

土木構造物の耐震性能の照査に用いるレベル2地震動について

1. はじめに
2. レベル2地震動に関する問題点の抽出
3. 「建築」との比較
4. 評価の方法と具体例
5. 評価・設定の手順
6. 緊急の解決・検討を要する課題

大 町 達 夫*

要 約

阪神・淡路大震災における社会基盤施設の被害が極めて深刻であったことから、土木学会では「耐震基準等基本問題検討会議」を設置して検討を重ね、2度にわたり「提言」が行われた。この「提言」には、構造物の耐震性能の照査においては、供用期間中における発生確率は低いものの極めて強い地震動（レベル2地震動）を用いるべきことが、新たに求められている。さらに、内陸活断層によるレベル2地震動は、地域ごとに脅威となる活断層を同定し、その震源メカニズムを想定して定めることが基本とされている。

一方、「提言」の記述は概念的で具体性を欠き、レベル2地震動の設定は困難との批判的意見や混乱も少なくない。小文は、この混乱の解消に若干なりとも資することを目的に、レベル2地震動に関わる問題点の抽出を行うとともに、高層建築物に対して従来使用されてきたレベル2地震動の考え方や具体的な強さを紹介し、最近までの研究成果をもとにレベル2地震動を設定する手順や課題の整理を行っている。

建築物に対するレベル2地震動は、従来、内陸活断層による直下地震の想定とは無関係に設定されていたので、これを想定する場合には、震源近傍効果を新たに考慮する必要があるが、その効果は地震動の周期によって変化する。基準地震動を定める基盤面にしても、短周期構造物に対しては工学的基盤でよいが、長周期構造物に対しては地震基盤とする必要がある。さらに、震源断層をもとに地震動を設定する手法は、理論的手法、半経験的手法、経験的手法に大別できるが、各手法には適用可能な周期範囲がある。これらをもとに、レベル2地震動を設定する手順をフロー図で示した。最後に、緊急の解決・検討を要する課題について私見をまとめた。

1. はじめに

1995年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震(M7.2)は、神戸市をはじめ周辺の地域に未曾有の大被害をもたらした。犠牲者の数は6000人近くにも達し、高架の道路や鉄道のほか、港湾施設や電力、ガス、水道、通信など、各種の土木構造物やライフライン施設は一瞬にして機能を失った。これらの社会基盤施設の被害が極めて深刻であったことから、土木学会では「耐震基準等基本問題検討会議」を設置して検討を重ね、1995年5月と1996年1月の2度にわたって「提言」が行われ、1996年5月にはそれらと解説をまとめた「提言集」¹⁾が刊行されている。

土木学会「第一次提言」では、今後、土木構造物の耐震性能の照査では、原則として、1) 構造物の供用期間内に1~2度発生する確率を有する地震動強さ(以後、レベル1地震動)、および2) 直下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極めて強い地震動(レベル2地震動)、の2段階の強さを用いるべきであることとされている。さらに第二次提言では、内陸活断層によるレベル2地震動は、地域ごとに脅威となる活断層を同定するとともに、その震源メカニズムを想定することにより定めることを基本とする、とされている。このほかにも「提言」ではレベル2地震動について、表現形式や設計地震動の体系への影響、要求される構造物の耐震性能などさまざまな視点から記述しているが、具体性を欠きそれを設定する観点からは不明確であるとの批判も少なくない。

小文では、このレベル2地震動についての具体的イメージづくりに資するため、筆者の独断で既存の資料と考え方の整理を行ってみた。

2. レベル2地震動に関する問題点の抽出

土木学会耐震工学委員会の地震荷重小委員会では、レベル2地震動に関する問題点を抽出し、それらの解決の糸口を見つけることを

目的にワークショップ(網代、1996/4/14)を行った。そこでは、以下のような意見が出された。

- 1) 再現期間1000年程度で確率評価すると、(A級+B級)の活断層が見えてくる。1000年に1度の地震でも、切迫度が高いものがある。(切迫度は別扱いするか?)
- 2) 既往最大や過去に動いた証拠などからは、兵庫県南部地震は見えてこない。
- 3) 起震断層は全国で237本(うち、主要起震断層は104本)。
 - ・切迫度が高い起震断層は、L2(以後、レベル2の略記)地震動の対象から外せない。
 - ・将来の調査を振興する意味では、切迫度が高い断層だけに限定しない方が良い。
 - ・起震断層からは地震規模が大きくなりすぎる。地体構造から決まる最大地震規模を使うのも一案。
- 4) 活断層に対しては地域差が大きい。すなわち、
 - ・活断層が明確で危険度が高い(黒色)、詳細が不明(灰色)、心配無い(白色)の3地域がある。
 - ・(黒色)にも、切迫度が高い断層と、不明確だが動くと強烈な断層の2種類がある。
 - ・(灰色)には、断層の位置が分からないものと、何時動くか分からないものの2種類がある。
 - ・(白色)には、伏在断層や詳細調査が実施されていない場合もありうる。
- 5) 入力地震動の作成は本来、断層モデルを使うべきであろうが、詳細方法と簡略方法があると良い。
- 6) アウトプットを何の形で与えるべきか。時刻歴かスペクトルか。
 - ・L2地震動に対しては非線形の応答予測が重要で、時刻歴を使うことになる。
 - ・スペクトルを与えれば、時刻歴は計算で求められる。
 - ・土構造物では、非線形応答解析をしないだろう。
 - ・単一アウトプットより、時刻歴、スペクトル、最大値、包絡形、継続時間など種々のものが良い。
 - ・大阪府の調査(上町断層に対して)は、時刻歴

表1 「土木」と「建築」のレベル2地震動の比較対象

		土木学会提言 (1995/5, 1996/1)	ビルディングレター-86/6 (1986年版)	建築センター報告95/5 (1995年版)	備考
適用範囲		地上構造物 (地中、基礎)	高層建築物 (H>60m)	同左 (対象を問わず)	
基本方針	確率 レベル1	供用期間中に 1～2回	耐用年数中に一度以上 供用期間中の超過確率0.2～0.3 (再現期間150年)	同左	両者 ほぼ 同等 (確率は 東京の値)
	レベル2	極めて稀	当該敷地で過去～将来で最強 当該敷地で過去最強または 供用期間中稀に受ける可能性有 同超過確率0.05 (再現期間1000年)		
方針	耐震性能 レベル1	概ね弾性限界内	概ね弾性応答を目標	同左	両者 ほぼ 同等
	レベル2	重要→早期修復可能 (許容変形内) 他は全体系が非崩壊	人命に損傷を与えないことを目標	同左	
地震動の種類		レベル2は次を考慮 内陸活断層が基本 プレート境界地震 今回の強震記録 応答スペクトル/時刻歴	3種類以上 標準的波形 地域特性波形 長周期を含む波形 (地表面で)	工学的基盤で定義 (Vs=400m/s以上) 作成指針 ²⁾	
地震動強さ					
	レベル1	(設計震度0.12～0.20)	時刻歴の最大速度で 東京礫層上地表>25cm/s 一次周期近傍での 速度応答スペクトル		高層建築は 新宿想定
	レベル2	設定位置 基盤岩 工学的基盤 地表	同地表>50cm/s		道路橋復旧 仕様では 神戸JMA、 JR鷹取など

註1) 1986年版の問題点

- 1) 特定の地震動の特性が設計に反映されている恐れあり。
- 2) 地盤や基礎構造の違いが設計に反映されない恐れあり。(地表面で与えるため)
- 3) 地域別の地震活動度が適切に評価されていない恐れあり。

註2) 設計用入力地震動作成手法技術指針(案) 本文解説編 平成4年3月
建設省建築研究所 (財) 日本建築センター

を与える方向で進んでいる。

- 7) アウトプットをどこで与えるべきか?
 - ・ L2地震動は、地表部に非線形応答を生じるので、その手前の工学的基盤 ($V_s=300\sim 400$ m/s) で与える。
 - ・ 地表でも与えると便利だ。その場合、少し高めに設定し、詳細調査により低減できるのがよい。
- 8) 構造物の種類が多いので、周期範囲は $T=0.05\sim 10$ 秒程度を規定すべきだ。
- 9) 解放(工学的)基盤面で平均スペクトルを算定する手法は幾つかある。当面は、これに断層近傍効果を付加して使えばよい。
- 10) 「原子力」と「建築」では、特定の断層を対象とするか否かが違う。
- 11) 活断層から地震動を評価する場合、「ばらつき」や「あいまいさ」が強く残る。
 - ・ 「原子力」のように精査すれば切迫度は考慮できるが、通常は切迫度は不明が多い。ただし、切迫度が明かなものは当然考慮すべきだ。(地震発生はポアソン過程ではないから)
 - ・ 活断層と実際に地震が起きた場所とは、必ずしも対応がよくない。
 - ・ 断層の主要破壊深さの違いで、地震動強さに大差がでる。
 - ・ L1とL2の地震動は「強さのレベル」の違いで定まり、再現期間の違いだけで定義されない。再現期間は長い切迫度が高い場合でも、 $L1 < L2$ である。

3. 「建築」との比較

建築分野では既に10年以上前からL2地震動が耐震設計に導入されている。その実績をもとに、見直し作業も実施されている。筆者の独断で土木・建築の両分野におけるL2地震動を比較してみた。

表1による比較の結果を要約すれば、次のようになる。

- 1) 確率的には両分野ともほぼ同程度のものを考え、構造物にもほぼ類似の耐震性能を要求して

いる。

- 2) 「土木」では直下の内陸活断層による地震動に言及しているが、「建築」では特に言及していない。
- 3) 「建築」では当初、東京などの特定都市が対象とされたが、「土木」では地域は限定されていない。
- 4) 「建築」ではL1とL2の地震動強さが工学的基盤における最大速度値や応答スペクトルで定量的に明示されているが、「土木」では定量的記述がなく設定位置も一つに絞られていない。

4. 評価の方法と具体例

最も単純な方法は、既往の強震記録や設計用地震動を用いる方法であるが、この問題点は表1の註1)に指摘されている。これ以外の方法は、経験的方法、半経験的方法、理論的方法などに大別される。経験的方法の一例として、表1の註2)の方法の要点を示せば次のようである。

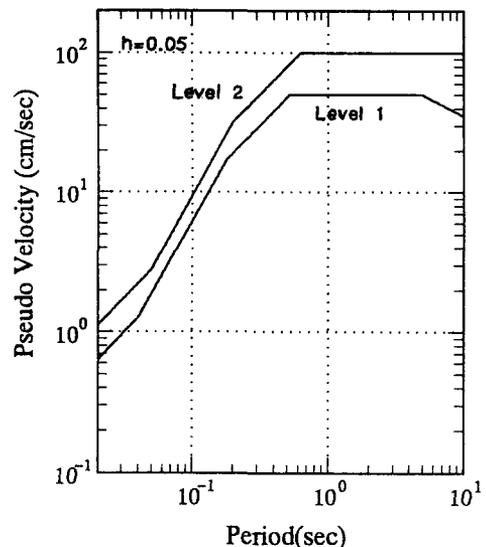


図1 水平動基準応答スペクトル

- 1) 総則 適用範囲……動的解析のため
用語……設計用入力地震動(地表面で)、基準応答スペクトル(解放工学的基盤で)

表2 評価・設定の手順と課題

1. 地震関連資料の収集・整理
A. プレート内地震資料（起震断層の分布、地体構造、すべり量、など） B. プレート境界地震資料（海溝型地震の再来期間、空白域など） C. 歴史地震のリスト
2. 設計で考慮すべき地震（L2地震）の選出
1)年超過確率や最近までの地震発生状況から、注目地点でのL2地震候補C1を選出 2)C1に含まれない切迫度の高い地震C2を選出 3)以上の候補からL2地震を選出（複数でもよい）
3. L2地震の震源特性の想定
1)静的パラメーター（断層位置、震源深さ、断層面の大きさ、平均ずれ変位量） 2)破壊過程と動的パラメーター（震源時間関数、破壊伝播速度、アスペリティ） 3)対象とする周期範囲、その他
4. 震源近傍効果(Near-field effects)の評価
1)震源メカニズム解の影響（ラジエーションパターン） 2)破壊伝播効果の影響 3)面震源の効果 4)アスペリティやマルチプル破壊の影響、その他
5. L2地震動の設定（簡便法/詳細法）
1)地震基盤での地震動特性（スペクトル/時刻歴） 2)地盤特性の設定（線形/非線形/液状化） 3)地表・工学的基盤での設計用地震動（スペクトル/時刻歴）
6. L2地震動に対する地震荷重の評価

地震基盤 (Vs>3km/s)、工学的基盤 (Vs>400m/s)、やや長周期 (2~10s)

$$S(T) = \zeta \cdot B(T) \cdot L(T) \cdot G(T) \cdot P(T) \cdot I(T)$$

設計用応答スペクトル

同上 液状化/特殊地形の影響考慮

2) 基本方針

- ①設計用入力地震動は、レベル1とレベル2で、水平と上下各1成分を定める。
- ②h=5%、T=0.02~10sの応答スペクトルで定義し、時刻歴はそれを基に作成する。

3) 作成手順

1.基準応答スペクトル →2.表層地盤の増幅特性 →3.設計用応答スペクトル →4.時刻歴波形

4) 設計用応答スペクトルS(T)を次式により定める。

ここに、 ζ :地震活動度係数、B:基準応答スペクトル、L:やや長周期補正係数、G:増幅特性、P:液状化補正計数、I:地形効果補正計数 (ただし、加速度応答倍率は4以下)

5. 評価・設定の手順

地表におけるL2地震動を設定する手順の概略は、表2のようになろう。すなわち、まず関連資

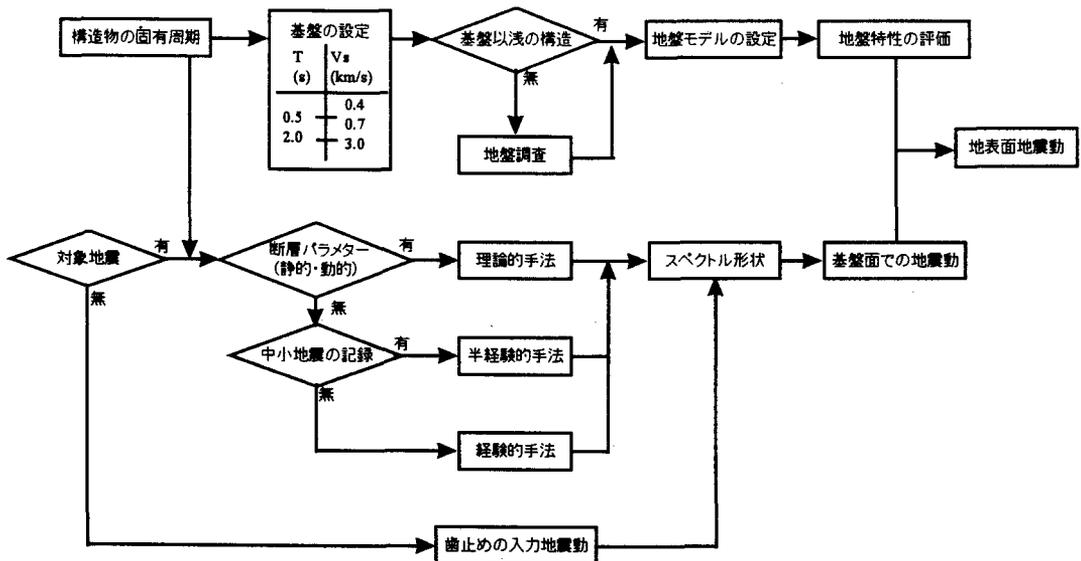


図2 入力地震動設定のフローの図

料の収集・整理が不可欠である。次にその資料をもとに、対象とすべき地震を抽出するが、これで抽出される地震はふつう複数あるものと考えられる。そして各地震に対応する断層の震源特性を検討する。直下地震特有の震源近傍における地震動特性は、near-field effects と呼ばれている。これには表中に示した少なくとも4つの効果が考えられるが、各効果は周期帯域によって一様でないので、常にこれらの効果を均等に扱う必要があるとは限らない。震源特性と基盤の位置が定まれば、基盤における地震動やスペクトルを定め、これに基盤から上部の地盤特性を勘案することによって、地表における地震動やスペクトルを定めることになる。

図2は、以上の手順をもう少し詳細にフロー図で示したものである。全体的な細かい解説は必要ないと思われるが、フロー図の最初に構造物の固有周期を配置した点だけは補足説明しておく必要があるだろう。工学的基盤の選択や、地震動を計算する手法の選択は、現状では対象とする周期範囲に依存すると考えられる。すなわち、対象とする構造物が短周期であれば比較的浅い基盤に注目すれ

ば十分であり、長周期であれば深い基盤を選択する必要がある。そこで、図2では周期範囲を、おおまかに0.5秒と2秒で分けてみた。また各手法の適用可能範囲も、理論的手法は約1秒以上、経験的手法は数秒以下、半経験的はそれらの中間的な広い周期範囲に適用できるので、理想的には対象とする断層全面にわたって適切な地震記録が精度よく得られている必要がある。

6. 緊急の解決・検討を要する課題

「提言」では、1) 地域ごとに脅威となる活断層を同定するとともに、2) その震源メカニズムを想定して、3) 基盤岩において設定する、この3点を内陸活断層によるL2地震動を設定する上での基本方針であると述べている。現段階では、これら3つの基本方針が適用しにくい場面も少なからず想定されるので、当面それらにいかに対処するかが緊急課題である。表2に示した各手順にしても、2～5の各項目がこのような緊急課題を含んでいる。数例を挙げ、筆者の所感を述べたい。

1) 未知の活断層と直下地震の不確実性 (2. L2地震の選出に関連)

現状では、脅威となる活断層が日本全国一様に、詳細に判明しているわけではない。むしろ全体的には活断層による危険度が判明している地域の方が少ないのかも知れない。したがって、現在までに脅威となる活断層が発見されていない地域でも、当該地域が本当地震危険度が低いとは限らないので、その地域に活断層に起因するレベル2地震(いわゆる菌止め)を考慮すべきか、考慮するとすればどのような地震が適切かが、課題となる。

活断層や直下地震のこのような不確実性に対し、従来「原子力」ではごく近傍である程度の規模の地震が発生したと仮定しても安全性が保てることを目標とし、いかなる敷地においても設計用限界地震S2の1つとしてM6.5の直下地震を震源距離10kmの位置において考慮することが行われている(原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987)。これらの数値が決定された経緯は筆者には分からないが、M6.5にしても10kmにしても、それぞれに根拠があって決定されたものと思われる。

2) 断層破壊の不確実性 (3. 震源特性の想定および 4. 震源近傍効果の評価に関連)

設計で考慮すべき断層が同定されたとしても、その震源メカニズムを想定することにも困難が伴う。ただし、この困難が地震動の設定に及ぼす影響は長周期成分ほど低減されるので、特に直下地震による地震動の短周期成分を設定する場合に影響が大きく、具体的には地震動の強さや特性の「ばらつき」や、それに対する処置が問題となる。この「ばらつき」の支配要因は、断層破壊の過程や状況を規定する断層パラメーターであり、具体的には応力降下量(または滑り量)や破壊伝播速度、震源時間関数などである。しかも断層全体にわたるこれらの平均値よりも、不連続的な分布や局所的な値が及ぼす影響が大きいこともよく知られている。これらの動的パラメーター

は従来の地質学的活断層調査では究明されていない項目である。今後、設計用地震動を設定するという地震工学的観点から活断層調査を推進する必要性が極めて高い。

3) 深層地盤データの不備 (5. L2地震動の設定に関連)

基盤岩あるいは地震基盤までの深い地盤構造が知られている地域は、現状では非常に限られている。短周期の地震動は工学的基盤から上の比較的浅い地盤構造をもとに精度よく推定することが可能と思われるが、長周期領域での推定精度は深い地盤構造の精度に強く依存する。したがって、深い地盤構造が不明の地域において、L2地震動の長周期成分をどのように設定するかが重要な課題である。

従来、工学的基盤は $V_s=400\sim 700\text{m/s}$ 程度の地層に設定されているが、 V_s が 400m/s と 700m/s とでは推定する地震動も大幅に異なる可能性があるので、まず合理的な工学的基盤の再定義を行う必要がある。

また地震基盤までの地盤構造については、調査方法はすでに確立しているものの、実施に多大の労力と経費が必要であるために広範な調査が進展していない。これを民間で行う個々の建設プロジェクトに関連して実施することは實際上、不可能と考えられる。したがって、この深層地盤調査こそ政府や自治体が率先して全面的に支援し、早期に実施すべき事業であると筆者は考える。

謝辞

本文は、レベル2地震動に関して、土木学会耐震工学委員会地震荷重小委員会における討論、および東京工業大学大学院総合理工学研究科のレベル2地震動研究会における研究の成果を筆者の私見に基づいてまとめたものである。有意義な討論や知見を提供頂いた小委員会や研究会の各位には、この場を借りてお礼申し上げる。なお本文中に誤った記述があれば、その全ての責任は筆者にある。

引用文献

- 1) 土木学会『耐震基準等に関する提言集』1996.
- 2) 日本建築センター『設計用入力地震動作成手法技術指針(案) 本文解説編』1992.

Key Words (キー・ワード)

1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (1995年兵庫県南部地震), Active Faults (活断層),
Near-field Motions (震源近傍の地震動), Level 2 Earthquake Motions (レベル2地震動)

On Level 2 Earthquake Motions Required for Seismic Design of Civil Structures

Tatsuo Omachi*

*Tokyo Institute of Technology

Comprehensive Urban Studies, No.61, 1996, pp.183-191

Following the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, PROPOSAL ON EARTHQUAKE RESISTANCE FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES was issued by the Japan Society of Civil Engineers. In the proposal, there are descriptions about earthquakes and earthquake motions that need to be considered in earthquake-resistant design, and Level 2 earthquake motions are newly required to be taken into account. Level 2 earthquake motions having extremely large intensity are said to be very low in the probability of occurrence during a life time of a structure, and they are closely related to near-field motions caused by active faults. Due to ambiguity in the proposal, there seems to be some confusion and difficulties in specifying Level 2 motions. To facilitate any effort to specify them, this paper summarizes the similar motions that have been used for high-rise buildings, and state-of-the-arts regarding methods and procedures to evaluate Level 2 motions taking account of active faults. The methods are classified into 3 groups: analytical, semi-empirical and empirical methods. In the evaluation, one has to pay attention to the facts that every method has advantages and disadvantages of itself, and that the basement where Level 2 motions are specified are dependent on vibration periods of a structure concerned. Finally, some comments on issues that need urgent solutions are also stated.