

耐震設計上の基盤の選定法に関する一考察

建設省土木研究所 正員 ○川島一彦
 " " 高木義和

1. まえがき

一般に構造物の動的解析を行なう際には、建設地点で採取された強震時の地震動記録を用いることが最善の方法と考えられる。しかしながらこのように恵まれた条件は一般に少なく、他の地点で採取された強震記録を準用するケースが多い。地表で採取された記録は、その周辺の表層地盤の影響を強く受けており、このような表層地盤の影響を除去するため、地表で観測された記録を一度その地点の基盤での地震動に変換し、それに改めて建設地点の表層地盤の影響を付加して設計に用いる地震動を算出するという方法が一般に用いられている。このような方法を用いるためには、基盤をどの地層面に選べばよいかに関する検討が重要となる。本報告は、モデル地盤の地震応答解析結果に基づいて基盤の選定法を検討した結果について報告するものである。

2. 耐震設計上の基盤とその問題点

耐震設計上の基盤の取り方に関して種々の提案がなされているが、最も基本的な考え方は地表に近い地盤の影響を受ける度合いの少ない地層であることと考えられている。すなわち、基盤と基盤に作用させる地震動とは表裏一体の問題であり、どのような地層を基盤とするかを考えずに基盤地震動を定めることはできない。

現在までに、技術基準等で耐震設計上の基盤について規定しているものには、以下のものがある。

(1) 石油パイプライン地震対策要綱・同解説 (日本道路協会, 1974.3) ----- 表層に比べて相対的に剛い下方の地盤の上面をいい、せん断波速度が 300 m/sec 以上、もしくは、 N 値が 50 程度以上の剛性が下方につづく地盤の上面とする。

(2) 沈埋トンネル耐震設計指針 (案) (土木学会, 1974.3) ----- 基盤とは、広い範囲にわたって存在する地盤で、その中で地震波が伝播する際に波形の著しい変化を生じない層を指し、典型的な例としては岩盤を考えてよい。

(3) 東京湾横断道路沈埋トンネル設計基準 (案) (日本道路協会, 1974.3) ----- 基盤は、 N 値の程度、せん断波速度 300 m/sec 程度以上で地中深部まで続く表層に比べて相対的に剛い地盤とする。

(4) UBC STANDARD (1976) ----- 基盤とは、微小ひずみ ($10^{-4}\%$) 時のせん断波速度が約 700 m/sec 以上で、その下にこれより著しい剛性の低い土層のない層をいう。

以上の技術基準に規定されている基盤の定義は、1) 充分剛性が高いこと、2) その下に軟い層がないこと、3) 広い範囲にわたって存在すること、3つに分類することができる。しかしながら、具体的にどの程度の地盤と基盤と取扱えばよいかという点になると、上記の基盤の定義に相当の幅があることからわかるように、はっきりしない点が多い。

3. 基盤の設定に伴う精度の検討

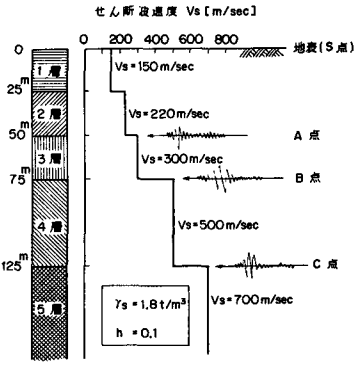


図1 解析対象とした地盤モデル

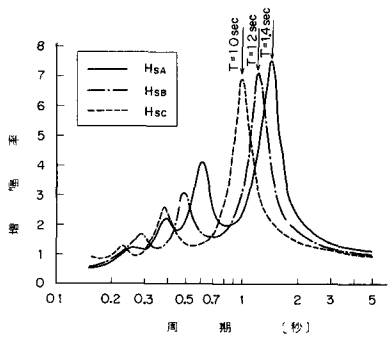


図2 モデル地盤の伝達関数(増幅率)

地層構成が与えられた地盤で、基盤の位置を変化させた場合の地表面地震動の精度を検討するため、モデル地盤を用いた応答計算を行った。対象としたのは図1に示す地盤モデルであり、第1層(地表層)から第5層(最下層、地下に半無限に連続すると仮定する)までの土層で構成されるものとした。土の単位体積重量および減衰定数は全ての地層に対して、それぞれ 18 t/m^3 、 10% と仮定した。これは、実在の地盤を簡単に理想化したもので、ごく普通に存在する地盤の構成である。この地盤で、基盤面を次の3通りの位置に仮定した。

- (i) ケース1 $V_s = 700 \text{ m/sec}$ の層の上面(C点)を基盤とする場合
- (ii) ケース2 $V_s = 500 \text{ m/sec}$ の層の上面(B点)を基盤とする場合
- (iii) ケース3 $V_s = 300 \text{ m/sec}$ の層の上面(A点)を基盤とする場合

ケース1~3のそれぞれの場合の基盤に対する伝達関数の増幅率 H_{si} ($i = A, B, C$) は図2に示す通りであり、表層地盤の固有周期はケース1, 2, 3に対してそれぞれ1.4, 1.2, 1.0秒である。

基盤に作用させる地震動としては、千葉県富津市の地下110mで観測された伊豆半島沖地震(1974)および伊豆大島近海地震(1978)による記録を用いた。これらの記録の加速度応答スペクトル倍率は図3に示す通りであり、伊豆半島沖地震記録が0.2~1.5秒に至る比較的最長い周期成分が卓越するのに対して、伊豆大島近海地震記録は0.25秒付近で卓越した短周期成分型の記録である。

これらの記録を最大加速度を10galに正規化して基盤に作用させ、地表の地震応答を計算すると図4のようになる。図中では、ケース1, 2, 3のうち

最も精度のよいケース1の場合と比較してケース2および3の場合が示されている。これによれば、いずれの地震記録を作用させた場合も、ケース2の方がケース3よりむしろケース1に近い応答を与えていること、また、伊豆大島近海地震記録を入力した場合と伊豆半島沖地震記録を入力した場合を比較すると、前者の場合にはケース1, 2, 3の差異は比較的小さいのに対して、後者の場合には3ケース間の差異がさうなまでに大きいことがわかる。図5は地盤中の最大加速度の分布を示したものである。

次に、図4に示した地表の応答波形を加速度応答スペクトル S_a で比較すると図6のようになる。これらの結

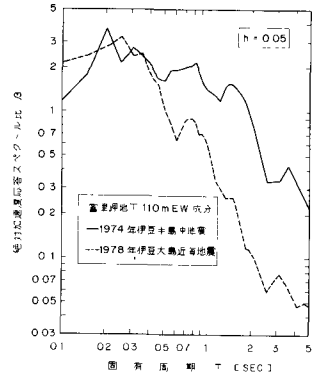
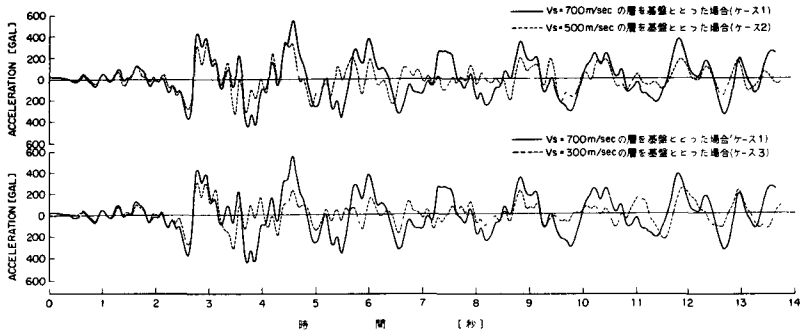
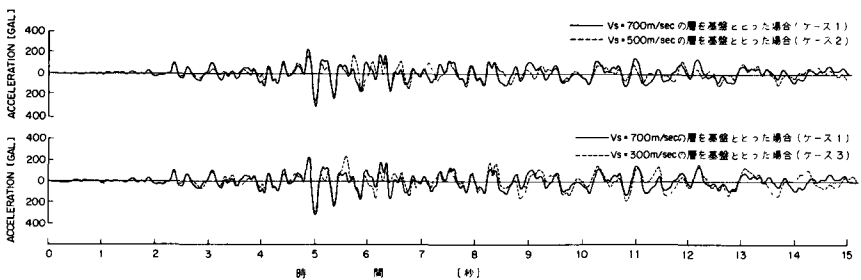


図3 基盤入力記録の加速度応答スペクトル



(a) 伊豆半島沖地震(1974.5.9)の記録を基盤に作用させた場合



(b) 伊豆大島近海地震(1978.1.14)記録を基盤に作用させた場合

図4 基盤位置を変化させた場合の地表面応答加速度の比較

次に、図4に示した地表の応答波形を加速度応答スペクトル S_a で比較すると図6のようになる。これらの結

果を、ケース1, 2, 3の違い、および、入力地震動特性の違いにより整理すると以下のようによりまとめられる。

(1) 伊豆半島沖地震記録を作用させた場合には、ケース1, 2, 3ごとに加速度応答スペクトルSAは大きく異なる。ケース1を基準とすれば、ケース3は一般にどの周期成分に対してもスペクトル値を過小評価している。これは、図5に示したように、ケース1の場合がケース3の場合より地表面最大加速度が約2倍程度大きく求められていることにも関係している。

(2) 伊豆大島近海地震記録を作用させた場合には、ケース1, 2, 3間の加速度応答スペクトルSAの差異は全体として伊豆半島沖地震記録を作用させた場合よりも小さい。しかしながら、ケース1, 2, 3ごとの加速度応答スペクトルSAの一致度は、一般に表層地盤の基本固有周期1.0~1.4秒より短周期側では比較的小さいのに、対して、これより長周期側では大きく、また、ケース1, 2, 3と異なるに従って応答のレベルが低下している。したがって、1.0~1.4秒以上の周期領域では、ケース1を基準とすればケース3は応答レベルを過小評価していることになる。

以上のような解析結果をもとに、表層地盤の固有周期、基盤入力地震動の卓越周期の観点から、基盤の選定に際し考慮する必要がある項目をまとめると以下のようになろう。

ある基盤地震動が与えられた場合には、設定した基盤から上の表層地盤の基本固有周期 T_s が基盤地震動の卓越周期(もしくは、その周期の範囲) T_{BR} に近い場合には、表層地盤の応答は大きく増幅される。したがって、 T_{BR} よりも充分表層地盤の基本固有周期 T_s が

長くなるように深く基盤を選べば、地震動に対する表層地盤の増幅効果は正しく再現される。反対に、基盤を地表面近くの浅い地層に選べば、 T_s が T_{BR} よりも短くなった場合には地震動は本来増幅されなければならないレベルまで増幅されないため、結果として求められる地表面加速度は過小の評価となる。

また、ある基盤地震動をもとに地表面での応答と求める際には、基盤として選んだ地層から上の表層地盤の基本固有周期 T_s よりも短周期の地震動には表層地盤の増幅効果が付与されるが、 T_s よりも長い周期成分の地震動は一般に増幅されない。したがって、ある基盤地震動から地表面地震動を計算するに際し、基盤を地表面近くの浅い層に選べば、表層地盤の固有周期 T_s が基盤入力地震動の卓越周期 T_{BR} よりも長い場合には、 T_s よりも長い周期成分は、基盤を深く選んだ場合に比較し、過小に評価されることになる。

このような点を避けるためには、一次の条件を満足するように基盤を選定すればよいと思われる。

$$T_s > T_{BR} \quad (1)$$

一般に、動的解析で対象とする構造的固有周期を T_{ST} とすれば、基盤地震動の卓越周期(もしくはその周期

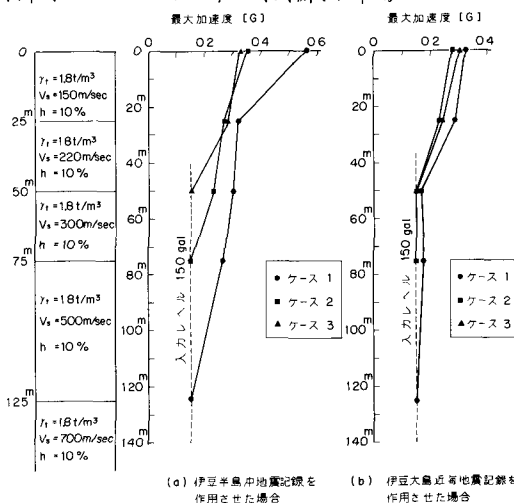


図5 最大加速度の地中内分布の比較

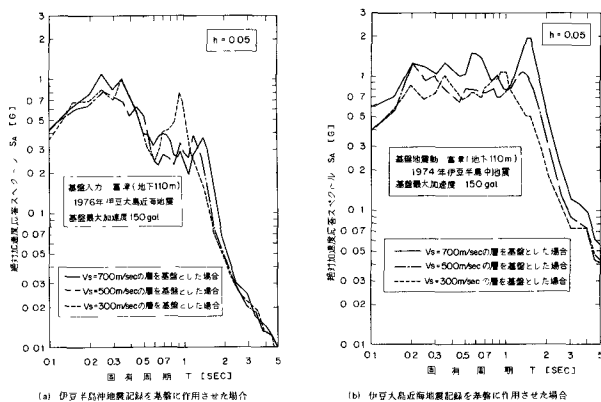


図6 SAスペクトルによる地表面地震動の特性の比較

一般に、動的解析で対象とする構造的固有周期を T_{ST} とすれば、基盤地震動の卓越周期(もしくはその周期

の範囲)は $T_{BR} \approx T_{ST}$ となるように選ばれる例が多い。したがって、このような点を考慮すると、基盤の選定基準の1つとして以下の条件が提案される。

$$T_S > T_{BR}, \quad T_S > T_{ST} \quad (2)$$

4. 2地点間の基盤の関係

以上の議論は、ある基盤地震動が与えられて地表面地震動を求める際の基盤の選び方であるが、同様の議論で地表面地震動から基盤地震動を求める際の基盤の選定法にもあてはまると考えられる。すなわち、ある深さに基盤を選定し、地表面地震動から基盤地震動を計算する場合には、表層地盤の固有周期 T_S よりも短い周期成分に対しては、表層地盤の増幅効果が取り除かれるが、 T_S よりも長い周期成分に対しては表層地盤の増幅効果が除去されない。したがって、十分な深さの基盤を選び(表層地盤の固有周期 T_S)、ここでの基盤地震動を計算した場合に、基盤をもっと深い位置に選んだ場合の基盤地震動と比較し、 T_S よりも長い周期成分が過大に評価されていることになる。

地表で観測した地震動をその地点の基盤地震動に変換し、これを建設地点の基盤に作用させて建設地点の地表面地震動を計算するためには、記録地点の基盤から建設地点の基盤への基盤地震動の受渡レベルとなる。上述した基盤の選定法を模式的に分類すると図7のようにまとめることができる。

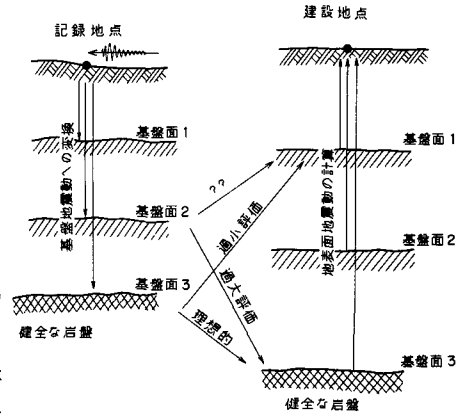


図7 記録採取地点の基盤から建設地点の基盤への基盤地震動の受渡し

5. まとめ

モデル地盤の地震応答解析結果をもとに、表層地盤の地震応答特性を検討した結果、耐震設計上の基盤の選定法に関して以下の見通しを得た。

(1) ある基盤地震動をもとに地表地震動を計算する際の基盤は、それより上の表層地盤の固有周期 T_S が基盤地震動の卓越周期 T_{BR} もしくは地震応答解析対象とする構造物の固有周期 T_{ST} よりも長くなるように選ぶのが望ましい。

(2) 一方、地表地震動をもとに深さに基盤を選定して、その面での基盤地震動を計算すると、表層地盤の固有周期 T_S よりも短い周期に対しては表層地盤の増幅効果は除去される。しかしながら、 T_S よりも長い周期に対しては表層地盤の増幅効果が充分除去されないため、この周期に対しては基盤地震動は過大評価となる。

(3) 基盤の選定に関しては、記録採取地点の基盤の特性、建設地点の基盤の特性、構造物の固有周期特性および基盤地震動の周期特性を考慮することが必要である。したがって、記録採取点および建設地点の基盤のうち、一方だけの基盤を他方の基盤のとり方に関係なく選定することは望ましくない。このような場合には、両所の表層地盤、固有周期がおおむね等しくなるように基盤を選ぶことが一つの考え方と思われるが、このような点については今後更に検討する必要がある。

謝辞 本研究は本州四国連絡橋公団からの委託で実施したものであり、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省 新耐震設計法(案), 1977
- 2) 川島, 高木 実測地中地震記録に基づく表層地盤の地震応答, 第5回日本地震工学シンポジウム, 1978
- 3) 栗林, 川島, 友沢 設計基盤面の設定法に関する一考察, 第12回土質工学研究発表会, 1977
- 4) 川島, 高木 実測地中地震動の解析, 第34回土木学会年次学術講演会, 1979