

松山城城壁の振動特性

Vibration characteristics of retaining walls around Matsuyama Castle

森 伸一郎*, 俵 司**

Shin'ichiro MORI, Tsukasa TAWARA

*博士(工学), 愛媛大学助教授, 工学部環境建設工学科(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

**愛媛大学学生, 工学部環境建設工学科(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

Preservation and retrofit of historic and cultural heritage are important problems in the world. The seismic behavior of historic structure has rarely been researched. The objective of this paper is to investigate the vibration characteristics of stone retaining walls around Matsuyama Castle by microtremor measurements. The spectral ratios of the shoulder to the bottom of retaining walls can explain the predominant frequencies of walls and the amplification in the walls. The predominant frequencies of walls scattered in measured sections, but the mean values of the predominant frequencies are inversely proportional to the heights of walls.

Key Words: castle retaining walls, historic heritage, H/V spectral ratio, microtremor, motion amplification

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震は, 現代の Engineered structure のみならず歴史的建造物や町並みにも大きな被害をもたらした. 歴史的遺産あるいは文化遺産の保存の重要性は, 1972年に成立した世界遺産条約などに集約されているように明白である. Marathaias¹⁾による石造建造物の基礎の柔性が地震時応答に及ぼす影響に関する研究などがあるが, 現在までに歴史的建造物の耐震性に関する研究例は多くない.

我が国では城下町として発展してきた都市が多く, 城郭, 城址, 城壁は都市の象徴的な文化遺産の一つである. 歴史的な石造建造物の崩壊要因として, 内田²⁾は動植物要因, 大気汚染・酸性雨, 地震の影響を挙げている. 例えば江戸城の城壁・濠の石垣は地震のたびに大小の崩壊を経験してきている³⁾.

そこで, 本研究では, 歴史的建造物としての城壁の耐震性に関する研究の一環として, 松山城城壁(石積み擁壁)⁴⁾のうち, 二の丸史跡庭園と本丸における常時微動測定により城壁の振動特性を調査するのを目的とした.

2. 常時微動測定と記録分析の方法

図-1に城壁とその周辺地盤における測定箇所を断面図で示す. 原則として, 各断面では, 城壁から離れた地盤(A), 城壁尻部地盤(B), 城壁肩部(C)と城壁上部地盤(D)の4点を設定した. A点またはB点を基準にと

り, C点の相対的な振動を城壁の振動特性として調べることを試みた. しかしながら, 後述するように, 二の丸においてはA点は盛土であり盛土の振動が卓越すること, 本丸においては地山の斜面となっており測定ができなかったことから, 本論文ではB点を基準とした.

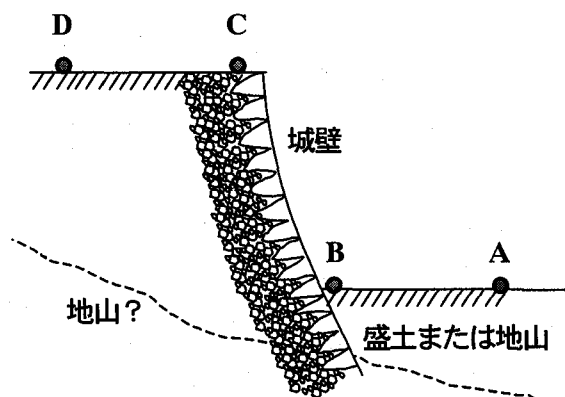


図-1 城壁とその周辺地盤における測定箇所

図-2に松山城・二の丸の西側の城壁における測定箇所を示す. 測定対象の城壁の高さは約13mである. 測定箇所として, 城壁に直交する断面を7つ想定し, 各断面に上述の4点を設定した. 現地の測定上の制約から合計21地点で水平2成分(NS, EW)・鉛直1成分(UD)の3成分の常時微動を測定した. 断面7を除けば, EW成分

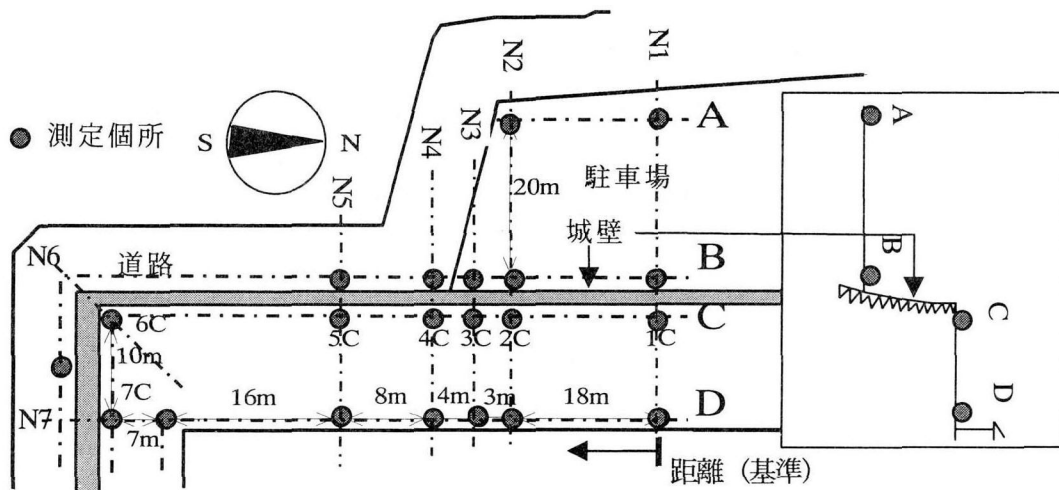


図-2 松山城・二の丸西側の城壁における測定箇所

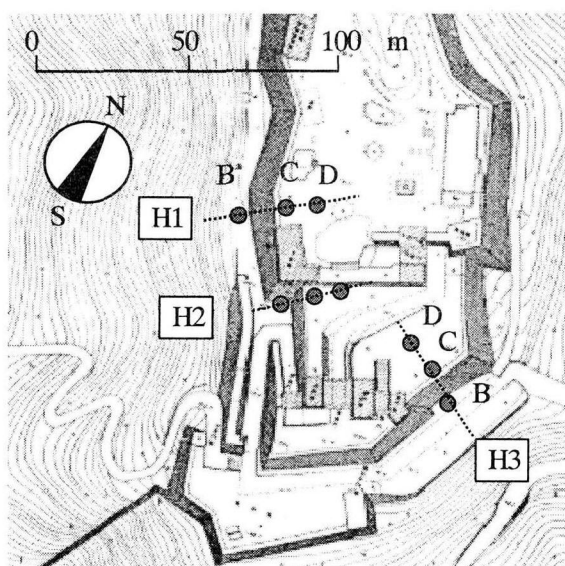


図-3 松山城・本丸城壁における測定箇所

が城壁直交方向である。測定は1999年6月3日の13:00～20:00に実施した。

図-3に松山城・本丸城壁における測定箇所を示す。本丸は城山（古くは勝山、味酒山と言う。）の傾斜の急な頂上部に位置しており、城壁から離れた地盤（A）は測定できなかった。測定は3断面9箇所で行った。測定は1999年6月4日の9:00～16:00に実施した。

なお、同時測定は行っていないが、ほとんど無風状態であったこと、隣り合う地点の加速度時刻歴の振幅レベルがほぼ同じであったことなどから、スペクトル比などの検討に耐えうるものであり、本研究の検討結果に影響はないものと考えられる。

振動計は、固有振動数3 Hz、減衰定数12で、0.3～30 Hzで平坦な利得特性を有する動電型加速度換振器 PK-130（水平2成分、上下動1成分）であり、記録はデジタル収録装置 Datol-100に収録した。全ての測定点で、動作方

位確認測定を10秒間、本測定を210秒間行った。サンプリング周波数は100 Hzである。また、二の丸では隣接する道路を車両が通過する時刻を記録した。

測定記録の分析は次のように行った。加速度時刻歴から、加速度フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比を算出した。以上の計算では、1セグメントあたりのデータ数を2048（約20秒間）としてフーリエ変換するとともに、オーバーラップ率を0として8セグメントのアベレージングによる平滑化を行った。さらにバンド幅1.0 HzのParzenウィンドウにより平滑化を行った。フーリエスペクトルとともに、フーリエスペクトル比として、同じ地点の水平鉛直フーリエスペクトル比（H/V比）と城壁尻部の水平動に対する城壁肩部の水平動のフーリエスペクトル比（H/H比）を求めた。なお、30 Hz以上の振動数範囲では利得は低下するので、その振幅そのものを議論するのは困難であるが、40 Hz以上ではノイズレベルよりも大きいと判断されることからフーリエスペクトル比では40 Hzまで議論することとする。

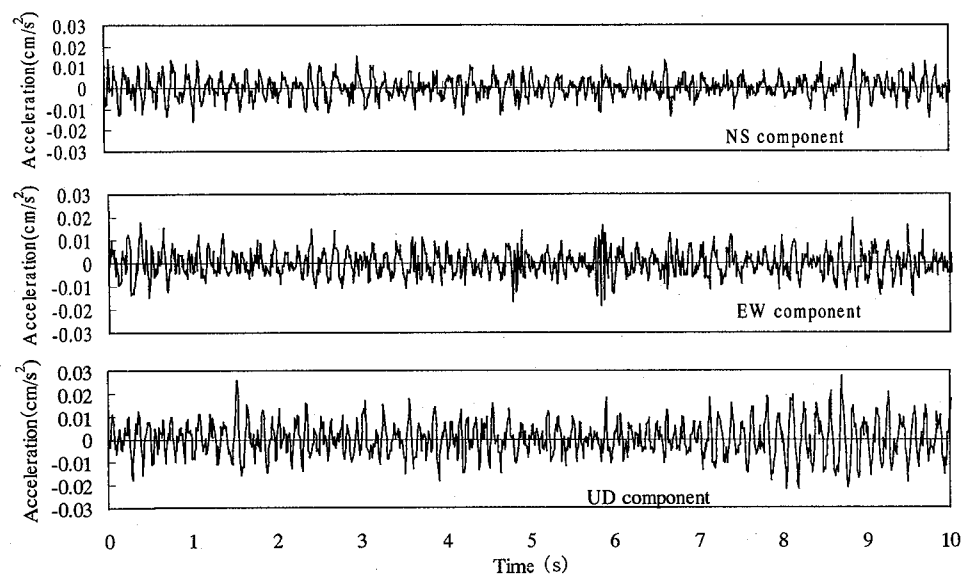
なお、スペクトル形状はA点では連続した車両の通行があるとき変化があるのみで、他の地点では大きな変化はない。そこで、A点では連続した車両のない記録を用いて、全ての記録はアベレージングを行っている。

3. 二の丸城壁の測定結果と考察

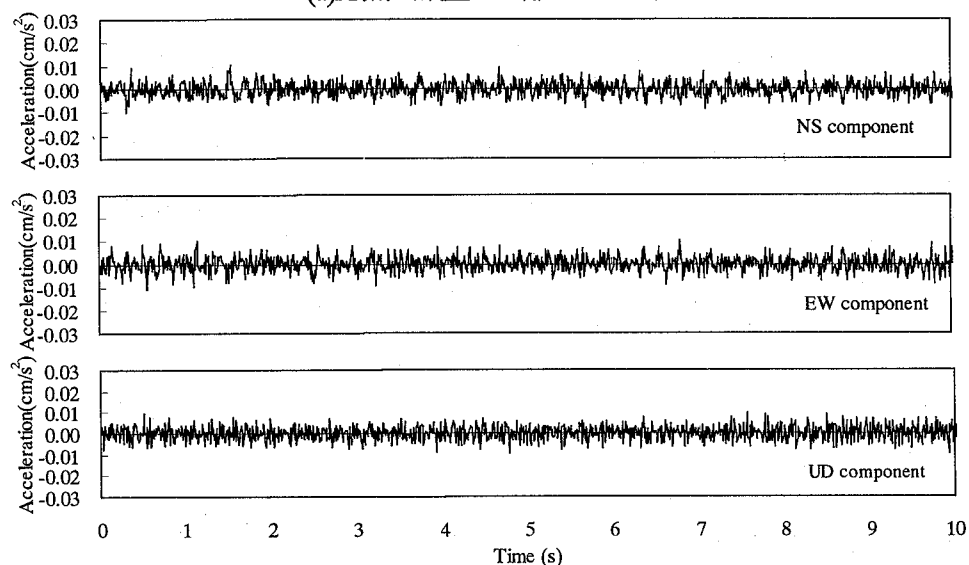
(1) 加速度時刻歴

図-4に断面1（N1）における城壁から離れた地盤（A点）、城壁尻部（B点）と城壁肩部（C点）の水平2方向と上下方向の常時微動の加速度時刻歴を示す。EW方向が城壁直交方向となる。

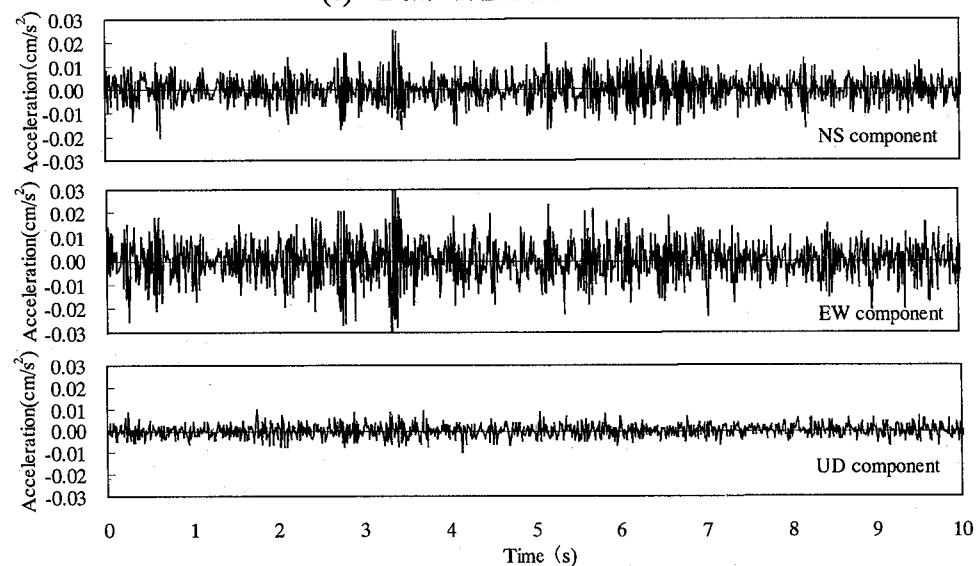
同じ地盤上でもA点とB点では様相が異なり、どの成分もB点はA点に比べて周期が短く振幅が小さい。しかし、両点ともに上下動は水平2成分とほぼ同様の振幅である。また、水平2成分に大きな差異は認められない。



(a) A 点 (城壁から離れた地盤)



(b) B 点 (城壁尻部地盤)



(c) C 点 (城壁肩部地盤)

図-4 二の丸城壁の第1断面 (N1 断面) 各部における常時微動の加速度時刻歴

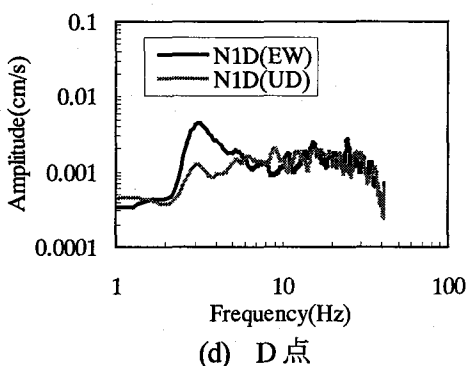
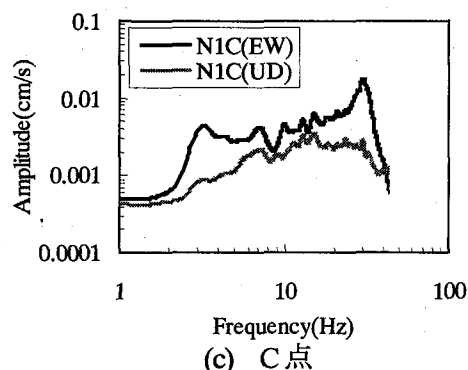
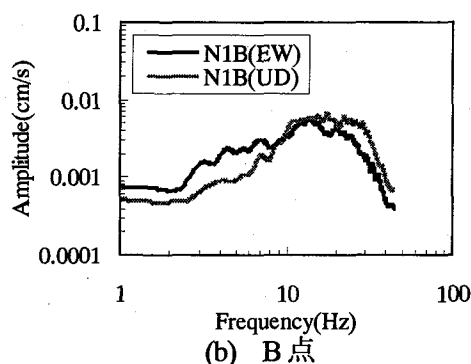
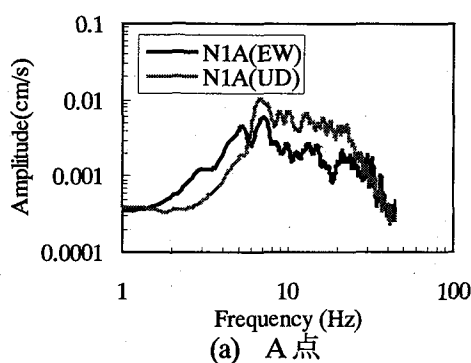


図-5 N1 断面における A, B, C, D 点の城壁直交方向水平動と上下動の加速度フーリエスペクトル

一方、C 点では上下動は波形・振幅ともに B 点と酷似しているが、水平動、特に城壁直交方向となる EW 成分の振幅が大きい。

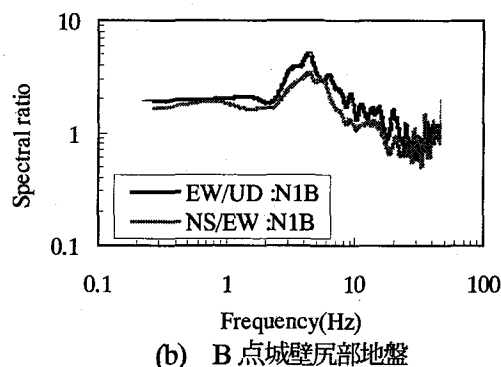
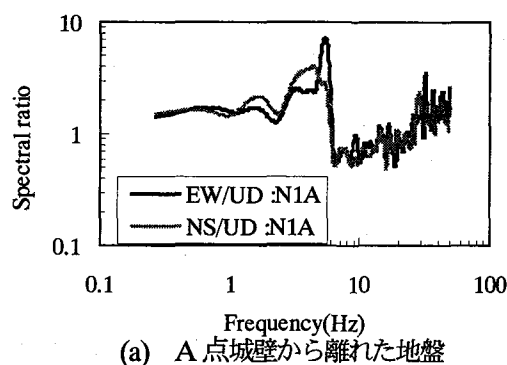


図-6 N1 断面における地盤の H/V スペクトル比

また、時刻歴波形から、A 点は盛土層を含む沖積層の卓越振動を多く含んでいるのに対し、B 点ではそれらを多く含まないものと推察される。

(2) 加速度フーリエスペクトル

図-4 に示した加速度記録のフーリエスペクトルを検討する。水平動は城壁直交方向の成分についてのみ示す。城壁平行成分については、直交成分と比べて有意な違いは認められなかったのここでは示さない。なお、時刻歴は示さなかったがフーリエスペクトルについては D 点についても示した。

図-5 にそれぞれ城壁から離れた地盤 (A)、城壁尻部 (B)、城壁肩部 (C) と城壁上部地盤 (D) の城壁直交方向水平動と上下動の加速度フーリエスペクトルを示す。4 地点とも 1 Hz 以下の振動数成分は勢力がほとんど見られなかったのので示していない。4 地点同時測定ではないので厳密な比較はできないが、A, B に共通して 6 Hz または 10 Hz を境にして低振動数側では水平動が高振動数側では上下動が卓越するという特徴が読み取れる。

一方、城壁肩部 C 点では、ほぼ全振動数範囲にわたり水平動が卓越している。B 点と比べて上下動ではそのスペクトル形状がほぼ相似形であるのに対して、水平動ではその形状が大きく異なる。すなわち、C 点では 3~5 Hz 付近と 30 Hz 付近で水平動の振幅が大きく、その卓越が顕著である。

さらに、城壁上部地盤 D 点では、ほぼ全振動数範囲で水平動が卓越し、3~5 Hz 付近で水平動が大きいのは C

点と同様であるが、C 点で見られた 30Hz 付近の卓越は見られない。このことから、3～5Hz 付近は城壁背後地盤の卓越振動を、30Hz 付近は城壁そのものの卓越振動を反映していることが推察できる。

(3) 微動の H/V スペクトル比と地盤の卓越振動数

表層地盤と基盤のインピーダンスに明瞭なコントラストがある場合、常時微動の水平動と鉛直動のスペクトル比 (H/V スペクトル比) は、地盤の卓越振動数を検出できることは最近よく知られている^{5),6)}。測定地の二の丸は城山 (勝山) の裾に位置し、城壁の下部地盤は濠であったところを昭和 10 年前後に歩兵聯隊の射撃場として埋め立てられており⁴⁾、基盤が浅いことが期待できる。そこで、図-6 に断面 1 の城壁から離れた地盤 (N1A) と城壁尻部 (N1B) の H/V スペクトル比を示す。

これらの図では、共通して 4～5 Hz に明瞭なピークが認められ、これが地盤の卓越振動数に対応することがわかる。しかし、ピークより高振動数側では形状が大きく異なり、B 点は城壁の拘束効果を受けているものと考えられる。

図には示さないが、N2 断面でも同様な結果と考察が得られる。以上のことから、城壁尻部であっても H/V スペクトル比より地盤の卓越振動数が求められることがわかる。

(4) H/H スペクトル比と城壁の卓越振動数

風の影響や城壁周辺の振動が無視できるならば、城壁尻部 (B 点) を基準として、これと城壁肩部 (C 点) の水平動のフーリエスペクトル比 (H/H スペクトル比) は、城壁の動的応答特性を示すものと考えられる。図-7 に EW 成分の H/H スペクトル比 (N1C/N1B) を示す。3.5 Hz 付近と 32 Hz 付近に卓越したピークが見られる。3.5 Hz 付近の卓越振動数は下部地盤の卓越振動数よりやや小さいことから、下部の地盤と裏込め地盤の連成振動に、32 Hz 付近は城壁の卓越振動数に相当すると考えられる。すなわち、常時微動による H/H スペクトル比によれば、城壁上部では基礎地盤の卓越振動数と城壁の卓越振動数を中心に地盤の振動が増幅されると解釈できる。

以上のような分析を全断面について行い、地盤と城壁の卓越振動数を求めた。図-8 に各断面の城壁の卓越振動数を示す。この図では、断面 1 から各断面までの距離 (図-2 参照) で整理している。城壁直交成分と平行成分との間に顕著な違いは認められない。この原因はわからないので今後の課題としたい。水平 2 成分に違いが認められないので、これらを分けずに考えると、この図より、城壁の卓越振動数は 21～40 Hz の間にばらついていること、平均的な卓越振動数は約 32 Hz であることがわかる。

また、20～35 m の区間では、卓越振動数が平均的に低い。この区間には城壁に修復の跡があり、明治期に撮影された写真⁴⁾には、変状している様子が写っている。このことから、この区間は周囲の城壁に比べて相対的に健

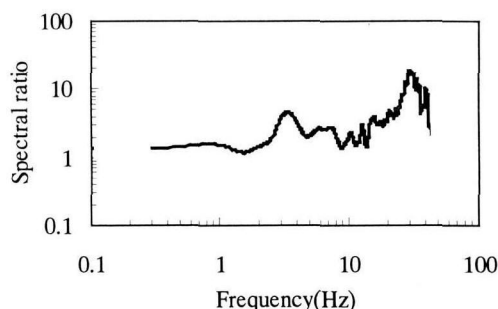


図-7 城壁直交方向の H/H スペクトル比 (N1 断面) (N1C/N1B)

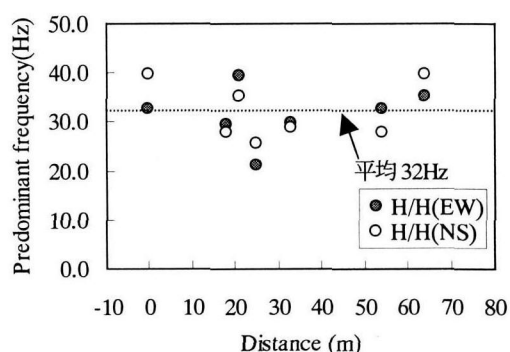


図-8 二の丸における各断面で城壁の卓越振動数

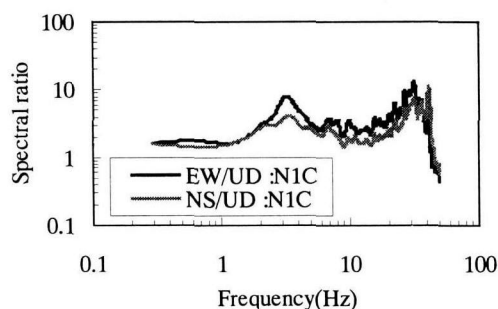


図-9 城壁肩部 (N1C) における H/V スペクトル比

全度が低下している可能性がある。すなわち、常時微動による卓越振動数の推定は、城壁の相対的な健全性を把握できる可能性を示唆していると思われる。

(5) 城壁肩部の H/V スペクトル比

H/H スペクトル比で把握できる城壁の卓越振動数が、城壁肩部の H/V スペクトル比の卓越振動数とどのような関係にあるか調べる。図-9 に城壁肩部 (N1C) における H/V スペクトル比を示す。3.2Hz 付近と 32Hz 付近に卓越したピークが見られる。これら 2 つの卓越したピークは、図-7 に示した H/H スペクトル比の卓越したピークに一致することから、前者は下部地盤と裏込め地盤の連成振動の卓越振動数に、後者は城壁の卓越振動数に相当すると

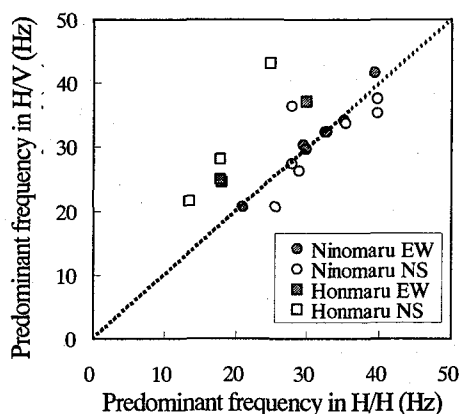


図-10 H/H (肩部/尻部) と H/V (肩部) スペクトル比から求められる卓越振動数の関係

考えられる。この図では、図-7 の H/H スペクトル比との比較から、前述の城壁の卓越振動数が捉えられることがわかる。

このことを確認するために、図-10 に二の丸の測定全断面について、尻部に対する肩部の H/H スペクトル比と城壁肩部における H/V スペクトル比から得られる城壁の卓越振動数の関係を示す。なお、図中には後で述べる本丸の結果についても併せて示してある。両者はほぼ同じであり、肩部の H/V スペクトル比で城壁の卓越振動数が捉えられものと考えられる。このことは、濠などのように尻部が水没しているような条件下でも、肩部の測定だけで城壁の卓越振動数が求められることを意味する。

4. 本丸城壁の測定結果と考察

本丸についても二の丸と同様な解析を行った。例として、図-11 にそれぞれ城壁尻部 (H3B) と城壁肩部 (H3C) の城壁直交方向水平動の加速度フーリエスペクトル (断面 3) を示す。また、図-12 に EW 成分の H/H スペクトル比 (H3C/H3B) を図-13 に城壁直交方向の城壁肩部 (H3C) における H/V スペクトル比を示す。

加速度フーリエスペクトルからは、城壁尻部に比べて城壁肩部では、水平動で高次振動数成分の振幅が大きいことがわかる。また、H/H スペクトル比 (肩部/尻部) には約 1.7Hz と約 18Hz の 2 つの卓越するピークが見られ、それぞれ前者は下部地盤と裏込め地盤の連成振動の卓越振動数に、後者は城壁の卓越振動数に相当すると考えられる。以上のように、二の丸と同様の考察が可能である。

しかしながら、H/V スペクトル比には、二の丸で見られたような H/H スペクトル比との明確な対応は見られない。これは、二の丸城壁は背後が緩やかな傾斜の地山の上に構築された盛土であるのに対して、本丸は傾斜の急な山の頂上に構築されており、背後の地盤の内、盛土の占める割合が少ないことがその原因として考えられる。

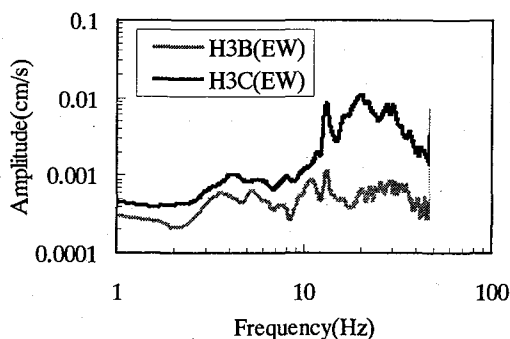


図-11 城壁尻部 (B) と城壁肩部 (C) の城壁直交方向水平動の加速度フーリエスペクトル (H3 断面)

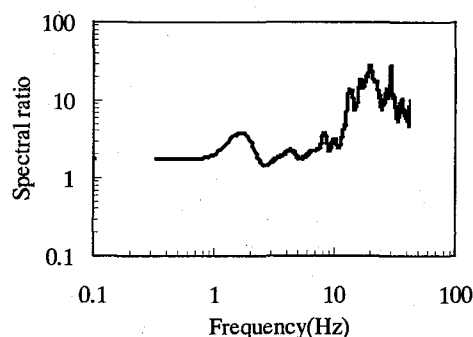


図-12 本丸 EW 成分の H/H スペクトル比 (H3C/H3B)

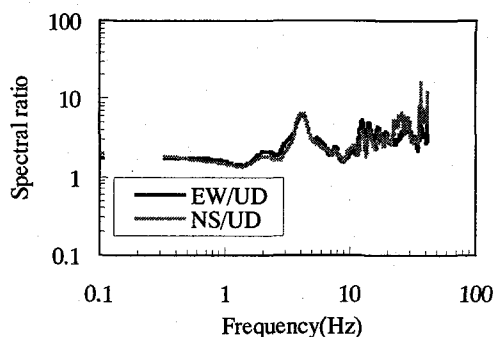


図-13 城壁直交方向の城壁肩部 (H3C) における H/V スペクトル比

したがって、以降で議論する城壁の卓越振動数については H/H スペクトル比により求められたものを対象とする。

尻部に対する肩部の H/H スペクトル比と城壁肩部における H/V スペクトル比から得られる城壁の卓越振動数の関係は図-10 に併せて示した。二の丸では両者がよく一致したのに対して、本丸では両者はおおむね比例関係にあるものの H/V による卓越振動数の方が 20~30% 大きい。この原因の解明については今後の課題である。なお、断面 H2 は隅に位置するので他と比べて 3 次元的な効果がある可能性はある。

二の丸は城壁高さが一定であったが、本丸城壁では、

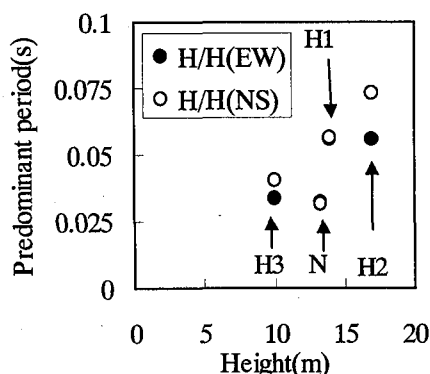


図-14 城壁の高さと城壁の卓越周期の関係

高さが異なっている。剛基盤上の均質な水平成層地盤では4分の1波長則が成立し、地盤の固有周期は表層厚さに正比例する。このアナロジーを仮定して、城壁の高さと振動特性の関係を検討するために、これまで対象としてきた振動数を城壁の高さと正の相関があると考えられる周期に変換して議論する。そこで、図-14に城壁の高さと城壁の卓越周期の関係を示す。本丸では城壁の高さと卓越周期は比例する。本丸と二の丸の城壁ではその傾向を異にする。このことは、城壁の構造や背面の地山の深さが関係しているものと考えられる。二の丸の卓越周期が本丸よりも小さいことは、比例定数の逆数がせん断波速度に比例すると考えると、二の丸城壁は本丸城壁よりも堅固であることを意味する。本丸が山頂付近に建てられ岩盤が浅いのに対して、二の丸が山裾の相対的に軟弱な地盤に建てられていると考えられるので、二の丸の方が奥深くまで裏込め石があることが推察される。

5. 結 論

松山城・二の丸と本丸において城壁の常時微動測定を行い城壁の振動特性を調査し、次の結論を得た。

- (1) 二の丸城壁の周辺地盤の卓越振動数は約4~5 Hzであり、城壁壁体の卓越振動数は場所によりばらつき、平均的に約35 Hzである。背後地盤を含めた城壁全体では3.2 Hzである。
- (2) 城壁の卓越振動数は城壁尻部と肩部のH/Hスペクトル比だけでなく、肩部のH/Vスペクトルでも検出できる。ただし、これは山裾に位置する二の丸城壁について言えることであり、山頂に位置する本丸城壁には当てはまらない。
- (3) 本丸では城壁の高さと卓越周期は比例する。城壁の高さと卓越周期の比例関係から、二の丸の城壁が本丸に比べて堅固な造りであることを示唆する。

謝 辞

本研究に際して、松山市役所の産業経済部・河本直人、

都市整備部・竹本勇、教育委員会・重松佳久の各氏にはお世話になりました。また、常時微動の測定では、研究室の大学院生の押村大司、込山貴士、4回生の阿部雅弘、豊嶋宏幸、中矢武樹の各氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Marathias, P.P.: Influence of foundation flexibility on the earthquake response of structures with many frictional interfaces, Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering (Vienna), Vol.2, pp.1449-1454, 1995.
- 2) 内田昭人：石造文化財の保存 10.日本の石造建造物ー石造建築・磨崖仏・石塔・石造品・庭園ー，土と基礎，Vol.45, No.5, pp.49-54, 1997.5
- 3) 宇佐美龍夫：東京地震地図，新潮選書，315p., 1983.
- 4) 松山市：松山城，増補第五版，342p., 1994.
- 5) 中村豊，上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み，第7回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.265-270, 1986.12.
- 6) 時松孝次，仲條有二，田村修次：短周期微動の水平鉛直振幅比と地盤特性の関係，日本建築学会構造系論文集，第457号，pp.11-18, 1994.3.

(1999年9月17日受付)