれや変形」に対する基準を明確化するという趣旨で、「原子炉建屋等の重要施設は、将来活動する可能性がある断層等の露頭が無い地盤に設置する」ことが規定されたのである⁷⁾。

その根拠は、断層変位の大きさの推定に不確かさが大きいことと、対策が不可能であるという非科学的な思い込みであろう。3章(2)節に記したように、不確かさは照査の中で総合的に判断するべきであり、性能設計の原則を無視した考え方は容認されるべきではない。また、作用の大きさや構造物の要求性能によっては対策は十分に可能であるし、重要構造物についても設計の事例も多く、数メートルを超える断層変位でも対策が機能した実績もある。

一方、新安全基準の決定のプロセスには不適切なところがある。原案を検討した発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チームにおいて十分な議論が尽くされたとは思えないし、内容に関するパブリックコメントについて検討チームの外部の専門家ないし学会・協会等の専門組織から寄せられた貴重な指摘や意見は一顧だにされなかった⁸⁾。規制委員会は、有識者会議やパブコメ等の手続きを形式的に踏むだけで、非科学的・非合理的な規定を強引に盛り込んだのである。

断層変位が小さい場合には、3章に述べたように照査（設計行為）や工学的な対処が可能であるが、「将来活動する可能性がある断層等」に該当するかどうかの判断は容易ではない。国際原子力機関（IAEA）の安全基準でも施設の安全性は性能設計の原則に基づいて評価することを規定しており⁹⁾、新安全基準の考え方は不適切である。科学的な知見に基づく適切な規定に速やかに是正するべきである。

参考文献

- 1) Amirhesari, N.: Evaluation of ground surface deformation due to fault dislocation for civil engineering design, 横浜国立大学, 博士論文, 2012.
- 2) 上田圭一, 谷和夫: 基盤の断層変位に伴う第4紀層及び地表の変形状況の検討(その3), 電力中央研究所報告, No.U98049, 1999.
- 3) Tani, K.: Design consideration of surface ground deformation due to fault displacement in foundation engineering, *Proc. Int. Sym. on Recent and Future Technologies in Coastal Development*, pp.5, 2010.
- 4) Tani, K.: Proposal of countermeasure against fault rupture damages to mountain tunnels, *Proc. 5th Asian Rock Mech. Sym.*, Vol.2, pp.853-860, 2008.
- 5) 土木学会: 原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言(土木工学からの視点)(案), 東日本大震災フォローアップ委員会 原子力安全土木技術特定テーマ委員会, 2013.
- 6) 増田聡, 村山良之: 活断層に関する防災型土地利用規制/土地利用計画, *自然災害科学*, 25-2, pp.146-151, 2006.
- 7) 原子力規制庁: 新安全基準(地震・津波)骨子案, (http://www.nsr.go.jp/public_comment/bosyu130206/kossi_eq.pdf)
- 8) 原子力規制庁: 発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム, (http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_anzenkijyun/)
- 9) IAEA Specific Safety Guide No.SSG-9: Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installation, 2010.

5. まとめ

GEOTECHNICAL DESIGN CONSIDERATIONS FOR STRUCTURES IMMEDIATELY ABOVE OR IN THE CLOSE VICINITY OF ROCK DISCONTINUITIES THAT CAN BE DISLOCATED

Kazuo TANI

Fault rupture hazard is one of the most important engineering issues for geotechnical designs of engineering structures sited on or near active faults. Modeling of fault dislocations, methods of numerical and/or empirical analyses, criteria of safety evaluation, and consideration on the relevant uncertainties are some of the vital topics to be concerned. In this paper, discussions on these topics are presented.