

群遅延時間を用いた地震動の位相特性に関する検討

中尾 吉宏¹・田村 敬一²・松本 俊輔³

¹正会員 工修 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

³正会員 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

地震動の位相特性は地震波の非定常性と密接に関連し、振幅特性とともに、構造物の地震時挙動に大きな影響を及ぼすことが知られている。そこで、耐震設計用の地震動を設定する際には、設計で想定する地震及び地震動に応じた位相特性を考慮することが必要とされる。

地震動の位相特性を評価するための1つの指標として群遅延時間が考えられる。本検討では、過去の地震による強震記録及び平成7年兵庫県南部地震による震源近傍の強震記録を用いて群遅延時間を算出し、地震の規模や震央距離等との関係について検討することにより、群遅延時間の推定式を導出した。

Key Words: group delay time, phase characteristics, non-stationarity, ground motion

1. はじめに

地震動の位相特性は地震波の非定常性と密接な関係を有し、位相特性の指標である群遅延時間や位相差分スペクトル等を用いて地震動の非定常性について検討した研究が各種報告されている^{1)・2)・3)}。群遅延時間は、地震動の周波数成分毎に算出されるものであるが、その平均は地震波形の重心時刻を表し、標準偏差は地震波形の重心時刻からのばらつきの程度を決定する1つの因子であることが知られている²⁾。本研究では、過去の地震により観測された水平202成分の強震記録及び平成7年兵庫県南部地震により観測された水平30成分の強震記録の群遅延時間を算出した。また、地震の規模、震央距離、震源深さ、観測点の地盤条件が群遅延時間の平均及び標準偏差に及ぼす影響について検討することにより、群遅延時間の推定式を導出した。

2. 群遅延時間の算出に用いた強震記録

解析に用いた強震記録は、過去に発生したマグニチュード5以上の71地震により観測された202成分と平成7年兵庫県南部地震で観測された30成分である。図-1に解析に用いた強震記録の地震のマグニチュードと震央距離の関係を地盤種別ごとに示す。ここで、地盤種別とは地盤の特性値 T_c により3種に区分された地

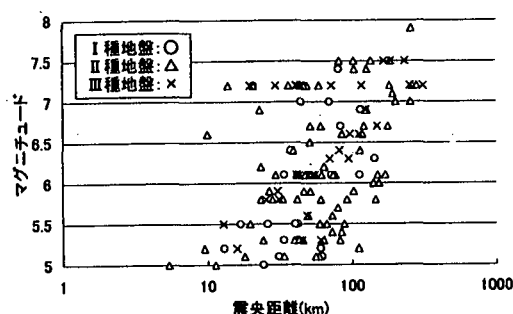


図-1 地震のマグニチュードと震央距離

表-1 解析に用いた強震記録

	I種地盤	II種地盤	III種地盤	計
$5 \leq M < 6$	20	56	11	87
$6 \leq M < 7$	12	52	19	83
$7 \leq M < 8$	9	33	20	62
計	41	141	50	232

盤の種類であり、 $T_c < 0.2(\text{sec})$ はI種地盤、 $0.2 \leq T_c < 0.6(\text{sec})$ はII種地盤、 $0.6(\text{sec}) \leq T_c$ はIII種地盤と定義される⁴⁾。図-1でマグニチュードが7.2の記録のうち、震央距離が小さな強震記録は兵庫県南部地震による強震記録である。

表-1に地震の規模、地盤種別ごとの強震記録数を示す。I種地盤については41記録、II種地盤は141記録、III種地盤は50記録を解析に用いており、II種地盤の記録数が多い。

群遅延時間の算出には、地震波初動部から、加速度の振幅値が7回以上継続して最大加速度の5%以下になるまでの時刻歴データを用いた。また、群遅延時間の平均及び標準偏差の算出においては、0.2~10Hzの周波数帯における群遅延時間を用いることとした。

3. 解析結果

群遅延時間の平均と標準偏差の関係を図-2 に示す。図-2 から、群遅延時間の平均と標準偏差の間には一定の相関が見られ、群遅延時間の平均（絶対値）が大きくなると標準偏差も大きくなる傾向があることがわかる。群遅延時間の平均と標準偏差の関係を回帰分析した結果を表-2 に示す。

表-2 回帰分析の結果

	全地盤種別	I種地盤	II種地盤	III種地盤
α	-0.503	-0.523	-0.447	-0.630
β	1.323	0.446	2.114	-0.184
相関係数	0.827	0.855	0.790	0.875

$$S_{GDT} = \alpha \mu_{GDT} + \beta$$

ここに、 S_{GDT} ：群遅延時間の標準偏差
 μ_{GDT} ：群遅延時間の平均

群遅延時間の平均の決定因子について検討するため、群遅延時間の平均とマグニチュード、震央距離、震源深さの関係を図-3、4、5 に示す。

図-3 及び図-4 から、マグニチュードまたは震央距離が大きいか場合には群遅延時間の平均が大きくなる傾向がある。また、I種、II種、III種地盤と地盤が軟質になるに従い、群遅延時間の平均とマグニチュード及び震央距離の相関係数が小さくなること、及びマグニチュードに比べ震央距離と群遅延時間の相関性が強いことが表中の相関係数の比較によりわかる。

震源深さと群遅延時間の平均の間には、図-5 に示すように、相関性がみられない。

4. 群遅延時間の平均の推定

0.2-10Hzの周波数帯の群遅延時間の平均と地震の規模、震央距離、震源深さの関係を回帰することにより、群遅延時間の平均の推定式を導出した。推定式の導出にあたり仮定した式形を表-3 に示す。例えば、表-3の⑥は、群遅延時間の平均の推定式として、(1)式を仮定したことを意味する。

$$\mu_{GDT} = \alpha_1 M + \alpha_2 X + \alpha_3 D + \alpha_4 \tag{1}$$

ここに、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ：回帰係数
 μ_{GDT} ：群遅延時間の平均(sec)
 M ：マグニチュード
 X ：震央距離(km)
 D ：震源深さ(km)

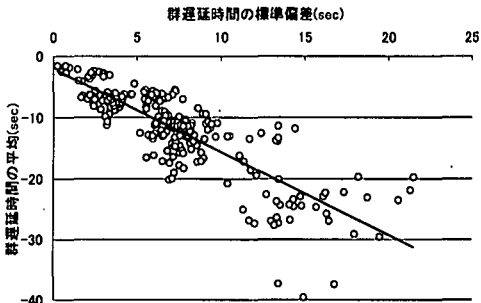


図-2 群遅延時間の平均と標準偏差の関係

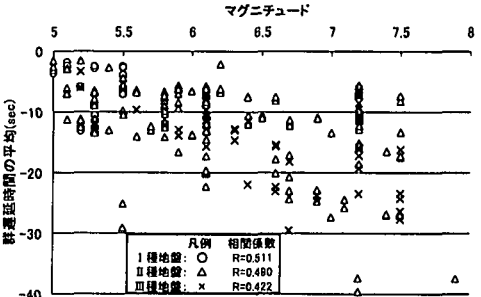


図-3 群遅延時間の平均とマグニチュードの関係

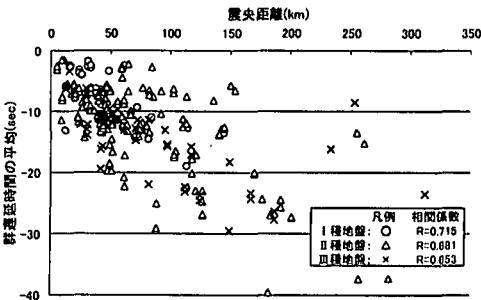


図-4 群遅延時間の平均と震央距離の関係

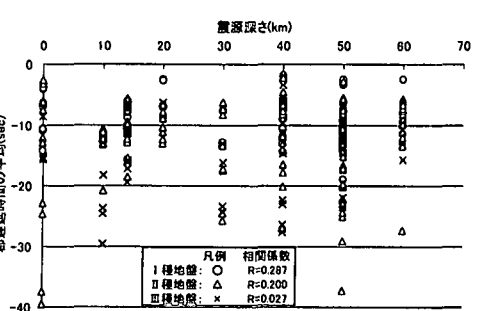


図-5 群遅延時間の平均と震源深さの関係

表-3 仮定した式形及び相関係数（群遅延時間の平均）

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
M	○				○	○	○	○		○
X	○	○	○	○	○	○				
D	○	○	○	○						
Log X	○	○		○			○			
X ²	○	○		○				○	○	
MX	○	○	○							
全地盤種別	0.748	0.748	0.748	0.734	0.728	0.718	0.703	0.681	0.601	0.500
I種地盤	0.844	0.814	0.763	0.768	0.781	0.762	0.711	0.737	0.663	0.511
II種地盤	0.741	0.740	0.739	0.739	0.715	0.716	0.678	0.688	0.644	0.490
III種地盤	0.811	0.798	0.608	0.772	0.782	0.674	0.752	0.538	0.487	0.422

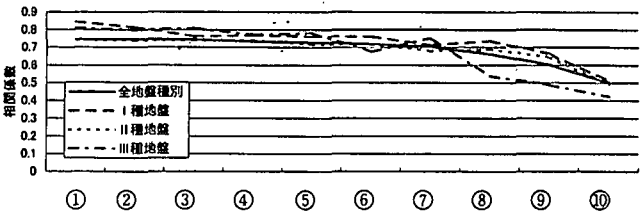


図-6 推定式の相関係数（群遅延時間の平均値）

また、地盤条件が群遅延時間に及ぼす影響を検討するため、群遅延時間の平均を地盤種別ごとに分類した場合と、分類しない場合について回帰分析を行った。結果として、仮定した式形による相関係数を図-6 に示す。

図-6 及び表-3 から、すべての地盤種別について 0.7 程度以上の相関係数を有し、かつ式形が簡便な⑦式が群遅延時間の平均の推定式として妥当であると考えられる。また、地盤種別の分類をした場合としない場合について、相関係数に大きな違いがないことから、今回の解析では、全地盤種別に対する⑦式が推定式として妥当であると判断される。

群遅延時間の平均について、強震記録からの算出値と⑦式による推定値の比較を図-7 に示す。図-7 の横軸は強震記録から算出した群遅延時間の平均を表し、縦軸はその強震記録に対応した⑦式による推定値を示している。図-7 から、推定式にはばらつきが伴うことに注意する必要がある。

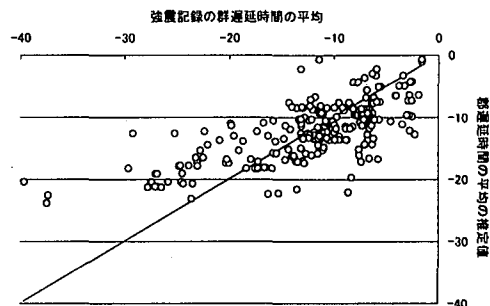


図-7 推定式のばらつき (群遅延時間の平均)

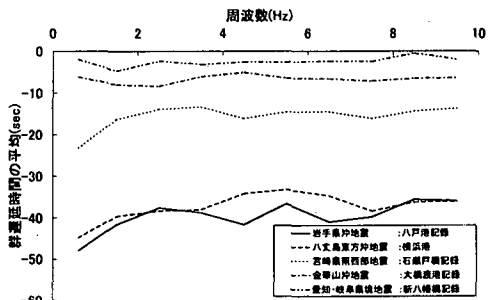


図-8 群遅延時間の平均値の周波数依存性

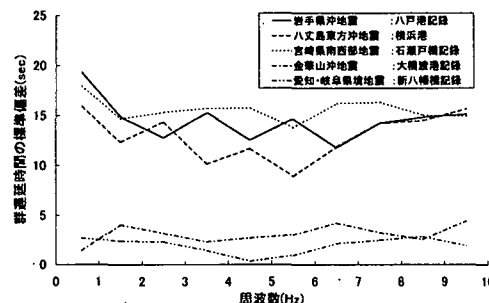


図-9 群遅延時間の標準偏差の周波数依存性

5. 群遅延時間の平均及び標準偏差の周波数依存性

5 成分の強震記録の群遅延時間について、その平均及び標準偏差を 0.2-1Hz、1-2Hz、2-3Hz、3-4Hz、・・・、9-10Hz の周波数帯で算出した結果を図-8 及び図-9 に示す。なお、図中では、各周波数帯の算定結果をそれぞれの中央にプロットしている。

図-8 から、群遅延時間の平均 (絶対値) が大きな強震記録に関しては、1-4Hz で周波数が低くなるにつれて群遅延時間の平均が減少する傾向が見られ、その傾向は群遅延時間の平均 (絶対値) が大きな強震記録ほど強い。また、図-9 から、群遅延時間の標準偏差が大きな強震記録については、1-4Hz で周波数の低下とともに標準偏差が増加し、群遅延時間の平均と同様に周波数に依存する傾向が見られる。群遅延時間の平均と標準偏差が同様の傾向を持つことは、2つの統計量が図-2 に示した相関性を有することからも推測される。

周波数に依存する群遅延時間の平均の推定式として、4. での検討を参考に、表-4 に示す式形を仮定し、回帰分析を行った。周波数 f に付加されている係数 0.5 は、低い周波数で群遅延時間の推定値が極度に小さくなるのを避けるために設けた係数である。回帰分析の結果として、式形ごとの相関係数を表-4 及び図-10 に示す。今回の検討で仮定した式形の中には、相対的に優位な式形を見出すことができなかった。また、地盤条件を考慮する利点も見られなかったため、地盤条件を考慮しない全地盤種別に対する①式を周波数に依存する群遅延時間の平均の推定式として用いることが妥当であると考えられる。①式の回帰係数を表-5 に示す。

表-4 周波数に依存する群遅延時間の平均の推定式形及び相関係数

GDT平均	①	②	③
M	○	○	○
logX	○	○	○
M*log(F+0.5)	○		
Xlog(F+0.5)		○	
D*log(F+0.5)			○
全地盤種別	0.689	0.676	0.676
I 種地盤	0.686	0.676	0.674
II 種地盤	0.667	0.653	0.658
III 種地盤	0.730	0.730	0.703

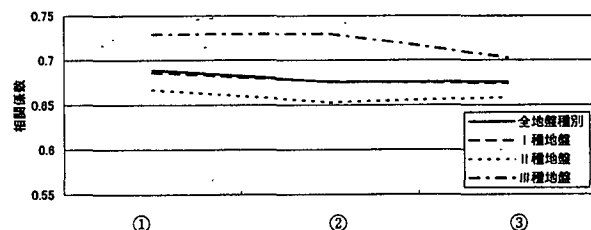


図-10 推定式の相関係数 (群遅延時間の平均)

表-5 群遅延時間の平均の推定式

回帰係数	α_1	α_2	α_3	α_4
全地盤種別	-2.844	-11.65	0.573	23.534

$$\mu_{\text{GDT}} = \alpha_1 M + \alpha_2 \log X + \alpha_3 M \log(f + 0.5) + \alpha_4$$

ここに、 μ_{GDT} : 群遅延時間の平均 (sec)

M : マグニチュード

X : 震央距離 (km)

f : 周波数 (Hz)

6. 推定式を用いた地震動のシミュレーション

群遅延時間の平均と標準偏差の推定式の妥当性を検証するため、群遅延時間を推定し、地震波のシミュレーションを行った。一例として、千葉県中部地震による新葛飾橋記録及び宮城県沖地震による開北橋記録の解析結果を、それぞれ、図-11 及び 12 に示す。図-11 は、群遅延時間の平均及び標準偏差の推定が実測記録からの算出値とよく一致している例であり、図-12 は両者の乖離が平均的な例である。

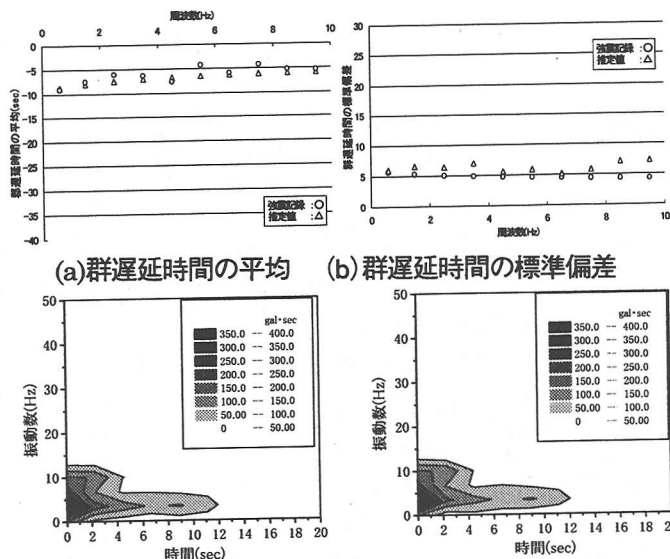
群遅延時間は、表-5 及び表-2 の推定式により各周波数帯の群遅延時間の平均と標準偏差を推定し、それらの統計量を有する正規乱数を発生させることにより算出した。模擬地震波の各周波数成分の位相角は、初期値を 0 として推定した群遅延時間より算出した。ここで、模擬地震波の加速度フーリエスペクトルは、強震記録と同じものを用いた。新葛飾橋記録とその模擬地震波の非定常フーリエスペクトルを図-11(c)、(d) に示す。また、開北橋記録とその模擬地震波の非定常フーリエスペクトルを図-12(c)、(d) に示す。

群遅延時間の平均と標準偏差の推定値が実測記録からの算出値とよく一致している新葛飾橋記録の場合、図-11(c)、(d) から、地震動の非定常性が精度良く再現されていることがわかる。

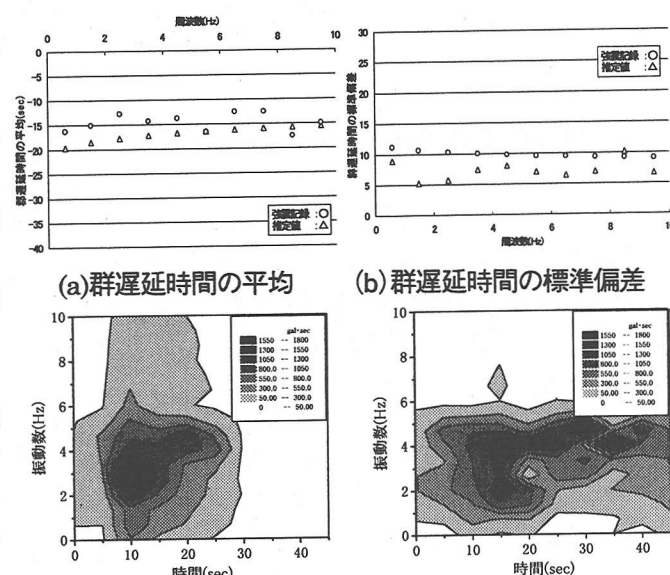
一方、開北橋記録の場合、図-12(c) に示した観測波では大きなスペクトル値が 10 秒付近に集中しているのに対し、図-12(d) の模擬地震波では、大きなスペクトル値が 15 秒及び 30 秒付近に位置し、スペクトル値が長い時間帯に分布しており、地震動の非定常性が十分に再現されていない。地震動の非定常性を推定するためには、推定式の精度の向上が必要であると考えられる。

7. まとめ

地震波の非定常性と密接な関係を有する地震動の位相特性の指標の 1 つである群遅延時間と地震の規模、震央距離等との関係について検討し、群遅延時間に影響を及ぼす因子を抽出した。群遅延時間の特性を表す指標として、その平均及び標準偏差を用い、これらの影響因子との関係を回帰することにより群遅延時間の平均及び標準偏差の推定式を導出した。また、その結果に基づき算出した群遅延時間及び強震記録の加速度フーリエスペクトルを用いて地震動波形をシミュレートした。



(a)群遅延時間の平均 (b)群遅延時間の標準偏差
(c)観測波の非定常スペクトル (d)模擬波の非定常スペクトル
図-11 新葛飾橋記録



(a)群遅延時間の平均 (b)群遅延時間の標準偏差
(c)観測波の非定常スペクトル (d)模擬波の非定常スペクトル
図-12 開北橋記録

【参考文献】

- (1) 大崎順彦、岩崎良二、大川出、政尾亨、「地震波の位相特性とその応答に関する研究」、第 5 回日本地震工学シンポジウム、1978
- (2) 和泉正哲、勝倉裕、「地震動の位相情報に関する基礎的研究」、日本建築学会論文報告集、第 327 号、1983
- (3) 羅休、室野剛隆、西村昭彦、「群遅延時間を用いた適合波形の作成とその非定常性が弾塑性応答へ及ぼす影響」、第 10 回日本地震工学シンポジウム、1998
- (4) 日本道路協会、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、1996