

強震動予測と土木工学との連携

堀 宗朗

●東京大学地震研究所

1. はじめに

強震動予測と土木工学との連携はいろいろな視点で考えることができる。紙面も限られているため、著者が重要と思われる二つの視点でこの小論をまとめる。土木構造物の耐震設計と都市の被害予測との連携という視点である。言わずもがなのことであるが、最も高い耐震性を要求される構造物は原子力発電プラントのような重要構造物である。本特集には含まれなかった原子力施設・機器の耐震性確保と強震動予測の連携が近い将来に地震工学の研究者で議論されることを強く希望する。

土木構造物の耐震設計との関連を論ずる前に、土木工学に馴染みのない読者はまず次の二点を理解してもらいたい。一口に土木工学といっても、土木工学が対象とする構造物の種類は多い。橋梁やダムのような大型構造物はもとより、トンネル等の地下構造物や地盤構造物、港湾・空港施設も含まれる。使われる材料も鋼・コンクリートの他、地盤・岩盤、さらには複合材料のような新しい素材もある。構造や材料の違いは構造物の変形メカニズムや地震応答の違いとなるが、さらに、要求される耐震性のレベルも構造物の重要度に応じて異なる。この結果、共通する部分は勿論あるものの、土木構造物は構造物ごとに特有の耐震設計の体系が作られている。これが第一点である。次に、社会基盤を欧米並に引き上げることは長期にわたって我が国の重要な課題であり、社会基盤を迅速かつ効率的に整備し、さらに、全国で一定の質を確保するため、土木構造物には標準的な設計が重視されてきた。このため、土木構造物の耐震設計では標準的な地震動を使う傾向が強い。大雑把に言えば、標準的な地震動とは全国一律に設計で用いる地震動であり、地震の伝播特性やサイト特性を積極的に取り入れるものではない。したがって、機械工学や建築と比べ、土木工学では地震学はもとより強震動予測に関する関心は決して高いものではないように思われる。これが第二点である。

さて、都市の被害予測は建築と土木工学の境界に位置している。人命に直結するため、住居として使われる建築構造物の地震被害予測は重要な課題であり、建築分野で優れた研究が多数行われている。一方、土木

工学が対象とするものは都市基盤施設の被害予測である。加えて都市基盤施設の被害軽減の技術も研究されてきた。都市基盤施設の被害予測と強震動予測の関わり方には注意が必要である。耐震設計と同様、都市基盤施設の耐震化の基本的な考え方は、「地点毎の強震動を予測しそれに耐えられるように補強する」というのではなく、「所定の地震外力に耐えられるよう補強する」ということである。したがって、必ずしも構造物に作用する強震動を精密に予測することが行われるとは限らない。また、強震動予測とは別に、実際に発生した強震動に対応することも居住以外の種々の機能を持つ社会基盤施設には重要である。例えば、都市基盤の一翼を担うエネルギー系のライフライン企業では、極めて高密度な強震動観測網を開発・展開している例があるが、これは地震発生後迅速にライフラインの安全性やエネルギー供給を確保するためであり、発生した強震動への対応が目的なのである。

安全・安心は比較的新しい研究領域であり、我が国では地震等の自然災害からの安全・安心が大きな課題となっている。土木工学ではこの枠組みでの地震防災が比較的積極的に研究されている。安全・安心の枠組みでも強震動予測は重要である。強震動が引き起こす都市の地震被害を綿密に推定することで、法・経済・社会心理等の研究者と連携しながら多面的に地震防災の研究や技術開発が行われている。地震の防災では分野横断の研究は新しいことではないが、安全・安心では、情報技術を駆使して分野横断を促進するとともに、さまざまな脅威の一つとして地震を位置付けることで、より総合的な地震防災を目指している。企業等の事業継続計画は安全・安心の具体的な目標である。地震に対して効果的な事業継続計画を立案するためには、都市の強震動予測が重要な役割を果たすと思われる。

2. 強震動予測と耐震設計

前述のように、さまざまな構造や材料が使われるため、土木構造物の耐震設計は多岐多様である。このため、強震動の何が予測されるべきかは実は構造物や設計法によって異なる。構造物に直接入力される加速度や速度の波形データが必ずしも必要とはされない。勿

論、地盤-構造物相互作用をも検討するために工学的基盤から地盤に入力される波形データが必要となる場合もあるが、構造物の諸元を決める設計においては、入力される地震動のより簡単な情報で十分とされる。

土木工学には限らないが、設計の際の強震動の使われ方として応答スペクトルは取り上げるべきであろう。多くの読者には説明の必要もないことであるが、応答スペクトルは、地震動の時系列データを単純な一自由度系モデルの応答に変換するものであり、モデルの固有周波数と変位・速度等の応答の最大値の関係となる。地震学の最新の知見を活用しても強震動の時系列を予測することは決して容易ではない。その一方で、努力して推定された強震動が、一自由度系モデルの応答の最大値に変換されてしまうことは皮肉である。しかし、応答スペクトルは地震動がどの固有周期を持つ構造物にどの程度影響を与えるかを知るには極めて有効であり、枝葉末節を省き応答の最大値として地震動を捕らえることは、設計の視点でみれば本質的に重要なのである。なお、地震は設計の際に考慮される要件の一つであり、大型の土木構造物は自重や使用時の荷重も大きくなるため、他の荷重がよりクリティカルな場合となることも多い。したがって、構造物の地震応答を把握するために強震動を応答スペクトルに変換することは有効なのである。

さて、より良い構造物を作るために設計法は改良が進められている。限界状態設計法への移行したように、現在、多くの土木構造物で性能規定型の設計法が研究・検討されている。従来、所定の安全性を満たすことが設計の目的であったが、性能規定型の設計法は構造物が持つ性能を明示することを目的とする。性能規定型の耐震設計は、どのような強震動まで構造物が耐えることができるか、もしくは、どの程度の余裕があるかを示すことになる。耐震設計が高度化すると、当然、設計に必要な地震動もより高度なものが要求される。一部の重要構造物を除き、建築構造物と比べれば強震動予測との連携が弱かった土木構造物も、性能規定型の耐震設計が一般化すれば格段に連携が強まる可能性がある。これは性能を正確に明示するためには、より精緻な構造物応答の解析が必要となるためである。全国一律に所定の地震動に対する応答を計算し性能を明示することが依然として標準となるように思われるが、地点毎に起こりうる地震動を予測してそれに対する応答から性能を考えることがより合理的な設計となる場合、強震動予測の必要性が増すと考えられる。

性能規定型と並び、確率論的設計論が設計の高度化として検討されている。設計の際に荷重や強度の不確

定性を確率的に扱うことは既にいろいろ試みられており、確率論的設計論は決して新規なものではない。しかし、より合理的な設計を行うために確率論的設計論の有効性は広く認識されつつある。自然と対峙する土木構造物では、河川流量や風力のような自然外力に対する安全性が重要であり、ある大きさの自然外力の発生確率を考えることは当然でもある。また、土木構造物の供用期間は総じて長いため、自然外力を確率論的に扱うことは有効でもある。地震は発生頻度が少ないため、強震動を確率的に扱うには、一工夫必要であることは確かである。地震学の進歩により地震の発生確率の予測が行われるようになったのであるから、もう一歩進めて、想定される地震動の幅が提示されたり、さらには、その確率が提示されることは、設計の合理化に繋がる確率論的な耐震設計を実現するためには極めて重要である。強震動予測との連携を考える上で有望な領域と考えられる。

耐震設計という観点で強震動予測との連携を論じてきたが、予測された強震動の利用の仕方は今後重要となるであろう。例えば、予測された強震動の信頼性が高くなれば、それに応じて構造応答の計算もより高度なものが必要となる。すなわち、構造物の動的応答の数値計算技術を高度化することが土木構造研究者・技術者に要求されることになるとと思われる。構造応答の計算技術は設計や照査には十分に使えるレベルに達しているが、地震動による構造物の破壊過程のシミュレーションは大きな課題を解決するためにも、強震動予測の進歩に見合った数値計算技術の高度化は必要である。また、強震動予測に進展に伴い、構造本体のみならず設備の耐震性の評価も要求されるかもしれない。いわゆる非構造部材の地震応答や耐震性は重要な課題となることが考えられ、より精緻な強震動が予測されると、この課題の解決も重要度が増す。したがって、強震動予測との連携の具体例として、非構造部材の地震応答挙動について詳細がわかる数値計算技術の開発が期待される。

上記の強震動予測と土木工学の連携は研究レベルである。連携の強化や活性化には研究レベルから入ることが一番であるが、連携の実効を上げるには最新の強震動予測の成果が実際の設計に活用されることが望ましい。前章で説明したが、土木構造物の耐震設計が多岐多用にわたり、また、全国で一様の質を確保することが重要であった現状を考えると、設計実務に最新の強震動予測が使われることは容易ではないことは想像できる。勿論、重要土木構造物の設計や耐震性判定には最新の成果が使われており、実務に活用することは

不可能ではない。連携の実効を挙げるためには、強震動予測の研究の本質的な要素ではないであろうが、強震動予測の最新の成果が簡単に使える仕組みが検討されることが望まれる。すぐに思いつくことであるが、所定の地震シナリオを与えると該当地点の地震動が相応の精度・信頼度で計算されるような仕組みである。勿論、構造物の応答の振動数まで地震動が計算され、既存の動的応答解析手法に簡単に入力できることが望ましい。

3. 強震動予測と被害予測

耐震設計の視点と同様、都市の被害予測の視点で強震動予測と土木工学の連携を考える際、重要な点は強震動の何を予測すべきかである。各地点で発生する強震動が正確に予測できるのであれば、個々の構造物に起こりうる被害が予想できるため、必要かつ十分な耐震補強が施されることになる。勿論、強震動の正確な予測は不可能であり、ある幅を持った予測をすることになる。極めて大きい強震動からさほどでもない強震動までさまざまであるかもしれない。このような幅のある地震動の予測の中でどれを使って土木構造物の被害予測をするかは技術者や防災担当者が決めることになる。その際、選ばれる地震動の発生確率にも依存するが、構造物の重要度も大事である。重要な構造物の重要度が高いほど、発生確率は低くとも、大きい地震動が選ばれる。至極当然なこの選択を、きちんと行うには予測される地震動の幅や発生確率をできるだけ正確に見積もる必要がある。強震動予測そのものが容易でない現状をみると、幅や発生確率の見積もりは難問であることは確かである。しかし、この難問を解決することが、被害予測の視点でみた強震動予測と土木工学の連携を強化すると思われる。

強震動の幅のある見積もりは決して新規なことではない。複数の地震シナリオが想定されれば、手間はかかるが、発生しうる地震動分布やそれが引き起こす構造物等の被害を算定することは十分可能である。なお、構造物被害の算定は過去の地震被害データに基づいていることは注意が必要である。設計では入力された地震動に対する構造物の応答を計算して耐震性を判定しているが、被害推定ではこのような計算に基づく判定は使われていない。計算に基づく被害判定には、都市内に配置された多数の構造物のデータが必要である。古い構造物では、設計図が無くなっている場合やデジタル化されておらず計算の準備に手間がかかる場合がある。また、安全性を確保するため、実際の構造物は設計されたものよりも強くなっているが、施工の質

によっては逆の場合もある。さらに経年劣化によって設計時とは構造物の特性が変わる場合もある。建築構造物であるが、構造物の固有周期が次第に長周期化する観測結果がある。したがって、強震動予測の高精度化が、被害予測の高度化に直結するとは限らない。都市内の各構造物に対して良質なデータを得る努力が必要とされる。

第1章で述べたが、安全・安心の枠組みでの地震防災では、従来にも増して詳細な地震被害の推定が必要とされている。逆に言えば、詳細な地震被害推定を行って適切な対処を実施することで、従来よりも高いレベルでの安全性を確保することが安全・安心の目的となる。なお、安全・安心では他の自然災害の他、テロへの備え・対応も検討される。危機として想定される状況はさまざまなものがある。したがって、地震シナリオが複数あることや地盤や構造物のデータに不確定な要因があることは致命的な障害とはならない。想定される危機の状況が複数あれば、各々もしくは一部の状況を選定し、備えや対応を検討することになるからである。安全・安心の枠組みで精緻な地震被害の推定を実現するには最善の強震動予測が必要であり、強震動予測との連携は不可欠である。実際に起こる地震と推定される地震が合う合わないということではなく、合理的に推定された結果、備えや対応を検討するに値すると判定されるのであれば、予測される強震動やその帰結となる構造物被害の推定が必要とされるのである。

安全・安心の具体的な目標として挙げられた事業継続計画を使って上記の点をもう少し詳しく説明してみる。事業継続計画は、危機的状況が発生した後の主要業務の継続を目的としている。全業務を対象としない点が従来の危機管理と若干異なり、企業の事業計画であるため極めて詳細な部分まで検討することが望ましい。発生する地震災害が完全に分かるのであれば事業継続計画の立案は容易である。災害状況にさまざまなものが考えられるため、どのような状況になっても効果的に主要業務の継続ができる計画を立てるのである。したがって、事業継続計画は固定的なものではなく、事業そのものの状態によって適宜変化するものである。細部まで詰めた地震被害を想定し有効な事前の準備や事後の対応を検討しより実効のある計画とすることが重要なのである。荒唐無稽な地震災害状況を想定しても意味が無く、地震シナリオに応じた地震動分布とその結果引き起こされる地震災害を客観的な方法で推定し、災害状況を合理的に想定することが必要であると思われる。前述のように、このような想定を実現

するには強震動予測との連携は不可欠となるのである。

事業継続計画は個々の企業が立案するものである。しかし、想定される地震が発生した場合に、交通網やエネルギー・情報等に関わる社会基盤施設がどのような被害を受ける可能性があり、また、被害を受けた場合にどのように復旧するかを明らかにすること共通の課題である。社会基盤を対象とする土木工学がこの課題に答を出すことが望まれる。土木構造物は元々高い耐震性を持つよう設計され、また、耐震性を向上させるために補強を受けたものがある。しかし、そうでない構造物が残されていることも事実である。地震によっては被害を被る可能性がある社会基盤施設を明らかにすることは、事業継続計画を実効あるものとするために重要な責務であろう。決して愉快なことではないが、合理的な耐震補強を進める一方で、不備を明らかにすることは避けては通れないことかもしれない。特に社会基盤施設は相互に強く依存しており、一つの施設の被害が波及的に広がることは周知の事実である。効率化を追求する現代社会において冗長性の確保は軽視される傾向にあると思われる。過去のいかなる時よりも、地震被害の波及的拡大が大規模なものになる可能性が懸念される。社会基盤施設の間の相互依存性を分析し、被害の拡大の可能性を検討することは重要である。このような検討にも、合理的な強震動予測とそれに基づく被害推定が不可欠であることは自明である。

4. おわりに

強震動予測と土木工学の連携を論ずるに際して、土木工学の中では強震動予測の必要性が必ずしもたかくなかったことを説明した。しかし、長周期地震動に関しては、過去の観測データがないだけに、予測に強い関心もたれた。これは長周期成分が大きく継続時間が長いという特徴が耐震設計で想定されているものと異なる可能性があり、構造物に想定外の被害が発生することが懸念されたためである。構造物の応答に関連する強震動の予測には積極的に取り組むことは十分期待できる。本論で述べたように、設計や被害想定を高度化するには信頼性の高い強震動の予測が必要であり、積極的に連携を進めるべきと思われる。

重要構造物の設計や耐震性の検討には、地震学の最新の知見を使って地震動を予測することが行われている。また、一部の自治体の被害想定にも高度な地震動予測が利用されている。通常の土木構造物の設計や被害想定に高度な地震動予測が使われるようになることは時間の問題かもしれない。このような地震動予測に見合うよう、構造物の地震応答予測を高度化したり、

また、現存する構造物の特性を正確に計測することは将来の課題となると思われる。解析手法や構造センシングの高度化を目的とする研究・開発が望まれる。

参考文献

- 土木学会「特集 大地震に備える」【土木学会誌】、87(12)、5-45、2002。
- 朱平、堀宗朗、清野純史、藤野陽三、「地震被害の共通認識形成を目的とした広域都市モデルの構築にむけて」、【社会技術研究論文集】、2、435-443、2004。
- 保野健治郎、「地震防災行政の今日」【土木学会誌】、71(4)、58-60、1986。
- 大林厚臣、「意思決定論の地震防災における応用可能性」【社会技術研究イニシヤティブ】(地震防災グループ) <http://www-msd.civil.tohoku.ac.jp/~EDPRG/mate/03/obayashi03124.htm>、2002。
- 堀宗朗、市村強、「高分解能強震動シミュレータの開発」【土木学会誌】、87(12)、39-40、2002。
- 田所諭、北野宏明監修、ロボカップレスキュー—緊急大規模災害救助への挑戦、共立出版、2000。
- 林春男、「いのちを守る地震防災学」、岩波書店、2003。
- 鹿島建設土木設計本部編、「耐震設計法／限界状態設計法」、鹿島出版会、1993。
- 土木学会コンクリート工学委員会、「コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]」、土木学会、2002。
- 日本道路協会、「道路橋示方書・同解説、V耐震設計編」、日本道路協会、1998。
- 土木学会地震工学委員会、「実務の先輩たちが書いた土木構造物の耐震設計入門」、土木学会、2001。
- 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会、「土木構造物の耐震設計ガイドライン—耐震基準作成のための手引き—」土木学会、2001。