

地盤震動と耐震設計

建築基準法との関連から

北川良和

慶應義塾大学 理工学部システムデザイン工学科・教授

1. はじめに

建築物の耐震設計理念とその手法を定めたものとして建築基準法と関連法令がある。その中で地盤震動に係わる事項は建設地点での地震動評価に基づいた地震荷重で代表されている。

一般に、建設地点毎に地震動を評価するためには、震源特性、波動伝播特性、表層地盤特性を把握する必要がある。これらの要因を厳密な意味で耐震基準にとり入れるには、早計の感を免れないという立場から、昭和 56 年（1981）に改正された建築基準法では、静的な荷重におきかえた包括的な扱いがなされている。また、平成 12 年（2000）6 月に改正された建築基準法・同施行令では、性能担保型設計指向がより明確になった。この結果、建設地点での地震動や建築構造物の地震時挙動を的確に把握することの必要がますます高まってきたといえる。

一方、超高層建築物や免震建築物の耐震設計では、実際に観測された地震動波形や模似地震動波形を用いて、その耐震安全性を査照するという動的設計手法が行われている。しかしながら、種々の地盤に建設される建物の設計にいかなる設計用入力地震動波形を用いるべきかについては、各種の構造に共通して適用できる合理的かつ一般的な手法として、社会的コンセンサスが得られるには至っていなかった。

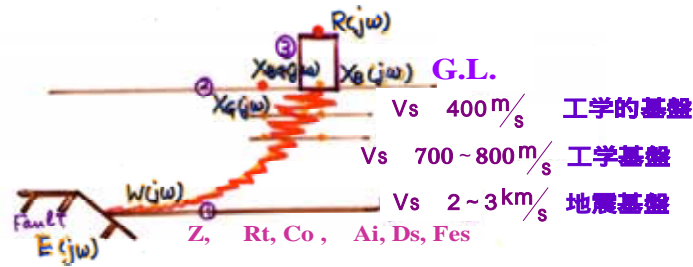
平成 12 年（2000）の改訂基準法では、より厳密な意味で動的な概念を取り入れるべく表層地盤の増幅率、解放工学的基盤でのスペクトル等が与えられた（告示 1457、1461 号等）。しかしながら、その取り扱い方について地盤震動に係わる研究成果から得られた知見をどう反映させるか幾多の課題が生じている。

これらの背景のもと、本稿では地震動の捉え方、建築物の地震荷重、特に地震地域係数の現状と今後の課題等について述べる。

2. 地震動の捉え方

一般に地震発生以来、建築物が地震によって揺れるまでの過程を周波数領域で表すと、建築物頂部での揺れ（応答量、 $R(j\omega)$ ）は震源特性（ $E(j\omega)$ ）地震の波動伝播経路特性（ $W(j\omega)$ ）建物までの地盤特性（ $X_G(j\omega)$ ）建物と表層地盤との相互関係から決まる相互作用特性（ $X_{BG}(j\omega)$ ）および建物の振動特性（ $X_R(j\omega)$ ）の積となる。すなわち、波動伝播経路としては、(1)震源 (2)地盤基盤 (3)工学的基盤 (4)地表 (5)建築物となる。この様相を図 1 に示す。

この時、(1) (2)の過程では震源・波動伝播経路特性が、(2) (4)の過程では地盤特性が、(4) (5)の過程では地盤・建物特性が各々の過程で寄与する代表的な要因となる。ここで、 $(j\omega)$ は周波数領域での振幅特性、位相を意味する。このように、地表面での地震動を建築物への入力地震動として捉えている。これらの要因を厳密な意味で基準法に取り入れることは現状では早計の感を免れないという立場から、昭和 56 年に改正された建築基準法では、静的な荷重いわゆる、実際に作用する地震力よりもはるかに簡略化した形の「設計用地震荷重」におきかえた包括的な扱いがなされている。



(1) 波動の伝播特性 $R(j) = E(j) * W(j) * X_G(j) * X_{BG}(j) * X_B(j)$

$E(j)$: 電源スペクトル $W(j)$: 波動伝播経路特性
 $X_G(j)$: 地盤特性 $X_{BG}(j)$: 相互作用特性
 $X_B(j)$: 建物の振動特性

(2) せん断力係数 $C_B : C_B = Z * Rt * Ai * Co$

Z : 地震地域係数 Rt : 振動特性係数
 Ai : せん断力係数分布 Co : 標準せん断力係数)
 稀に発生する地震動に対して0.2,
 極めて稀に発生する地震動に対して1.0

図1 地震時における建築物応答の位置づけ

3. 建築物の地震荷重

耐震工学は震害の経験を母体とし、これに実験や解析結果をもとに発展してきた。これらを通して得られた知識と経験は耐震設計に活用されている。代表的な地震動と建築物の耐震工学上の意義を表1に示す。

表1 代表的な地震と耐震工学上の意義

年代	地震名(M)	死者数(人)	耐震工学上の意義及び特徴的な被害
1880	横浜		日本地震学会の発足
1891	濃尾(M=8.4)	7273	輸入構工法(煉瓦材)の批判、震災予防調査会の発足、三角測量の実施、地磁気観測の開始
1919			市外地建築物法
1923	関東(M=7.9)	142807	震災火災、内藤式計算法のチェック、市街地建築物の地震力(震度0.1)地盤と建物との被害関係
1924			市外地建築物法の大改正
1927	北丹後(M=7.5)	2925	断面調査と三角測量(水準測量)
1933	三陸沖(M=8.5)	3064	津波
1948	福井(M=7.2)	3769	局地的な激震、気象庁震度階 の設置、RC造ビルの崩壊、強震観測事業
1950			建築基準法
1964	新潟(M=7.5)	26	地盤による被害(地盤の液化化)、工場火災(沿岸工業地帯の被害)
1966	松代(M=5.4)		地震予知研究
1968	十勝沖(M=7.9)	52	RC造ビルの崩壊(せん断補強の不足による柱のせん断破壊)、家具・物体転倒
1971			建築基準法に改正
1978	伊豆大島近海(M=7.0)	25	
1978	宮城県沖(M=7.4)	27	
1981			建築基準法の大改正「新耐震設計法」
1983	日本海中部(M=7.7)	104	地盤災害・津波
1983	釧路沖(M=7.8)	2	大きな加速度値(軽微な建物被害)
1993	北海道南西沖(M=7.8)	230	津波災害、火災
1995	兵庫県南部(M=7.2) (阪神・淡路大震災)	6348	大きな加速度値・速度値・震度 の帯、中低層RC造ビルの崩壊、木造住宅の倒壊、厚肉鉄骨の破断、地盤災害、家具・物体の転倒、非構造部材の被害など。気象庁計測震度による震度階
2000			建築基準法の改正「限界耐力計算法」
2004	新潟県中越(M=6.8)	(42)	大きな加速度値、地盤災害、家具・物体の転倒、木造住宅の被害

我が国の建築基準法では、これまで一般的な建築物に作用する地震動の算定から超高層建築物（高さ60m以上）および原子力施設の構造物を対象から除外している。

建築物のある部分に作用するせん断力は、その部分が支えている鉛直荷重にその部分における地震層せん断力係数を掛け合わせることによって、その部分から上に作用する地震力の合計として計算出来る。すなわち、

$$Q_i = C_i \sum_{i=i}^n W_i \quad (1)$$

ここで、 Q_i : i 階の地震層せん断力、 C_i : i 階の層せん断力係数、 W_i : i 階の重量、 n : 総層数である。

このとき、 C_i は

$$C_i = Z \cdot R_i \cdot A_i \cdot C_o \quad (2)$$

である。

Q_i とその階に作用する地震力 F_i との関係は、

$$Q_i = \sum_{i=i}^n F_i \quad (3)$$

ここで、 Z : 地震地域係数(1.0~0.7)、 R_i : 振幅特性係数、 A_i : 高さ方向での C_i の分布係数、 C_o : 標準せん断力係数(1次設計の場合0.2以上、2次設計の場合1.0以上)である。これらの諸パラメータの位置を図1中に併せて示す。

一方、建築基準法改訂(2000)に伴う限界耐力計算法では、建築構造の性能の簡略化、国際基準との調和等を基本理念として性能規定型指向となっている。ここでは、

- (1) 工学的基盤での地震動の設定
- (2) 表層地盤の増幅特性の算定
- (3) 地盤と建物との相互作用効果の算定
- (4) 建築物の荷重変形特性に基づいた等価周期・等価粘性減衰定数の算定

が提示されている(施行令第82条6、告示1457号参照)。

このとき、この構造設計法の基本となる建物の地震時応答は時刻歴応答解析ではなく応答スペクトル上で評価される。すなわち、解放工学的基盤で設定された加速度応答スペクトル($h=0.05$)を耐震設計用入力地震動とし、非線形地盤の1次固有周期、固有振動モードから、表層地盤の増幅特性を算定し、両者の積から地表面での加速度応答スペクトルを近似するものである。ここで、解放工学的基盤での地震動スペクトルは従来の地震力レベルとの連続性が維持されており、地盤の増幅特性を考慮した地表面での地震動レベルは新耐震設計法の地震力レベルとほぼ同等となっている。

上述した耐震設計に係るパラメータのうち地盤震動に関するものは、 Z 、 R_i 、 C_o 、(1)(2)であり、特に(1)~(4)については解説書を参考に-されたい¹⁾。

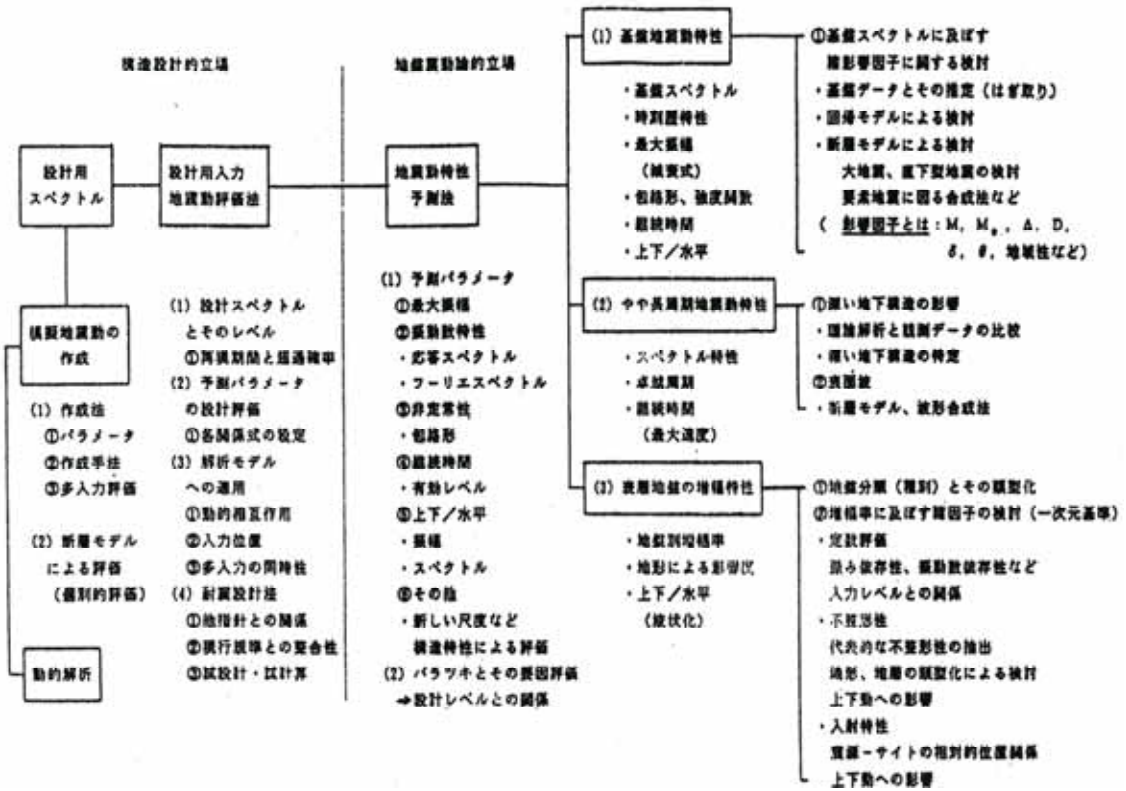


図2 設計用地震動に関する検討項目とその評価 (文献2)より引用)

地表面での地震動特性に寄与するパラメータについて、その評価項目を設計的立場と地盤震動論的立場から整理したものを図2に示す。図中、右側部分は地震動予測の観点から、研究成果として得られる項目で、主として建築類物の存在を無視し、震源・波動伝播・地盤特性のみを検討対象とするものである。また、左側部分は設計用入力地震動に直接関係する項目で、地盤震動論的立場から得られる地震動特性をもとに、その中から建築物の地震時応答に直接大きな影響をおよぼすものを取り出し、建築物が保有すべき耐力等を勘案して設計用入力地震動を算定するものである。これらの評価項目や既往の強震観測記録を基に、工学的判断のもとに設定された設計用地震動スペクトルとして、平成12年(2000)の建築基準法告示で示された解法工学的基盤での加速応答スペクトルがある。

なお、上部構造に着目し、上記2種類目の耐震設計法を比較すると、限界耐力計算法では地震力と上部構造の変形との関係が建築物の耐震性を評価する際に特に重要となる為、いかに建物の1次固有周期と減衰定数を的確に評価するかが重要となることに留意する必要がある。

一方、高さ60mを越える超高層建物については、告示1461号に規定された解放工学的基盤での加速度応答スペクトルに基づいた設計用入力地震動による時刻歴応答解析に基づいた耐震設計となっている。

ここで、同告示第四号イのただし書きにより、「敷地の周辺における断層・震源からの距離、その他地震動に対する影響及び建築物への効果を適切に考慮した場合はこの限りではない」と記述されていることに留意する必要がある。これは性能担保型設計体系への移行と相俟って、設計用入力地震動としては設定した耐震性能目標を確認するために相応したものを採用すべきであり、このためには、従来から用いられている EL-Centro 1940 NS、Taft 1952 EW、Hachinohe 1968 NS・EW といった波形での応答解析は必ずしも行う必要はなく、むしろ耐震性能目標で設定した地震動強さに合致するよう実

地震動記録や、適切な方法によって建設地点での地震生起頻度、活断層、地盤特性等を反映させた模擬地震動を採用すべきであるという考え方によるものと考えられる。

4. 地震地域係数

正確な地震予知が不可能な現段階では、将来起こり得る地震動の強さを過去の地震記録から統計的に予測することが工学的に必要となる。ある建設地点での危険度は、一般的に言って、その付近の地震活動度と地盤特性の地震動への影響によって決められるものであるが、これらの要因を厳密に考慮することはなかなか容易なことではない。

これまでに国内で行われた地震危険度に関する研究を概観すると、いずれの研究成果も過去の地震資料をもとに求められており、特殊な地震を除けば、十分とは言えないまでも、一応の結果を得ているものと思われる。

工学的実用性、すなわち耐震設計での地震力の低減係数としての地震地域係数は、いずれ近い将来、日本全域にわたる均等な判断で十分な精度をもつ地知予知マップの作成が可能になった場合、改められるべきものの、当面、短・中期地震予報等によって左右されては困るものであり、また、わが国は地形・地質学的に地震活動の特殊性を有している。これらの点を考慮して、昭和56年(1981)に改正された建築基準法・同施行令では、地震力の相対的な低減係数として地震地域係数(Z)が公示され、今日に至っている。以下に、設定の考え方、設定項目とその判定規準、地域係数作成上の留意点、及び平成12年(2000)の建築基準法改正に向け検討された内容について述べる。

地震地域係数の設定に際して、(1)耐震設計上の危険度マップを統一する、(2)地震資料に関して、地震活動の時間的・空間的固有性を客観的に評価する、(3)解析方法に関して、地盤の地域特性を含まず、地震活動のみを反映させる、(4)結果の表現として、日本全国を 0.5° 毎の細目点で表現するなどの諸点が考慮された。

これまでの研究成果は主として学術的な観点から提案されており、使用した地震資料、その評価および解析手法もまちまちであった。このため、耐震設計上実用的な地域係数として個々の研究成果を直接応用することは、多少時期尚早の感を免れないという判断のもと、各研究成果内容について検討された。検討項目は(1)地震資料に含まれる地震諸元の精度、(2)地域毎に得られる資料の均一性、(4)最大地震動を求める計算式、(5)最大地震動の期待値を予測する方法、(6)結果の表現法である。表2に検討項目とその判定基準および重み例を示す。

地域係数作成手順は以下の通りである。(1)表2に示した判定基準をもとに、地震活動のみを反映した各種研究成果(当時の研究成果総数は10)を3つのグループに分類する、(2)分類された研究成果の個々について、 0.5° 毎の細目点で読み取られた期待値に、個々の研究成果が属するグループ毎に定められた最終的な重み(3、2、1)を乗じ、各細目点での総和平均、総乗平均操を行う。この時、考慮の対象となった研究成果は、再現期間100年で求められた期待値マップを一応の規準としている。これは、その他の再現期間(50、75および200年)で求められた期待値マップについて、最高値で除した係数表示による相対的な期待値の地域特性が大局的に類似の傾向を示していることによっている。

総和平均および総乗平均から得られた結果を比較し、工学的判断のもと、日本全国を3区分にした地震地域係数の原案を図3に示す。図中、日本全域を地震活動によって、A:地震活動度の高い地域、B:地震活動度の中程度の地域、C:地震活動度の低い地域に3区分されている。この原案をもとに、最終的に旧基準による地震地域係数との整合性等行政的判断もと決定されたのが、現行の地震地域係数(Z)である。

表2 判定項目とその判定基準³⁾

	検討項目	判定基準	重み例
使用した地震資料に関して	資料に含まれる地震諸元の精度	1885年～江戸中期までのデータを使用したもの	3または2
	地域に得られる情報の均質性	1885年, 1600年を基準とし, 1885年以降のデータを使用したもの	3,2または1
	資料の数量(統計年数)	1885年, 1600年を基準とし, 1885年以前のデータを使用したもの	3,2または1
解析方法に関して	マグニチュード, 震央距離から最大地震動を求める計算式	方法については研究者独自の主張があるため, 特に評価の基準を設けない	1
	得られた最大地震動の値の頻度分布から任意の再現期間に対する最大地震動を予測する方法	極値統計予測方法によるもの	2または1
結果に関して	結果の表現方法	1を2等分割以上した細目で, できるだけ細かく結果を表現し得ているもの	2または1

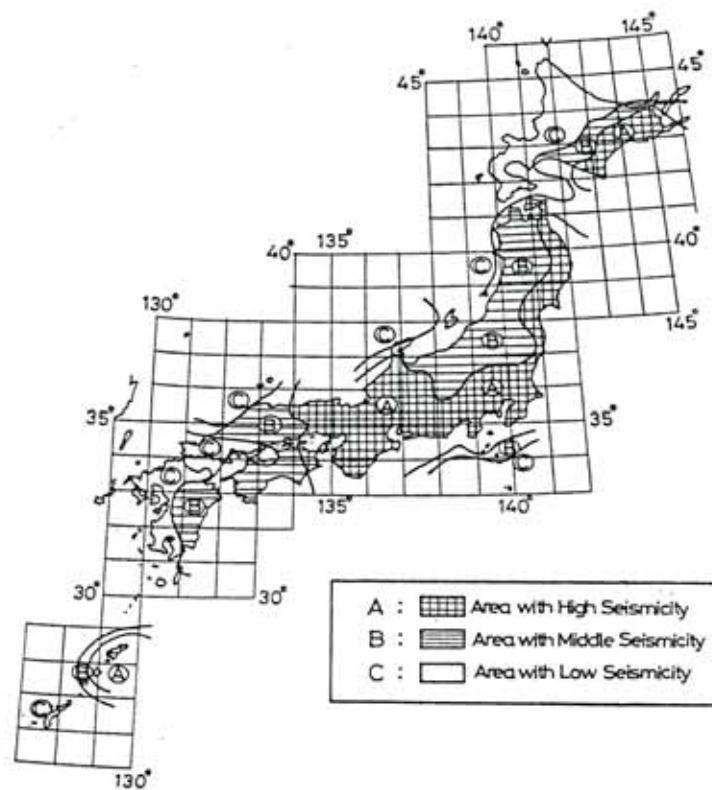
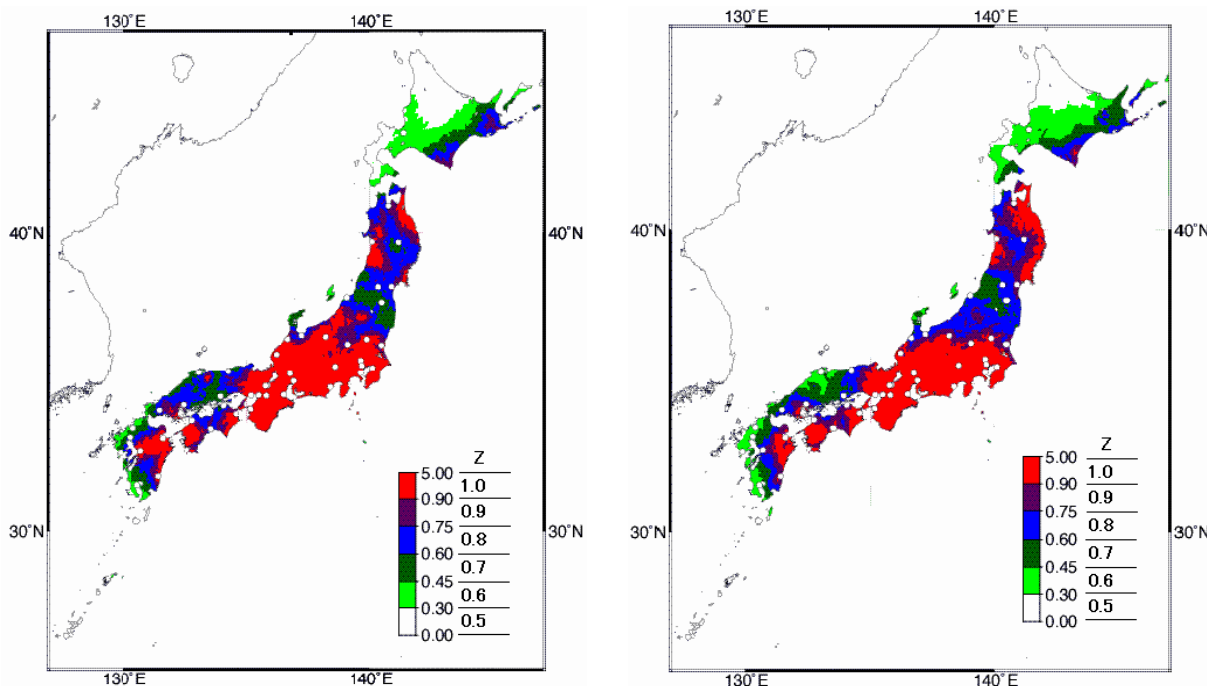


図3 相対的な地震動の地域特性³⁾

平成 12 年（2000）の建築基準法改正に關して検討された地震地域係数に係わる内容を概観する。地震資料については、これまでに公表されている宇佐美カタログ（1496-1984 年、M 5、534 地震）、気象庁カタログ（1985-1995、M 5、534 地震）及び活動度が A、B かつ確実度が 1、2 の内陸活断層の 3 種類で、地震地帯構造は考慮されていない。また、再現期待値の算定にあたっては、最大加速度に対しては福島・田中式（1992）、最大速度に対しては翠川式（1993）が用いられた。

地震地域係数の評価に際して、地震動の応答スペクトルとして与えた場合、周期成分毎に地域係数や、周期成分に応じて波動伝播特性が異なることから、周期成分毎の地震地域係数が必要となるため、作成にあたっては、短周期成分については加速度振幅、長周期成分については速度振幅が用いられている。その結果、地震地域係数として、図 4 に中地震動に対して日本全国を 5 区分（1.0~0.5）、大地震動に対して 3 区分（1.0~0.8）されている。また、これらの結果に加えて、内陸活断層の存在する地点近隣においては 1.0 としている。図 4 に中地震動の場合（再現期間 50 年）について、図 5 に大地震動の場合再現期間 500 年）について、各々加速度振幅地域格差、速度振幅地域格差分布を示す（資料提供：(独法)建築研究所大川出博士）。現行の地震地域係数（Z）と比較すると、大地震動の場合、四国・九州地方でおおきな値を示し、また、活断層近傍の都市（県庁所在地）の大半が 1.0 となっている。中地震動については四国・九州地方で大きな値になる都市が存在している。

地震地域係数は、日本全国にわたり、均等な判断で、十分精度を持つ地震予知マップ係数が可能になった場合、改めるべきものである。しかしながら耐震設計上の地震強度の低減係数としての地域係数は、当面、短・中期地震予報等によって左右されては困るのものである。この為には、(1)地盤震度に関する知見・情報の高度化、例えば、地震動レベルに応じた地域係数の評価、周期別距離減衰式の提案、地震活動と地盤特性を考慮した地震危険度評価等、(2)活断層情報の精度と信頼性の確保、(3)建築物の耐用年数の導入等が考えられる。



加速度振幅地域格差(50年期待値)

速度振幅地域格差(50年期待値)

図 4 中地震動の場合の加速度・速度振幅地域格差

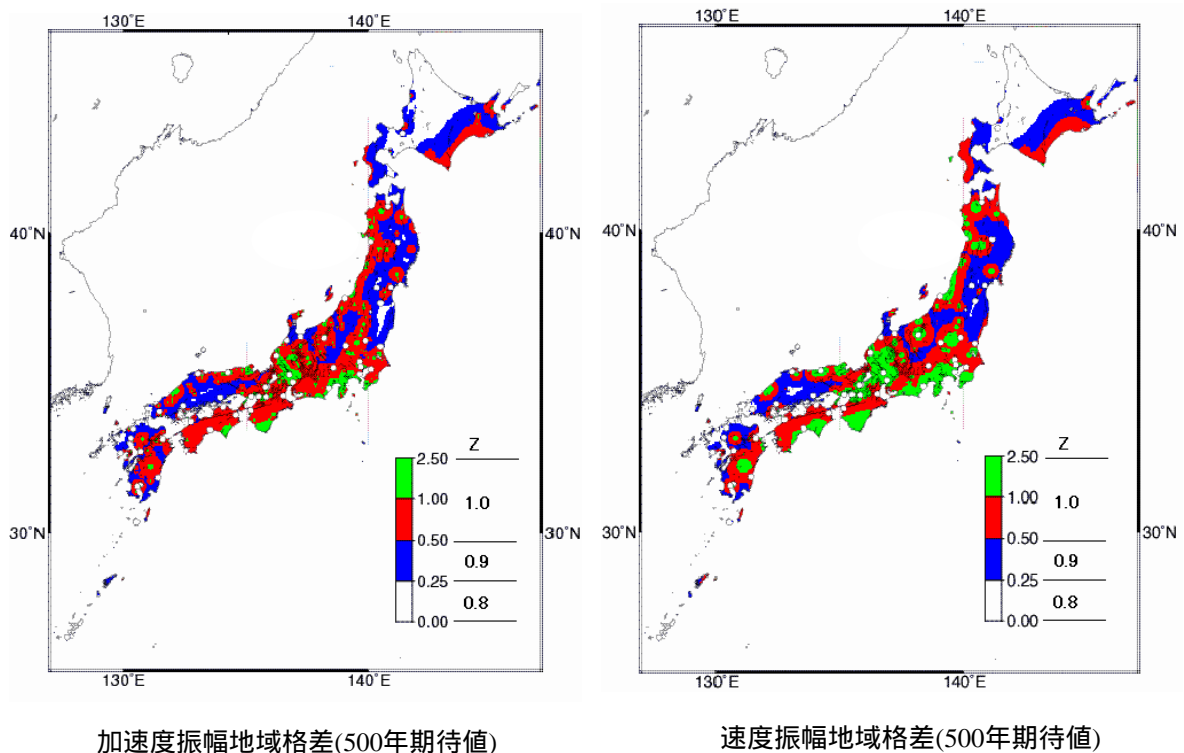


図5 大地震の場合の加速度・速度と振幅地域格差

5. あとがき

地震動の捉え方、地盤震動に係わる耐震設計とのパラメータ、建築物の地震荷重、特に地震地震地域係数の現状と今後の課題等について述べた。

地盤震動に係わる代表的な課題を列記すると、(1)解放工学的基盤での加速度応答スペクトルの妥当性、(2)サイト波としての模似地震動作成手法の妥当性、(3)地盤の平行層や鉛直下方入射等の仮定の妥当性、(4)地盤の非線形性の等価線形化評価の妥当性、(5)地盤の液状化評価の妥当性などが挙げられる。地盤震動に係わる研究成果から得られた高度な知見（建築基準法で示された内容との比較から）をどのように耐震設計に反映させるか、幾多の問題が残る。この為には「波の迷い」を起こすことなく、建築物の重要性、経済性、社会的要求などを十分に考えながら、構造設計者が自負と責任を持って設計入力地震動として捉え、ベストのものを求めて悩み悶えつつ、性能担保型設計に対して対応することが肝要といえる。

参考文献

- 1) 改訂建築基準法の構造関係規定の技術的背景, 国土交通省建築研究所編, ぎょうせい, 2001
- 2) 北川、大川、鹿島、設計用入力地震動作成手法, 建築研究資料, 建設省建築研究所 83, 1994
- 3) 尾崎、北川、服部、地震動の地域特性に関する研究(その1), 日本建築学会論文報告集, 第266号, pp.31-40, 1978

謝辞: 本稿の作成に当たり、独立行政法人建築研究所 大川出博士より資料を提供して頂いた。また、今は亡き小林啓美先生の記念講演会で機会を与えて頂いた。ここに、関係各位に心から感謝の意を表する次第です。