

レベル2地震動の評価はなぜシナリオ型地震動評価に基づくべきか

野津 厚

●独立行政法人港湾空港技術研究所

1. はじめに

本特集のテーマは「地震防災における確率論的アプローチ」である。土木構造物の耐震設計においても、レベル1地震動^{*}の評価においては、確率論的地震危険度解析 (PSHA) の利用がすでに始まっている^{例えは^{1),2)}}。しかし、土木構造物の耐震設計におけるレベル2地震動^{**}の評価にPSHAの結果を直接用いることに対しては、土木学会の中では否定的な見解が多い。なぜレベル2地震動は (PSHAではなく) シナリオ型の地震動評価に基づいて設定することが望ましい¹⁾ののだろうか。本稿ではその理由を出来るだけわかりやすく説明することを主な目的とする。以下においては、まず、土木分野におけるレベル2地震動の有する性格について述べることから始める。

2. 土木分野におけるレベル2地震動の性格

土木構造物の耐震設計におけるレベル2地震動の出発点は、1995年兵庫県南部地震がもたらした大被害への深刻な反省である^{***}。この地震の際に神戸市内で観測された地震動は、最大加速度800Gal、最大速度100cm/sを越えるような、それまでの耐震設計では考慮されていない強いものであった。「外力を過小評価していたことが土木構造物の大被害の第一義的要因である」との認識が土木学会の中で広く共有され、地震後直ちに、従来よりも大きい設計地震動を設定することが検討された。その結果生まれたものがレベル2地震動である^{***}。実はこの点が建築分野と大きく異なっている。建築分野では「既存不適格建物の存在が大被害の第一義的要因である」と認識されたので、兵庫県南部地震を踏まえて設計地震動を従来よりも大きくすることはあまり議論されなかった。

土木学会が地震後に公表した第一次提言⁴⁾ (1995年) と第二次提言⁴⁾ (1996年) では、土木構造物の耐震設計において、従来の設計地震動に加え、「陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や直下型地震による地震動のように供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動」をレベル2地震動として考慮することを求めている。第三次提言⁵⁾ (2000年) では、レベル2地震動の定義が「現在から将来にわたって

当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動」と修正され^{***}、これが作用の指針¹⁾ (2008年) に引き継がれている。また、第三次提言と作用の指針では、対象地点周辺に活断層やプレート境界が存在しない場合、M6.5程度の直下地震が発生する可能性に配慮することを求めている。以上を踏まえ、土木分野におけるレベル2地震動のイメージをわかりやすく言えば「東南海・南海地震のような海溝型地震であれ、内陸活断層地震であれ、対象地点に対して最も大きい影響をもたらす地震による地震動をレベル2地震動とする。対象地点周辺に活断層やプレート境界が存在しない場合にはM6.5程度の直下地震による地震動をレベル2地震動とする」ということになる。

3. シナリオ型の地震動評価が望まれる理由

3.1 PSHAのおさらい

PSHAについては、本特集の他の記事でも言及されると考えられるが、そのエッセンスのみ記せば次のようになる。まず、対象地点周辺において想定されるあらゆる地震シナリオ (震源距離やマグニチュード) を考える。各々の地震シナリオに対しては、その (1年あたりの) 発生確率と、実際に発生した場合の対象地点における地震動強さの確率分布を評価しておく。例えば1,2,3のシナリオがあり、各々の年発生確率が $P_1, P_2,$

* 作用の指針¹⁾では「使用性照査用地震動」と呼ばれ「設計供用期間内に発生する可能性が高い地震動」と定義される。

** 作用の指針¹⁾では「安全性照査用地震動」と呼ばれ「当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動」と定義される。

*** 1990年に道路橋の耐震設計に導入された地震時保有耐力法のための照査用震度³⁾がレベル2地震動の始まりとの見方もできるが、道路橋の照査用震度も神戸の地震を踏まえ大幅に改定されているので³⁾、少なくとも、「現在見るようなレベル2地震動の起源は兵庫県南部地震である」と言って良いだろう。

**** このように修正されたのは、第一次提言、第二次提言におけるレベル2地震動の定義に含まれる「供用期間中に発生する確率は低いが」の文言が一部のプレート境界地震には当てはまらないという認識が高まったためである。

P_3 、実際に発生した場合に対象地点の地震動強さが A を上回る確率が $P_1(A), P_2(A), P_3(A)$ であったとすると、対象地点で1年間に A を上回る地震動が発生する確率（年超過確率）は $P(A)=P_1 P_1(A)+P_2 P_2(A)+P_3 P_3(A)$ となる。当然 A が大きいほど $P(A)$ は小さくなる。この関係を図にしたものがハザード曲線である（図1）。この関係から、特定の年超過確率に対応した地震動強さを求めることができる（図1の矢印）。最初の「発生確率の評価」の部分では活断層研究の成果を取り入れることができる。また、地震動強さの指標として各周期における応答スペクトルの値を選べば、どの周期においても等しい年超過確率を有する応答スペクトル（一様ハザードスペクトル）を求めることもできる。

この一見合理的に見えるPSHAをレベル2地震動の評価に適用することの何処に問題があるのだろうか？以下の内容は、このことに関して著者の考えを説明したものである。土木学会としての見解をお知りになりたい方は作用指針¹⁾を御覧下さい。

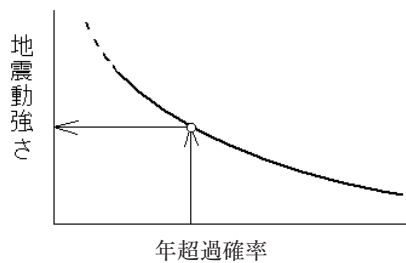


図1 PSHAによるハザード曲線

3.2 Realisticな地震動に対する地震応答解析ができなくなる

現在、シナリオ型の地震動評価では、経験的グリーン関数法⁶⁾や古和田の方法^{7),8)}、ハイブリッド法⁹⁾などを用いることにより、震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮した非常にrealisticな地震動を生成できるようになっている（ただしそれらを適切に運用した場合）。それに対してPSHAで得られるものは多くの場合一様ハザードスペクトルであり、これと物理的意味を有しないランダム位相を組み合わせて生成した地震動では、質の高い地震応答計算が出来ないのではないかとこのことを心配する人は多い。著者もこの点は心配であり、これがレベル2地震動の評価にPSHAをお勧めできない理由の一つである。もっとも、これだけのことであれば、解決法が無くもない。PSHAにおける地震動評価では、通常は距離減衰式が用いられるが、手間さえいとわなければ、シナリオ型の地震動評価と同様の手法を用いることも可能である。しかし、次に述

べるようなもっと本質的な問題もある。いま、対象地点に影響を与える震源として、遠くの大きい震源と近くの小さい震源があるとする。遠くの大きい震源だけを考えた場合の年超過確率1/1000に対応する応答スペクトルが図2の細実線、近くの小さい震源だけを考えた場合の年超過確率1/1000に対応する応答スペクトルが図2の破線であったとする。このとき両者の寄与を考慮した最終的な年超過確率1/1000に対応する応答スペクトルは図2の太実線のように両者を包絡したものとなるはずである。こうして得られた応答スペクトルは、遠くの大きい地震とも近くの小さい地震とも異なる現実にはあり得ないスペクトル特性を有してしまっている。つまり現実にはあり得ない地震動を対象に地震応答計算を行うことになる。

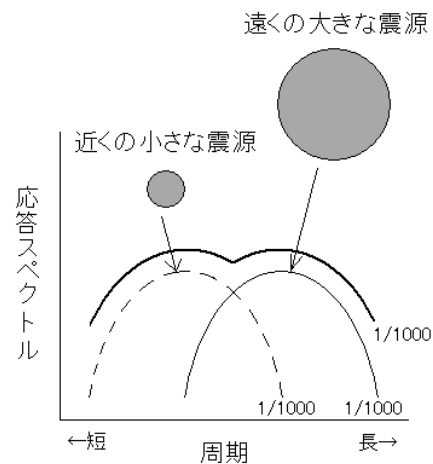


図2 平均化にひそむ思わぬ落とし穴

3.3 地域防災計画やBCPとの関係

上で述べたことを言い換えれば、PSHAで得られる特定の年超過確率に対応した地震動においては、個別の地震に関する具体的なイメージが失われてしまっているということになる。このことは、レベル2地震動に対する要求性能の設定でも問題となる。港湾の場合、レベル2地震動に対する耐震強化岸壁の要求性能は、主に地震後の緊急物資輸送を念頭に置いている²⁾。これは、兵庫県南部地震の経験（写真1）を踏まえ、地震後の緊急物資輸送において港湾の果たすべき役割を重視しているためである。道路橋の場合も、地震後の緊急物資輸送のために橋が必要とされる度合いが高い場合には、レベル2地震動に対してより高い耐震性能が設定される¹⁰⁾。このように、レベル2地震動に対する土木構造物の性能は、自治体による地域防災計画の策定や企業によるBCPの策定と深く関わっている。地域防災計画やBCPの策定においては、例えば「東南海・南海

地震は広域が揺れる地震であるから周辺自治体からの支援を受けることは難しい」といった個別の地震に関する条件が考慮される。従って、これらの策定において自治体や企業が土木構造物の設計者に求める情報とは、「東南海・南海地震」や「内陸活断層地震」のような個別の地震に対して岸壁が、あるいは橋がどのよう



写真1 港湾を活用した緊急物資輸送の例
(兵庫県南部地震直後の神戸港)

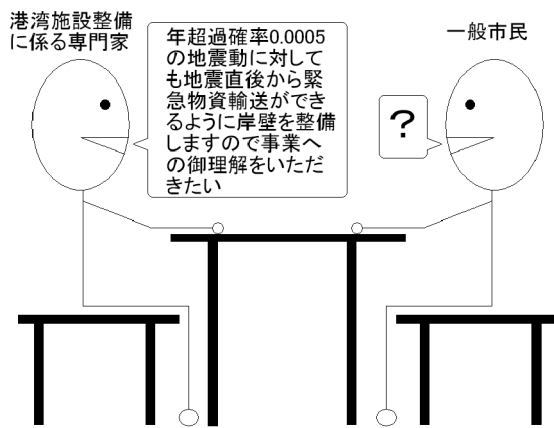


図3 専門家と一般市民の間でのコミュニケーションがうまくいっていない例

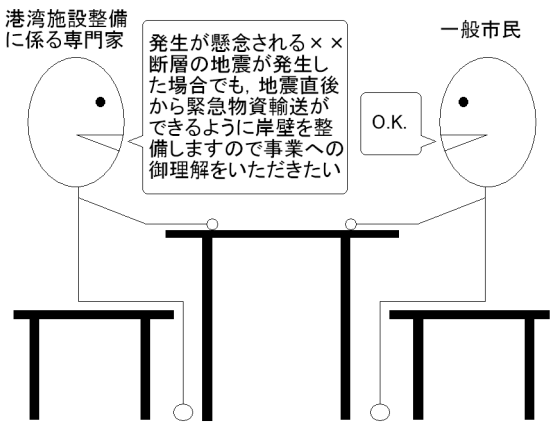


図4 専門家と一般市民の間でのコミュニケーションがうまくいっている例

なパフォーマンスを示すのかである。この期待に設計者が応えるには、個々の地震シナリオに対して要求性能が規定されていなければならない。港湾施設整備に携わる専門家が一般市民に対して事業への理解を求める場合、「年超過確率0.0005の地震動に対しても地震直後から緊急物資輸送ができるように岸壁を整備しますので事業への御理解をいただきたい」のように説明しても、理解は得られにくい(図3)。それに対して「発生が懸念される××断層の地震が発生した場合でも、地震直後から緊急物資輸送ができるように岸壁を整備しますので事業への御理解をいただきたい。××断層の地震が発生すれば〇〇道路が寸断されることが懸念されるので、防災上の観点からも岸壁の整備が望まれます」のように具体的な地震のイメージをもとに説明したほうが、一般市民としても、地域防災計画やBCPの観点から、事業の是非を判断しやすくなる(図4)。確率論は、専門家と一般市民の間でのコミュニケーションを図る上での最適なツールであるように考えられがちであるが、常にそうであるとは限らない。

3.4 ハザード曲線の低確率側の信頼性

レベル2地震動の評価にPSHAがお勧めできないもう一つの理由として、PSHAによって得られるハザード曲線(図1)の低確率側の信頼性が十分でないことを挙げざるを得ない。

PSHAではほとんどの場合距離減衰式により地震動が評価されることは上述の通りであるが、その際、距離減衰式に含まれる様々な σ が無分別のまま地震動の σ に反映されるので、結果的に地震動の σ の信頼性が低下し、ハザード曲線の低確率側の信頼性が低下してしまうことに注意が必要である。例えば距離減衰式の σ の中には異なる震源域で発生した同一マグニチュードの地震間での地震動のばらつきも含まれることになるが、このばらつきなどは再来大地震による地震動の評価では本来考慮する必要の無いものである可能性が高い。一般にPSHAでは活断層の近傍よりもプレート境界地震の近傍で非常に大きい地震動が評価される傾向がある。これは活断層で地震が1回発生する間にプレート境界では例えば10回の地震が発生し、10回分の地震動のばらつきが考慮されるためであるが、再来大地震による地震動のばらつきが距離減衰式のばらつきに置き換えられている点に問題がある。

もう一つ、兵庫県南部地震以降のわが国における規模の大きい(M6.8以上の)内陸地殻内地震を振り返ってみると、2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2004年新潟県中越地震(M6.8)、2005年福岡県西方沖の地震

(M7.0)、2007年能登半島地震 (M6.9)、2007年新潟県中越沖地震 (M6.8)、2008年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) の6つがあるが、このうち、2004年新潟県中越地震が都市圏活断層図に事前に明記されていた小平尾断層に対応すること¹¹⁾を除けば、いずれも専門家間で活断層との認識が共有されていなかった断層が動いたものである^{12, 13)}など。活断層に対して警戒することは当然であるが、活断層が存在しないことをもって安心情報とすることは適切でない。PSHAの結果は、近傍に活断層やプレート境界のある地域とそうでない地域との間で数字にかなりの隔たりがある場合が多い。しかし、上述の内陸地殻内地震の発生状況を踏まえると、近傍に活断層やプレート境界のある地域とそうでない地域との間で構造物の設計外力に大きな差を設けることは得策とは考えられない。

4. 活断層研究者と構造物設計者のよりよいコラボレーションのために

このように書いてきたが、構造物設計者が活断層研究の成果に対してリスペクトを払うことは当然であると考えられる。本稿の締めくくりとして、地震災害の軽減に向けた活断層研究者と構造物設計者のよりよいコラボレーションのあり方について私見を述べる。

活断層研究では、規模の大きい活断層に力点が置かれることはある意味当然である。しかし規模が小さい(とみなされた)活断層の中にも、土木構造物に被害を与えるものがある。このことから、活断層研究では位置を特定しにくい比較的規模の小さい地震については土木構造物設計者が設計で対応し、これを越える規模の地震については活断層研究者が発生場所を特定して設計者に情報を伝えるという連携プレーが考えられる(図5)。これが著者のイメージする活断層研究者と構造物設計者のコラボレーションである。土木学会第三次提言⁹⁾に含まれる「M6.5程度の直下地震が発生する可能性に配慮する」との文言は、「M6.5を越える地震の震源についてはぜひ見つけていただきたい」という土木工学者から活断層研究者へのメッセージであると受け取っていただければ有り難い(ただしM6.5という数字の妥当性については今後さらに議論する必要がある)。土木工学者と活断層研究者の双方がこの数字を「連携プレーのための数字」として認識することが重要ではないかと考える。

確率情報を含まない位置と規模の情報だけでも構造物設計者にとってはたいへん貴重である。活断層研究者と構造物設計者のコラボレーションは常にPSHAを介さなければならないとは限らない。

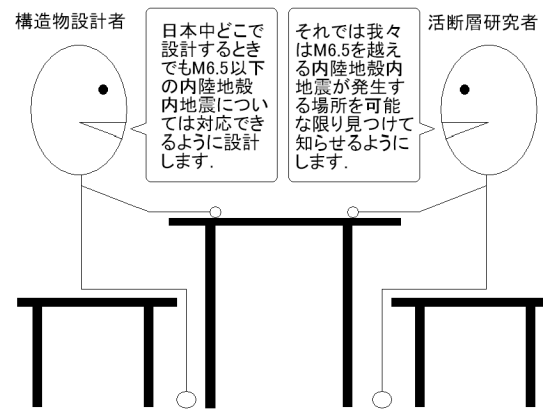


図5 著者のイメージする活断層研究者と構造物設計者のコラボレーション

参考文献

- 1) 土木学会：性能設計における土木構造物に対する作用の指針，2008。
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 3) 時松孝次，大町達夫，盛川仁，翠川三郎：地震・津波ハザードの評価，朝倉書店，2010。
- 4) 土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集，1996。
- 5) 土木学会：土木構造物の耐震設計法に関する第三次提言と解説，2000。
- 6) 入倉孝次郎・香川敬生・関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良，日本地震学会講演予稿集，No.2，B25，1997。
- 7) 古和田明・田居優・岩崎好規・入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.514，pp.97～104，1998。
- 8) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良，土木学会論文集A，Vol.65，pp.808-813，2009。
- 9) Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka, A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.88, pp.357-367, 1998。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2002。
- 11) 渡辺満久，鈴木康弘，伊藤武男：変動地形に基づく2004年中越地震の断層モデル，地震2，Vol.58，pp.297-307，2005。
- 12) 井上大榮・宮腰勝義・上田圭一・宮脇明子・松浦一樹：2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査，地震2，Vol.54，pp.557-573，2002。
- 13) 遠田晋次，丸山正，吉見雅行，金田平太郎，栗田泰夫，吉岡敏和，安藤亮輔：2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層－震源過程および活断層評価への示唆－，地震2，Vol.62，pp.153-178，2010。