やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (3)

—1968 年十勝沖地震の SMAC 型強震計記録との比較—

北海道大学工学部建築工学教室	鏡 味 洋 史・太 田 裕
	後 藤 典 俊・塩 野 計 司
東京大学地震研究所	工 藤 一 嘉
八戸工業大学	坂 尻 直 巳
愛知教育大学	成 瀬 聖 慈・出 原 孝 示
京都大学防災研究所	竹 内 文 朗

(昭和 51 年 5 月 14 日受理)

Observation of 1- to 5- sec Microtremors and Their Application to Earthquake Engineering. Part III

Comparison with the SMAC Type Accelerograph Records
in Tokachi-oki Earthquake of 1968

Hiroshi KAGAMI, Yutaka OHTA, Noritoshi GOTO and Keishi SHIONO

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Kazuyoshi KUDO

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Naomi SAKAJIRI

Hachinohe Institute of Technology

Seiji NARUSE and Kohji IZUHARA

Aichi University of Education

Fumiaki TAKEUCHI

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(Received May 14, 1976)

Continued to the previous papers observations of the long-period microtremors were carried out in Aomori and Miyako cities for a farther comparative research of their characteristics to the SMAC type accelerograph records in Tokachi-oki earthquake of 1968. The purpose we extended the observations from Hachinohe to these areas is following. The

very large acceleration amplitudes in 1- to 5-sec in period were recorded more clearly in Aomori than in Hachinohe, but no significant indication was seen on the accelerograph record in Miyako. Still the differences were seemed too extreme to be explained by the epicentral distances. In Hachinohe we successfully gave an interpretation that the predominancy of the earthquake motions in the long period was considerably due to a large amplification effect by the deep soils. But we did not know if this was true in general.

The observation and the analysis of the microtremors were performed in 1975 with a similar manner to those reported in the previous papers.

The SMAC site in Aomori is situated on the ground of which depth to the bed rock is around 600 m, and the predominant period of microtremors, obtained by a series of careful observations from bed rock to the SMAC site, was 3.0 sec. This is nothing but a predominant period in the strong motions of the Tokachi-oki earthquake.

On the contrary to this, the SMAC accelerograph in Miyako has been installed above the hard rock with a very thin superficial layer, and no predominant period in the long-period range was observed in the microtremors. This must be the same reason why there were no long-period amplitudes in the acceleration records in Miyako.

Combining these results with that in Hachinohe we can conclude that the correspondency of the predominancy and the predominant period between the microtremors and the strong motion records is very remarkable and thus the observation of the long-period microtremors is a good alternative to estimate the long-period input motions to large-scale structures by future earthquakes.

Finally a short recommendation on the observation schema of long-period microtremors was added. The problem left untouched is the wave-theoretical considerations of the microtremors, which will be scheduled before long.

§1. はじめに

1968 年 5 月 16 日の十勝沖地震の際には北海道・東北地方の各地に設置されていた SMAC 型強震計によって多数の強震記録が得られている。この地震は構造物に多大の被害を与えたことはもとより、SMAC で記録された地震として最大のものであり、これらの記録の解析は地震工学において非常に重要である。これらの強震記録はただ単に大きな加速度を記録しているのみならず、マグニチュードの小さい他の地震の記録には見られなかつた周期 1~5 秒というやや長周期成分の大振幅の波を記録している。この点からもこれらの強震記録のやや長周期成分の解明は、構造物の長大化が進み、長い固有周期の構造物が数多く建設されている現在、これら構造物への地震入力进行を考えるとくに重要な意味をもつてくる。

とりわけ青森県八戸市の八戸港湾事務所（運輸省）に設置されていた SMAC は十勝沖地震の際、周期 2.5 秒の非常に大きな加速度を記録しており、これのよつて来たる原因の解明は緊急のこととされている。このような背景をふまえて、われわれは既に八戸市においてこの問題を解きほぐす 1 つの手段としてやや長周期微動の観測を行い次の結論を得ている。すなわち港湾強震記録の 2.5 秒の周期をもつ大きな加速度は、この周期がやや長周期微動にも顕著にあらわれている、微動の卓越する周期が SMAC 設置点を含む測線上で非常にシステムティックに移動している、基盤とみなせる地点ではこれに対応する周期にピークがあらわれていないとい

う3つのことから、深さ 400 m に至る地盤がもたらす波動の増幅性が主要原因である可能性が非常に強いことを第1報・第2報を通じて示した。[坂尻・他 (1974), 成瀬・他 (1976)]

1968 年十勝沖地震の際には、やや長周期成分の大きな波は上述の八戸港ばかりでなく、例えば青森港においてはさらに大振幅で記録されている。一方宮古港においては八戸港・青森港と記録の様子が大きく異なり、短周期の波が卓越し、両地点で見られたようなやや長周期の大振幅は記録されていない。これら強震記録に見られるやや長周期成分の波の特性の違いは、震源スペクトルの特性・経路の問題もさることながら第1報・第2報の結果からみて、観測地点での深い地盤構成と密接な関係にあると考えられる。

そこで今回はやや長周期微動の系統的な観測をさらに青森市・宮古市において行つた。微動観測を通じて、深い地盤構成にもとづく震動性状を把握し、やや長周期成分の強震動の性質との関係を明らかにし、かつそのよつて来たる原因を見い出そうとするのが本論文の目的である。

§2. 1968 年十勝沖地震の SMAC 型強震計による記録

1968 年十勝沖地震の際 SMAC 型強震計によつて八戸港・青森港・宮古港で Fig. 1 に示す加速度記録が得られている [土田・他 (1969)]。3つの地点は Fig. 2 に示すように、気象庁の決定した震央からそれぞれ 188, 251, 189 km 離れたところに位置している。また長宗 (1969) が主要動の走時から求めた震央からはそれぞれ 75, 134, 115 km の位置にある。この加速度記録から見ても判るように、八戸港・青森港において周期 2 秒から 3 秒に至る周期にかなりの大振幅をもつ加速度の波が含まれている。一方宮古の記録にはこの周期範囲では目立つ振幅はなく、0.2 秒程度の短周期の波がきわだつている。この様子を速度応答スペクトル^{*1}と比較してみると Fig. 3 のようになり、その違いがさらに明瞭になる。すなわち八戸港・青森港のスペクトルは周期 2~5 秒の間で応答値が大きく、かつピークをもっているのに対して、宮古港でのスペクトルはこの周期範囲では短周期側に比べて小さく、また卓越性もみられない。1~5 秒の周期範囲の応答量について、八戸港・青森港と宮古港とを比較すると前者の応答量が 100 kine 前後であるのに対して後者のそれは 10 kine 以下であり、青森港・八戸港での応答量は宮古港の倍以上の値を示している。この違いは、1~5 秒の固有周期を持つ、いわゆる大型構造物の設計用地震入力として考えた場合非常に大きな違いであり、また震央距離のみからでは説明できないことからその原因の究明がまたれる。スペクトルに見られるこれらの

^{*1} 1 質点より成る振子の相対速度を求め、その最大値を振子の周期をパラメーターにスペクトル表示したもので、振子の減衰が 0 の場合加速度波形のフーリエスペクトルにほぼ一致する。

Fig. 1. Accelerograph records at Hachinohe, Aomori, and Miyako sites in Tokachi-oki earthquake of 1968.

違いが深い地盤の特性を考えることによつてどこまで説明できるかについて、第 1・2 報に引き続き考察を行つた。

§3. 青森市における微動観測

(1) 観測点の設定

八戸市における観測の経験からやや長周期の微動を観測して深い地盤の震動性状を明らかにしようとする場合、短周期微動におけるように所望の地点のみの 1 点観測では極めて不充分であることが判つている。主な理由はその波源スペクトルが短周期微動において想定される程単純ではないからである。従つて観測点は以下に述べるように基盤—地盤という地下構造の変化に対応した測線に沿つて設定することが望ましい。

青森平野は北側が陸奥湾に面し、南側は八甲田火山山麓に連なる海岸平野である。平野南

部の山地は第三系中新世の安山岩・凝灰岩等の火山岩類および洪積世の八甲田火山噴出物が分布する (Fig. 4). 深井戸の資料から作成した, この地域の断面図によれば基盤岩は平野東南部の山地から $20 \sim 45^\circ$ の傾斜で地下にもぐり込み, 平野西端の入内断層附近では深度 $800 \sim 1000 \text{ m}$ に達している. 表層には $30 \sim 40 \text{ m}$ の層厚の沖積層があり, 以深は基盤岩に至るまで洪積層で, 途中に 3 層の熔結凝灰岩の層をはさんでいる [青森県 (1974)].

SMAC の設置点は海岸の港湾事務所で基盤までの深度は 650 m 程度と推定されている. この結果を参照しながら微動観測の測線は Fig. 4 に示すように SMAC 設置点と東南部の山地で熔結凝灰岩の層が露頭している点を結ぶ直線とした. 測点は露頭を 1, SMAC 設置点を 10 とした合計 10 点を約 600 m 間隔に設けた. 基盤までの深度は測点 1 から 10 に進むに従って, 順次増加している. 測点 6 は青森地方気象台構内に設けた.

(2) 微動観測

観測に用いたシステムは既にわれわれが八戸市で用いたものである. 固有周期 1 秒の地震計

Fig. 2. Epicenters of main shock and major aftershocks of the Tokachi-oki earthquake, and their relations to the accelerograph sites.

(a) NS-component

(b) EW-component

Fig. 3. Velocity response spectra of the accelerograph records for the main shock.

に周期延ばし回路をつけたものであり、周期 5~6 秒までの微動観測に十分耐えるものである [坂尻・他 (1974)]. 観測は 2 回に分けて行い、測点 4~10 は 1975 年 8 月 1 日 0 時より 4 時までの間、測点 1~3 は 8 月 2 日 20 時より 22 時のいずれも夜間に行つた。

各地点とも主要道路より離れることによつて、出来るだけ車輛通行等による人工ノイズを避けるように努めたが市街地ではこれの困難な測点も 2, 3 あつた. 1 地点の観測は原則として 3 成分で行ひまた 20 分以上とした。

(3) スペクトル解析

得られた記録について、人工ノイズの少ない区間 5~10 分間を選びスペクトル解析を行つた。スペクトル解析はデジタル型実時間相関計 (C-110, TEAC 製) によつて記録の自己相関関数を求め、さらにこの自己相関関数のフーリエ変換をスペクトルアナライザー (F-100,

Fig. 4. Surveyed area and observation points of microtremors in Aomori city.

Fig. 5. Sequential expression of microtremors spectra along a line from bed rock to accelerograph site in Aomori.

TEAC 製) によつて行い、パワースペクトルを得た^{*2}。各地点のスペクトルを各成分ごとにまとめて示すと Fig. 5 のようになるが、八戸の場合に比べてかなり複雑となつている。このような場合基盤から地盤に至る系統観測が特に有効となる。測点 1 (基盤) のスペクトルには 5 秒附近のピーク以外にはピークは見られず、このピークは当然のことながら地盤によるものでなく、波源スペクトルの特性と考えられる。NS 成分のスペクトルについてみると、測点 2 においては 1.0 秒附近にピークが見られる。このピークは測点 2, 3 と順次長い周期の側へ移動しているのが見られる。SMAC 設置点である測点 10 ではその周期は約 3.0 秒となつている。NS 成分に見られるこのピーク周期を測線に沿った断面と対比してみると Fig. 6 のようになる。EW 成分・V 成分のスペクトルについても同様の傾向が見られるが NS 成分の場合ほど明瞭でない。これらの卓越周期は地下構造に対応して系統的に変化していることから、また基盤の露頭上ではこれに対応するピークが見られないことから地盤の特性を明瞭に反映しているものと考えられる。

(4) 強震記録との比較

1968 年十勝沖地震の際青森港でやや長周期の大振幅の強震記録が得られたことは先に示したが、他の地震 (余震) についても青森港で観測された強震記録には長周期での卓越がみられる。水平動の速度応答スペクトルを Fig. 7 に示す。(震源位置・マグニチュードについては Fig. 2 を参照) いずれの地震の場合もスペクトルは周期 2 から 3 秒の間にピークを有し、この周期範囲での応答値は短周期におけるそれに較べて非常に大きい。

一方今回の微動観測から、すなわち基盤の露頭より第 4 紀層の堆積の厚い港湾に至る測線上で卓越周期が 1 秒から 3 秒へと系統的変化をしていること、また基盤への深度の漸増ともよく対応していることから、港湾の SMAC 設置点では深さ 600~700 m の地盤の特性を反映し、

Fig. 6. Relation of predominant periods and underground conditions along the observation line in Aomori.

^{*2} 第 1・2 報においてはスペクトルアナライザー (HIC-300B, H-500) によつてフーリエスペクトルを求めており、今回の解析法と異なるが、同じ記録について両システムによる結果の比較を行ない、ここで対象としている周期範囲では特に差のないことを確かめている。

Fig. 7. Velocity response spectra of the accelerograph records at Aomori site for main shock and major aftershocks of the Tokachi-oki earthquake.

その結果微動のスペクトルに3秒の顕著なピークがあらわれたものと考えられる。これはまた前報の結論を再確認したものともいえる。このことから地震記録に見られる2から3秒にいたるピークは深い地盤特性を反映しているものであり、1968年十勝沖地震の本震の際記録されたやや長周期の大振幅も地盤の増幅性による影響を強く受けているものと考えられる。

§4. 宮古市における微動観測

(1) 観測点の設定

SMACの設置されていた宮古港湾工事事務所はFig. 8に示すように層厚10m程度の沖積層の上に位置している。設置点より10数m離れたところに硬岩からなる地層の露頭が出ている。10万分の1岩手県地質図によれば、この附近の基盤をなす岩石は流紋岩・花崗岩から成っている[岩手県(1956)]。

測点はSMAC設置点、それより10数m離れた岩盤の露頭、山の上の宮古測候所、愛宕中学校の4点を選らんだ。SMAC設置点以外の3点はいずれも岩盤上である。

(2) 微動観測

微動観測は青森で用いたシステムと同じものを、1975 年 8 月 5 日 0 時より 3 時間程度の短時間のうちに行つた。記録時間は同じく各点 20 分間以上とした。

(3) スペクトル解析

記録のスペクトル解析は青森の解析と同じシステムを用いて、パワースペクトルを求め Fig. 9 に示した。4 地点とも水平動のスペクトルは周期 4~5 秒にピークを有し非常に単純な形を示す。上下動についてはスペクトルの形状が相互にやや複雑であるが、これは記録振幅も水平動の $1/2 \sim 1/3$ と小さく増幅器のゲインもやや不足気味であつたためと考えられる。ここでは水平動についてのみ議論をする。SMAC 設置点以外の 3 地点はいずれも岩盤上であり、水平動に見られる周期 4~5 秒のピークは微動の入射波そのものの特性と考えてよい。注目すべき点は SMAC 設置点においても、このピークのみが卓越していることである。SMAC 設置点は層厚 10 m 程度の沖積層があると推定されるが、その影響は本観測で対象とした 1~5 秒の周期範囲にはあらわれていない。いいかえれば 4 地点ともこれらの周期

Fig. 8. Surveyed area and observation points of microtremors in Miyako city.

Fig. 9. Comparison of microtremors spectra at four points in Miyako.

範囲では微動はほぼ同一の挙動をしていることを示している。またこのことから、やや長周期の周期範囲について考える場合には、SMAC は沖積層上でなく岩盤上に設置されていたのと同等に考えることができよう。試みにこの地点の沖積層による卓越周期をあたつてみると 0.2 秒程度である。

(4) 強震記録との比較

1969 年十勝沖地震の際宮古港で観測された強震動には八戸・青森でみられたようなやや長周期の大振幅が見られないことは先に示したが他の地震（余震）についてもやはり長周期での波の卓越性が見られない。水平動の速度応答スペクトルを示したのが Fig. 10 である。各スペクトルの 1~5 秒の応答値はいずれの場合も短周期の応答値に較べて小さ

い。またスペクトルに共通して見られる顕著なピークは 0.2 秒という短周期のところに唯一つのピークがあるのみであり、これより長い周期の側では応答値は比較的単調にへつている。このピークは先の試算にみるように厚さ 10 m 程度の沖積層の存在のためと考えられる。従つていま考えているやや長周期の周期範囲ではここで得られた強震記録（本・余震）に共通したピークは見られず、八戸・青森の場合とは違つて深い地盤構成を反映するような特性は見られない。一方微動観測からは SMAC 設置点は近傍の岩盤上と同じ動き、つまりやや長周期の周期範囲において地盤特性があらわれないという結果が得られている。このことより地震記録にやや長周期における波の卓越性が見られないことは、やや長周期の微動観測において、地盤構造を反映する特性が見られないということによつて説明することができ、したがつてやや長周期に関する限り宮古の SMAC 観測点はそれが基盤上にあるのと同等と見なし得ると考えられる。

なお、このことは宮古ではやや長周期の強震動が観測されないことを意味するものではない。震源からの Primary な波動は当然観測されて然るべきである。ここでは周期 1~5 秒において地震波の増幅作用をもたらすような地盤構成が、八戸・青森の場合とは違つて、宮古にはないことをいつているのである。1968 年十勝沖地震の宮古での記録がやや長周期の波をう

Fig. 10. Velocity response spectra of the accelerograph records at Miyako site for main shock and major aftershocks of the Tokachi-oki earthquake.

まく把えていないのは、入射地震波の加速度レベルが低くまた地盤の増幅作用がないことから強震計の記録限界を下まわつたために他ならない。

§5. まとめと今後の問題

今回行つた青森および宮古における微動観測の結果を第1報・第2報に示した八戸での微動の観測結果と併せて、1968年十勝沖地震の強震記録との比較を行つた。八戸・青森の設置点はそれぞれ基盤までの層厚が400 m ないし600 m に及ぶかなり深い地盤上に位置しており、そこで観測された、やや長周期の微動には、その地盤特性を反映する特性が顕著にあらわれ、強震記録に見られるピークの周期とよい一致を示した。

これに対し、宮古のSMACの設置点は基盤までの層厚が10数mと八戸・青森の場合に較べて非常に浅く、そこで観測されたやや長周期の微動は、附近の岩盤の露頭上の微動とほぼ同じ特性を示し、深い地盤特性に関与する特性は見られなかつた。これはまた強震記録では1~5秒の周期範囲でスペクトルに卓越性がみられないこととよい対応を示した。

以上をまとめると、強震記録にやや長周期成分の卓越している地点では微動でも同じピークが得られ、逆に強震記録に卓越するやや長周期成分の見られない地点では微動にもあらわれないという対応関係が得られた。このことはやや長周期微動の工学への適用可能性、つまりこれを観測することによつてかなり深い地盤の増幅性(卓越周期)を知り地震時(とくに加速度記録)のそれを推定する有力な手段になり得ることを強く示唆するものである。

これまでの観測により、やや長周期微動の観測法の定式化については次のような注意が考えられる。やや長周期微動の波源スペクトルは短周期微動において想定されるように単純でなく、気象条件等によつて、観測日時によつて大きく変化することが知られている。したがつて短周期微動におけるように1点のみの観測では極めて不十分であり、常に基盤から地盤へという地下構造の変化に対応した測線を設ける必要があり、観測は短時間のうちに行い、できれば基準点を基盤上に設け、同時多点観測を行うのが望ましい。

今回の観測ではやや長周期微動の卓越周期に着目して、深い地盤構造との関係を議論したもので、やや長周期微動のスペクトルの絶対値・波動としての性質については言及しなかつた。今後の問題の1つとして、やや長周期微動の波動としての性質を明らかにして行く予定である。それにより、深い地盤を有する地点での強震動と微動との関係をより定量的に議論できるものと思われる。またこのためには地盤における地震観測も欠かせない。さらに、これら地盤の影響をうけない、いわゆる基盤上での地震動の観測はこのためにも、そして地震動の基本的性質—震源スペクトル—理解のためにも今後一層強化されるべきであろう。

おわりに、現地の観測では青森地方気象台・青森港湾事務所・宮古測候所・宮古港湾事務所の方々にはいろいろお世話になった。また中根敏彦（愛知教育大学）氏には観測を手伝っていただいた。これらの諸機関・諸氏に厚くお礼を申し上げる。また調査研究費は文部省自然災害特別研究「長大構造物の地震動災害とその防止に関する研究（代表者：小林啓美）」および建設省「新耐震設計法の開発」に関するプロジェクト研究によるところが大きいことを申しそえる。

文 献

- 青森県環境保健部，1974，青森地区水収支解析報告書。
 岩手県，1956，岩手県地質図
 成瀬聖慈・出原孝示・竹内 文朗・太田 裕・鏡味 洋史・後藤 典俊・塩野 計司・工藤 一嘉・坂尻 直己，
 1976，やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (2) — やや長周期微動の卓越周期と地下構造の関係一，地震 2，29，25～32。
 長宗留男，1969，大地震生成の過程，地震 2，22，104～114。
 坂尻直己・成瀬聖慈・竹内文朗・吉川賢一・後藤典俊・太田 裕，1974，やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (1) — 八戸市における予備観測一，地震 2，27，338～351。
 土田 肇・倉田栄一・須藤克子，1969，1968 年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料，80。