

地震調査研究推進本部政策委員会
第8回総合部会

土木構造物に対する設計地震動
の現状と地震動研究に対する期待

平成21年12月9日

東京工業大学
大学院理工学研究科土木工学専攻
川島一彦

目次

- 土木構造物の耐震設計に用いる設計地震動
- 新しい地震動研究をどのような形で取り入れようとしているか？—地震動研究の進展を取り入れた土木構造物の設計地震動の設定法ガイドライン(案)
- 地震調査推進本部における地震動研究に対する期待

土木構造物の耐震設計に用いる 設計地震動

用途種別、構造種別ごとに間口の広い 土木構造物

- 用途・種別：交通系施設、治山・治水・利水系施設、上下水道施設、電力・通信系施設、エネルギー系施設、……

- 構造形式：橋梁、ダム、港湾、堤防・堰、トンネル、地下構造物、ライフライン施設、……

- 耐震基準が整備されてきている施設

- ✓交通施設：橋梁（道路系、鉄道系）、港湾施設、地下駐車場

- ✓治水・利水系施設：河川施設、ダム

- ✓電力施設：ダム

- ✓ライフライン施設：上水施設、下水施設、ガス導管、石油パイプライン

土木構造物の耐震設計

地上系構造物

震度法
(1925年ー)
レベル1地震動



2段階設計法

地震時保有耐力法
(1990年ー)
レベル2地震動、
変形性能確保



次第に、事実上、地震時保有耐力法で設計を決定

地下構造物

応答変位法
(1978年ー)
地下構造物



順次、レベル2
地震動対応

震度法に用いる設計地震動

- 設計震度0.2~0.3は、過去のいろいろな震災経験を経て総合的に定められた地震力を与えると、長い間考えられてきた。
- しかし、強震記録に基づく距離減衰式が実用されるようになるに従い、1980年代後半から(特に、兵庫県南部地震以降は)、設計震度0.2~0.3は、増幅率2.5程度の構造物では地表面PGAが0.08g程度のさして大きくない地震動に相当すると考えられるようになってきた。
- 震度法にかわり、現実的な地震動、事実に近い耐震計算法、事実に近い耐力・変形性能を考慮する地震時保有耐力法に設計の主力が移ってきた。

地震時保有耐力法に用いられる設計地震動

●タイプⅠ地震動(平成2年以降)

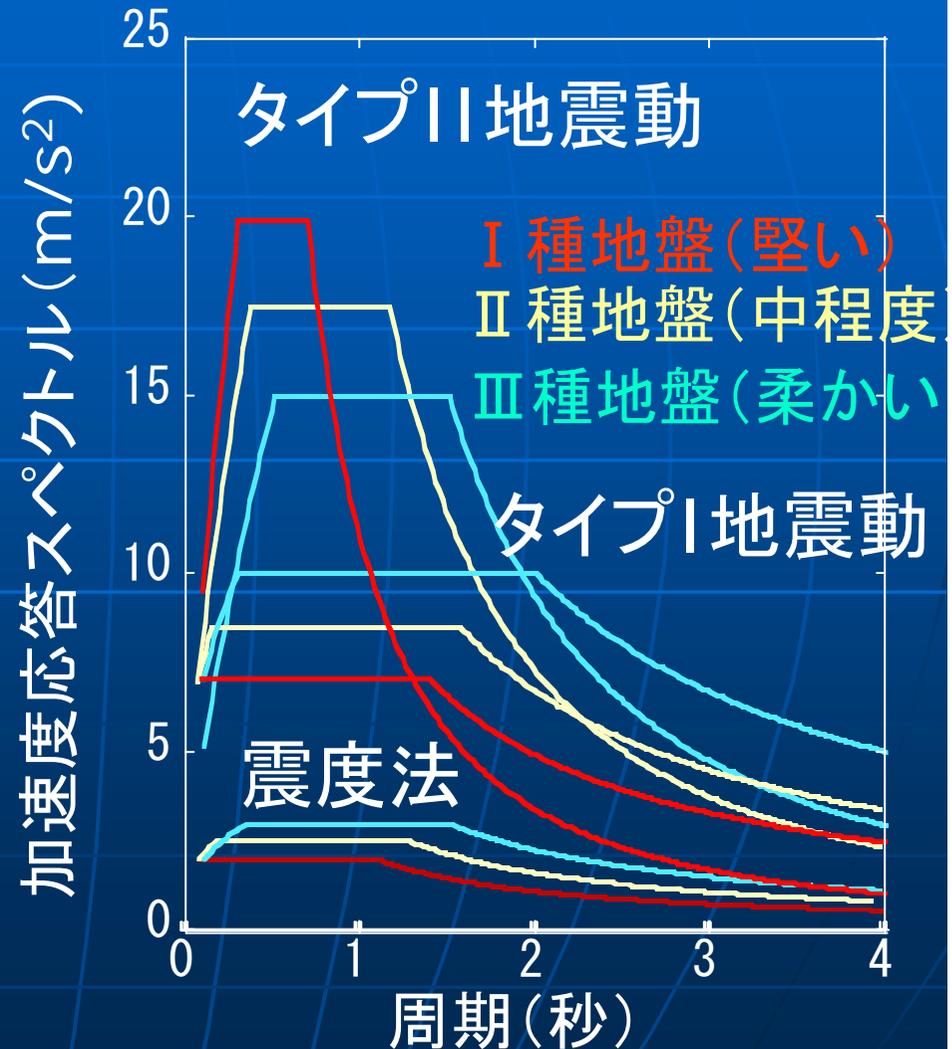
✓M8クラスのプレート境界型の大地震による中程度の距離の地震動

✓継続時間が長く、強い地震動

●タイプⅡ地震動(平成7年以降)

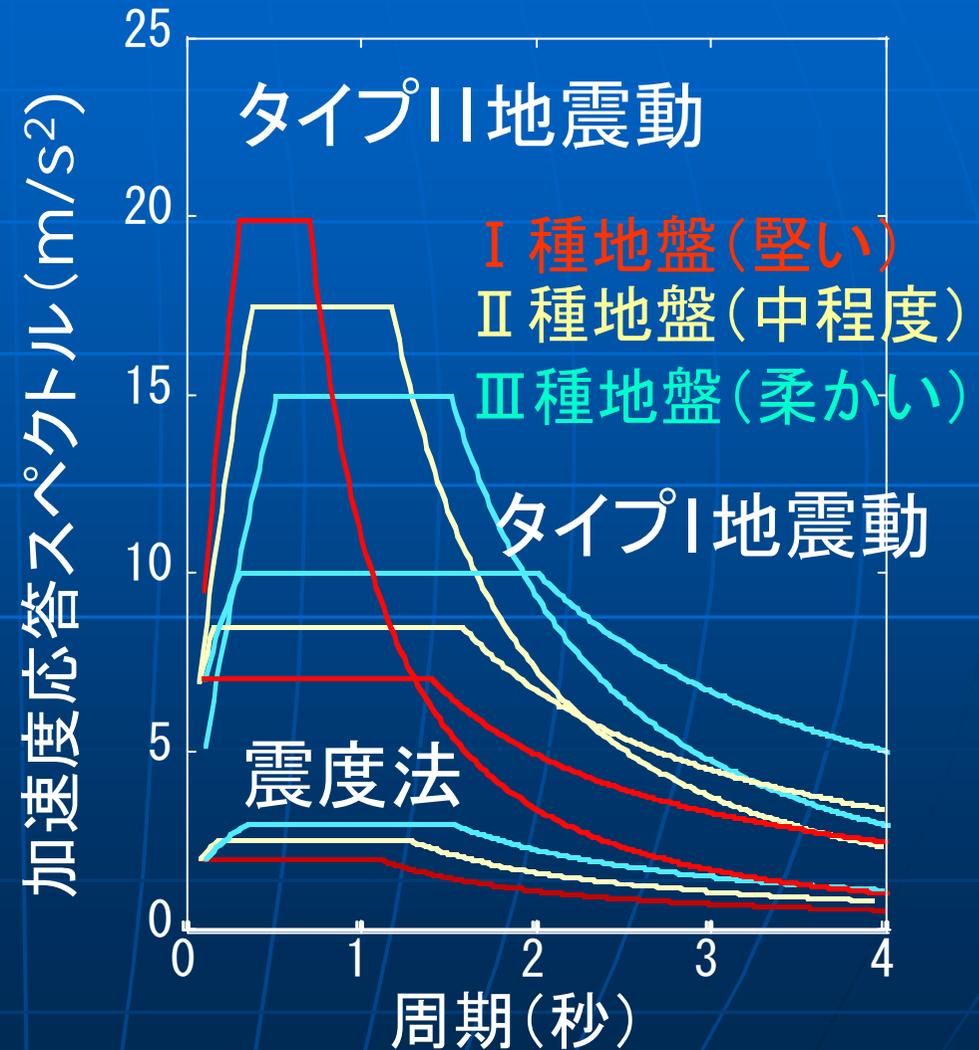
✓M7クラスの内陸直下型地震による断層近傍地震動

✓継続時間が短いが強烈な地震動



タイプI地震動

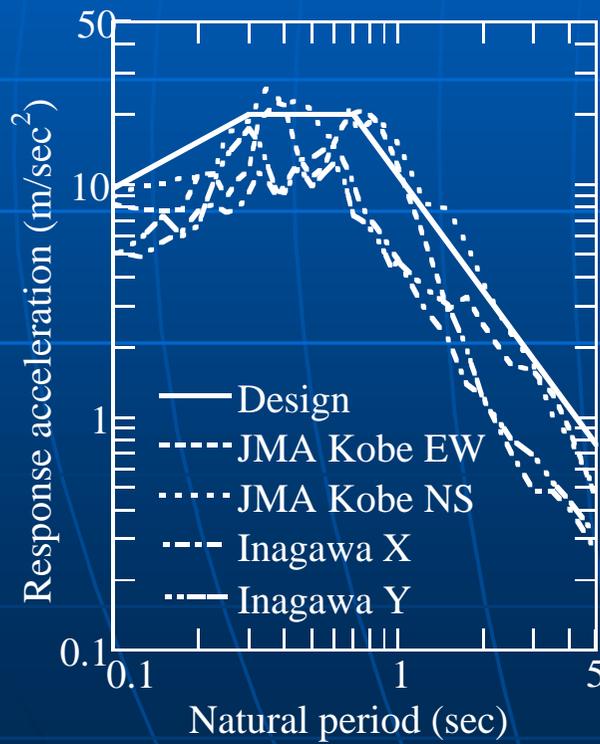
- 平成2年道路橋示方書にはじめて導入。
- 加速度応答スペクトルの距離減衰式(川島、相沢、1984)に基づき、関東地震の際の東京での地震動を想定(M=8、 $\Delta=50\text{km}$)し、包絡線を求めたもの
- 短周期ではキャッピングを行っている。



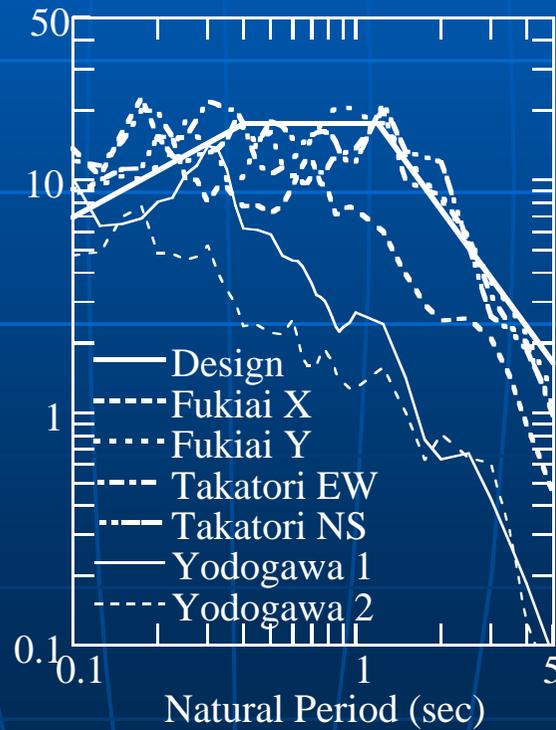
タイプII地震動

1995兵庫県南部地震による代表的強震記録を包絡。
1995年以降、使用されている。

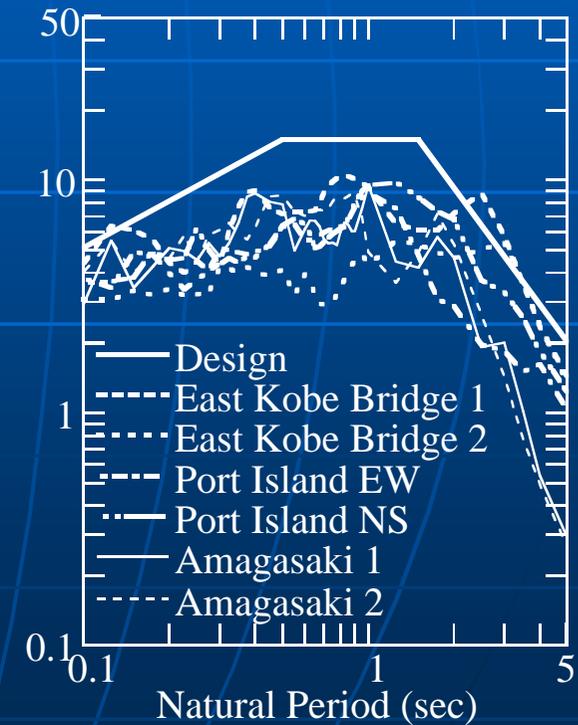
I種地盤



II種地盤



III種地盤



Kawashima (2000)

新しい地震動研究をどのような形で取り入れようとしているか？

地震動研究の進展と土木構造物の
設計地震動に関する講習会

土木学会地震工学委員会・地震動研究の進展を取り入れた
公共社会インフラの設計地震力に関する研究小委員会

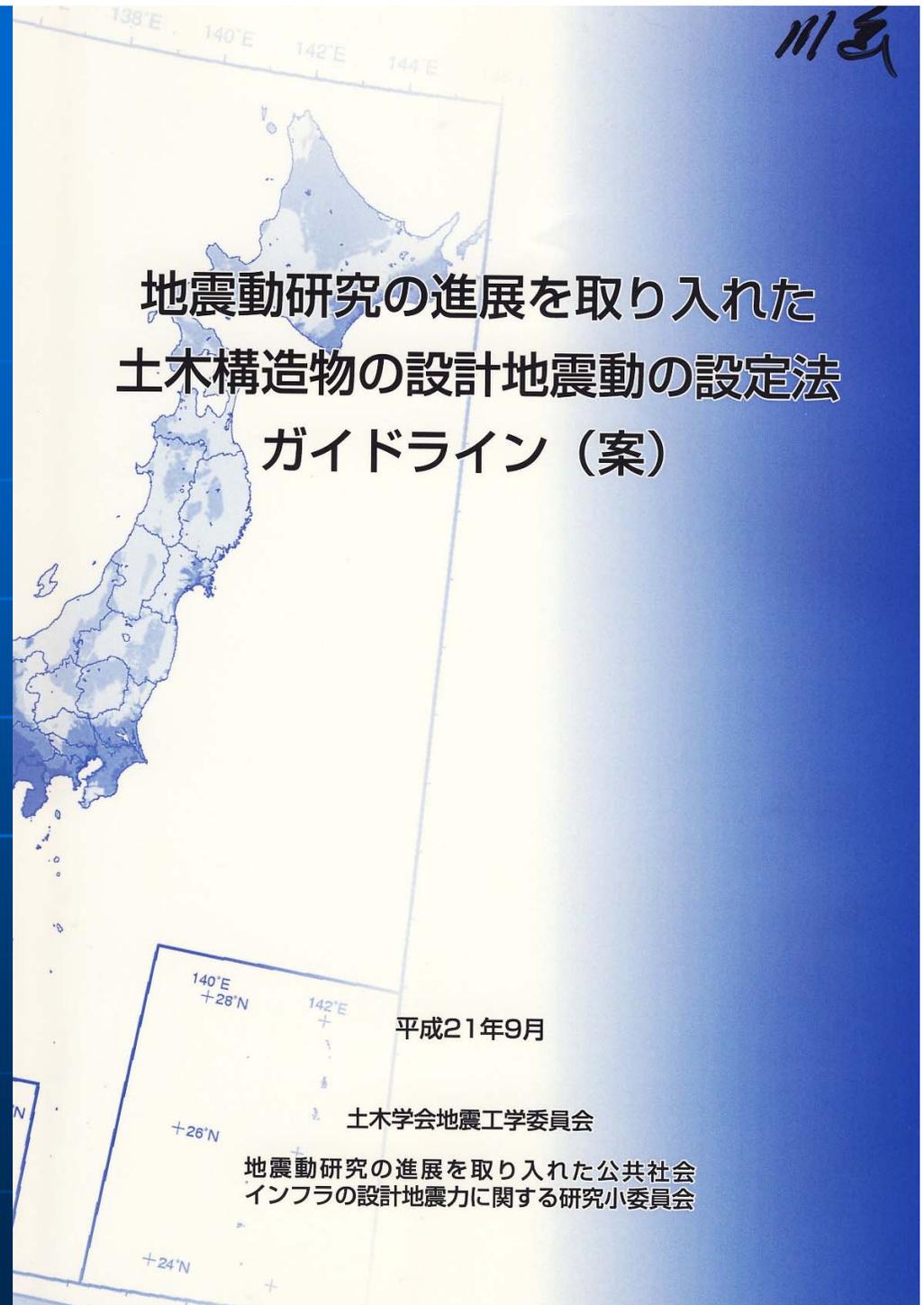
地震動研究の進展を取り入れた
土木構造物の設計地震動の
設定法ガイドライン(案)

平成21年12月1日

東京工業大学大学院理工学研究科
土木工学専攻
川島一彦

●土木学会地震工学委員会の中に設けられた「地震動研究の進展を取り入れた公共社会インフラの設計地震動に関する研究小委員会」で、平成18年度～20年度の3年間にわたって、検討した成果

地震動研究の進展を取り入れた
土木構造物の設計地震動の設定法
ガイドライン（案）



地震動研究の進展を取り入れた土木構造物の設計地震動の設定法ガイドライン(案)

1. 設計地震動の設定の基本方針
 2. 断層近傍地震動の特性
 3. 短周期地震動が土木構造物に与える影響
 4. 長周期地震動の特性
 5. 震源断層を特定した地震動の推定手法とその利用
 6. 確率論的な地震動評価とその利用
 7. 設計地震動の設定に使用してはならない気象庁震度階
 8. 設計地震動の設定と工学的判断
- 付属資料

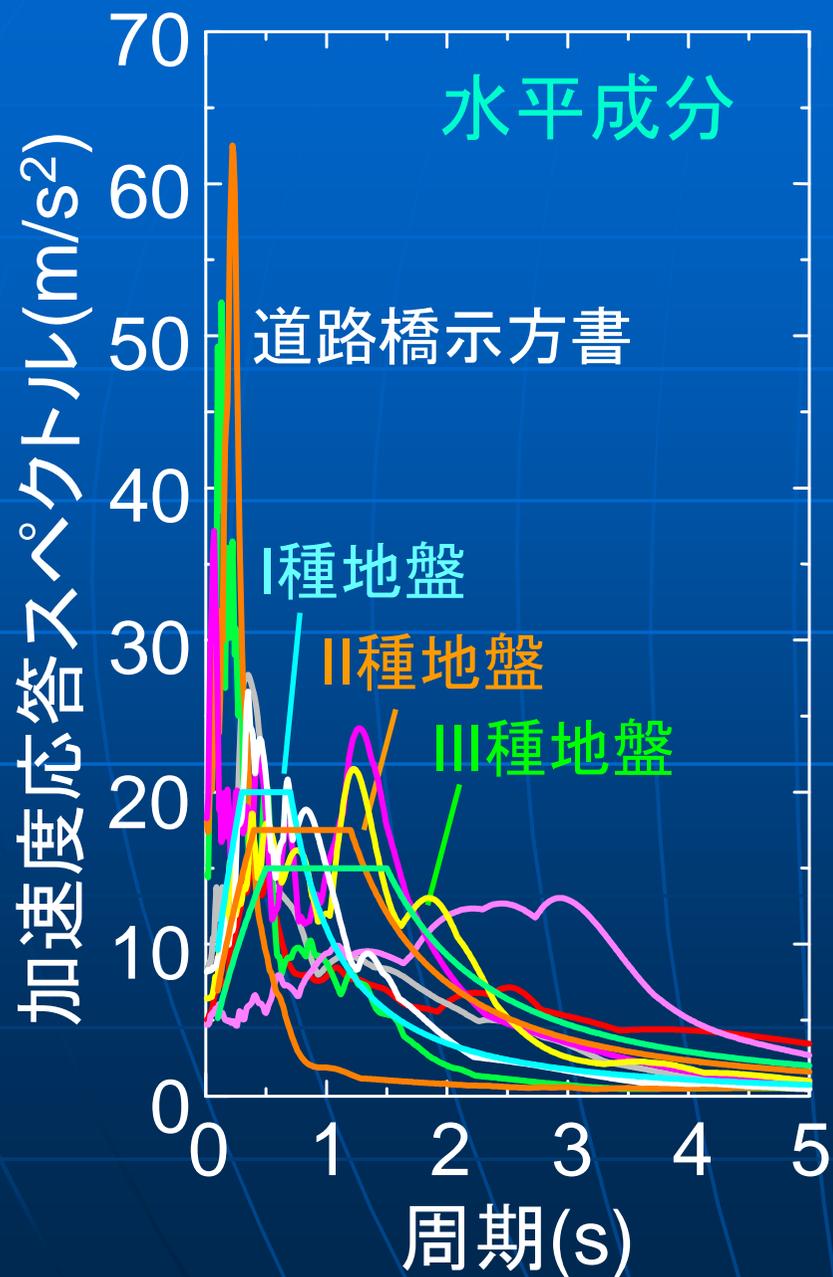
1. 設計地震動の設定の基本方針

- 構造物の耐震設計では、設計地震動、耐震計算法、構造設計が、それぞれより事実近く、実態に近い結果を与えるように設定していく必要がある。
- 設計地震動を設定する際には、常に地震、地震動、断層等に関する新しい知見に注意を払い、必要な情報は適宜、設計地震動の設定に取り入れることが必要である。
- 地震、地震動、断層に関しては、まだ知られていないことがいろいろあること、現在の知見とそれを支える科学的予測手法の不確かさをよく理解し、適切な工学的判断を加えた上で、設計地震動を設定しなければならない。

設計地震動の設定に際しては、地震学上の情報に工学的な判断を加えていくことが重要

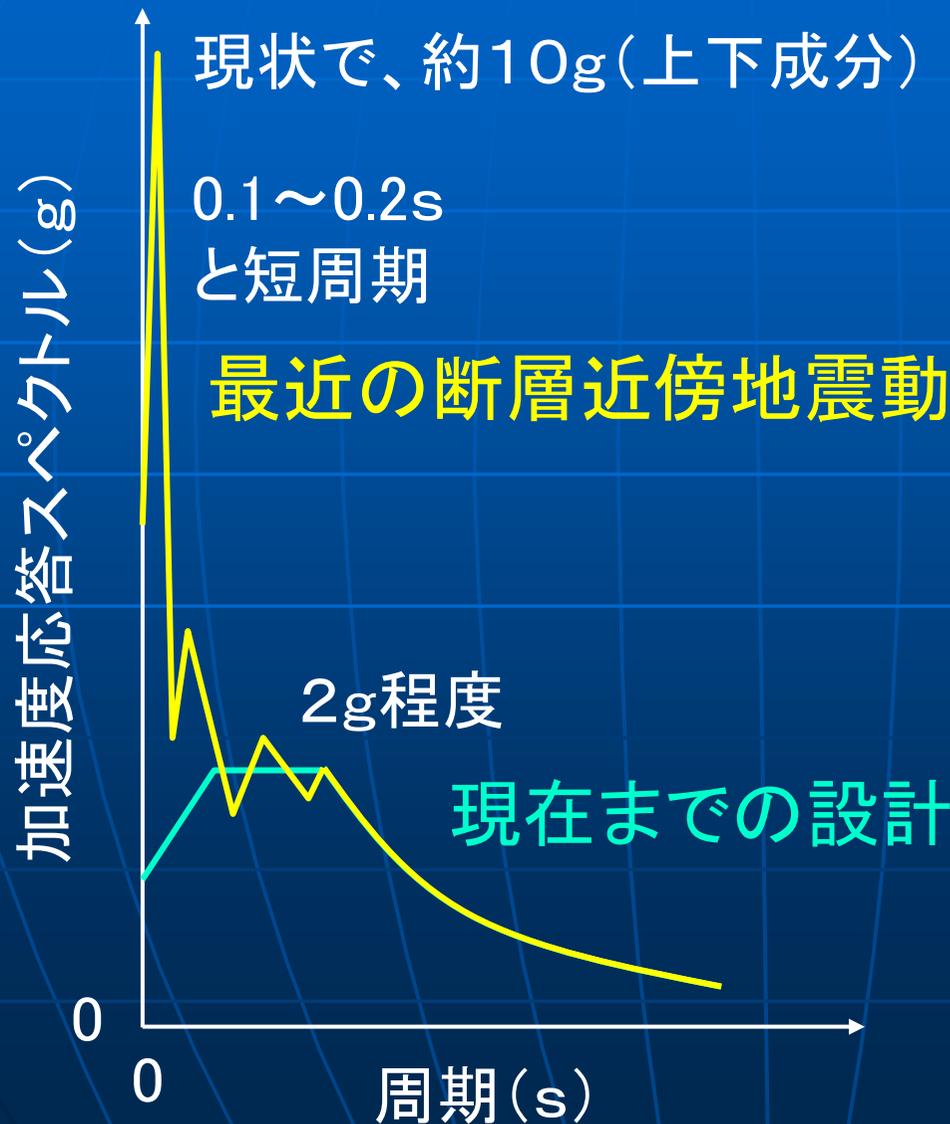
- 地震動評価は地震学的な発見や研究の進展がある度
に変わっていく
- 土木技術者は事実がわかっていなくても、現状の知識
に技術的洞察を加えて将来にわたって安全な社会資本イン
フラを造っていく使命を負っている。
- 現状の知見とそれを支える地震学的予測手法の不確
かさをよく理解した上で、その度合いに応じて適切な安全
率を見込んだり、仮に現状の設計地震動を大きく上回る
地震が生じても、構造物の崩壊だけは免れるような手段
を講じる等、工学的判断を加えておかなければならない。

最近の断層近傍地震動の加速度応答スペクトル



- JMA神戸NS
(兵庫県南部地震)
- JR高取駅NS
(兵庫県南部地震)
- K-NET十日町NS
(新潟県中越地震)
- JMA川口EW
(新潟県中越地震)
- 刈羽村役場NS
(新潟県中越沖地震)
- KiK-net 一関西EW
(岩手宮城内陸地震)
- Sylmar NS (Northridge)
- Shikhekang EW (Chi-Chi)

従来の常識とは変わりつつある応答スペクトルの形状



●将来的には、 $PGA > 100$ m/s^2 、短周期領域の S_A スペクトル > 300 m/s^2 もあり得るだろう

●断層が岩盤の破壊で生じる以上、破壊面では数百 m/s^2 のPGAや S_A が生じてても不思議はない。

より強く、継続時間の長い地震動に対する 配慮が必要

- 現在までに蓄積された断層近傍地震動は、ほとんどがマグニチュード7前後の地震によって得られた記録であり、これよりもマグニチュードの大きい地震による断層近傍地震動が得られた事例はまだほとんどない。
- 大規模地震による断層近傍地震動を考慮する必要がある地域においては、現在までに得られている断層近傍地震動よりも、さらに強度が大きく、継続時間の長い地震動となる可能性が高いことを認識しておく必要がある。

3. 短周期地震動が土木構造物に与える影響

- 固有周期0.1秒の土木構造物にはどのようなものがあるか？



- 短周期構造物は、サイズや質量の割に剛性が高いか、剛性の割に質量が小さい構造物
- 地震荷重が断面決定要因である構造系
- どのような構造系が短周期地震動に対して弱点を有しているかをよく検討しておくことが重要

4. 長周期地震動の特性とこれに対する配慮

- 大規模地震では近距離において発生した場合はもちろん、中～遠距離において発生した場合にも、周期3秒以上の長周期地震動が一般に予期されるよりも卓越して発生する場合がある。
- 長周期地震動は、厚い堆積層が存在する場合に卓越することが知られている。長周期構造物に対する設計地震動の設定に際しては、地域ごとに卓越しやすい周期が異なることもふまえて、長周期地震動の影響を考慮する必要がある。
- 長周期地震動対策として、長周期成分における設計地震動に余裕を見込むだけでなく、構造物の減衰性能を高め、共振を避けるように固有周期を定めることが考えられる。

5. 震源断層を特定して推定した地震動の活用

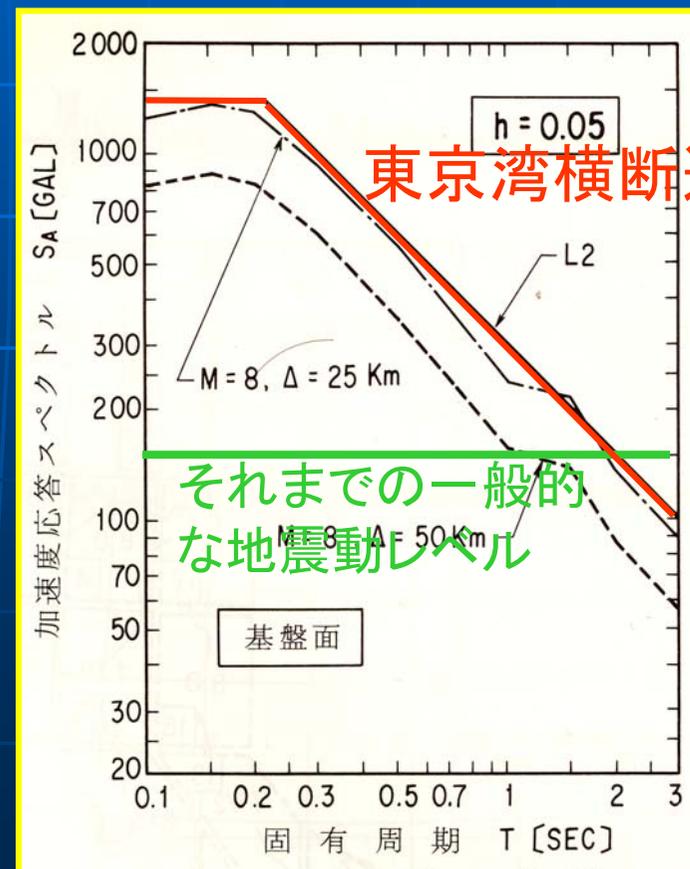
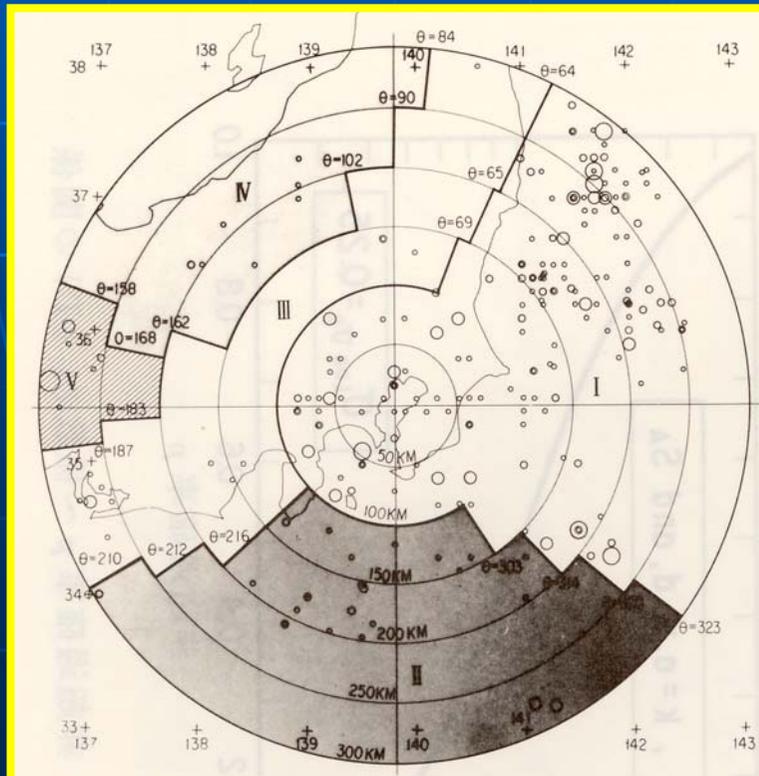
- 近年の地震学の顕著な進歩として、設計地震動の評価に重要な役割を果たしつつある。
- 推定手法には、それぞれ長所、短所や適用限界があるため、これらの特徴をよく理解して解析結果を利用する必要がある。

震源断層に基づく地震動の利用上の注意事項

- 推定結果と実測記録の波形の特徴が一致し、その上で線形および非線形応答スペクトルが一致するかどうかで地震動の推定精度を検討すべきところを、気象庁震度階の比較だけで推定精度が評価されている場合が多いが、これは工学利用上の精度検討としては不十分。
- 地震動が震源依存、地点依存である以上、ある震源、地点を対象に推定手法やパラメータの設定精度が検証されていても、これらが常に妥当とはいえない。
- 現時点では、大規模構造物を対象に、委員会等の場で専門家が入って設計地震動を設定する際に利用できる手法と考えるべき。

6. 確率論的地震動評価とその利用

- Cornel & McGuire以降、土木構造物の耐震設計でもいろいろな形で利用されてきている(荒川・川島 1984)。
- 東京湾横断道路や本州四国連絡橋等の設計地震動の算定にも利用された。



海外での利用が多い、確率論的地震動評価

1) 米国の道路橋 (AASHTO、2009)

- 75年に対して7%期待値(再現期間約1000年)のハザードに対して、人命確保(Life safety)を目標として設計する.
- 人命確保(Life safety)とは、橋梁は崩壊する確率は低いが、大被害を受け、長時間にわたって交通サービスが失われる可能性がある状態をいう。また、部分的もしくは全体の取り替えが必要となる可能性がある。

2)ヨーロッパ(EC-8)

- 崩壊防止目標(No-collapse requirement)と、限定被害目標(Damage limitation requirements)の2種類の性能目標が設けられている。
- 崩壊防止目標とは、50年間の超過確率が P_{NCR} もしくは再現期間が T_{NCR} の設計地震動に対して、構造物が部分的にも全体系としても崩壊することなく、構造系としての一体性と残留耐力を保った状態にあるように設計すること。
- P_{NCR} 、 T_{NCR} はそれぞれの国の責任機関が定めるが、一般に、 $P_{NCR}=10\%$ 、 $T_{NCR}=475$ 年が推奨されている。
- 橋梁では、耐用年数は、一般的な橋では100年、戦略的重要性のある橋では200年、重要性の低い橋では50年とすることが推奨されている。

3) カリフォルニア州交通局

グーグルマップから任意地点の設計地震応答スペクトルを求める

任意の点を指定する

任意の点を指定する

Vs30を与える

ARS Online - Windows Internet Explorer

http://dan3.dot.ca.gov/shake.html

gooウェブ検索(Green)

お気に入り おすすめサイト Web スライス ギャ...

ARS Online

RESOURCES

- Caltrans
- Research & Innovation
- Earthquake Engineering
- Geotechnical Services

Developed By

GeoResearch Group
Caltrans
Research & Innovation

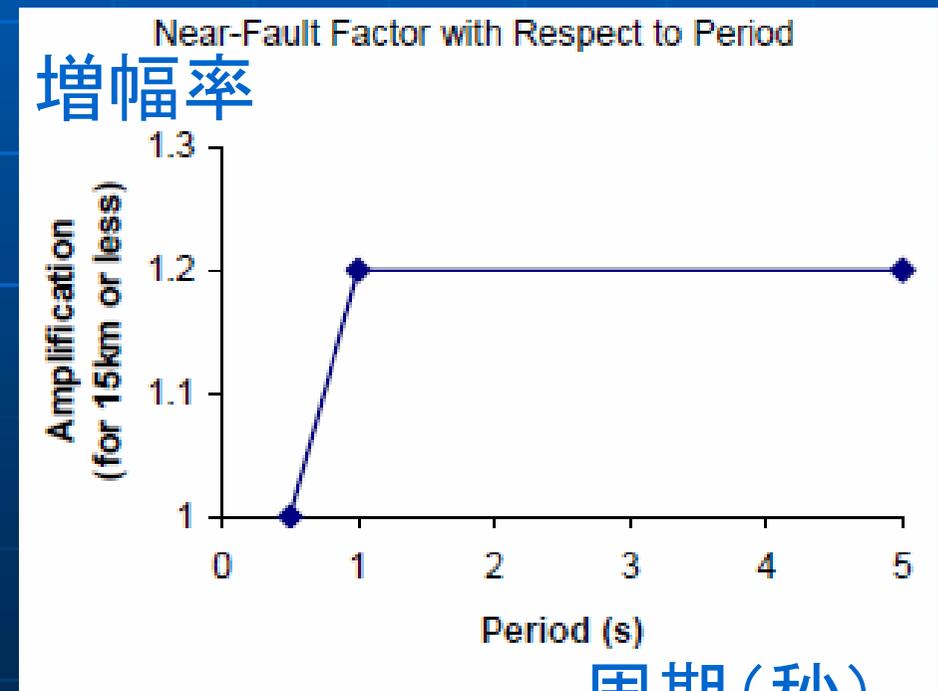
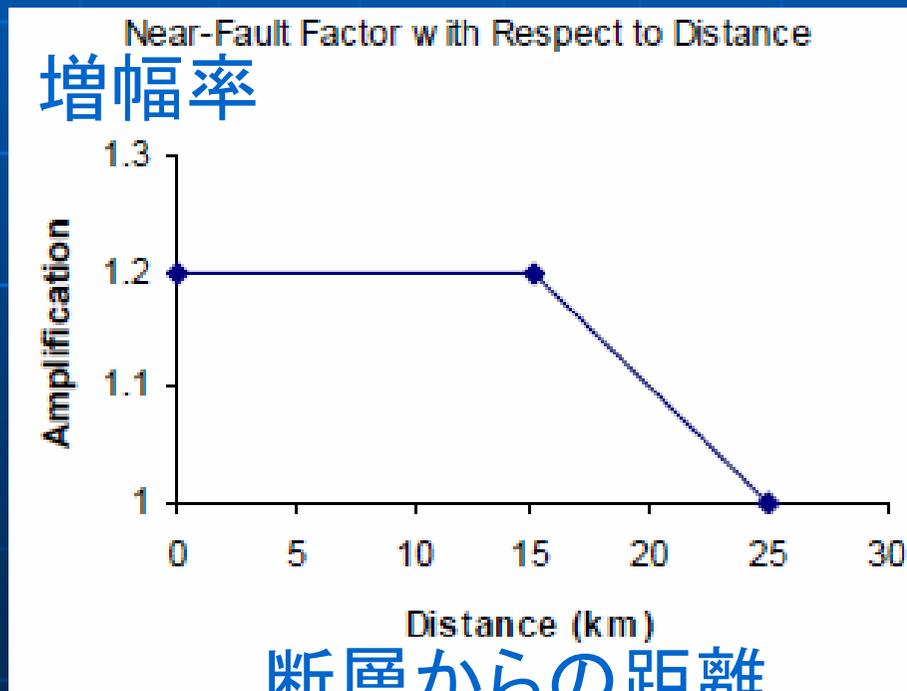
In Partnership With

USGS
science for a changing world

Latitude: 37.596824 Longitude: -122.46459961 Vs30: 180 m/s Calculate

断層近傍での地震動の増幅 カリフォルニア州交通局

断層から25kmの範囲で、周期0.5秒以上の地震動を20%増加させている



カリフォルニア州交通局

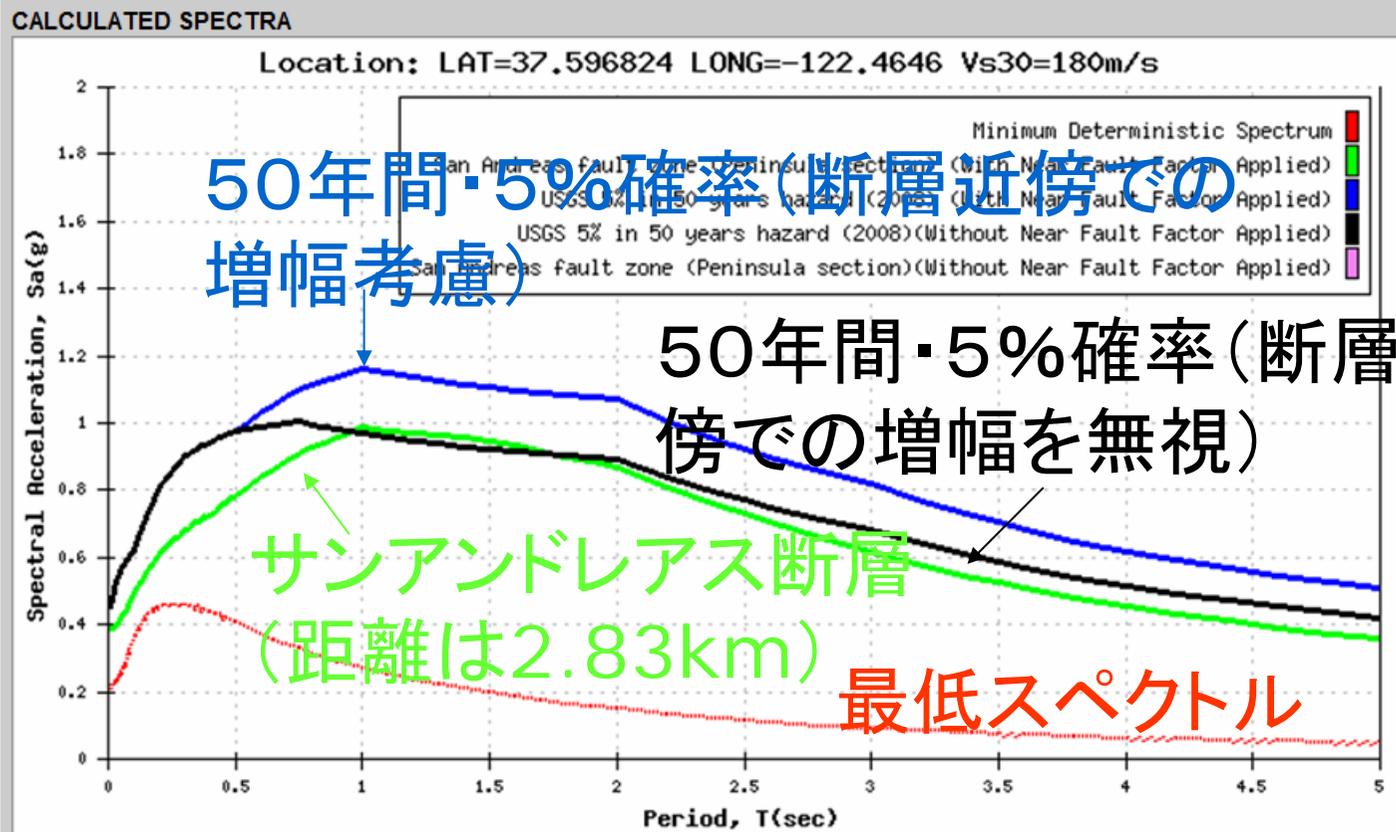
ARS Online - Windows Internet Explorer

http://dap3.dot.ca.gov/shake_stable/

gooウェブ検索(Green)

McAfee SiteAdvisor

ARS Online



2007年版の最大地震動加速度マップ

2007 Caltrans Deterministic PGA Map
Fault Identification Numbers (FID) Shown
September 2007



by

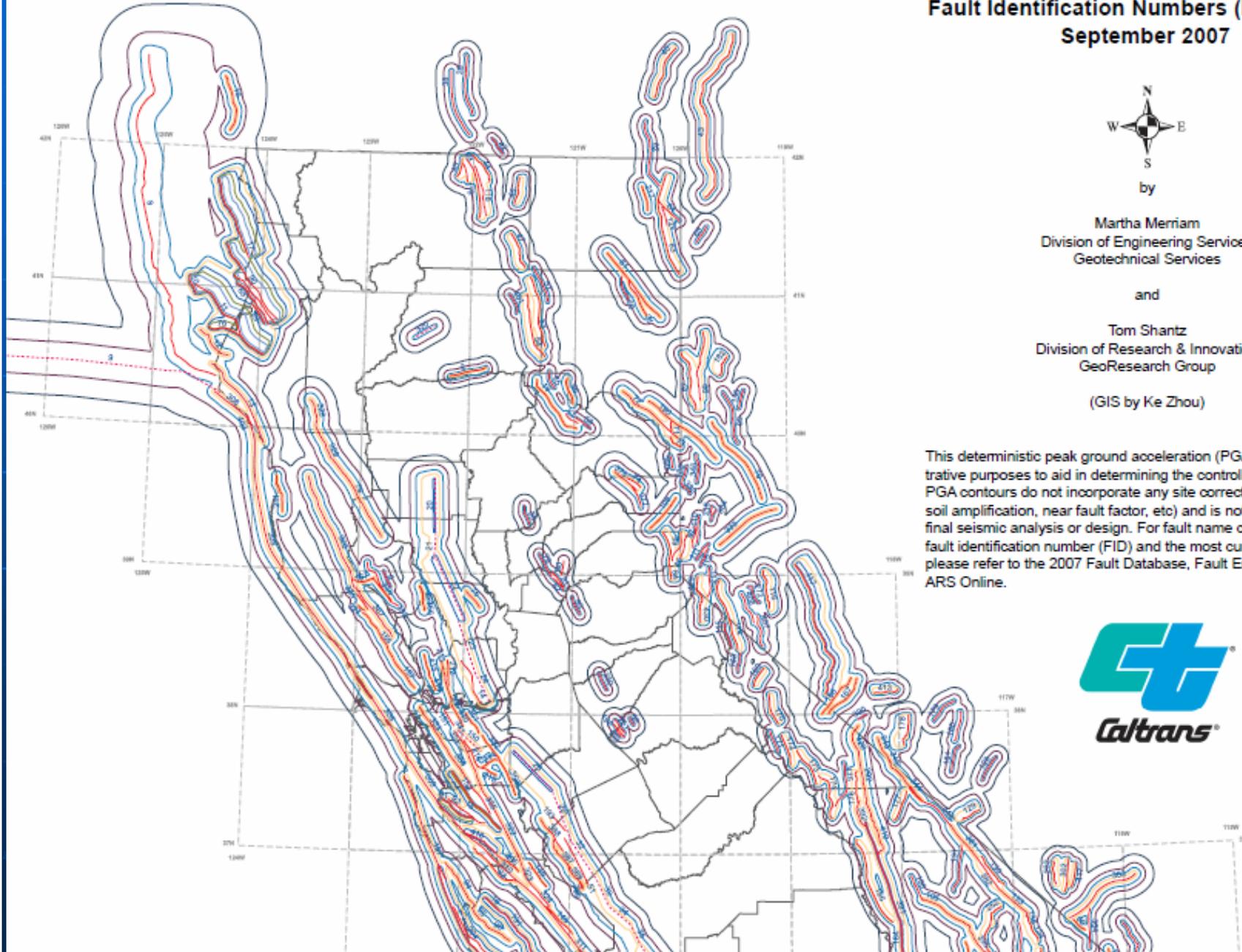
Martha Merriam
Division of Engineering Services
Geotechnical Services

and

Tom Shantz
Division of Research & Innovation
GeoResearch Group

(GIS by Ke Zhou)

This deterministic peak ground acceleration (PGA) map is for illustrative purposes to aid in determining the controlling fault. The PGA contours do not incorporate any site correction factors (e.g. soil amplification, near fault factor, etc) and is not to be used for final seismic analysis or design. For fault name corresponding to fault identification number (FID) and the most current fault data, please refer to the 2007 Fault Database, Fault Errata Report and ARS Online.



ARS曲線

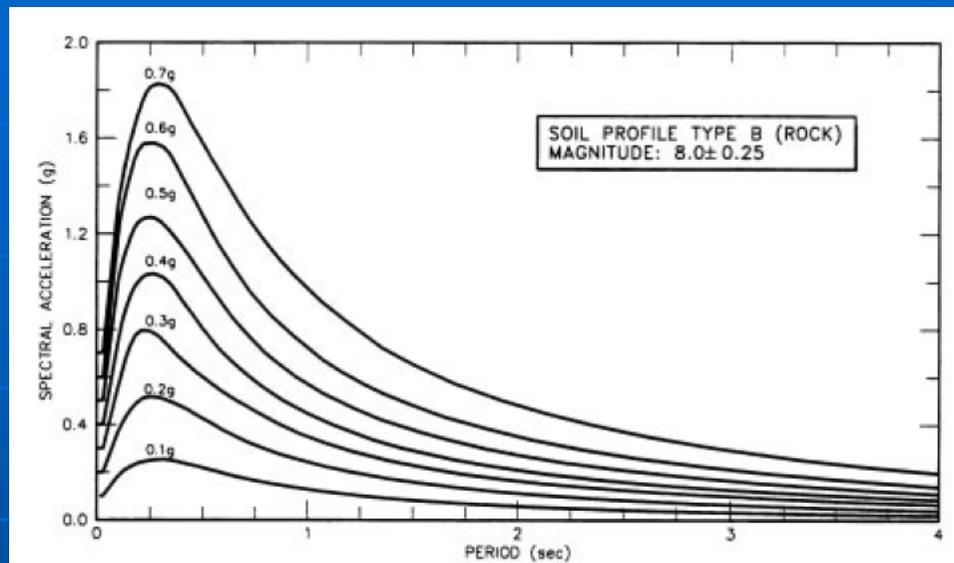
カリフォルニア州
交通局

2g

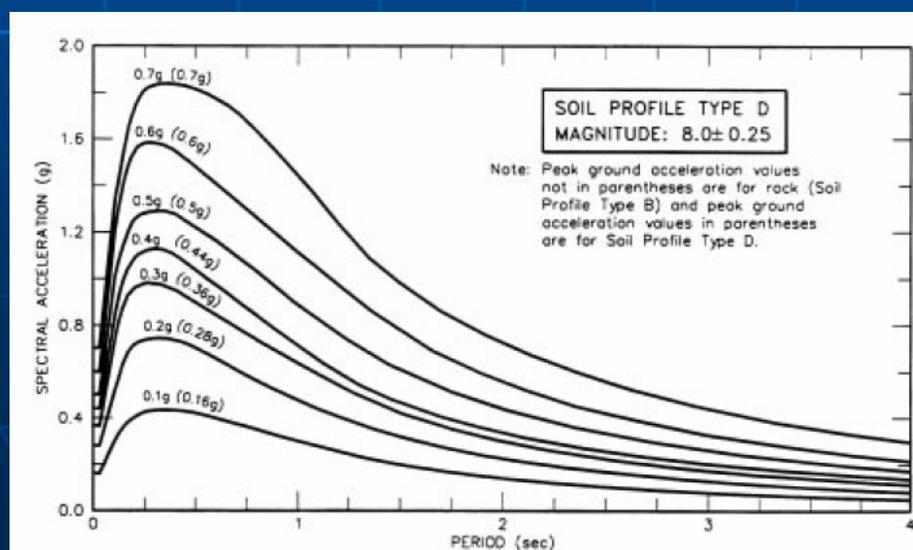
1g

0

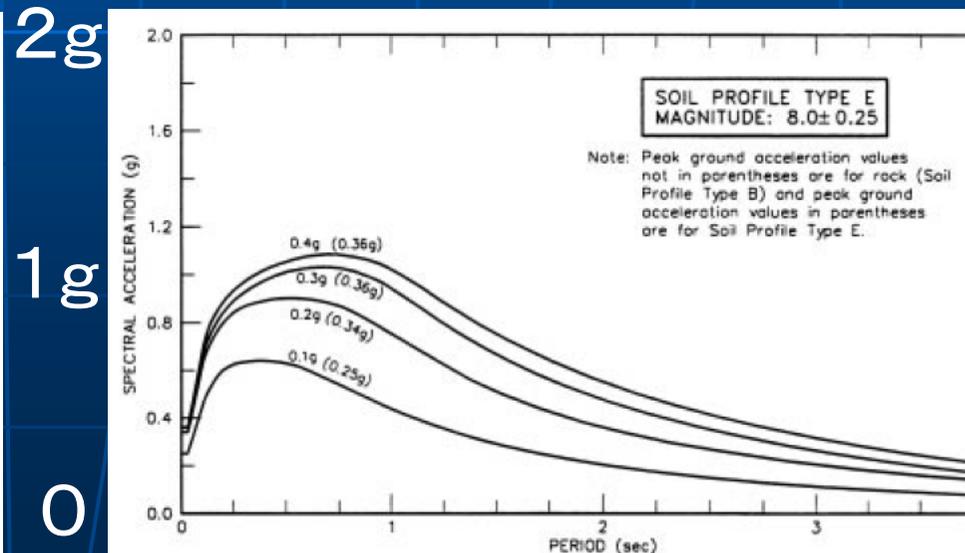
地盤種別A



地盤種別D



地盤種別E



設計地震動は、地震危険度を全国で一律にするように設定すべきか？

$$p(IGM) = \text{全国で一定}$$

↑
└── T_S 年間に強度 IGM 以上の地震動が発生する確率

$$\int R(IGM) f(IGM) = \text{地震リスクが全国で一定}$$

↑
└── 強度 IGM の確率密度関数

↑
└── ロス関数

構造物の耐震設計では、大きい地震動が重要であるが、確率論的地震動はこれを与えているか？

- 確率論では、建設地点に大きな影響を与える地震であっても、発生頻度が低ければ確率的地震動は小さな値としてしか評価されない。
- 発生頻度が低くても、実際に地震が起こった場合には、耐震性を確保できない可能性がある。
- 確率論的地震動評価結果に基づいて定めた地震動強度を用いて設計しさえすれば、仮にこれを上回る地震動が生じても、やむを得ないと受け止める国民的コンセンサスがあるか？

確率論的に求められた地震動強度よりもはるかに大きい地震動が生じることがある

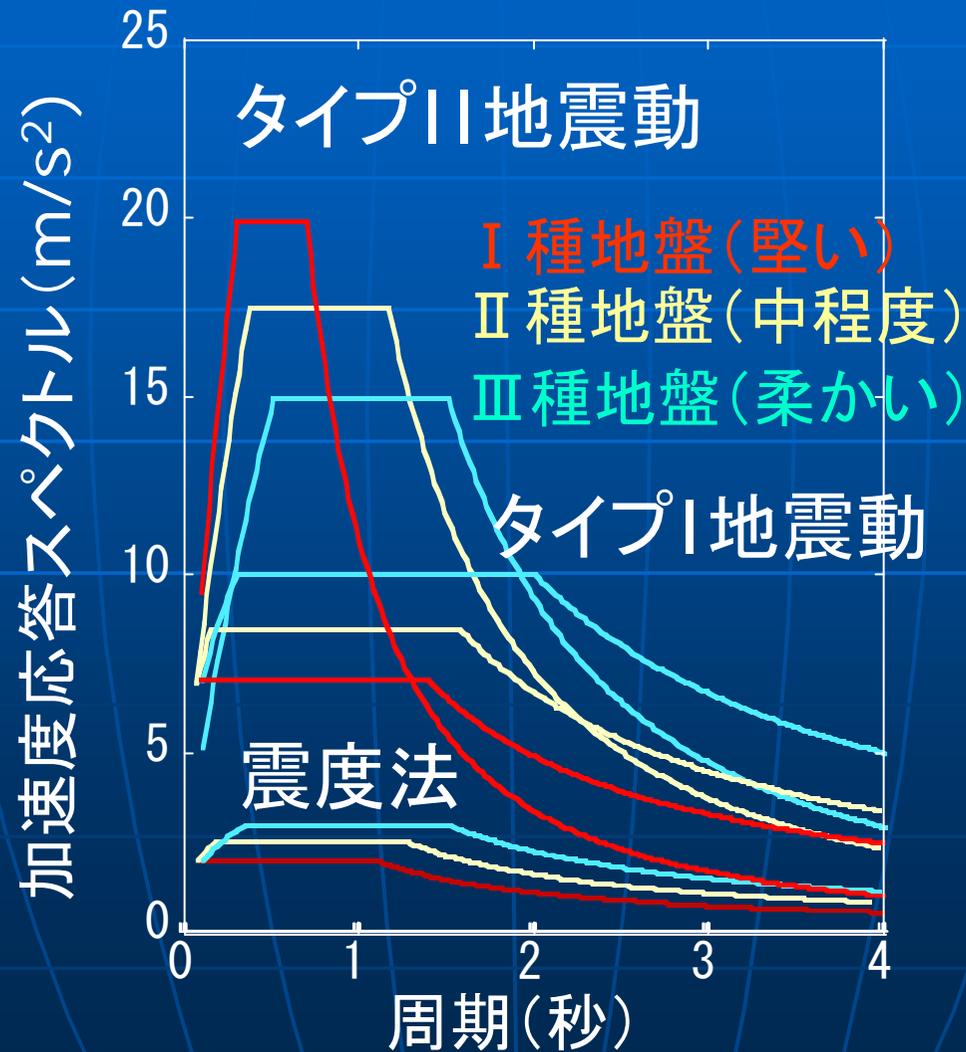
震源を予め特定できない地震

●近年起こった地震は、ほとんどが地震前に知られていなかった断層で生じている。

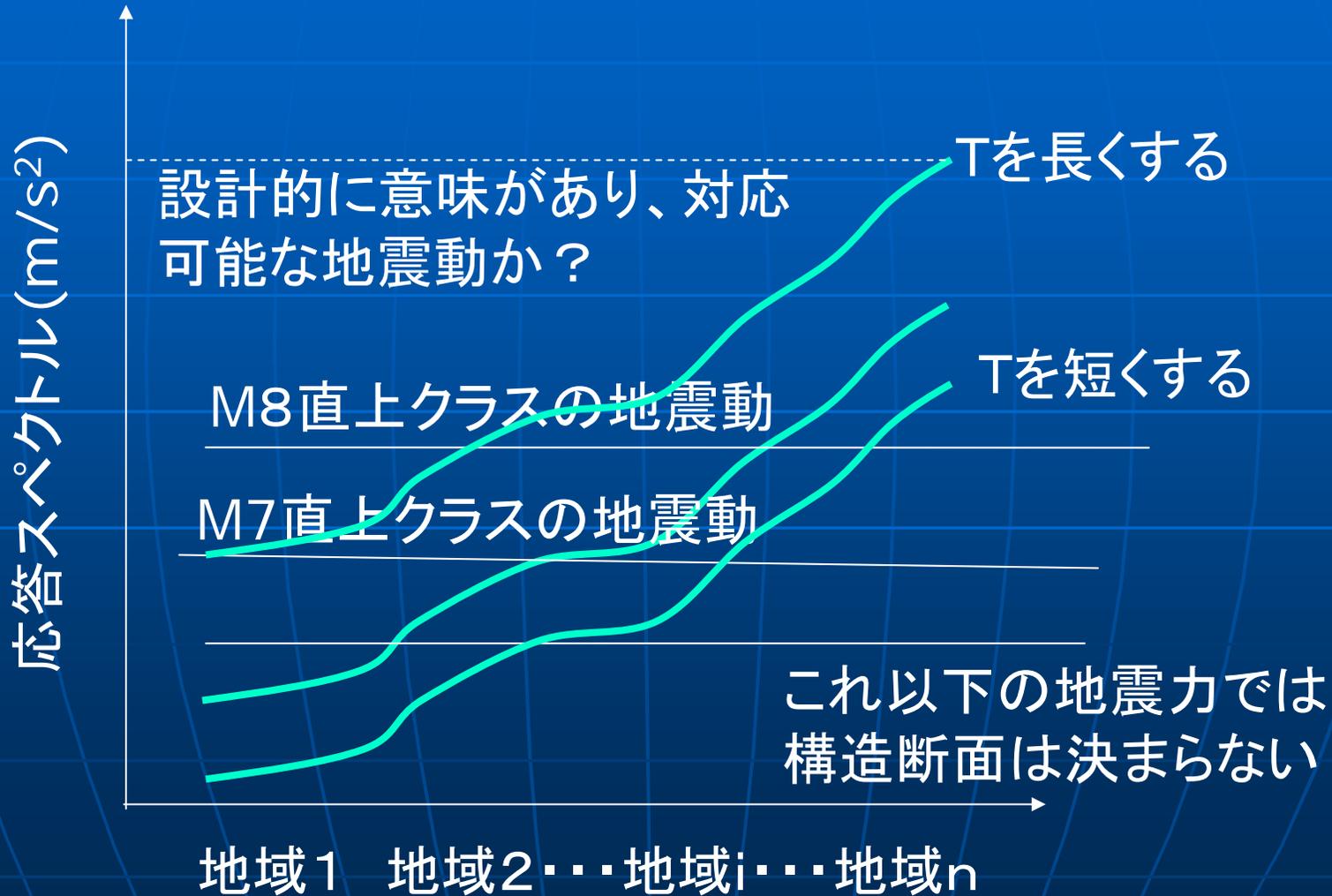
✓沿岸海域の地震：2005年福岡県西方沖の地震(M_j7.0)、2007能登半島地震(M_j6.9)、2007新潟県中越沖地震(M_j6.7)

✓陸域の地震：2000鳥取県西部地震(M_j7.3)、2004新潟県中越地震(M_j6.8)、2008岩手・宮城内陸地震(M_j7.2)

M_J7.3という直下型地震による地震動は、道路橋示方書のタイプII地震動と同レベル



再現期間T年に相当する応答スペクトル 概念図



海外では、確率論的地震動評価に基づいてそのまま地震動を定める事例が多いが、……

- 米国やヨーロッパのように、地震活動が活発な地域からほとんどない地域まで、広範囲に地震動強度を定めるためには、確率論的地震動は便利

- 米国でも、カリフォルニア州等、西海岸の一部でしか耐震設計は支配的ではない。将来、中西部に被害地震が生じ、これによる地震動が確率論的地震動を上回った場合には、当然、いろいろな議論が起こるだろう。ヨーロッパも同じ。

- 地震が起こらない地域はないと国民が理解している我が国では、安易に米国やヨーロッパの考え方を踏襲できない。

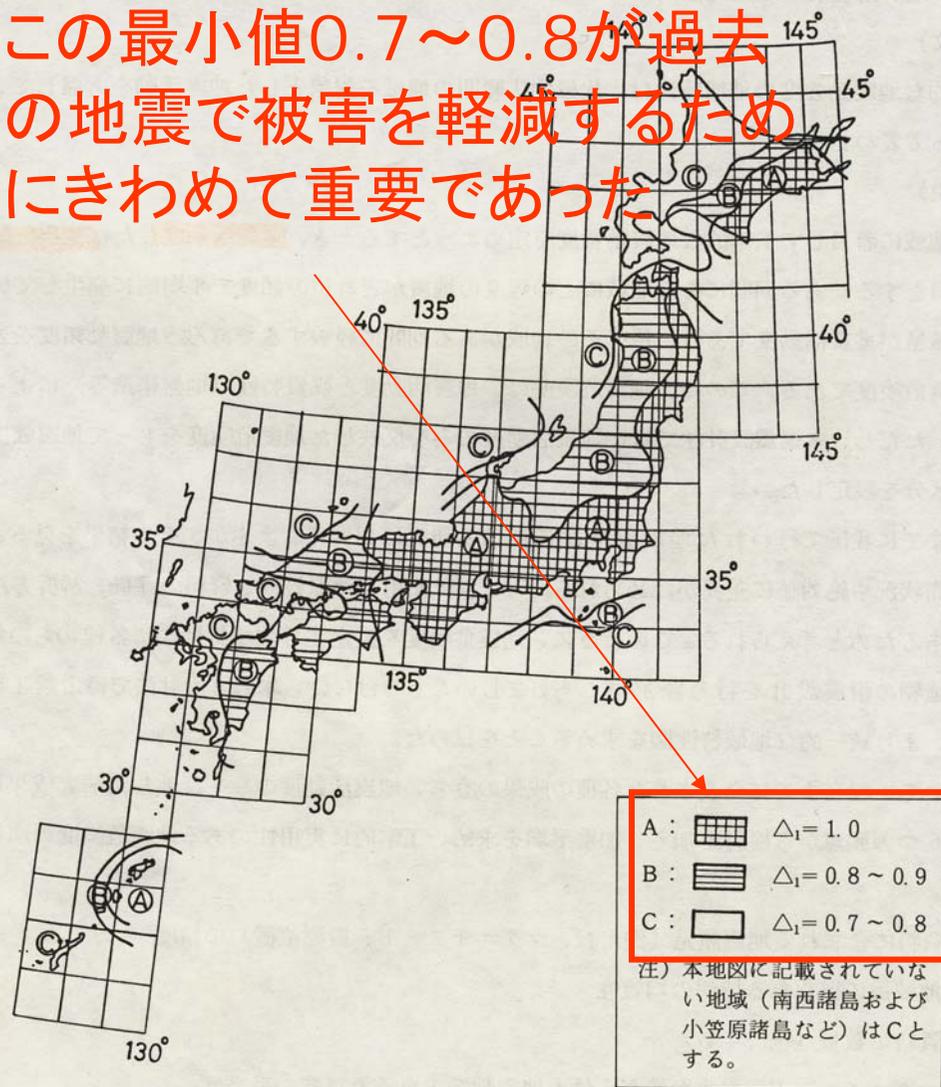
一般構造物(特殊な構造物を除く)では、確率論的地震動マップをどのように利用可能か？

- 確率論的地震動マップにしたがって、地震動強度を求める(米国やECではこの考え方に近い)
- 確率論的地震動マップから相対的な地域区分を定め、これに工学的判断を加えて、地震動強度を評価(現在の多くの技術基準の考え方)
- 確率的地震動マップによる地震動に、最小値の足切りを加える

建設省・新耐震設計法(案)以降広く使用 されている標準地震力

昭和53年3月

この最小値0.7~0.8が過去の地震で被害を軽減するためにきわめて重要であった



●当時までに公表されていた地震危険度に関する12例の研究に加重平均を加えて求められた再現期間100年の地震危険度区分

●現在に至るまで、土木、建築分野で、広く採用されてきている

耐震設計で考慮しておくべき、確率論的地震動の精度

●距離減衰式の精度

- ✓ 距離減衰式の回帰誤差が大きい
- ✓ 断層の上盤と下盤における距離減衰の違い
- ✓ 断層ごとの応力降下量が反映されていない
- ✓ 地域的な距離減衰特性の違い

●地震パラメータの推定精度

- ✓ 地震規模、平均発生間隔、最終発生年の推定精度
- ✓ 断層が連続する場合に、どの範囲で断層が一度に破壊するかの評価
- ✓ 周辺に複数の断層が存在する場合に、単独の断層か同一の断層かの評価

7. 設計地震動の設定に使用してはならない 気象庁震度階

- 気象庁震度は国民にもよく知られた指標
- 気象庁震度階はかつて体感や、周囲の震動、被害状況に基づいて定められてきたが、1996年以降は、計測震度計により自動的に観測される。
- 計測震度は、基本的に、従来の体感震度に近い値を与えるように、地震動にフィルター処理し、これを0～7の10段階で与えたもの。

なぜ、気象庁震度に基づいて設計地震動を定めることが不適當か？

気象庁震度は5強であった



地震の揺れの大きさを表す指標

この地区の被害は、気象庁震度6弱相当よりも弱かった



被害レベルを表す指標

建造物の被害レベルは、地震の揺れの大きさだけでなく、当然、建造物の応答、強度によって異なってくる

なぜ、気象庁震度に基づいて設計地震動を定めることが不適當か？(2)

- 気象庁震度に示される被害と、実際の被害には大きな違いが生じる場合がある。
- たとえば、2008年岩手・宮城内陸直下地震では、気象庁震度は6強であったにもかかわらず、木造家屋の倒壊率はほとんど0であった。
- 構造物被害にまで気象庁震度を適用しようとする、致命的な誤解を与える可能性がある。ある構造物が震度6強に耐えるとか、震度7にも倒壊しないといった使い方には十分注意しなければならない。
- 上限のない「震度7に対しても安全」といった表現は、耐震設計では使用すべきではない。

設計地震動は、気象庁震度ではなく、構造物の応答を支配する物理量に基づいて、設定すべき

- 設計地震動の設定には、構造物の応答を表す物理量を用いるべき。
- 地震動加速度(PGA)は、構造物の応答とは直接の関係はない。
- 少なくとも応答スペクトル(線形、非線型)、より直接的には構造物の応答に基づいて、設計地震動を設定するのがよい。

8. 設計地震動の設定と工学的判断

設計地震動の設定

特に重要で、大規模な構造物

- 動的設計の中で、確率論的地震動、震源断層を特定した地震動評価結果を活用
- 地震動の最低レベルの設定が重要

多数ある、普通規模の構造物

- 動的設計の中で、強震記録を活用して、耐震性向上を図る。
- 地震動の設定だけにとらわれることなく、構造的にバランスの取れた設計を優先させる

設計地震動の設定に高度な手法を用いると、構造物は耐震的になるか？

- 精度の高い地震動の解析には、多くのパラメータが必要であり、専門家の参加が不可欠。精密な手法を採用したからといって、直ちに構造物の耐震性の向上につながるわけではない。
- 高度な解析が可能なのは、特に重要で大規模な構造物
- 通常クラスの構造物では、耐震設計の全体像をよくとらえて、地震動の設定だけにとらわれることなく、構造設計にバランスの取れた配慮を加え、トータルとして耐震性の高い構造物を目指すことが重要

8. 設計地震動の設定と工学的判断の重要性

- 現在、まだ巨大地震を含めて規模の大きい地震による強震記録が十分得られておらず、今後とも、断層近傍地震動の特性にはこれから明らかとなっていく事項がいろいろあると予想される。
- 建設後、地震動研究の進展によって、当該構造物の耐震性が確保できないといった事態は極力避けるべき。
- 設計地震動の設定だけでなく、構造系の選定、設計、施工のすべてのプロセスを含めて、将来、設計地震動が大きくなっても構造物の耐震性が損なわれることのないようにしていくことが重要

設計地震動が大きくなっても、耐震性が損なわれないための知恵が求められている

- キャパシティデザインに代表されるように、階層化され、コントロールされた各レベルの損傷の積み重ねにより、構造全体の崩壊を防止する構造
- 破壊領域まで踏み込んだ各種の非線形域の応答をより事実に近く、正確に推定する技術の開発が重要
-

地震調査推進本部における 地震動研究に対する期待

地震動研究に対する期待

●震源断層を特定した地震動の推定手法の向上

✓釜石等、強震記録から特徴のある地点の地震動特性が震源断層を特定した手法で再現でき、耐震設計上の重要性を実感(川島)

✓気象庁震度ではなく、波形の特徴、ノーマルグラフで示した(両対数グラフではなく)応答スペクトルの一致度が重要

✓大きめの地震動(これを下回る確率が小さい)の評価

✓将来、断層条件、深層地盤条件等のデータが入手可能になると、耐震設計で広く使用されていくだろう。

地震動研究に対する期待(2)

●巨大地震の断層近傍地震動の特性解明

我が国では、再現期間を少し長くすると必ず(1回は)M8クラスの地震発生地域があり、このため、確率論的な地震動評価といっても、結局、確定論的な評価に依存する

●長周期地震動

✓周期2~3秒の領域が重要。多数の免震構造物がこの周期に存在

●ばらつきの小さい距離減衰式の開発

✓地震動が2倍違うことは、耐震設計では致命的。

✓平均よりも大きい方の地震動推定が重要

✓上盤・下盤の違い、応力降下量等を取り入れたNGAが必要

地震動研究に対する期待(3)

●工学とも密接に連携をとった研究の推進

✓米国では、USGS-AASHTO、USGS-Caltrans等が協力して、耐震設計に適した確率地震動評価を行っている。日本でも、こうした理学分野と工学分野の協力が重要。現状では、地震調査推進本部の事業は理学中心になっている。

✓表層地盤の非線形動的解析など、工学分野で得意な部分がある。こうした分野でも協力が不可欠。