

甲第 538 号証

平成24年9月

国土交通省鉄道局 監修

鉄道総合技術研究所 編

鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計

丸善出版

1 章 総 則

1.1 適用の範囲

鉄道構造物の設計において、地震に対する構造計画および性能照査（以下、耐震設計という）を行う場合には、本標準によるものとする。

ただし、特別な検討により、鉄道構造物が本標準に定める性能を満足することを確かめた場合には、この限りではない。

【解説】

鉄道構造物の設計において、地震に対する構造計画および性能照査を行う場合には、本標準によるものとする。ただし、仮設構造物や簡易な構造物は本標準を適用しなくてよい。また、既設構造物の耐震性の検討など、必要に応じて本標準を参考としてよい。

本標準では、鉄道の橋梁、高架橋、橋台、盛土、擁壁、開削トンネルおよびその他の特殊な条件下のトンネルを対象として、これらについての地震に対する性能の照査方法を規定している。ここで、擁壁および盛土に関しては、重要度の高い場合や、地震の影響を受けやすい地形にあるなど耐震設計を行う必要のある擁壁と盛土を対象とする。特殊な条件下のトンネルとは、地震の影響を受けやすく耐震設計を行う必要のあるシールドトンネルや山岳トンネルなどをいう（「14.1 一般」参照）。

「1.2 用語の定義」に示すように鉄道構造物には、列車の走行空間を確保するための人工の工作物も含まれる。例えば、線路上空建築物における列車走行空間を確保する階層部や跨線橋なども、地震に対して所要の安全性を満足させる必要がある。この場合、本標準を準用するか、あるいは本標準と同等の安全性が得られることが確認されている他の設計基準^{例えば1)}を適用してもよい。

また、専ら鉄道旅客の用に供するための人工の工作物に関しても、本標準を準用するのがよい。

地震に対する性能の照査において、本標準に定められていない事項については、各種構造物別に定められている鉄道構造物等設計標準（「1.2 用語の定義」参照）による。また、地震時の列車の走行に係る性能を照査する場合は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」による。

模型実験や高度な解析等、工学的な方法で所要の性能を満足することを確かめた場合には、必ずしも本標準によらなくてよいが、本標準の主旨を十分に尊重し、実状に適合するように行う必要がある。

性能照査に対する基本的な考え方は、「付属資料 1-1 性能照査に対する基本的考え方」に示す。

関連法令および本標準に記述されていない事項で参照すべき基準類のうち主なものを次に示す。

参考にしながら、その影響を受けないように路線計画するのがよい。ただし、その影響を受ける場合には、地盤調査結果などを参考に下部構造物の設置位置をよく検討するのがよい。

3) 地震随件事象として津波の影響が想定される場合には、国や地域の防災計画等を参考にしながら、その影響を大きく受けないように路線計画するのが望ましい。やむを得ず、津波により構造物が影響を受けると想定される場合には、現時点では未解明な部分も多いことから、今後の技術的動向を踏まえつつ、津波の影響を受け難い構造形式に配慮するのが望ましい。

4) 地震随件事象として、余震の繰返しによる影響により構造物の損傷が進展する可能性がある。そのため、想定地震に対する損傷をなるべく小さく抑えたり、残存耐力の高い材料や構造の採用を考えるとよい。

なお、数メートル級の大規模な地表断層変位や大規模な津波などに対しては、構造的な対応だけでは安全性を確保できない場合があることは否定できない。そのような場合には、早期地震警報システムなどの導入により、ソフト対策とハード対策を組み合わせることで、人的な被害を受けないようにするなど、リスクの低減手段を講じておくことが重要である。

参考文献

- 1) 足立幸朗, 庄司学: 兵庫県南部地震で被災を受けた都市高速道路橋の復旧費に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, pp. 1-4, 2003.
- 2) 常田賢一: 土木構造物における地震断層の工学的対応に関する考察, 土木学会論文集, No. 752/I-66, pp. 63-77, 2004.1
- 3) 安西綾子, 室野剛隆, 川西智浩, 紺野克昭: 断層交差角度に着目した橋梁の性能評価ノモグラムの開発, 第13回日本地震工学シンポジウム, pp. 2361-2367, 2010.

2.3 設計地震動

(1) 設計地震動は、構造物に影響があると想定される地震動に基づいて設定するものとする。この場合、構造物の要求性能との関係において、特定の地震動を設定することができる場合は、それを設計地震動としてよい。

(2) 本標準では、設計地震動として、次の二つのレベルの地震動を「6章 設計地震動」に示す方法により設定するものとする。

L1 地震動: 構造物の建設地点で設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動

L2 地震動: 構造物の建設地点で考えられる最大級の地震動

【解説】

(1) について

耐震設計では、構造物に影響があると想定されるすべての地震動を対象に、構造物の保有性能が要求性能を満足していることを確認する必要がある。ただし、設計実務において、すべての地震動に対して上記の確認を行うことは一般に困難であり、これらの地震動の中から、構造物の要求性能との関係から、特定

6章 設計地震動

6.1 一般

- (1) 設計地震動は、建設地点周辺における活断層の分布状況や活動度等の調査結果、および地盤の堆積構造や強震観測結果、地震活動履歴等の利用可能な資料を十分に活用して設定するものとする。
- (2) 設計地震動は、建設地点の耐震設計上の基盤面を基準にして、水平方向および鉛直方向について設定するものとする。

【解説】

(1) について

地震動の特性は、震源の特性、伝播経路の特性および対象地点周辺の地盤による増幅特性に依存する。また構造物の地震応答量、損傷程度は地震動の振幅の大小だけでなく周期特性や経時特性によっても大きく変化する。設計地震動は、これらの諸特性を適切に反映したものであることが望ましい。そのためには、歴史地震の発生状況や活断層調査結果、地盤構造の調査結果、建設地点周辺での地震・常時微動観測結果等の関連分野で利用可能な知識や資料を最大限に活用することが必要である。また、意思決定過程の透明性を確保する観点から、設計地震動を設定する際に用いたデータや評価手法、意思決定の根拠などの関連資料を設計図書に明記しなければならない。

また、本標準における設計地震動は、自然現象としての地震動に影響のある各種の物理的要因をもとに設定するものである。そのため設計地震動は、構造物種別、設計に用いる計算モデルや構造物の重要度とは無関係に評価しなければならない。

6.2 耐震設計上の基盤面

耐震設計上の基盤面は、せん断弾性波速度または土質柱状図に基づき、比較的強固な連続地層の上面に設定するものとする。

【解説】

建設地点周辺の深層を含む地盤構造と不整形性は地震動に顕著に影響することが知られている。したがって、地震動はこれらの影響を受けない硬質な岩盤（地震基盤：せん断弾性波速度が3.0 km/s程度の堅固な岩盤）の上面において規定し、この地震動に堆積層による増幅等を考慮して、構造物への入力地震動を推定するのが理想的である。しかし、鉄道構造物の設計に必要な周期帯域までを考慮できる精度で深部地下構造が判明している地域は少ないのが現状である。これらの背景と設計実務における土質調査の現状を勘案して、設計地震動は耐震設計上の基盤面で設定するものとする。

耐震設計上の基盤面とは、以下の2つの条件を満足する地層の上面としてよい。

- ① せん断弾性波速度が400 m/s以上の比較的強固な連続地層
- ② 上層とのせん断弾性波速度の差が十分に大きく、下層とのせん断弾性波速度の差が小さい

この耐震設計上の基盤面は、必ずしも洪積層上面あるいは「鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）」に示される支持層とは一致しない。また、実際の地盤調査においては、支持層まで到達した段階で調査を終了している場合が多く、せん断弾性波速度400 m/sを満たす地盤まで到達していないケースもあると考えられる。このような場合には、砂質土でN値50以上、粘性土でN値30以上の連続地層とその上層との剛性比が大きいくことを確認することにより、上記①、②の条件を満足するものと考え、この連続地層上面を耐震設計上の基盤面としてもよい。

6.3 L1地震動の設定

L1地震動は、建設地点における構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動として、基準となる地震動に地域特性を考慮して設定するものとする。

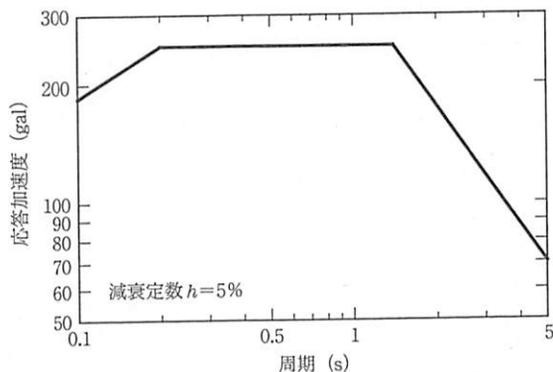
【解説】

L1地震動は、主として鉄道構造物の安全性を車両の走行安全性の観点から照査するための地震動である。また、これまでの経験からL1地震動に対して損傷させないように設計された構造物は、これまでの大地震によく耐えてきたという事実もあり、構造物の降伏耐力を設定する際に参考とすることもできる。

国土交通省鉄道局からは、L1地震動として解説表6.3.1、解説図6.3.1に示す減衰定数5%の弾性加速度応答スペクトルを、地域別係数として解説表6.3.2、解説図6.3.2を当面の間用いることがそれぞれ

解説表 6.3.1 L1地震動の弾性加速度応答スペクトル（減衰定数5%）

| 周期 T (s) | 応答加速度 (gal) |
|--------------------|-----------------------|
| $0.1 \leq T < 0.2$ | $508 \times T^{0.44}$ |
| $0.2 \leq T < 1.4$ | 250 |
| $1.4 \leq T$ | $350 \times T^{-1.0}$ |



解説図 6.3.1 L1地震動の弾性加速度応答スペクトル

調査は調査方
費に比べて十

まず既存資料
度等に関する
査の事項、方
図は、現段階
e) ではいくつ
度を考慮して
礎的資料とな
とが重要であ

れる各断層あ
し点から重要と
であることを
判断するうえ
さらにL2地
位置関係を把

わせて整理す
から総合的に

学的情報と

【解説】

建設地点周辺で過去に発生した地震に関する情報や周辺に分布する活断層等の地質学的情報等に基づき、建設地点において最大級の強さの地震動をもたらす得る地震をL2地震動の対象地震として選定する。L2地震動を選定する際には、わが国における過去の被害地震や活断層に関する特徴を総合的に網羅した資料や、過去に発生した比較的規模の大きな地震のデータがまとめられた代表的な地震カタログなどが利用可能である。また、わが国における活断層の情報を網羅したデータベースや地図などもあり、これらも有用である（「付属資料 6-1 L2地震動の対象地震の選定のための資料」を参照）。

一方、兵庫県南部地震以降、地震の発生源としての活断層の見直しと種々の調査が精力的に行われ、それらの成果は将来の地震の発生確率とともに地震調査研究推進本部¹⁾より順次公表されている。また、各地方公共団体や国の研究機関による活断層の調査結果、強震動予測結果^{例えば2),3)}も蓄積されつつある。これらの情報は今後逐次更新されていくと考えられるため、その時点での最新の資料や情報を収集するとともに、それらの情報を総合的に踏まえた形でL2地震動の対象地震を選定する必要がある。ただし、現在までに様々な機関、組織によって強震動予測が実施されているが、何を目的としているかによって、予測手法や結果に大きな差が生まれることに注意が必要である。そのためこれらの強震動予測の意図、目的、解析手法を十分に理解したうえで、鉄道構造物の耐震設計に適した地震動となっていることを確認しておく必要がある。

また、同一地点であっても対象とする構造物の振動特性によってL2地震動の対象地震が異なる場合がある。例えば、構造物の周期が長い場合や液状化が予測される地盤などでは、加速度が小さくても周期や継続時間が長い地震の方が大きな影響を及ぼす可能性があり、遠方で発生する規模の大きな地震が選定される場合もある。例えば2011年東北地方太平洋沖地震では、震源から数百km離れた千葉県浦安市付近で大規模な地盤の液状化が発生した。そのためL2地震動の選定にあたってはこのような特徴を十分に踏まえておく必要がある。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書，2005。
- 2) 中央防災会議 首都直下地震対策専門調査会：首都直下地震対策専門調査会報告，2005。
- 3) 大阪府：大阪府自然災害総合防災対策検討（地震被害想定）報告書，2007。

6.4.4 L2地震動の算定

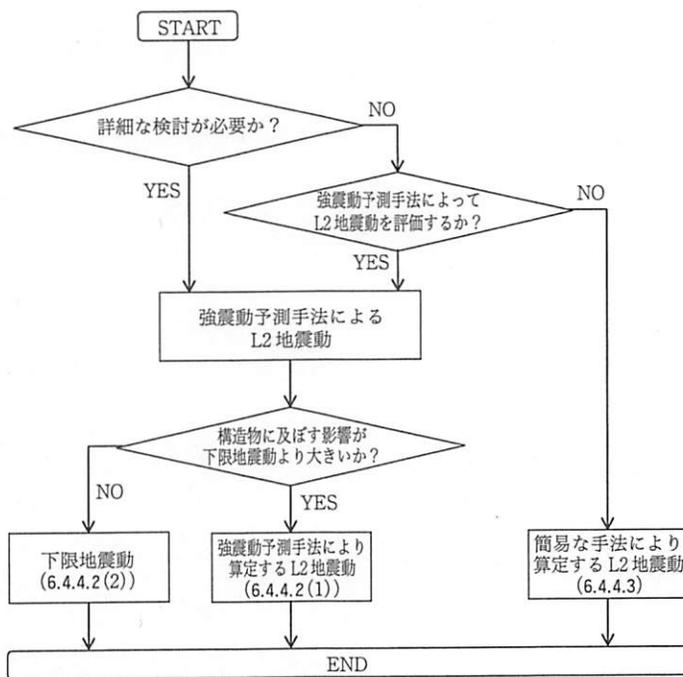
6.4.4.1 一般

L2地震動は、強震動予測手法に基づき地点依存の地震動として算定するものとする。ただし、詳細な検討を必要としない場合は、簡易な手法によりL2地震動を算定してもよい。また、L2地震動の算定時には、伏在断層による地震についても配慮するものとする。

【解説】

L2地震動を算定する手法を選択する時の考え方を解説図6.4.2に示す。L2地震動は、震源特性・伝播経路特性・地点特性を考慮した強震動予測手法に基づき、地点依存の地震動として算定するものとする。ただし、詳細な検討を必要としない場合は、簡易な手法によりL2地震動を算定してもよい。

詳細な検討が必要な場合は、



解説図 6.4.2 L2地震動の算定方法

① モーメントマグニチュード $M_w=7.0$ よりも大きな震源域が建設地点近傍に確認される場合
 ② 耐震設計上の基盤面より深い地盤構造の影響によって地震動の著しい増幅が想定される場合

である。上記①については、東海・東南海・南海地震などの巨大海溝型地震の震源断層が陸地直下に潜り込むような地点の近傍や、中央構造線などの大規模な内陸活断層などが存在する地点の近傍が該当する可能性がある。「付属資料 6-2 L2地震動の算定時に詳細な検討を必要とする地域と対応の考え方」に詳細な検討を必要とする地域の目安と対応の考え方を示すが、実際の適用に当たっては慎重に対応することが望ましい。②については、耐震設計上の基盤面以深の地盤構造の影響によって、局所的に大きな地震動となる可能性がある。例えば新潟県中越沖地震においては、ごく限られた領域において周期 2~3 秒程度で非常に大きな地震記録が観測されたが、その要因としては地点の地震増幅特性と震源特性の組み合わせによって発生したと考えられている。解説表 6.4.3、解説表 6.4.4 は標準的な地震増幅特性を有する地点を念頭に設定したものであるため、深部地下構造の影響により地震動特性が大きく増幅することが分かっているような地域においてこれらの地震動を用いることはできない。建設地点の地震増幅特性を評価するには、地震観測、常時微動観測が有効であり、事前に調査を行うことが望ましい。これら調査に基づいて地震増幅特性を評価する方法を、「付属資料 6-2 L2地震動の算定時に詳細な検討を必要とする地域と対応の考え方」に示す。

6.4.4.2 強震動予測手法により算定する L2地震動

- (1) L2地震動を強震動予測手法により算定する場合は、断層の広がりや破壊伝播の影響、距離減衰特性、深部地下構造による地震動の増幅特性を考慮するものとする。

- (2) 建設地点およびその周辺に活断層が知られていない場合においても、伏在断層による地震が直下で発生する可能性に配慮するものとする。この伏在断層による地震動をL2地震動の下限值として設定するものとする。

【解説】

(1) について

震源特性、伝播経路特性、地点増幅特性を考慮した強震動予測手法に基づき、地点依存の地震動を評価する手法としては、理論的方法、半経験的方法、経験的方法がある。利用できるパラメータの量と質、設計する構造物の重要性や動特性などを勘案しながら、適切な手法を選択することが望ましい。以下にそれぞれの特徴を記すが、現状では2)の方法が耐震設計において最も適用性の高い方法である。

1) 理論的方法

地盤構造や震源過程などを理論的にモデル化し、差分法や有限要素法、波数積分法などの数値解析法によって地震動を推定する方法である。深部地盤の調査を詳細に行った場合には、周期数秒程度より長周期では、信頼性の高い予測結果が期待される。しかしながら本手法において構造物の設計に必要な短周期成分を精度よく推定することは、地盤構造の推定精度や計算容量を勘案すると現時点では困難である。そこで短周期側を2)または3)の方法で求め、これに理論的方法で求めた地震動を組み合わせるハイブリッド合成法もある。震源近傍の堆積盆地上の地震動を予測する場合には、たとえ経験的グリーン関数が存在しても、小地震の震源の位置によって、堆積盆地構造内で励起されるやや長周期の地震動の特性が大きく変化する可能性があるため、上記のハイブリッド合成法を用いることが多い。

2) 半経験的方法

建設対象地点で観測された小さな地震記録を、想定した断層の破壊過程に応じて重ね合わせるによって、当該断層の地震動を推定する方法である。伝播経路特性および地点の増幅特性が小地震記録（経験的グリーン関数）によって正確に評価されていることが期待されるため、現時点では鉄道構造物の周期帯域付近において最も精度の高い強震動予測手法であると考えられる。しかしながら対象とする断層面上で発生した小規模地震の観測記録が対象地点で観測されていない場合には、理論的方法または経験的・統計的方法によってグリーン関数を評価することになる。この場合の予測精度は、グリーン関数を評価した方法の精度に依存するため、注意が必要である。対象地点において地震観測記録が得られている場合には、地震動の信頼性は飛躍的に向上することが期待されるため、対象地点において短期間の地震観測を行い、地震観測記録を蓄積しておくことは非常に有効である。

3) 経験的方法

距離減衰式などの各種経験式によって強震動予測を行う方法である。経験式によって断層の広がりや破壊伝播の影響などを考慮できるように工夫されているものがあり、このような経験式はL2地震動の評価に用いることができる。しかしながら、多くの経験式は与えられた条件に対する地震動の平均的な大きさを与えるに過ぎないことに注意が必要である。

上記1)~3)の各方法によって算定された地震動には、断層のモデル化のばらつきや、パラメータ設定のばらつき、計算法によるばらつきなど数多くの不確実性が含まれていることを認識しておかなければならない。設計地震動を算定する際には、これらのばらつき、不確実性を適切に判断することが必要である。さらに各手法を用いて算定される地震動がどの程度の精度を持っているかについても確認しておくことが望ましい。予測精度を確認する方法としては、対象地点において観測された中小地震の記録に対し

る場合
る場合
崖地直下に潜り
旁が該当する可
考え方」に詳細
対応することが
大きな地震動と
2~3秒程度で
り組み合わせに
有する地点を
ことが分かって
主を評価するに
に基づいて地
る地域と対応

壊伝播の影
する。

て、各手法を用いて予測を行った場合の再現性を把握しておくこと等が考えられる。

(2) について

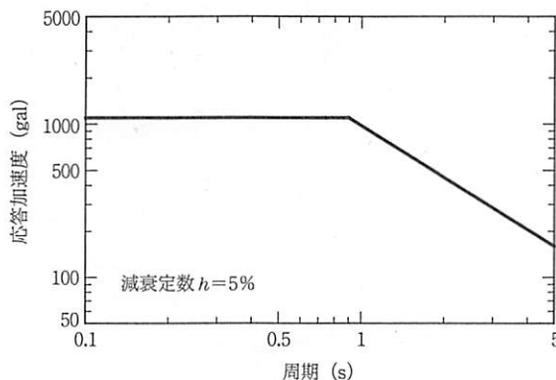
活断層の存在が知られていない地域でも中規模以下の直下型地震が発生した事例は多く、それに伴う地震被害も発生している。既往の研究では、概ねマグニチュード6.5以下の地震は活断層として地表に痕跡を残していないものが多く、活断層データから地震の発生を予測することは困難であるとされている¹⁾。このような理由から、本標準では、綿密な調査を行った場合においても、全国すべての地点で最低限考慮するL2地震動の下限値として、マグニチュード6.5の地震が直下で発生することを想定することにより、震源断層が伏在する場合に備えることとした。

マグニチュード6.5以上の地震でも例外的に地表地震断層を出現させない地震もあるが、既往の被害データによると、これらの地震の被害程度がマグニチュード6.5以下の地震による被害の上限とそれほど大きな差がないことが分かっている。そのためマグニチュード6.5の地震が直下で発生することを想定しておくことによってこれらの例外的な地震に対してもある程度の対応は可能であるものと考えられる。

この下限地震動の弾性加速度応答スペクトルとしては、国土交通省鉄道局より当面の間、解説表6.4.2および解説図6.4.3を用いることとされている²⁾。なお、解説表6.4.2は水平方向成分を想定した弾性加速度応答スペクトルであり、このスペクトルは数値計算や観測記録との比較により、マグニチュード6.5程度の地震が近傍で発生した場合における応答スペクトルをほぼ包絡することが確認されている。なおこの下限地震動は、耐震設計上の基盤面としてせん断弾性波速度が400 m/s程度の地盤を設定した場合の弾性加速度応答スペクトルである。よって、この条件よりもせん断弾性波速度が大きな地盤を耐震設計上の基盤面とする場合には、地盤条件の違いを適切に考慮した上で下限地震動を設定することができる。また、L2地震動には発生確率を考慮しないため、下限地震動には地域別係数は考慮しない。

解説表 6.4.2 下限地震動の弾性加速度応答スペクトル (減衰定数5%)

| 周期 T (s) | 応答加速度 (gal) |
|-----------------------|--------------------------|
| $0.1 \leq T \leq 0.9$ | 1100 |
| $0.9 < T$ | $1000 \times T^{-1.137}$ |



解説図 6.4.3 下限地震動の弾性加速度応答スペクトル

参考文献

- 1) 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（案），2001.
- 2) 国土交通省鉄道局：鉄道構造物等設計標準（耐震設計）の運用について，国鉄技第34号（平成24年7月2日）.

6.4.4.3 簡易な手法により算定するL2地震動

L2地震動を簡易な手法により算定する場合は，あらかじめ妥当性が検証された標準的な弾性加速度応答スペクトルに基づき算定してよい。

【解説】

1) 簡易な手法によりL2地震動を算定する場合の弾性加速度応答スペクトル

簡易な手法によりL2地震動を算定する場合には，国土交通省鉄道局より当面の間，解説表6.4.3，解説表6.4.4に示す2種類の弾性加速度応答スペクトル（標準応答スペクトル）を用いることとされている¹⁾。これら標準応答スペクトルは，L2地震動の水平方向成分を想定した弾性加速度応答スペクトルであり，具体的には以下の地震動を想定したものである。

- ① 海溝型の地震：プレート境界で繰返し発生するMw 8.0程度の海溝型地震が60 km程度離れた地点で発生した場合の地震動を想定したもの（スペクトルI）で，その形状を解説図6.4.4に示す。
- ② 内陸活断層による地震：Mw 7.0程度の内陸活断層による地震が直下で発生した場合の地震動を想定したもの（スペクトルII）で，その形状を解説図6.4.5に示す。

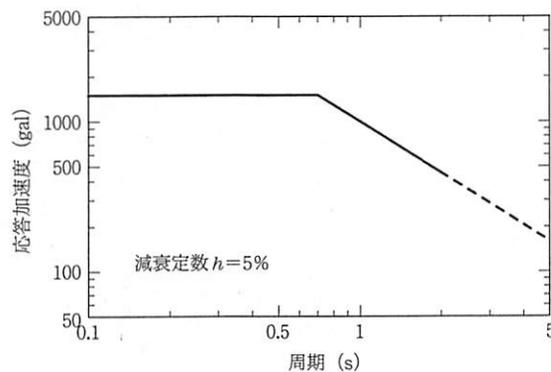
これらの地震動は，既往の地震による観測記録を耐震設計上の基盤面位置に補正し，さらに想定している地震規模，距離となるように補正して得られた応答スペクトル群に対して，一定非超過確率（非超過確率90%）で包絡したものである^{2),3)}。これは，従来のL2地震動と同様の手順で算定されているが，近年

解説表 6.4.3 スペクトルIの弾性加速度応答スペクトル
(減衰定数5%)

| 周期 T(s) | 応答加速度 (gal) |
|-----------------------|--------------------------|
| $0.1 \leq T \leq 0.7$ | 1500 |
| $0.7 < T \leq 2.0$ | $1000 \times T^{-1.137}$ |

解説表 6.4.4 スペクトルIIの弾性加速度応答スペクトル
(減衰定数5%)

| 周期 T(s) | 応答加速度 (gal) |
|-----------------------|--------------------------|
| $0.1 \leq T \leq 0.5$ | 2200 |
| $0.5 < T \leq 2.0$ | $1000 \times T^{-1.137}$ |



解説図 6.4.4 スペクトルIの弾性加速度応答スペクトル

それに伴う地
で地表に痕跡
れている¹⁾。
で最低限考慮
ることによ

既往の被害デ
とそれほど大
とを想定して
られる。
解説表 6.4.2
とした弾性加
チュード 6.5
る。なおこ
とした場合の
と耐震設計上
ができる。ま

付属資料 6-3 L2地震動の標準応答スペクトルの設定方法

1. はじめに

L2地震動は、震源特性、伝播経路特性、地点増幅特性を考慮した強震動予測手法に基づき、地点依存の地震動として算定する。ただし、詳細な検討を必要としない場合には、解説表 6.4.3、解説表 6.4.4 に示された L2 地震動の標準応答スペクトルを用いることもできる。ここでは、この L2 地震動の標準応答スペクトルの設定手順、設定方法について解説を行う。

また、震源特性、地点増幅特性等の特殊な地域では、L2地震動の標準応答スペクトルを上回る地震が発生する可能性があるため、詳細な検討が必要である。そこで過去に発生した大規模地震において、L2地震動の標準応答スペクトルを上回る地震が観測された例についても示す。

2. L2地震動の標準応答スペクトルの設定

2.1 観測記録の収集

L2地震動の標準応答スペクトルとしては、以下の2つの地震を想定している。

- ① スペクトル I：モーメントマグニチュード M_w 8.0 の海溝型地震が距離 60 km 程度の地点で発生した場合
- ② スペクトル II：モーメントマグニチュード M_w 7.0 程度の内陸活断層による地震が直下で発生した場合

そこで、震源規模、震源距離が想定している地震動レベルと近く、地盤条件が良好であり（耐震設計上の基盤面までの深度が 10 m 以内）、大きな加速度が得られている記録を収集した。また、耐震設計上の基盤面よりも深い地盤構造の影響により、地震基盤の浅い地点においては、短周期成分が卓越し、一般的な鉄道構造物の周期帯域では比較的小さな応答を示すことが確認されている¹⁾。ここで設定する L2 地震動の応答スペクトルは、一般的な鉄道構造物の周期帯域における増幅特性を勘案して、地震基盤が概ね 500 m より深い地域における地震動とすることとした。よって記録を収集する際には、観測地点の地震基

付属表 6.3.1 検討に用いた地震の一覧（内陸活断層による地震）

| No. | 地震名 | 発震日 | M_j | M_w | 記録数 |
|-----|-------------|------------|-------|-------|-----|
| 1 | 兵庫県南部地震 | 1995.01.17 | 7.3 | 6.9 | 10 |
| 2 | 鳥取県西部地震 | 2000.10.06 | 7.3 | 6.8 | 34 |
| 3 | 新潟県中越地震 | 2004.10.23 | 6.8 | 6.7 | 22 |
| 4 | 新潟県中越地震（余震） | 2004.10.23 | 6.5 | 6.4 | 24 |
| 5 | 福岡県西方沖地震 | 2005.03.20 | 7.0 | 6.7 | 30 |
| 6 | 能登半島地震 | 2007.03.25 | 6.9 | 6.7 | 10 |
| 7 | 新潟県中越沖地震 | 2007.07.16 | 6.8 | 6.6 | 22 |
| 計 | | | | | 152 |

付属表 6.3.2 検討に用いた地震の一覧 (海溝型地震)

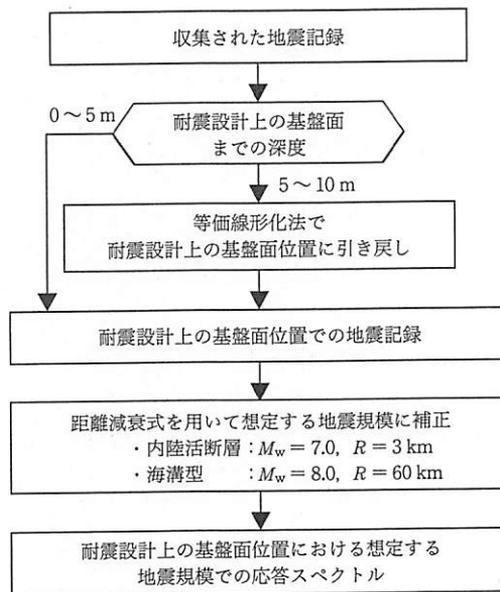
| No. | 地震名 | 発震日 | M_j | M_w | 記録数 |
|-----|-----------------|------------|-------|-------|-----|
| 1 | 宮城県沖地震 (1978 年) | 1978.06.12 | — | 7.57 | 2 |
| 2 | 北海道南西沖地震 | 1993.07.12 | - | 7.83 | 2 |
| 3 | 北海道東方沖地震 | 1993.10.04 | - | 7.58 | 2 |
| 4 | 芸予地震 | 2001.03.24 | 6.7 | 6.8 | 20 |
| 5 | 三陸南地震 | 2003.05.26 | 7.1 | 7.0 | 22 |
| 6 | 十勝沖地震 (本震) | 2003.09.26 | 8.0 | 8.0 | 22 |
| 7 | 十勝沖地震 (余震) | 2003.09.26 | 7.0 | 7.3 | 12 |
| 8 | 紀伊半島南東沖地震 (前震) | 2004.09.05 | 7.1 | 7.3 | 8 |
| 9 | 紀伊半島南東沖地震 (本震) | 2004.09.05 | 7.4 | 7.5 | 10 |
| 10 | 釧路沖地震 (本震) | 2004.11.29 | 7.1 | 7.0 | 16 |
| 11 | 釧路沖地震 (余震) | 2004.12.06 | 6.9 | 6.8 | 14 |
| 12 | 宮城県沖地震 (2005 年) | 2005.08.16 | 7.2 | 7.1 | 20 |
| 13 | 茨城県東方沖地震 | 2005.10.19 | 6.3 | 6.3 | 4 |
| 計 | | | | | 154 |

盤深度を確認し、基盤深度が概ね 500 m よりも深い地点の記録を選定した。

用いた地震、観測記録数を付属表 6.3.1, 付属表 6.3.2 に示す。また、記録を収集する際に地点の特殊な地震増幅特性や震源特性、表層地盤の顕著な非線形性などの影響を強く受けたと考えられる記録については、除外して検討を行っている。これらの除外した地震記録の詳細と L2 地震動の標準応答スペクトルとの比較は 3. で行うこととした。

2.2 観測記録の補正

前項で選定された観測記録は、L2 地震動の標準応答スペクトルとして想定している地震レベルをある程度満足しているものの、地震規模、震源距離による違い、堆積層の増幅、減衰の影響等を多少含んでい



付属図 6.3.1 観測記録の補正フロー

るものと考えられる。そこで、記録に補正を施すことによって、これらの影響を除去する。補正の流れを付属図 6.3.1 に示す。

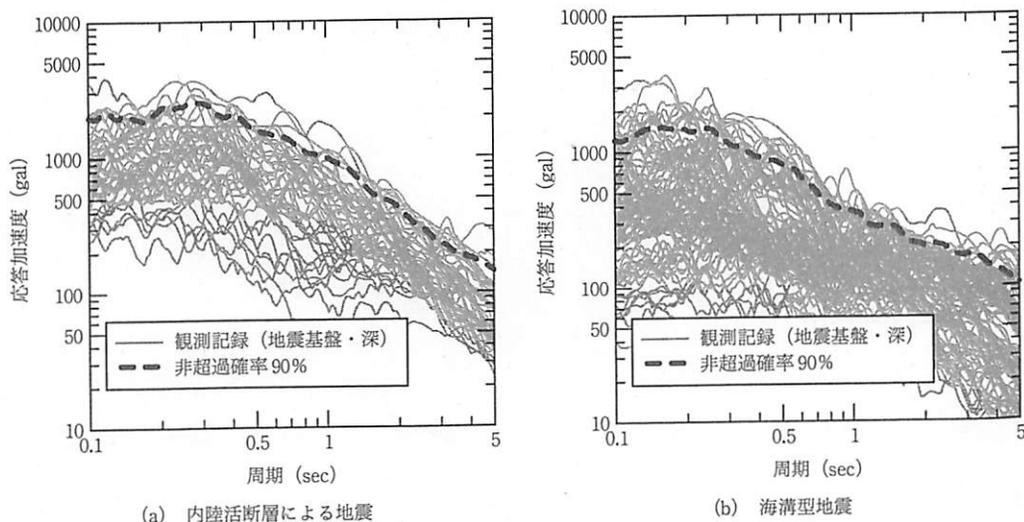
収集された地震記録は、地盤条件が比較的良好な地盤である（耐震設計上の基盤面までの深度 10 m 以下）。しかし今回選定した記録は加速度レベルの大きな記録であり、表層地盤の塑性化の影響を比較的多く含んでいる可能性がある。そこで、これらの記録に対して補正を施し、耐震設計上の基盤面位置での地震記録に補正を行うこととした。補正には等価線形化法 (FDEL²⁾) を用いた。なお解析手法、地盤のモデル化の不確定性などを鑑みて、補正を行う記録は耐震設計上の基盤面までの深度 5 m 以深の記録とし、耐震設計上の基盤面までの深度が 0~5 m の記録については、それをそのまま耐震設計上の基盤位置での記録として取り扱った。

またこれらの記録は、想定している標準地震と比較して、地震規模（マグニチュード）、震源距離が異なる。そのため観測記録に対して距離減衰式³⁾を用いて補正を施し、想定地震規模、想定震源距離の応答スペクトルを推定する。震源断層から観測点までの断層最短距離を求める際の震源断層の位置、断層サイズは既往の震源インバージョンの結果を参考にしている。なお、スペクトル II の地震規模としては、 $M_w=7.0$ の地震が直下で発生した場合を想定しているが、断層最短距離を 3 km と設定した。これは、地表数 km には地震を起こしにくい領域があるとされており^{例えは 4)}、地表に断層面が現れている場合でも、この範囲では応力降下がほとんど発生していないことが指摘されていることを考慮したものである。

2.3 L2 地震動の標準応答スペクトルの設定

前項で示した手法を用いて、全観測記録の補正を行った。付属図 6.3.2 (a) (b) に補正後のすべて観測記録の応答スペクトルをまとめて描く。これらの記録はすべて同じ地震規模、震源距離、地盤条件に補正されているものの、スペクトルレベルでは、10 倍以上のばらつきがあることが分かる。このばらつきの原因としては、断層最短距離を等しくしてはいるが、断層面内のアスペリティからの距離が大きく異なっていること、断層の破壊伝播の影響などを無視していること等が考えられる。

そのため、L2 地震動の標準応答スペクトルとしては、これらのばらつきの影響を考慮して設定する必要がある。そこで、設計時の取り扱いを考えて、これらの補正を行った観測記録の非超過確率 90% を満足する線をもとに、簡単な直線で描くことを基本に設定することとした。ここで、非超過確率 90% のス



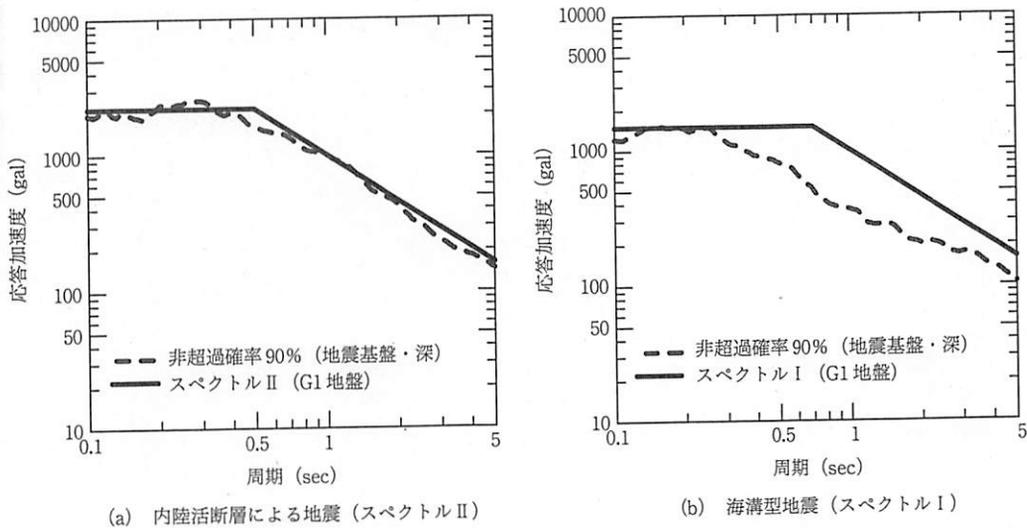
付属図 6.3.2 補正を行った観測記録の応答スペクトル

ベクトルを算出する際に、観測点から断層面までの距離、観測地震マグニチュードと想定している地震規模の差が大きい観測記録に関しては、距離減衰式による補正誤差をより多く含んでいると考えられるため、補正倍率に対して重みをつけて検討を行った。つまり、マグニチュード M_w^{obs} 、断層最短距離 R^{obs} (km) の観測記録に対して、補正前後のスペクトル比の逆数

$$W_n(t) = \frac{1}{SA(t)[M_w^{obs}, D^{obs}, R^{obs}] / SA(t)[M_w^{att}, D^{obs}, R^{att}]}$$

を観測点番号 n 、周期 t (sec) での重みとして与える。ここで $SA(t)[M_w, D, R]$ は、地震規模 M_w 、震源深さ D (km) の地震が断層最短距離 R (km) の観測点において距離減衰式より想定される周期 t (sec) での応答加速度である。得られた非超過確率 90% のスペクトルも付属図 6.3.2 (a) (b) に示してある。

以上の条件に基づいて設定した L2 地震動の標準応答スペクトルを付属図 6.3.3 に示す。これらの応答スペクトルを用いることで、想定した地震規模の観測記録に対して一定の非超過確率を有する構造物を設計することが可能となる。

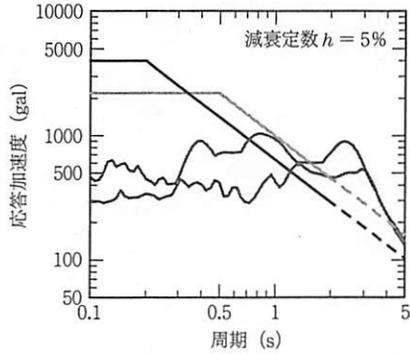


付属図 6.3.3 L2地震動の標準応答スペクトル

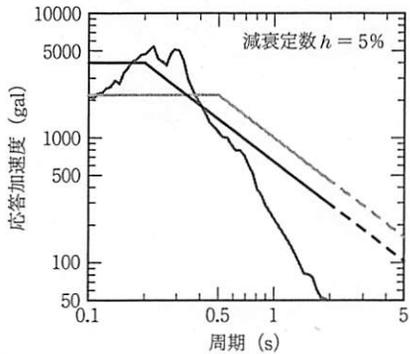
3. L2地震動の標準応答スペクトルを上回る観測記録の例

上記の手順に従って設定した L2 地震動の標準応答スペクトルは、想定した地震規模 (スペクトル I では M_w 8.0 の地震が距離 60 km 程度の位置で発生した場合、スペクトル II では M_w 7.0 程度の地震が直下で発生した場合) に補正を行った観測記録を統計的 (非超過確率 90%) に処理したものである。そのため、たとえ同一規模の地震が発生した場合においても、標準応答スペクトルを上回る地震が発生する可能性は否定できない。特に深部地下構造や表層付近の地盤構成の影響によって、地点の地震増幅特性が特異な性質を示すような箇所については、地震動が局所的に大きくなる可能性がある。ここでは、過去に発生した大規模地震において得られた観測記録のうち、標準応答スペクトルを上回るような記録の例を付属図 6.3.4 に示す。

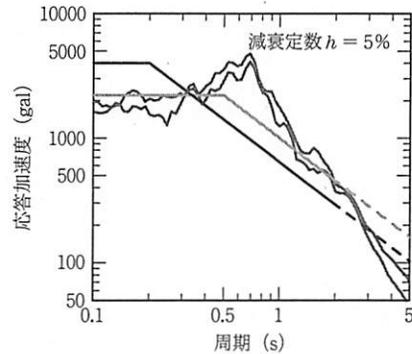
これらの記録の中には、表層付近の薄い軟弱層の強非線形化等の影響によって地震動が大きくなった可



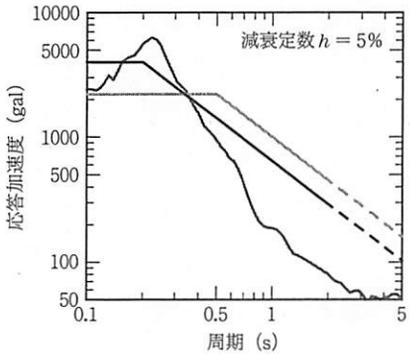
(a) 1995/01/17 兵庫県南部地震 (東神戸大橋)



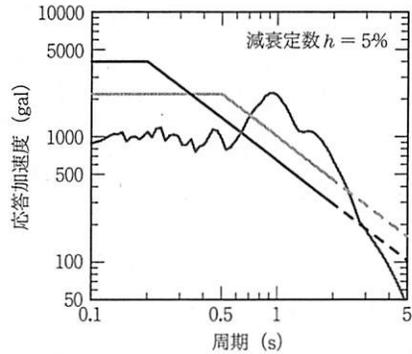
(b) 2003/05/26 宮城県北部地震 (K-NET 牡鹿 NS)



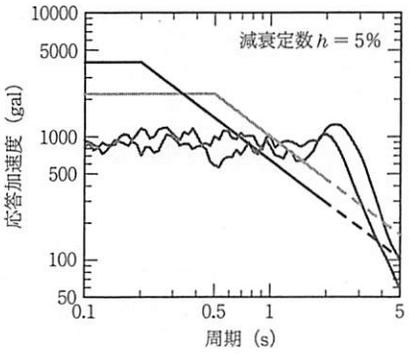
(c) 2004/10/23 新潟県中越地震 (K-NET 小千谷)



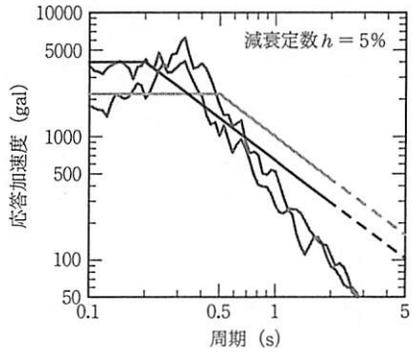
(d) 2004/10/23 新潟県中越地震 (K-NET 十日町 NS)



(e) 2007/03/25 能登半島地震 (K-NET 穴水 EW)



(f) 2007/07/16 新潟県中越沖地震 (K-NET 柏崎)



(g) 2008/06/14 岩手・宮城内陸地震 (KiK-net 東成瀬)

付属図 6.3.4 L2地震動の標準応答スペクトルを上回る観測記録の例

能性が
ないも
設置状
常に大
た、こ
は、「
地震観
行う必

- 1) 場
- 2) 文
- 3) 形
- 4) 全

能性が指摘されているものもあり、必ずしもこれがそのまま耐震設計上の基盤面位置での地震動に相当しないものも存在する。また、これらの観測記録と周辺の被害状況が一致しない等の指摘もあり、計測器の設置状況の影響等も完全には否定できない。しかしながら地点の地震増幅特性によっては、このような非常に大きな地震動が局所的に発生する可能性があることを念頭において検討を行うことは重要である。また、このような特異な地震が発生することが指摘されている箇所周辺においてL2地震動を設定する際には、「付属試料 6-2 L2 地震動の算定時に詳細な検討を必要とする地域と対応の考え方」の第4項により、地震観測や常時微動観測等の調査を事前に行い、周辺の地震動特性を詳細に把握した上で地震動の設定を行う必要がある。

参考文献

- 1) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉, 澤田純男: 深部地下構造を考慮した内陸活断層型地震の経験的評価, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.98-103, 2007.
- 2) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, 493/III-27, pp.49-58, 1994.
- 3) 内山泰生, 翠川三郎: 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.606, pp.81-88, 2006.
- 4) 武村雅之: 日本列島における地殻内地震スケールング則-地震断層の影響および, 地震被害との関連-, 地震第2輯, Vol.51, No.2, pp.211-228, 1999.

付属資料 6-4 短周期成分の卓越した L2 地震動の考え方

1. はじめに

地震動の特性は、断層から対象地盤に到達するまでの過程によって大きく変化する。例えば、地震基盤が浅いと短周期が卓越し、地震基盤が深いと卓越周期が長くなることが分かっている¹⁾。この影響によって岩手・宮城内陸地震や東北地方太平洋沖地震等の震源近傍における地震基盤の浅い地域では、短周期成分において 3000 gal を上回るような非常に大きな地震記録が観測された。解説表 6.4.3 と解説表 6.4.4 に示した L2 地震動の標準応答スペクトル（スペクトル I，スペクトル II）は、一般的な鉄道構造物の周期帯域における増幅特性を勘案して、地震基盤が概ね 500 m より深い場合を想定して設定したものである（「付属資料 6-3 L2 地震動の標準応答スペクトルの設定方法」参照）。しかしながら、山間部等の地震基盤が浅い地域において短周期成分が卓越するような地点においては、地震動特性が標準応答スペクトルとは異なる可能性が考えられる。そのためこれらの地域に周期の短い構造物を設計する場合には、標準応答スペクトルに加えて短周期成分の卓越を考慮した L2 地震動も併せて設定することが望ましい。

建設地点の地震動特性を把握するためには、「付属資料 6-2 L2 地震動の算定時に詳細な検討を必要とする地域と対応の考え方」の第 4 項に示すように、地震観測、常時微動観測を実施することが望ましい。ただし、これらの調査を実施しない場合には、地震基盤の大まかな構造のみから地震動特性を概略的に把握することも可能であると考えられる。その際の短周期成分の卓越する可能性のある地域の区分と、これらの地域における L2 地震動の考え方について記述する。

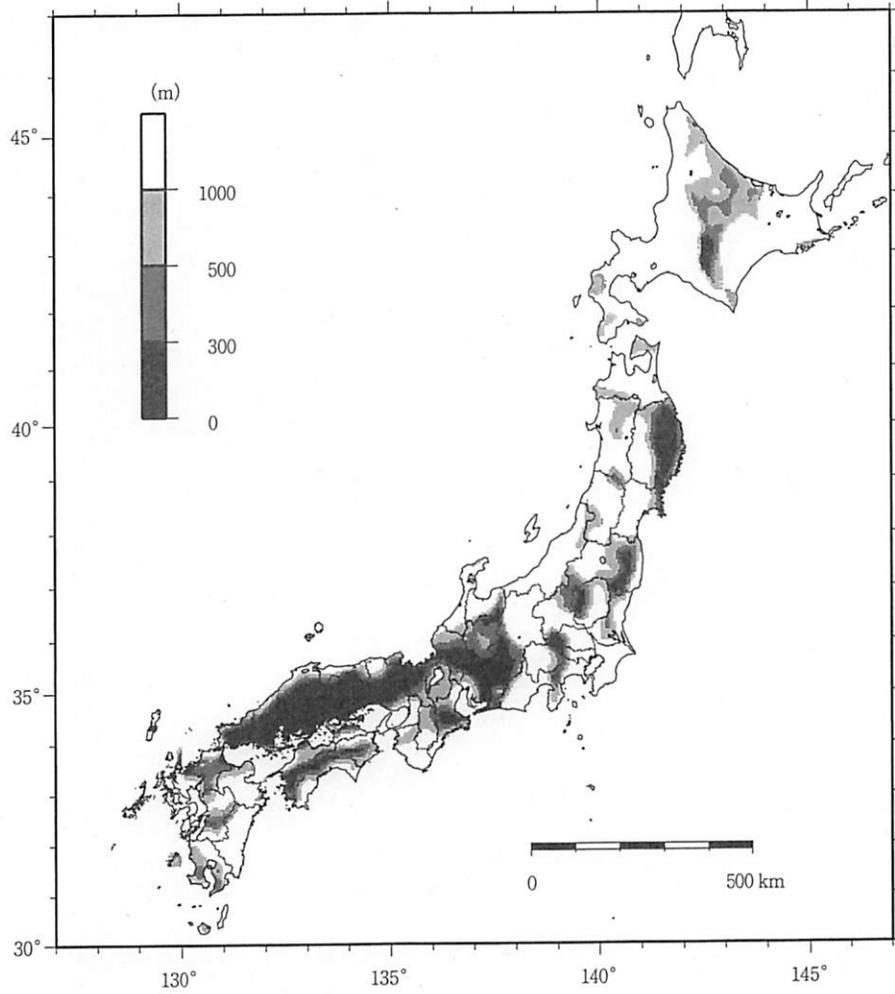
2. 短周期成分の卓越する可能性のある地域

既往の物理探査やボーリング調査に基づいた全国の地盤構造をまとめた結果²⁾によると、地震基盤深度は付属図 6.4.1 のように推定されており、地域によって大きく変化していることが分かる。このうち、地震基盤が 500 m 程度よりも浅い地域では、標準応答スペクトルとは異なり短周期側が卓越した地震動となることが分かっている¹⁾。

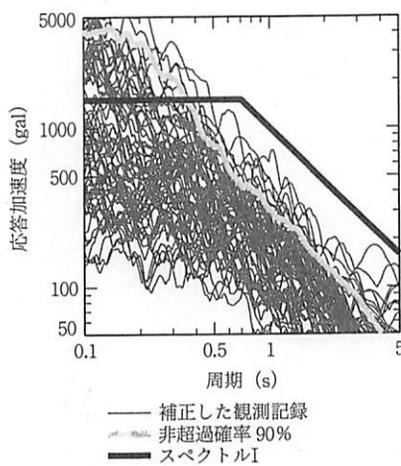
しかしながら現状の深部地下構造の調査間隔や推定精度、実務上の取り扱いを勘案すると、この結果のみを使用して地震動特性の違いを分類することは困難であると考えられる。そのため先述したように地震観測または常時微動観測を実施するのがよいが、それが不可能な場合には、当面の間、地震基盤深度が 1000 m よりも浅い地点（付属図 6.4.1 の白塗りの地域を除く地点）においては、短周期成分が卓越する可能性があると考えたこととした。今後、地盤調査技術の推進、発展により地下構造推定精度が向上するとともに、短周期成分の大きな地震動の発生メカニズムの解明がさらに進むことによって、地域ごとの地震動の分類、使い分けがより明確となることが期待される。

3. 短周期成分の卓越した L2 地震動

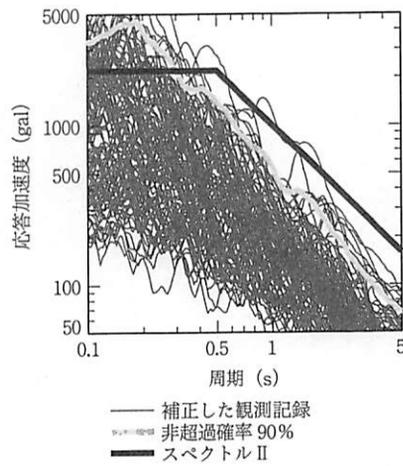
既に述べたように、地点の深部地下構造によって地震動特性が大きく変化する。例えば付属図 6.4.2 お



付属図 6.4.1 全国の地震基底深度²⁾



付属図 6.4.2 スペクトル I と地震基底が浅い地域での観測記録の比較



付属図 6.4.3 スペクトル II と地震基底が浅い地域での観測記録の比較

与

地震基底
深さによっ
て周期成
分が異な
り、1.4.4に
示すような
短周期成
分が卓越
する地域
では、地
震基底深
さと周期
成分との
関係が、
標準的な
ものと異
なると考
えられる。

必要とし
、この

地震基底
深さ、地
震動と
結果の
に地震
動が
異なる
上する
との地

4.2 お

よび付属図 6.4.3 は、地震基盤が浅い地域で観測された比較的規模の大きな地震記録（海溝型地震，内陸活断層による地震）を，標準応答スペクトルの想定規模（スペクトル I では $M_w 8.0$ ，断層最短距離 60 km 程度，スペクトル II では， $M_w 7.0$ 程度の地震が直下で発生した場合）に補正を行った結果を示したものである¹⁾。またこれらの図には，それぞれの補正した観測記録を非超過確率 90% で包絡するスペクトルも示している。これらの結果を見ると，観測記録を補正した結果は，0.3 秒程度よりも短周期側で標準応答スペクトル（スペクトル I，スペクトル II）を上回っていることが分かる。一方で周期が長くなると，標準応答スペクトルは地震基盤の浅い地域における観測記録を大きく上回っている。そのため第 2 項で示した短周期成分の卓越する可能性のある地域で等価固有周期が 0.3 秒よりも短い構造物を設計するような場合には，これらの結果を参考にして標準応答スペクトルに加えて短周期成分の卓越した地震動も L2 地震動として設定するのがよい。

この場合の L2 地震動を付属表 6.4.1，付属図 6.4.4（スペクトル I），付属表 6.4.2，付属図 6.4.5（スペクトル II）に示す。また，時刻歴波形を付属図 6.4.6，付属図 6.4.7 に示す。この時刻歴波形を作成する際の位相特性等の設定条件は，標準応答スペクトルの時刻歴波形を算定した場合と同様である。

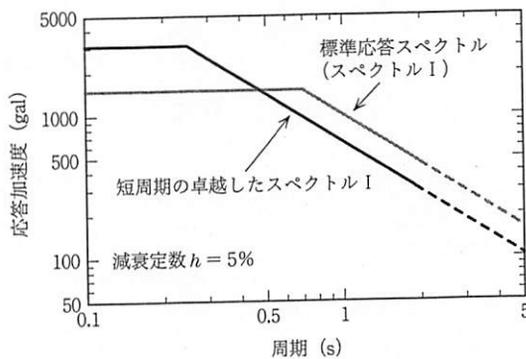
これらの地震動の想定規模，設定条件などは，標準応答スペクトルと同様であるため，適用範囲や距離

付属表 6.4.1 短周期成分の卓越したスペクトル I の弾性加速度応答スペクトル

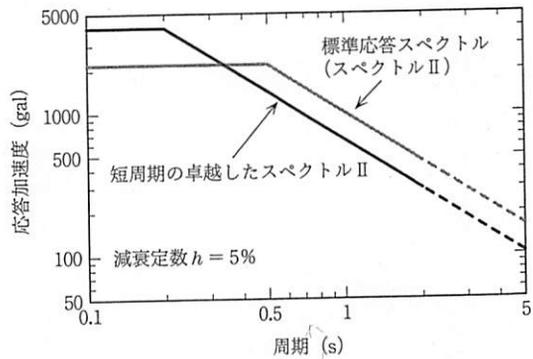
| 周期 T (s) | 応答加速度 (gal) |
|------------------------|-------------------------|
| $0.1 \leq T \leq 0.25$ | 3100 |
| $0.25 < T \leq 2.0$ | $642 \times T^{-1.137}$ |

付属表 6.4.2 短周期成分の卓越したスペクトル II の弾性加速度応答スペクトル

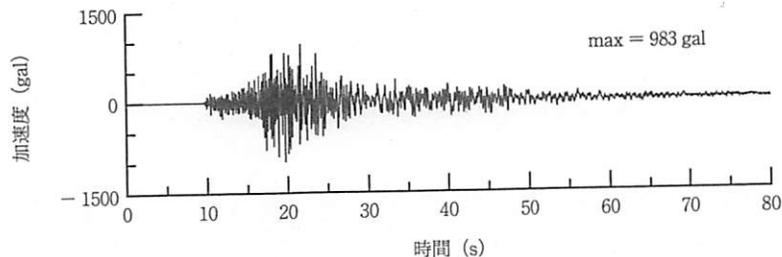
| 周期 T (s) | 応答加速度 (gal) |
|-----------------------|-------------------------|
| $0.1 \leq T \leq 0.2$ | 4000 |
| $0.2 < T \leq 2.0$ | $642 \times T^{-1.137}$ |



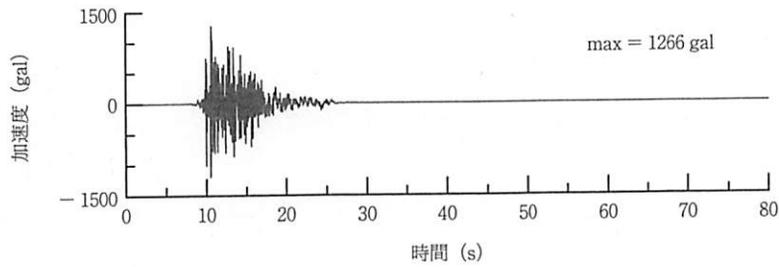
付属図 6.4.4 短周期成分の卓越したスペクトル I



付属図 6.4.5 短周期成分の卓越したスペクトル II



付属図 6.4.6 短周期成分の卓越したスペクトル I の時刻歴波形



付属図 6.4.7 短周期成分の卓越したスペクトルIIの時刻歴波形

等による補正なども同様の条件で用いることが可能である。ただしこの場合にも、解説表 6.4.2 に示す下限地震動を下回る地震動を L2 地震動として設定することはできない。

4. 適用する場合の注意点

付属表 6.4.1, 付属表 6.4.2 に示す地震動は、短周期成分の卓越する可能性のある地域において、等価固有周期が 0.3 秒よりも短い橋梁・高架橋を設計する場合に適用する必要がある。ただし、以下の場合には、この地震動を用いる必要はない。

① 液状化時の検討

液状化時の検討においては、長周期成分の大きな解説表 6.4.3 と解説表 6.4.4 の地震動の方がより大きな応答値を与えると考えられるため、構造物の等価固有周期が短い場合であってもこの地震動を用いる必要はない。

② 開削トンネル

開削トンネルのような地中構造物では、地盤変位による影響が支配的であり、解説表 6.4.3 と解説表 6.4.4 の地震動の方がより大きな応答値を与えると考えられるため、短周期成分の卓越した地震動を適用しなくてもよいものとした。

③ 土構造物、橋台等

盛土構造物の地震応答値は、一般的にはニューマーク法によって算定している。この場合、解説表 6.4.3 と解説表 6.4.4 の地震動の方が大きな応答値を与える場合が多いため、短周期成分の卓越した地震動を適用する必要はない。また橋台の地震応答値を「11.2 応答値の算定」に示される手法で算定する場合、固有周期の短い橋台では付属表 6.4.1, 付属表 6.4.2 に示す地震動の方が大きな応答を与えることがある。しかしながら固有周期の短い橋台の地震時応答は、背面盛土の滑動による影響が卓越するため、盛土構造物と同じように扱うことが可能であり、この場合、短周期成分の大きな地震動は適用しなくてもよいものとした。

参考文献

- 1) 坂井公俊, 室野剛隆, 澤田純男: 地震基盤深度を考慮したレベル 2 地震動の簡易評価, 第 12 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 317-322, 2009.
- 2) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 工藤暢章, 大井昌弘, はお憲生, 早川譲, 逸山信彦, 松山尚典, 岩本鋼司, 鈴木晴彦, 劉瑛: 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 337 号, 2009.

)を
ベル
を満

報告,

DO
10
反)
OC
DO
10
01
OF
DF
DF
IF
円
円

平成 24 年 9 月
鉄道構造物等設計標準・同解説—耐震設計

平成 24 年 9 月 25 日 発 行
平成 30 年 6 月 20 日 第 4 刷発行

編 者 公益財団法人 鉄道総合技術研究所

発行者 池 田 和 博

発行所 丸善出版株式会社

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町二丁目17番
編集：電話(03)3512-3266/FAX(03)3512-3272
営業：電話(03)3512-3256/FAX(03)3512-3270
<https://www.maruzen-publishing.co.jp>

© 公益財団法人 鉄道総合技術研究所, 2012

組版印刷・中央印刷株式会社/製本・株式会社 星共社

ISBN 978-4-621-08587-5 C3351 Printed in Japan

本書の無断複写は著作権法上での例外を除き禁じられています。