

(11) 位相差分による地震動継続時間の定義とその統計解析

徳島大学工学部 正員 〇沢田 勉 徳島大学大学院 学生員 永江 正広
 徳島大学大学院 学生員 辻原 治 徳島大学 正員 平尾 潔
 工業短期大学部

1. まえがき

本報告は、位相差分によって定義された地震動継続時間の統計解析を行い、若干の考察を加えたものである。

地震動の継続時間は、構造物の応答、特に長周期構造物や弾塑性系の応答を支配する重要なパラメータであり、構造物の耐震性を評価する場合には、この影響を適正に考慮することが必要である。現在用いられている主な地震動継続時間としては、Bolt¹⁾によるbracketed 継続時間とTrifunac and Brady²⁾による累積パワーに基づく継続時間があるが³⁾、これらは地盤条件すなわち地盤の卓越周期に対応する周波数成分の振幅特性の影響を受けて地盤ごとにかなり変動すると考えられる。本研究では、地盤条件の影響をあまり受けないと考えられる地震動の位相特性に注目し、フーリエ位相から得られる群遅れ時間の頻度分布の標準偏差を用いて地震動継続時間を定義する。つぎに、地表および基盤地震動の継続時間の比較、および位相差分による継続時間とTrifunac and Bradyの定義との比較を行い、位相差分による継続時間の指標について若干の検討を加えた後、この指標のM-Δ回帰を行い解析結果について考察する。

2. 位相差分による地震動継続時間の定義

地震記録のフーリエ解析より得られるフーリエ位相は、地震動の非正常性と密接に関係する。いま、N個の等間隔の離散時間点で与えられた継続時間Tの地震記録をフーリエ解析し、k番目の振動数におけるフーリエ位相 ϕ_k を求めると、位相差分 $\Delta\phi_k$ は次式で与えられる。^{4), 5)}

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k, \quad k = 1, 2, \dots, N/2 \quad (1)$$

ここで、フーリエ位相 ϕ_k が単調減少すると仮定すると、位相差分 $\Delta\phi_k$ は $-2\pi \sim 0$ の範囲に限定される。つぎに、振動数の刻み幅を $\Delta f = 1/T$ とし、式(1)の $\Delta\phi_k$ を $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ で除すと、次式の群遅れ時間 t_{grk} が得られる。 $t_{grk} = -\Delta\phi_k / \Delta\omega, \quad 0 \leq t_{grk} \leq T$ (2)

この t_{grk} を、地震動のフーリエスペクトルが有意な振動数領域について求め、その頻度分布(以下では簡単のためにこれを位相差分分布と呼ぶ)を描くと、この分布は地震波の振幅包絡線とよく対応する。しかしながら、フーリエ解析の際のリンク効果のために、地震波の後端部に初期部分の影響が現われ、位相差分分布の右のすその部分にもかなりの分布値が生じる。本研究では、継続時間の指標として位相差分分布の標準偏差を用いるが、この標準偏差は分布のすその部分の影響を大きく受ける。そこで、次のようにしてリンク効果の影響すなわち分布のすその部分の影響を除去した。まず、式(1)の位相差分 $\Delta\phi_k$ を求める際に、フーリエ位相 $\Delta\phi_k$ が単調減少するという仮定を除き、 ϕ_k が $-2\pi \sim 0$ の範囲の値をとるとして、式(1)、および式(2)より群遅れ時間 t_{grk} を計算し、位相差分分布を求める。このとき、 t_{grk} は $-T \sim T$ の値をとる。

Fig.1は、このようにして得られた位相差分分布を波形と対応させて示したものである。この図に見られるように、 t_{grk} は負の領域においても値をとり、 $t_{gr} = 0$ 付近では分布が連続している。従来の研究では、このような負の領域の分布を継続時間Tだけ平行移

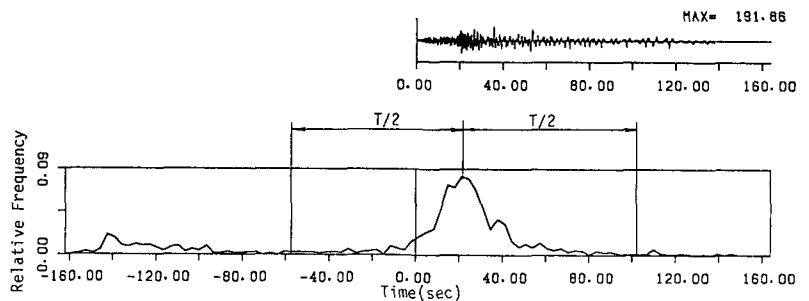


Fig.1 Time History and Relative Frequency Distribution of Group Delay Time

動して正の領域の分布と重ねさせたため、 $t_{gr}=0$ の近傍の負の領域の分布が波の後端部に対応する領域に現われリンク効果が生じた。本研究では、このリンク効果を近似的に除去するために、Fig.1に示すように、位相差分分布の最大ピークが生じる時刻から $\pm T/2$ の範囲に存在する群遅れ時間のみを考慮した。そして、この範囲の分布の標準偏差を求めて、これを震動継続時間の指標として用いた。以上のようにした理由は、位相差分分布が最大ピーク値に対してほぼ対称形を有すること、また負の領域の分布は一般に小さくかつ正の領域の分布とほぼ相似形になることなどによる。以上のような位相差分から定義された継続時間を以後 t_g 、継続時間 (T_g)と呼ぶ。次節以降では、この t_g 、継続時間の解析を行うが、比較のために Trifunac and Bradyの累積パワーに基づく継続時間 (p 継続時間, T_p)³⁾、すなわち次式のように地震動の累積パワーが5%になる時刻と95%になる時刻の差によって定義される継続時間も用いる。

$$0.05 \leq \int_0^{t_g} a^2(t)dt / \int_0^T a^2(t)dt \leq 0.95 \quad (3)$$

ここで、 $T_p = p$ 継続時間、 T =地震動の全継続時間、 $a(t)$ =加速度記録である。

3. 地盤条件が継続時間に及ぼす影響

前節で述べた t_g 、継続時間および p 継続時間に対して地盤条件がどのような影響を与えるかを調べるため、地表で得られた地震動記録を基盤まで戻して、地表および基盤地震動の継続時間を比較する。基盤地震動を求める際には、S波の鉛直入射を仮定し重複反射法⁶⁾を用いた。解析の対象とした地震動は、文献(3)で用いられた8地点の地盤上で得られた18個の強震記録である。Fig.2は、1968年十勝沖地震の際に青森で得られた記録の地表および基盤の波形と位相差分分布を示したものである。図より、基盤地震動の振幅は地表のそれに比べて1/5程度に減少するが、継続時間はあまり変わらないことがわかる。また、位相差分分布の形状も、地表と基盤でさほど変わらず、標準偏差(S.D.)も大差ない。Fig.3および4には、前述の18記録、36成分の p 継続時間および t_g 継続時間を、横軸に地表に対する値を、縦軸に基盤のそれとて示

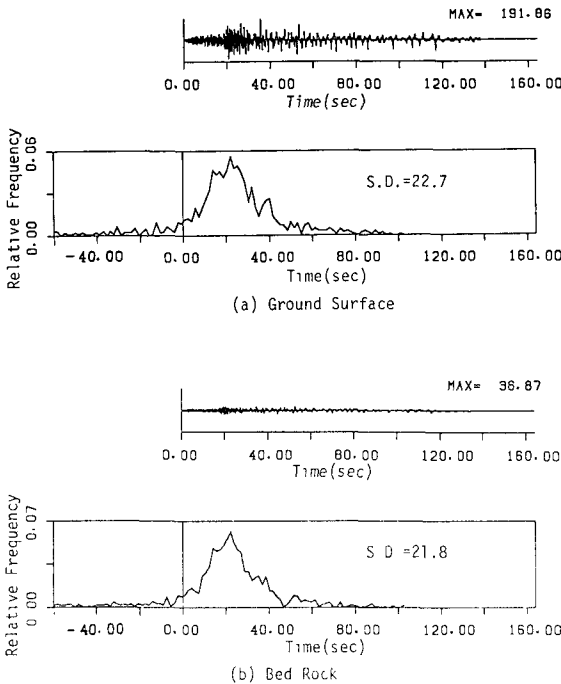


Fig.2 Comparison of Relative Frequency of Earthquake Motion on Ground Surface and Bed Rock

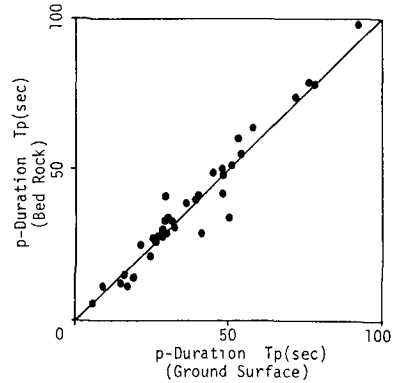


Fig.3 Relation between p-Duration of Bed Rock and Ground Surface

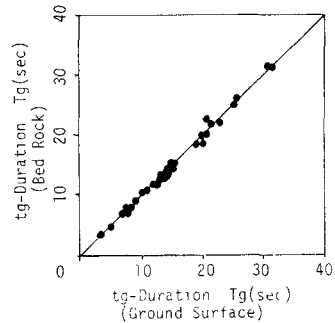


Fig.4 Relation between tg-Duration of Bed Rock and Ground Surface

した。 Fig.3 より、 p 継続時間はばらつきはあるものの地表及び基盤であまり変らない値になっている。文献(3) などの結果から、当初は基盤の継続時間が地表のそれに比べてかなり短くなるものと予想されたが両者にあまり差が見られなかった。この原因としては、文献(3) が統計解析に基づいて表面波などの影響を考慮しているのに対し、本研究ではS波の影響のみにしか考慮しなかったこと、また、波が地盤中を重複反射するに要する時間がそれほど長くないこと、さらに p 継続時間は累積パワーに基づく相対的なものであるから振幅の大小によってあまり差がでないことなどが挙げられる。 Fig.4 の地表と基盤の t_g 継続時間の関係より、 t_g 継続時間は地盤条件の影響をほとんどうけないことがわかる。これは、地盤条件が地震動の位相特性の各振動数における変化率にほとんど影響しないことを示している。以上のことより、 t_g 継続時間を地表地震動に対して求めると、基盤地震動のそれが推定できることになる。

4. 震動継続時間の統計解析

第2節で述べた p 継続時間、および t_g 継続時間のマグニチュード M と震央距離 Δ に対する依存性を検討するため回帰分析を行った。解析の対象とした記録は、文献(7) で公表された記録に、文献(8) の誤差補正を施したものであり、43記録の84成分が用いられた。ここで用いたデータのマグニチュードと震央距離の関係を示すと Fig.5 のようになる。なお、用いたデータセットの地盤種別ごとの数は、第1種8成分、第2種24成分、第3種36成分、第4種16成分である。 Fig.5 のマグニチュードと震央距離の関係よりわかるように、このデータセットには近距離巨大地震がほとんど含まれない。また、マグニチュードと震央距離の間には正の相関が存在しているので回帰分析結果の解釈には注意を要する。以下の解析においては、重回帰分析の証明変数としてマグニチュード M と震央距離 Δ のみを用いる。地盤条件は p 継続時間にはかなりの影響を与えると考えられるが、 t_g 継続時間にはほとんど影響しないので、地盤種別ごとの解析は行わなかった。重回帰モデルとしては、文献(3) と同様に、次のモデルを仮定した。

$$T = a \cdot 10^{bM} \cdot \Delta^c \quad (4)$$

ここで、 T は目的変数、 a 、 b 、 c は回帰係数、 M はマグニチュード、 Δ は震央距離である。上述のデータセット、および式(4) の重回帰モデルを用いて、 p 継続時間 T_p 、および t_g 継続時間 T_g について回帰分析を行った結果次の重回帰式が得られた。

p 継続時間； T_p

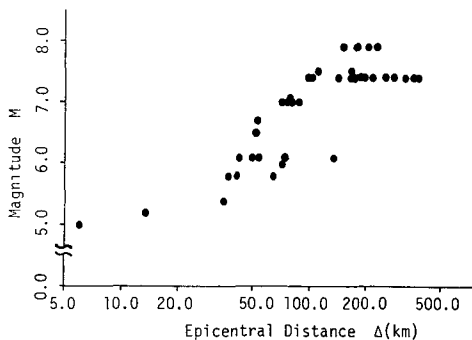


Fig.5 Relation between Magnitude and Epicentral Distance

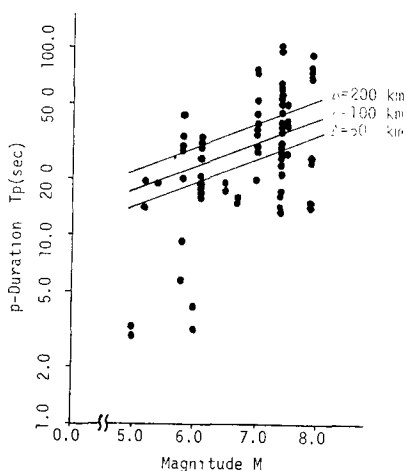


Fig.6 Relation between p-Duration and Magnitude

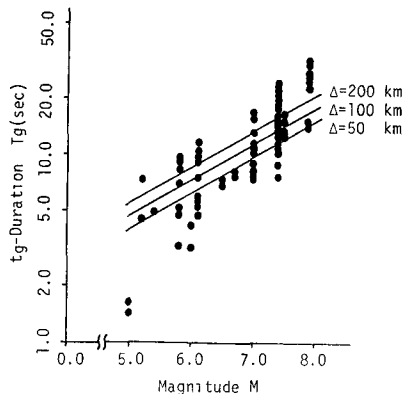


Fig.7 Relation between t_g -Duration and Magnitude

$$T_p = 0.90 \cdot 10^{0.13M} \cdot \Delta^{0.32} \quad , \quad (R=0.68) \quad (5)$$

t_g 継続時間; T_g

$$T_g = 0.18 \cdot 10^{0.19M} \cdot \Delta^{0.24} \quad , \quad (R=0.85) \quad (6)$$

ただし, R は重相関係数である。Fig.6 および 7には, 横軸にマグニチュード M をとり, 縦軸に T_p または T_g をとって, 継続時間とマグニチュードの関係を示した。また, 図中には, 式(5), または式(6)より得られる回帰直線を, $\Delta=50, 100, 200$ Km について記入した。式(5)の T_p は, 神山³⁾の重回帰式と異なり震源深さを説明変数に含まないため単純な比較はできないが, 重相関係数は神山に比べて若干小さく, かつ, 震央距離 Δ に対する回帰係数は大きい値をとっている。また, 式(6)の t_g 継続時間の回帰式では, 重相関係数は $R=0.85$ とかなり大きい値をとり, Δ の回帰係数も神山に比べて大きい。 Δ が継続時間に及ぼす影響は小さいという報告もあるが, ^{1), 3)} 本研究では上述のようにかなり影響を与えるという結果が得られた。このような結果が得られた一つの原因として, Fig.5 に示したように, 用いたデータセットの M と Δ の間に正の相関が存在することが挙げられる。しかしながら, 伝播経路における地震波の重複反射や乱反射, また表面波のように波が分散することによって継続時間が長くなることも考えられる。そこで, 震央距離 Δ が t_g 継続時間に与える影響を調べるために, 同一地震(1978年宮城県沖地震)のいくつかの記録の継続時間と Δ の関係を調べた。Fig.8には, この関係を, 横軸に Δ を, 縦軸に T_g をとって示した。図より, T_g と Δ の間には, 若干ではあるが正の相関が存在していることがわかる。

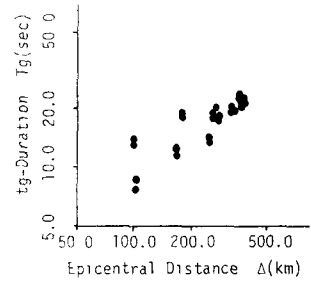


Fig.8 Relation between tg-Duration and Epicentral Distance (1978 Miyagiken-Okai Earthquake)

Fig.9には, 式(6)の T_g について, 記録より得られた値と予測された値との関係を示した。図より, 予測値がまずまずの適合度をもつことがわかる。

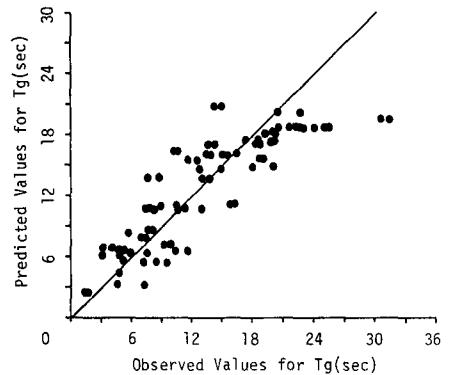


Fig.9 Predicted and Observed Values for tg-Duration

5. おわりに

位相差分を用いて震動継続時間 T_g を定義し, 地盤条件の影響の検討, p 継続時間 T_p との比較, および重回帰分析を行い, 若干の考察を加えた。得られた結果を要約すると次のようになる。

(i) 位相差分により定義された t_g 継続時間は地盤条件の影響をあまりうけないため, 地表地震動から基盤地震動の t_g 継続時間を推定することができる。(ii) t_g 継続時間は p 継続時間に比べて回帰式まわりのばらつきが小さく, 重相関係数は0.85程度になる。(iii) t_g 継続時間は震央距離 Δ の影響をうけて Δ が大きくなると増大する。この傾向は Trifunac and Brady²⁾の結果と一致している。

なお, 本研究で用いた強震記録は運輸省港湾技術研究所より公表された記録⁷⁾に対して, 後藤・亀田・杉戸・今西⁸⁾による基線および計器特性に関する補正を施した補正加速度波形であることを記して, 関係者の方々に謝意を表します。最後に, 本原稿のタイプに御助力いただいた徳島大学工学部宗田和之技官に謝意を表します。

- 参考文献 (1) Bolt, B.A ; 5 th WAEI, pp.1304-1313. (2) Trifunac, M.D. and Brady, A.G., BSSA, vol.65, No.3, pp.581-626, 1975. (3) 神山; 土木学会論文集, 第 350/I-2号 pp.271-280, 1984.10. (4) 大崎 他; 第5回日地地震工学シンポジウム, pp.201-207, 1978. (5) 沢田; 土木学会論文集, 第344/I-1号, pp.175-183, 1984.4. (6) 土岐; 構造物の耐震解析, pp.80-90, 技報堂, 1981. (7) 土田・倉田; 港湾地域強震観測年報, 港湾技術資料(1963-1980). (8) 後藤・亀田・杉戸・今西; 土木学会論文集, 第 277号, pp.57-69, 1983.9.