

中国西部地域の地震応答特性に関する総合研究 —西安地域の古建築物の動的応答特性その2—

1. 研究背景・目的
2. 西安地域の自然条件および歴史文化財
3. 常時微動観測による古建築物の動的応答特性の検討
4. 物理探査
5. 西安鼓楼の動的応答解析
6. まとめ

車 愛 蘭*
 岩 楯 徹 広**
 吉 嶺 充 俊**
 小 田 義 也**
 兪 茂 宏***

要 約

東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻（担当：岩楯徹広教授、吉嶺充俊助教授）と西安交通大学建築工程与力学学院土木工程系（担当：兪茂宏教授、劉奉銀講師）とは、「中国西部地域の地震応答特性に関する総合研究」を共同研究として、①西安交通大学およびその周辺の地盤および古建築物の地震時の応答特性、②黄土の力学的特性に関する土質試験を、鋭意実施中である。

本研究は、西安市内の6つの古建築物（西安城壁西門—城楼・箭楼、西安城壁東門—城楼・箭楼、鐘楼、鼓楼）を対象に常時微動観測を実施するとともに西安交通大学構内西区広場における物理探査試験を実施し、古建築物の地震応答特性と地盤構造について検討したもので、歴史的価値を有する古建築物の保存や今後の都市防災のための基礎資料を得ることを目的としている。

1. 研究背景・目的

1. 1 研究背景

東京都立大学では、1994年より都立大学および

周辺の多摩地域さらに逗子地域を対象に地震観測、常時微動観測を実施し、表層地盤や建物の地震時応答特性について検討し、都市防災のための基礎資料の収集分析、データベース化を図ってきた^{1,2)}。さらに、2001年において、東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻（担当：岩楯徹広教授、

* 東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻（博士課程）

** 東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** 西安交通大学建築工程与力学学院土木工程系

吉嶺充俊助教授)と西安交通大学建築工程与力学学院土工系(担当:俞茂宏教授、劉奉銀講師)は、学术交流に関する協定を締結し、共同研究「中国西部地域の地震応答特性に関する総合研究」(2001年~2003年の3年間)を立案し、中国西安地域の防災のため以下の研究を実施中である。

①西安交通大学およびその周辺地域の地盤および主要な構造物(歴史的建造物も含む)の動的応答特性の把握と地震時の耐震安全性の評価・検討

②表層地盤の地盤構造の把握と黄土(風積土)の強度・変形特性の把握

平成13年度においては、9月に約1ヶ月間、中



写真1 西安交通大学建力学院での講演会



写真2 西安交通大学構内で常時微動観測



写真3 西安市東郊で黄土供試体の採取

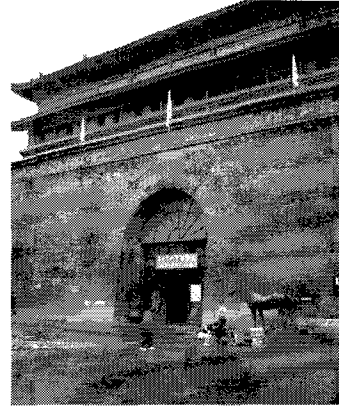


写真4 西安城壁西門で常時微動観測



写真5 西安交通大学構内西区広場における物理探査

国の西安市内および西安交通大学構内において、常時微動観測(写真2)を実施し、表層地盤の応答特性を検討評価するとともに、黄土を採取し室内試験により、その強度特性について調べた(写真3)³⁻⁵⁾。

さらに、平成14年度においては、9月に約2週間に渡って西安市内の文化遺産である6つの古建築物(西安城壁西門一城楼・箭楼、西安城壁東門一城楼・箭楼、鐘楼、鼓楼)を対象に常時微動観測(写真4)を実施し、その震動特性を把握するとともに西安交通大学構内西区広場において、物理探査試験を実施し、地盤構造について検討した(写真5)。

平成13年度の研究成果の一部を、「中国西部地域の地震応答特性に関する総合研究－西安地域の地盤・構造物の応答特性その1(常時微動観測による応答特性)³⁾にとりまとめた。

本報告は、平成14年度の研究成果として、「中

国西部地域の地震応答特性に関する総合研究－西安地域の古建築物の動的応答特性その2-」を、取りまとめたものである。

1. 2 研究目的

本研究は、西安地域の代表的な古建築物とその周辺地盤を対象に常時微動観測を実施し、その震動特性を把握するとともに、地震時の耐震安全性を評価し、これらの成果を、今後このような歴史的価値を有する各時代の古建築物を保存するための基礎資料を得ることを目的としている。

2. 西安地域の自然条件および歴史文化財

2. 1 西安市の地理位置

西安市(旧長安)は中国の陝西省の政治、経済、文化の中心であり、面積9983km²、人口662.1万人

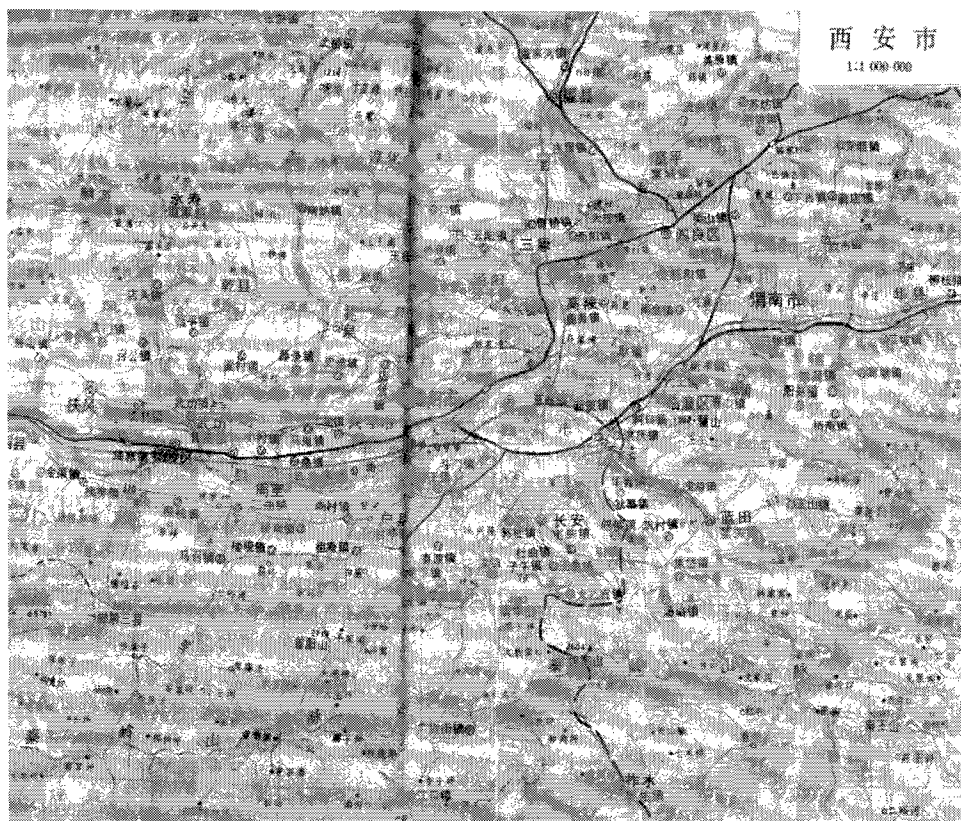


図1 西安の地形図(1:1000,000)

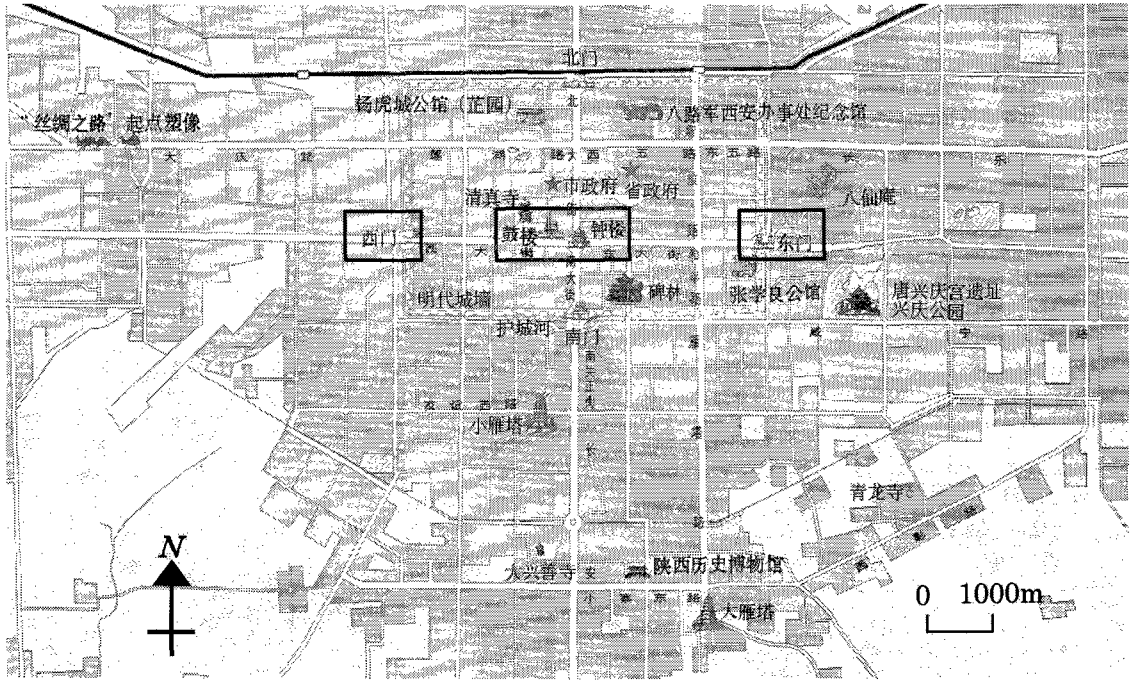


図2 西安市の歴史文化財

の大都市である。歴史的に見ると、シルクロードの始点であり、現在でも中国の西北、中原、西南の交通に重要な役割を果たしている。陝西省（緯度 $31^{\circ}42' \sim 39^{\circ}35'N$ 、経度 $105^{\circ}29' \sim 111^{\circ}15'E$ ）は、中国の内陸中部、黄河の中流一帯である。西安城区は陝西省中部の関中平原（渭河盆地）の中心にある。その標高は $400 \sim 700m$ になっている（図1）^{7,8)}。

2. 2 歴史文化財^{10,11)}

(1) 西安城壁

西安（旧長安）では明時代の1370年ごろに城壁の造営が行われた。これが現在西安で保存されている古建築物の中で最も有名な中世紀の防御壁であり、中国政府はこれを最初に国の重要文化財に指定している。西安城壁の600年の歴史の中では、1556年、1564年などの関中大地震で大きな被害を受けてきた。

西安城壁の長さは東長 $2,683m$ 、西長 $2,626m$ 、南長 $4,194m$ 、北長 $4,134m$ 、総長 $13.74km$ となっている。城壁の周りには深さ $7m$ 、幅 $10m$ の城川があ

り、城川と城壁の間隔は $20 \sim 60m$ となっている。城は四角形となっており、それぞれの壁に東門（長樂門）、西門（安定門）、南門（永寧門）、北門（安遠門）があり、各門には城楼と箭楼がある（図2）。城壁の高さは約 $12m$ 、幅は下が約 $18m$ 、上は約 $14m$ になっている。

(2) 鐘楼、鼓楼

西安鐘楼は1384年に西安広濟街東側に建てられ、1582年現在地（西安市の中心）に移転した。現在まで600年以上の歴史がある。鐘楼の高さは $36m$ 、基礎は煉瓦と土になっている。東西、南北方向に対称な正方形の木構造物になっている。歴史的には、1582年以来4回の大きな地震を被ってきたが、大きな破壊はなかったと記載されている。

西安鼓楼は1380年に西安城内北大街に建てられ、西安鐘楼の西側に位置している。鼓楼の高さは $33m$ 、下層構造は青煉瓦で造られ、その高さは $8m$ である。鼓楼の東西方向の長さは $52.6m$ 、南北方向の長さは $38m$ である（図3）。

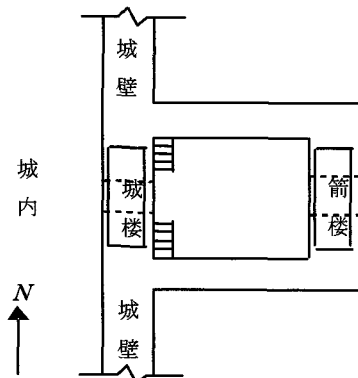


図3 城楼と箭楼の配置図

3. 常時微動観測による古建築物の動的応答特性の検討

平成14年9月に約2週間にわたって、西安市内において6つの古建築物（西安城壁西門－城楼・箭楼、西安城壁東門－城楼・箭楼、鐘楼、鼓楼）における常時微動観測を行い、観測データに基づいて西安市内において6つの古建築物の応答特性を把握し、動的挙動について検討を行った。

3. 1 常時微動観測の概要

地盤および構造物は地震動以外にも、色々な外乱により常に揺れ動いている。このような震動は、常時微動 (Microtremor) または雑震動 (Earth Noise) と呼ばれるものであり、その震動の振幅は、非常に静かな山地で岩盤が露出しているような地盤ではオングストローム ($\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$) のオーダーであるが、大都会では数百マイクロン ($\mu=10^{-4}\text{cm}$) に及ぶことがある。その震源は、人工的なもの (交通機関の震動、工場、土木工事など) や自然によるもの (風、波) などが考えられ、0.5Hz以下のものは特に「脈動」と呼ばれている。強風下の状

況では0.25Hzないし0.3Hz程度の振動数が卓越する。この脈動を除いた0.5Hz以上の振動を一般的に「常時微動」という⁶⁾。

重要文化財の耐震診断や地震時の応答特性を評価する場合、一般に、起振実験など人工的に加振することが許されないため、常時微動による応答特性を観測して評価する方法 (常時微動観測) が広く用いられている。

(1) 常時微動観測装置

観測に使用する微動計：携帯用地震計 (SPC-35F：VSE-15D型速度計、分析能16ビット、東京測振製) である (図4、表1)。

(2) 常時微動観測・解析方法

各観測点において、水平2方向 (NS, EW方向) と上下方向 (UD方向) の3方向速度成分をサンプリング周波数100Hzで5分間 (30000個データ) 測定した。

(a) 構造物のフーリエスペクトル解析

都立大学では、各観測点のフーリエスペクトルは、5分間の観測データから比較的定常性を保った約20秒間 (20.48秒間) のデータを5つ選び出し、

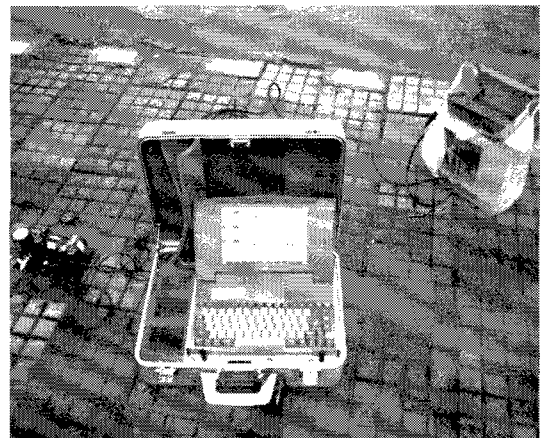


図4 携帯用地震計

表1 携帯用地震計の仕様

形式	携帯用振動計SPC-35E
メーカー	東京測振製
振動測定	速度：100mkine, 10kineの2レンジ、分解能10μkine、周波数範囲0.1~70Hz
	加速度：10gal, 100galの2レンジ、分解能1mgal、周波数範囲0.1~70Hz
	変位：100μm, 10mmの2レンジ、分解能0.01μm、周波数範囲1~70Hz
サンプリング周波数	1000Hz, 500Hz, 200Hz, 100Hz, 50Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hzの9種類

それぞれに対してFFT解析を行い、Hanningウィンドウ(10回)をかけて平滑化(バンド幅は約0.1Hz)し、この5つの相加平均をとり、各点の3成分(NS, EW, UD)のフーリエスペクトルを求めている。さらに、構造物の応答特性に対しては、成分毎(NS, EW, UD)に、各階の応答と基礎の応答との比(伝達関数)を求めて検討した。

(b) 表層地盤のフーリエスペクトルとH/Vスペクトル比⁹⁾

表層地盤の応答特性の評価は、各点毎に、3成分のフーリエスペクトルを求めるとともに、次式に示すように、H/Vスペクトル比(中村の方法)を算定して行った。

ここでは、次式 $\frac{\sqrt{NS \cdot EW}}{UD}$ (文部省方式)により求めた。

3. 2 観測地域と観測点

(1) 地盤の常時微動観測点

地盤の常時微動観測は各古建築の周辺の合計6地点を行った(写真4)。

(2) 構造物の常時微動観測

西安市内において6つの古建築物(西安城壁西門-城楼・箭楼、西安城壁東門-城楼・箭楼、鐘楼、鼓楼)(表2)(写真6, 7, 8, 9, 10, 11)における各階(1F, 2F, 3F)での常時微動観測と各階同時にNS方向、EW方向の常時微動観測を行い、構造物の応答特性について調べる。なお、1Fは地表面、2Fは建物の基盤(城壁の上端)、3Fは建築物の階上である。

3. 3 観測結果

(1) 建築物周辺地盤の震動特性

地盤の常時微動観測では、各古建築の周辺で合計6点の観測波形が得られた(全ての観測波形)。

6地点の観測波形(付録を参照)を用いて、地盤のフーリエスペクトル比H/V(伝達関数)を算定した(図5)。6地点とも、スペクトル比H/V(伝達関数)の明瞭なピークは確認されていない。

この原因の一つとして、西安地域の表層地盤は風積黄土が長い年月の間に堆積したもので、表層と基盤の物性に明瞭なコントラストがないことが考えられる。

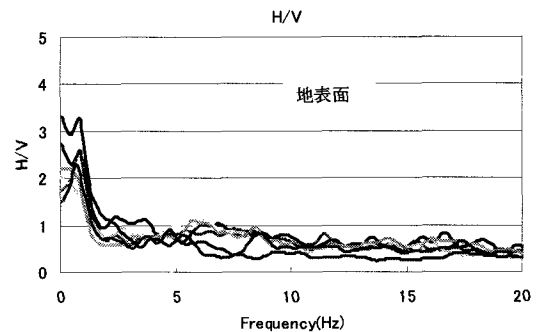


図5 地盤のフーリエスペクトル比H/V(伝達関数)

(2) 構造物の振動特性

構造物の各階に観測した常時微動の解析により、卓越振動数および増幅特性を調べた。

図6に、西安城壁東門-城楼の1F, 2F, 3Fで観測した常時微動観測波形のフーリエスペクトルを示す。図7に、西安城壁東門-城楼の1F, 2F, 3Fで同時にNS方向とEW方向で観測した常時微動観測波形のフーリエスペクトルを示す。二つのフーリエスペクトル図を比較すると、卓越振動数はほぼ同じであるが、振幅は異なる。独立した観測では、応答特性(増幅特性)は、十分評価できていないが同時観測では妥当な結果が得られている。これらの図より各構造物の卓越振動数および振幅を求め、一覧表にしたものを表3, 4に示す。

表2 観測建築物

	西安城壁西門		西安城壁東門		西安鐘楼	西安鼓楼
	箭楼(XM-1)	城楼(XM-2)	箭楼(DM-1)	城楼(DM-2)	(ZHR)	(GR)
建築年	1370年		1370年		1582年	1380年
高さ(m)	30	30	30	30	36	33
観測階数	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 4	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3

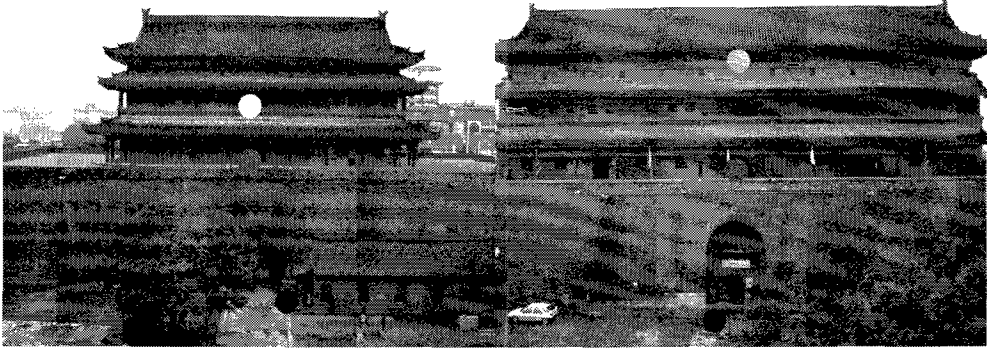


写真6 西安城壁西門—城楼 (DM-2)

写真7 西安城壁西門—箭楼 (DM-1)

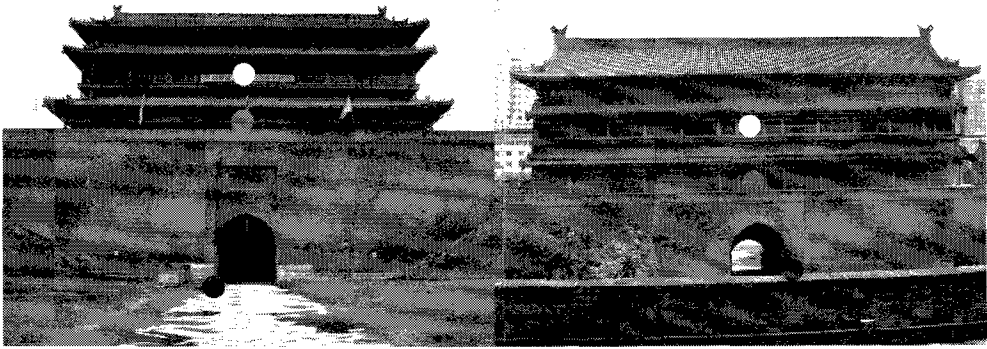
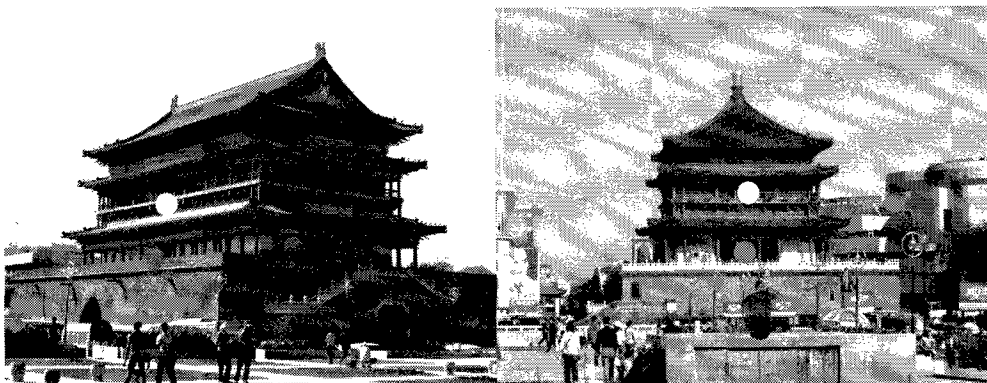


写真8 西安城壁東門—城楼 (XM-2)

写真9 西安城壁東門—箭楼 (XM-1)



● 観測点 1F

● 観測点 2F

● 観測点 3F

● 観測点 4F

写真10 西安鼓楼 (GR)

写真11 西安鐘楼 (ZHR)

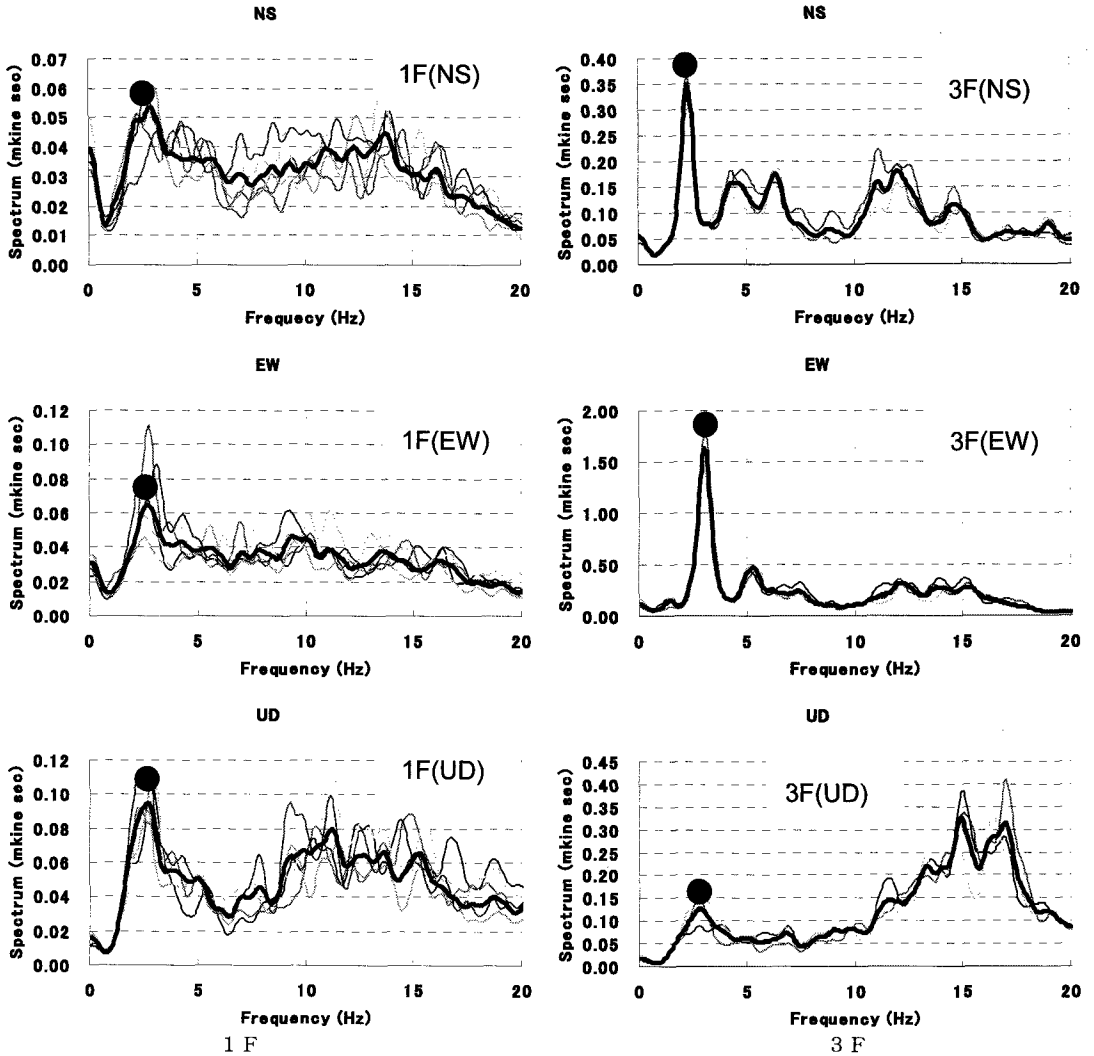


図 6 西安城壁東門一城樓の常時微動観測波形のフーリエスペクトル

表 3 各構造物の卓越振動数

高さ (m)	DM-1 (Hz)		同時観測		高さ (m)	XM-1 (Hz)		同時観測	
	NS	EW	T-NS	T-EW		NS	EW	T-NS	T-EW
1F	2.54	2.83	3.22	2.93	1F	2.73	3.03	2.83	3.03
2F(12m)	2.44	3.03	2.83	3.03	2F(12m)	2.83	2.73	2.73	3.03
4F(23m)	2.64	3.61	2.64	3.61	3F(19m)	2.93	3.03	2.93	3.03
高さ (m)	DM-2 (Hz)		同時観測		高さ (m)	XM-2 (Hz)		同時観測	
	NS	EW	T-NS	T-EW		NS	EW	T-NS	T-EW
1F	3.125	2.93	2.73	3.03	1F	3.03	2.64	2.25	2.64
2F(12m)	2.73	3.03	2.83	3.125	2F(12m)	2.44	2.83	2.15	2.83
3F(19m)	1.95	3.91	1.86	3.91	3F(19m)	2.34	3.125	2.34	3.125
高さ (m)	GR-1 (Hz)		同時観測		高さ (m)	ZHR-1 (Hz)		同時観測	
	NS	EW	T-NS	T-EW		NS	EW	T-NS	T-EW
1F	2.64	2.93	2.83	2.73	1F	6.44	6.54	3.32	3.125
2F(8m)	2.83	2.83	3.03	2.83	2F(8m)	5.57	5.57	3.81	3.42
3F(20m)	3.32	3.125	3.32	5.18	3F(23m)	4.59	4.98	4.39	4.59

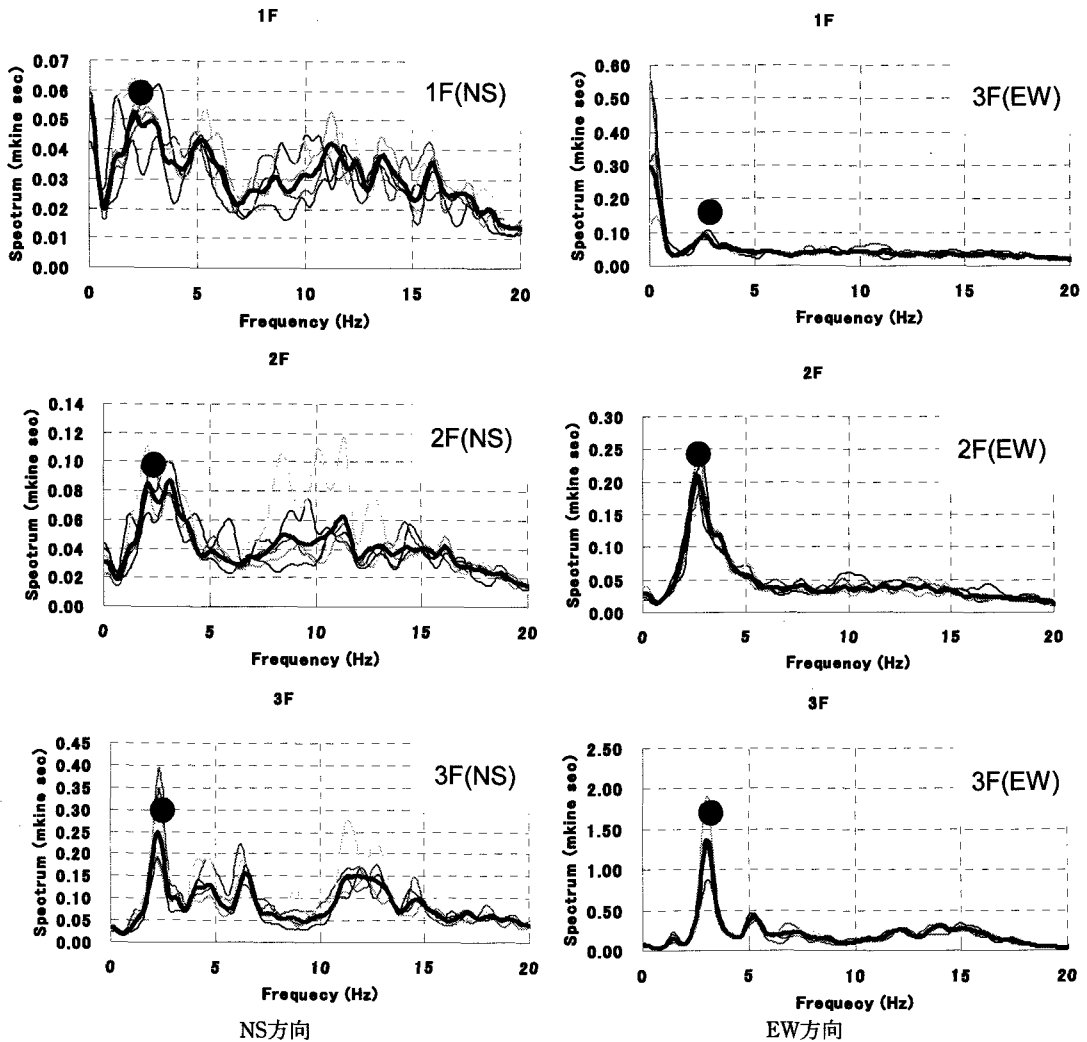


図7 西安城壁東門一城樓の同時常時微動観測波形のフーリエスペクトル

表4 各構造物の振幅増幅

高さ(m)	DM-1	Ratio	高さ(m)	DM-1	Ratio
	NS	EW		NS	EW
1F	1	1	1F	1	1
2F(12m)	1.14	1.67	2F(12m)	1.67	3.00
4F(23m)	8.43	8.50	3F(19m)	5.33	9.67
高さ(m)	DM-2	Ratio	高さ(m)	DM-1	Ratio
	NS	EW		NS	EW
1F	1	1	1F	1	1
2F(12m)	1.50	1.80	2F(12m)	1.60	2.22
3F(19m)	2.17	12.60	3F(19m)	4.80	15.00
高さ(m)	GR-1	Ratio	高さ(m)	DM-1	Ratio
	NS	EW		NS	EW
1F	1	1	1F	1	1
2F(8m)	1.93	1.57	2F(8m)	1.57	1.57
3F(20m)	8.57	7.43	3F(23m)	7.43	7.43

・西安城壁西門—城楼・箭楼の振動特性

図 8、9 は西安城壁西門—城楼・箭楼の卓越振動数の分布図である。これらの図から、各階の一次卓越振動数の平均値を算定した。

その結果、西安城壁西門—箭楼 (XM-1) の一次卓越振動数は2.91Hzであり、西安城壁西門—城楼 (XM-2) の一次卓越振動数は2.65Hzとなった。

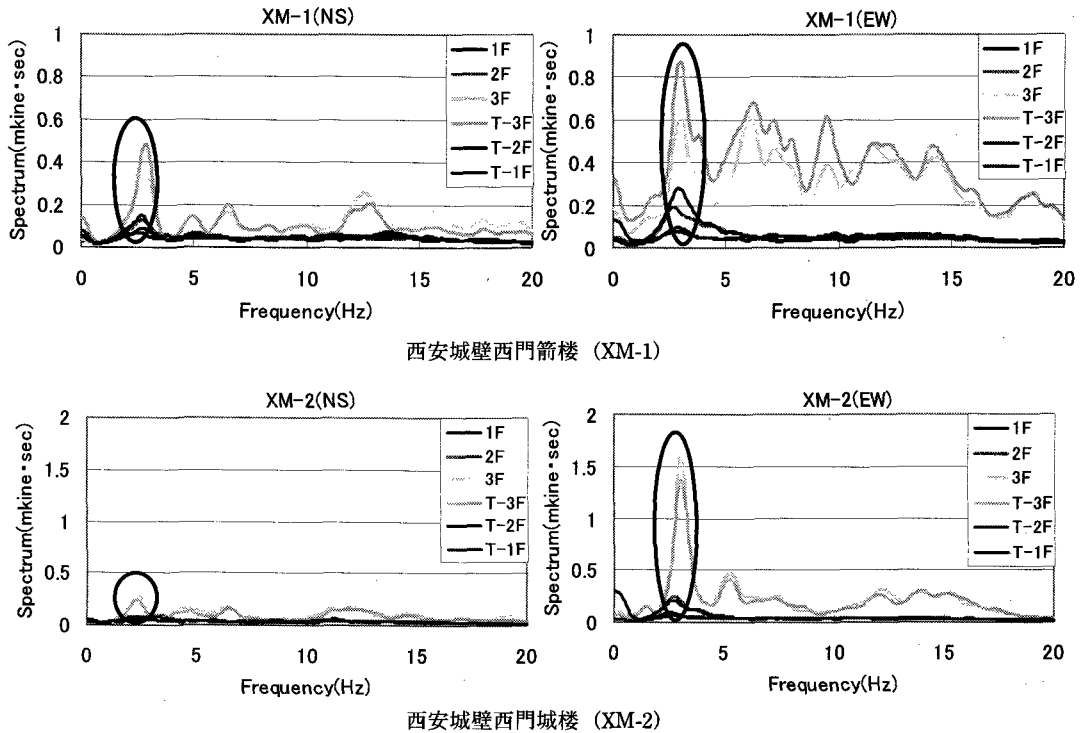


図 8 西安城壁西門—城楼・箭楼の卓越振動数

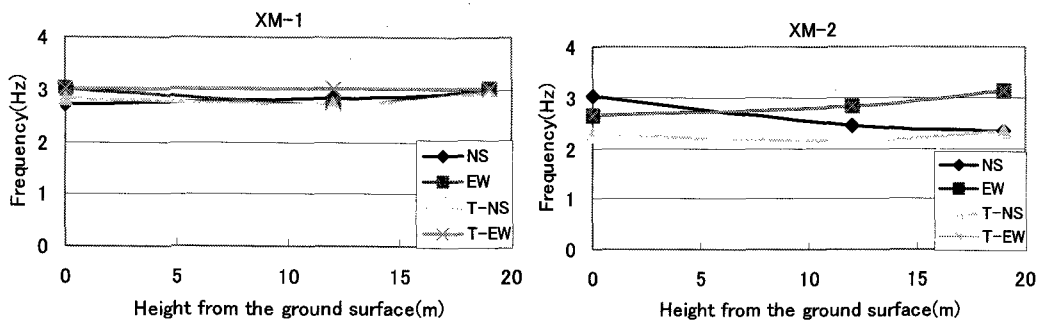


図 9 西安城壁西門—城楼・箭楼の卓越振動数の分布

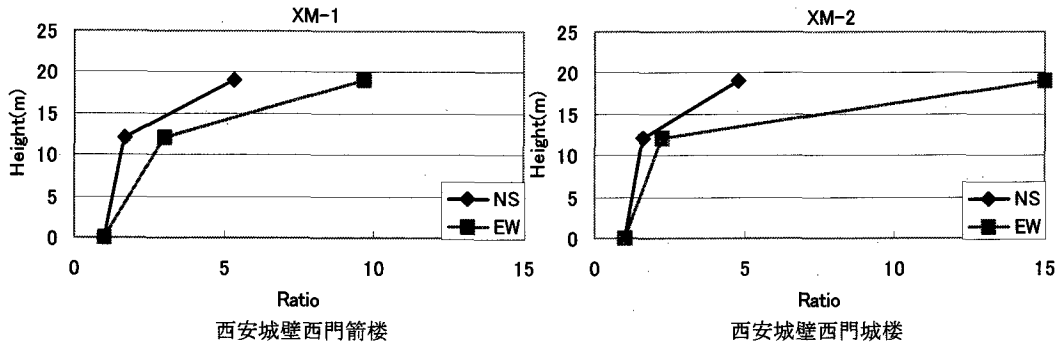


図10 同時観測から西安城壁西門一城楼 (XM-2)・箭楼 (XM-1) の増幅特性

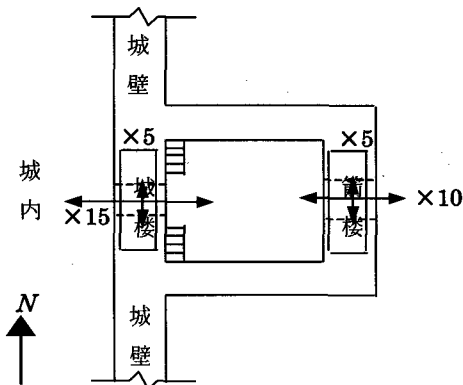


図11 同時観測から西安城壁西門一城楼 (XM-2)・箭楼 (XM-1) の微動応答特性

図10、図11はNS、EW方向での同時観測から西安城壁西門一城楼 (XM-2)・箭楼 (XM-1) の増幅特性を示している。これらの図から、西安城壁西門一城楼・箭楼はEW方向とNS方向の増幅特性の相違があることが分かった。西安城壁上にある城楼と独立する箭楼の城壁と並行する (NS) 方向では、城楼と箭楼の3Fの増幅率が同じ(5倍)であるが、城壁と鉛直する (EW) 方向では、城楼の3Fの増幅率が15倍であるのに対し、箭楼は10倍になっている。この相違は、基礎 (城壁) の形状の違いにより、建物の剛性が2方向で大きく異なるためと考える。

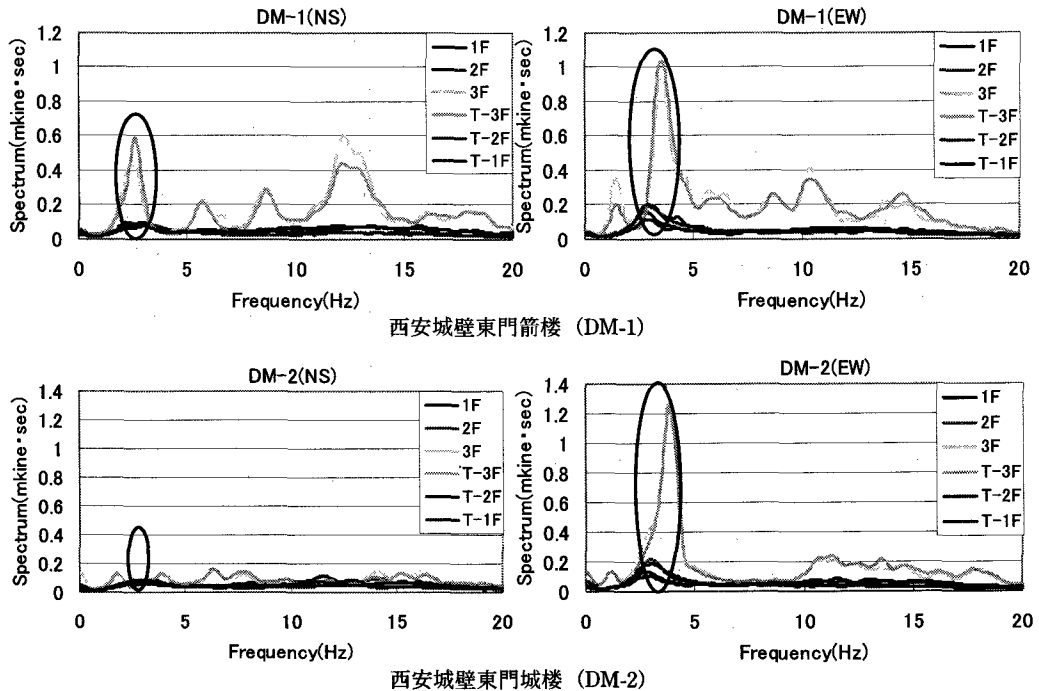


図12 西安城壁東門一城楼・箭楼の卓越振動数

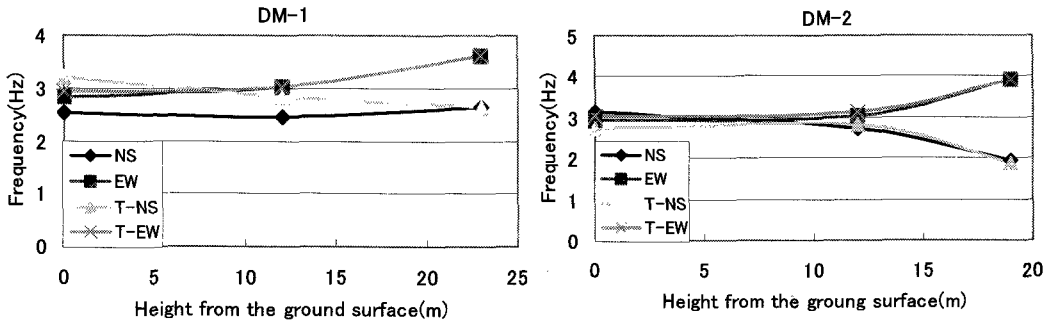


図13 西安城壁東門一城楼・箭楼の卓越振動数の分布

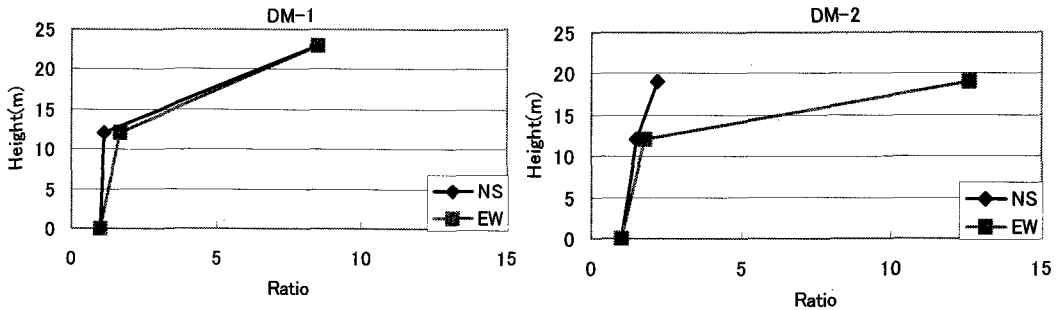


図14 同時観測から西安城壁東門一城楼 (DM-2)・箭楼 (DM-1) の増幅特性

・西安城壁東門一城楼・箭楼の振動特性

図12、13は西安城壁東門一城楼・箭楼の卓越振動数の分布図である。これらの図から、各階の一次卓越振動数の平均値として、建築物の一次固有振動数を算定すると、西安城壁西門一箭楼 (DM-1) では、2.95Hz、西安城壁西門一城楼 (DM-2) では、2.93Hzで、ほぼ同じである。

図14、15はNS、EW方向での同時観測から西安城壁東門一城楼 (DM-2)・箭楼 (DM-1) の増幅特性を示している。これらの図から、西安城壁東門一城楼はEW方向とNS方向の増幅特性の相違性があることが分かった。西安城壁と独立する箭楼は建築物4Fの増幅率がNS、EW方向とも同じ(8倍)であるのに対し、西安城壁上の城楼は城壁と平行する方向(NS方向)では、建築物3Fの増幅率が2倍であるが、城壁と鉛直する(EW)方向では、建築物3Fの増幅率が13倍になっている。

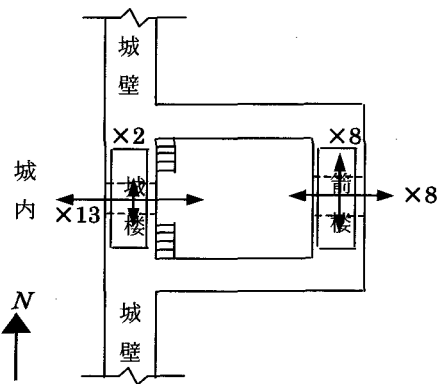


図15 同時観測から西安城壁東門一城楼 (DM-2)・箭楼 (DM-1) の微動応答特性

・西安鐘楼 (ZHR)・西安鼓楼 (GR) の振動特性

図16、17は西安鐘楼 (ZHR) と西安鼓楼 (GR) の卓越振動数の分布図である。これらの図から、建物の一次卓越振動数を各階の平均値として求めると、西安鐘楼 (ZHR) では、4.7Hzとなり、西安鼓楼 (GR) では、3.13Hzになった。

図18、19はNS, EW方向での同時観測から西安鐘楼 (ZHR)・西安鼓楼 (GR) の増幅特性を示し

ている。これらの図から、西安鐘楼 (ZHR)・西安鼓楼 (GR) はEW方向とNS方向の増幅特性の相違性があることが分かった。西安鐘楼 (ZHR) は建築物の水平断面形状が正方形になっており、建築物3Fの増幅率がNS, EW方向とも同じ(8倍)となった。一方、西安鼓楼 (GR) では、建築物3Fの増幅率は、NS方向で8.6倍、EW方向で7.4倍になっており若干差がある。これは、建物およびそ

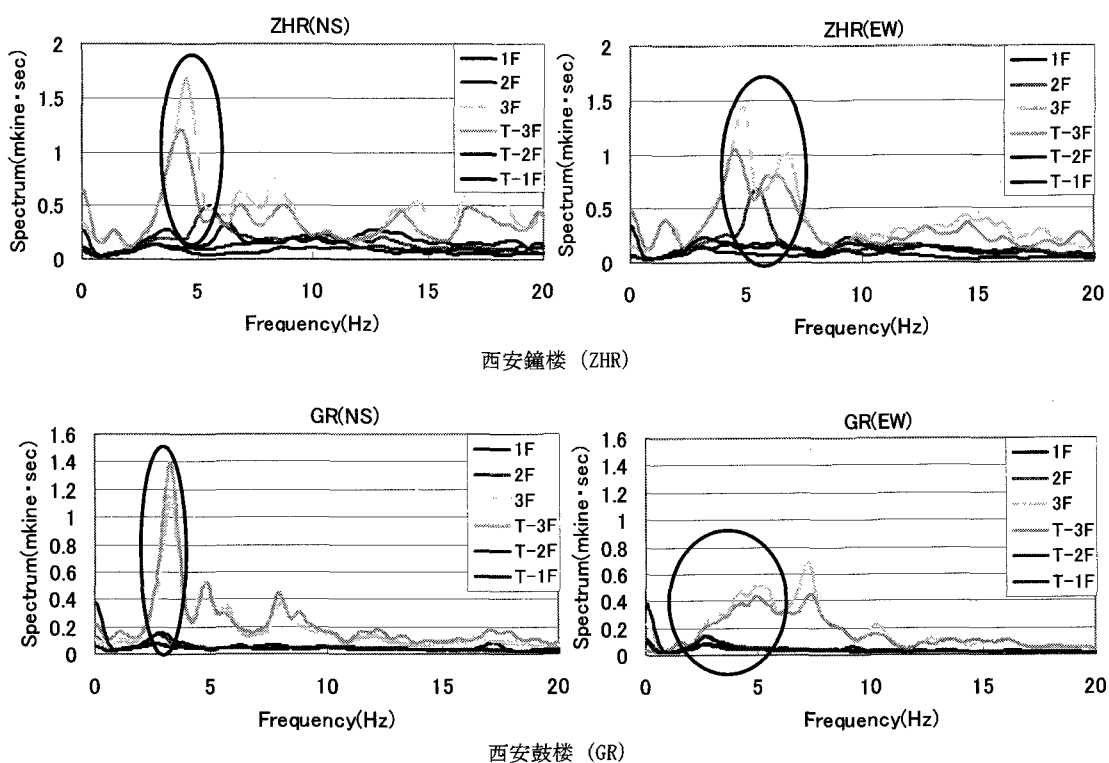


図16 西安鐘楼 (ZHR)・西安鼓楼 (GR) の卓越振動数

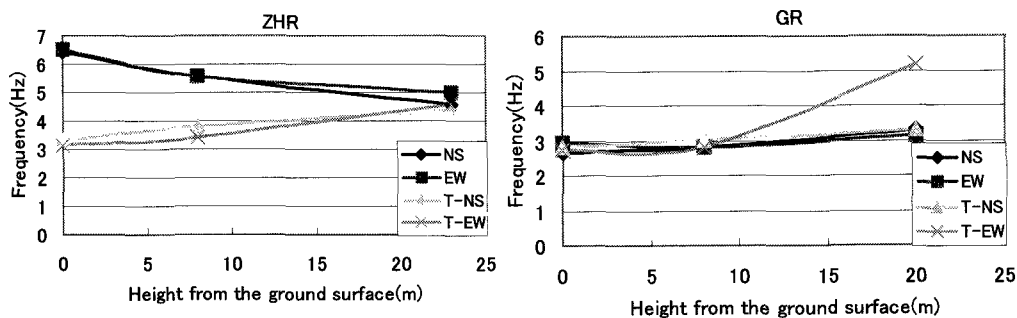


図17 西安鐘楼 (ZHR)・西安鼓楼 (GR) の卓越振動数の分布

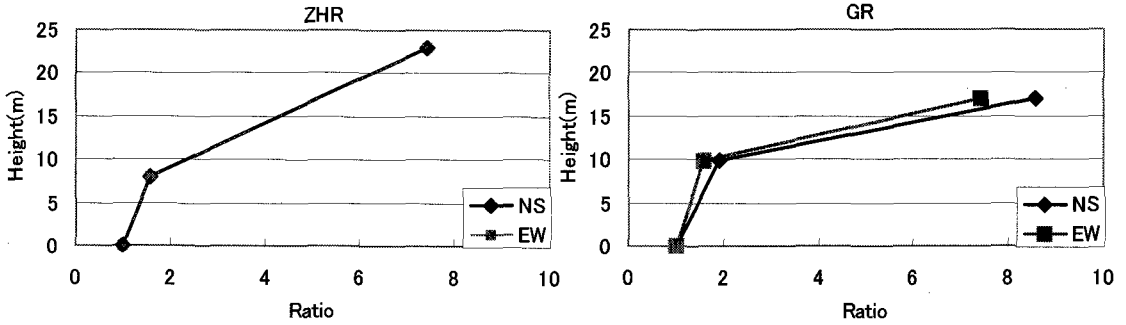


図18 同時観測から西安鐘楼 (ZHR)・西安鼓楼 (GR) の増幅特性

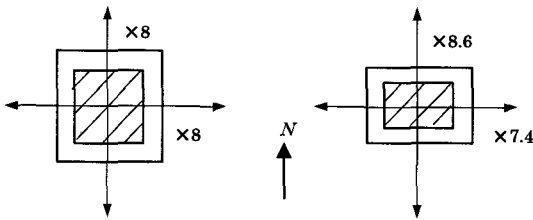


図19 同時観測から西安鐘楼 (ZHR)・西安鼓楼 (GR) の微動応答特性

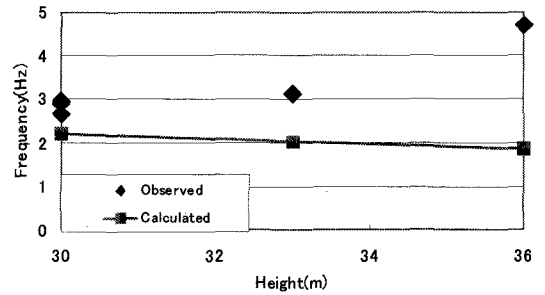


図20 構造物の一次卓越振動数の観測値と計算値の比較

の基礎形状 (長方形 (NS÷EW≒3 : 5)) が異なるためと考えられる。基礎と建築物の形状が増幅特性に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

式 1 は、日本建築学会が提案している式であり、RC造の建物に対して、構造物の 1 次固有振動数 (f_1) は、建物の高さ H (m) の関数として表される。

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0.015H} = \frac{66.7}{H} [Hz] \quad (式 1)$$

図20は観測の平均卓越振動数、式 1 による構造物の一次固有振動数と構造物高さの関係を示してある。西安の古建築物は木造と煉瓦の混合構造物であり、RC造に対し提案されている建物の一次固有値の推定値とは一致していないことが分かった。

4. 物理探査

本研究では西安交通大学構内西区広場において、地盤の S 波速度を調べるため、屈折法物理探査

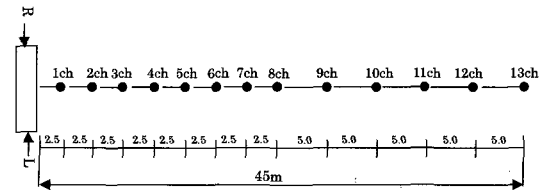


図21 物理探査の観測点配置

を行った。

屈折法は、地表に一直線 (測線) に設けた多数の観測点に次々と波動が到着する時間 (初動走時) を観測して、表層の物性 (S 波速度) を算定する方法である。図21は今回西安交通大学構内で行った物理探査実験の観測レイアウトである。

4. 1 観測結果

2002年 9 月 22 日に西安交通大学構内西広場で、常時微動観測装置を用いて、長さ 45m の一直線 (測線) に 13 個の観測点を設けた。振源としては、コンクリートの細長い板を地面に設置して、その端部をハンマーで打撃することにより、左側と右側からせん断波を発振する。図22はその観測波形の例を示している。

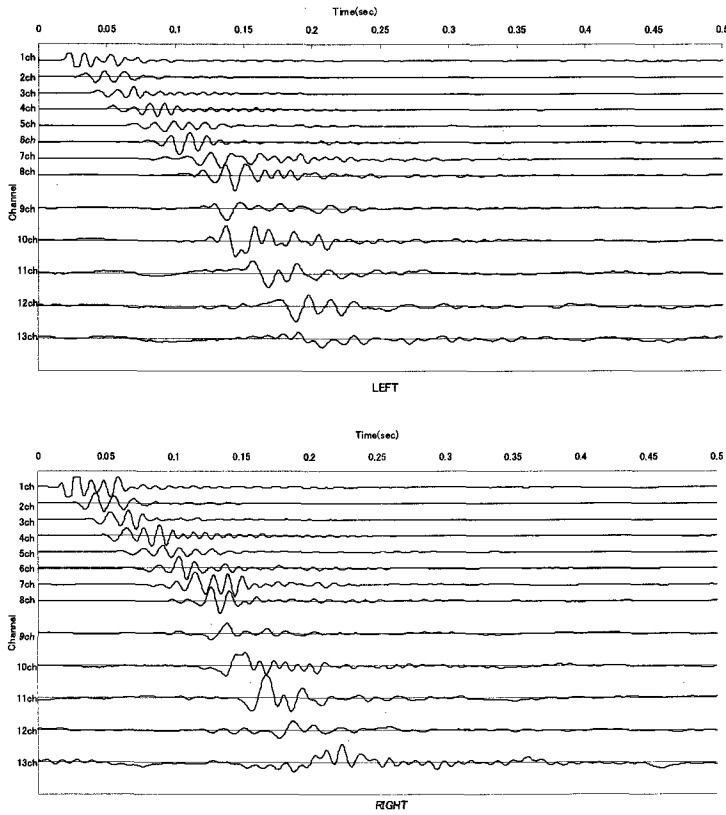


図22 物理探査の観測波形

4. 2 S波速度(V_s)の測定

図22の右発振と左発振の観測波形から、S波の伝播時間をプロットし、その時間と距離の関係を図23に示した。これらの観測結果から、表層地盤のS波速度(V_s)は233m/secとなった。

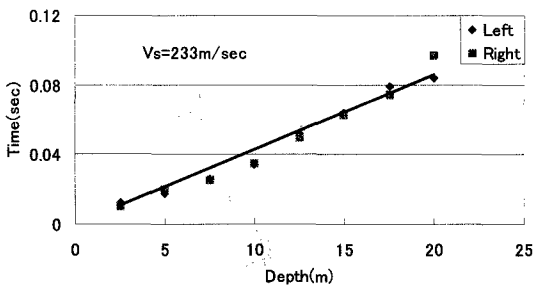


図23 S波速度の測定

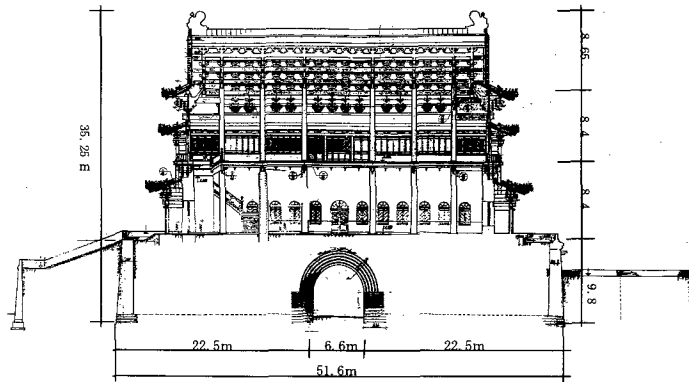
5. 西安鼓樓の動的応答解析

構造物の動的応答特性を解明するため、代表的な古建築物（西安鼓樓：GR）（図24）を対象に一次元解析および二次元有限要素解析を行う。解析コードとしては、TDAP III（Time Domain 3-dimensional Dynamic Analysis Program III）を用いている。

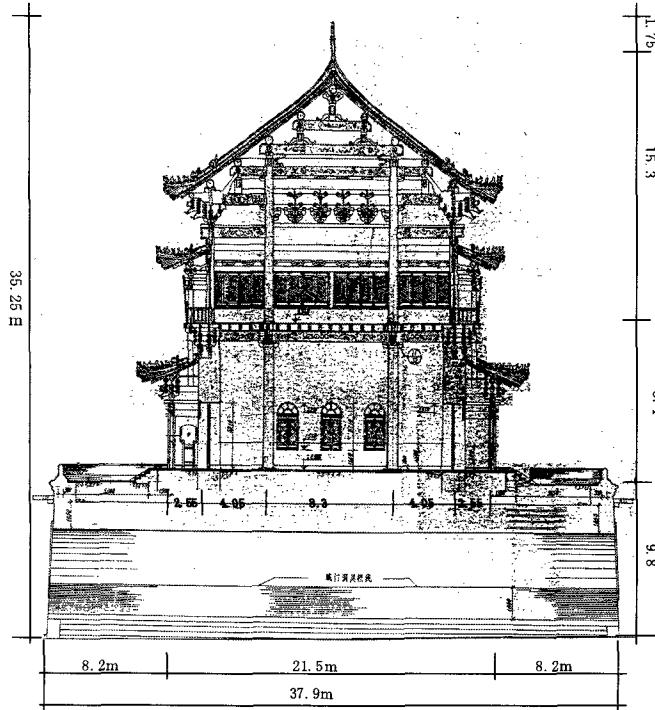
5. 1 一次元解析

(1) 解析モデル

図25には構造物の一次元解析モデルと物性を示している。構造物の物性は西安古城壁研究⁹⁾から得ている。



EW方向の断面図



NS方向の断面図

図24 西安鼓楼の断面図¹⁰⁾

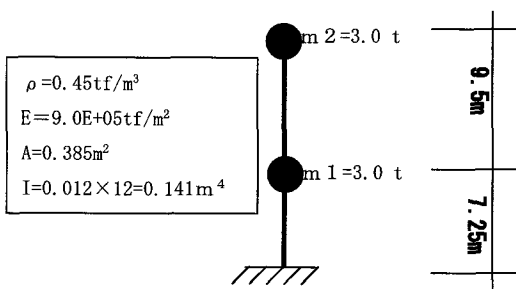


図25 構造物の一次元解析モデルと物性

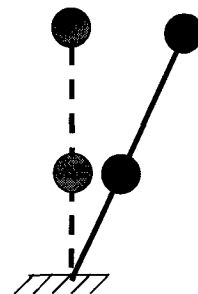


図26 構造物の一次固有モード

(2) 固有値解析

一次元の固有値解析から建造物の一次固有値は3.16Hzになっている。常時微動観測で得られた西安鼓楼 (GR) の一次卓越振動数3.13Hzとよく一致している。

5. 2 二次元解析

(1) 解析モデル

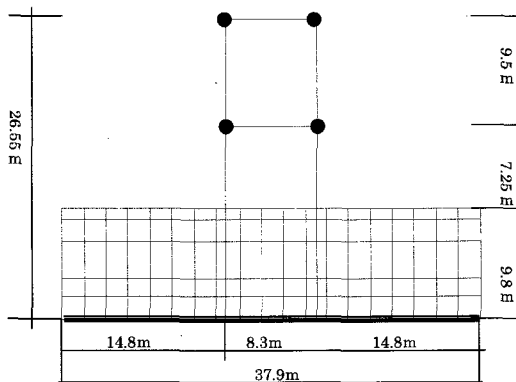
図27は西安鼓楼のNS, EW断面の二次元モデル

である。建造物の物性は一次元解析と同じ物性値を用い、土台の物性値は西安交通大学内の物理探査の結果 ($V_s=233\text{m/sec}$) を用いている。

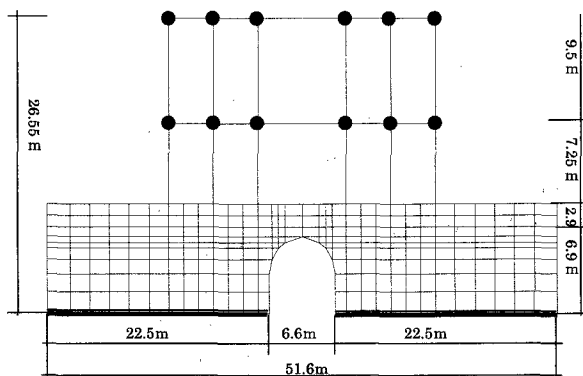
(2) 固有値解析

二次元の固有値解析から建造物の一次固有値はNS方向には3.07Hz、EW方向には3.36Hzになっている (図28)。常時微動観測で得られた西安鼓楼 (GR) の一次卓越振動数3.13Hzとよく一致することが分かった。

建造物の物性： $\rho = 0.45 \text{ tf/m}^3$ $E = 9.0\text{E}+05 \text{ tf/m}^2$ $A = 0.385 \text{ m}^2$ $I_{NS} = 0.012 \times 6 = 0.072 \text{ m}^4$ $I_{EW} = 0.012 \times 2 = 0.024 \text{ m}^4$	地盤の物性： $\rho = 2.0 \text{ tf/m}^3$ $E = 1.2\text{E}+04 \text{ tf/m}^2$ $h = 0.05$
---	--



NS方向のモデル



EW方向モデル

図27 西安鼓楼のNS, EW断面の二次元モデル

二次元の固有値解析から構造物の固有スペクトルは図29に示している。常時微動観測で得られた西安鼓楼 (GR) の増幅特性を比較すると、よく一致している。

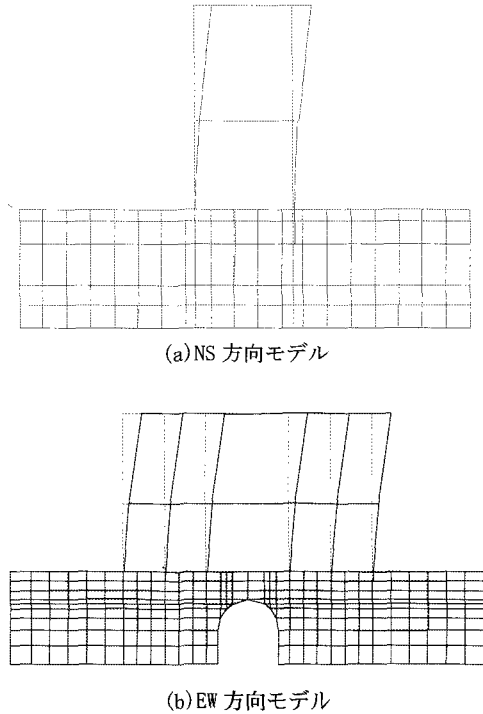


図28 構造物の二次固有モード

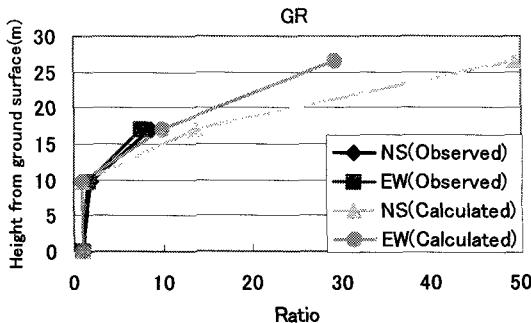


図29 西安鼓楼の増幅特性の解析結果と観測結果の比較

6. まとめ

6. 1 地盤の震動特性

(1) 常時微動のH/V波形にはピークがみられて

ないことから、西安地域の表層地盤は風積黄土が長い年月の間に厚く堆積したもので、表層と基盤の物性に明瞭なコントラストがないと考えられている。また、西安地域で常時微動装置を用いた物理探査によって、S波測定を行った結果、西安地域の表層地盤のS波速度は233m/secであることが分かった。

6. 2 古建築物の振動特性

(1) 西安城壁西門-城楼 (XM-2) の一次卓越振動数はNS方向には2.65Hz、西安城壁西門-箭楼 (XM-1) の一次卓越振動数は2.91Hzになっている。西安城壁上にある城楼と、城壁と独立している箭楼の振動特性を比較してみると、城壁と並行する(NS) 方向には建築物3Fの増幅率が同じ(5倍)であるが、城壁と鉛直する(EW) 方向には建築物3Fの増幅率が城楼の方は15倍になって、箭楼の方は10倍になっている。

(2) 西安城壁東門-城楼 (DM-2) の一次卓越振動数はNS方向には2.93Hz、西安城壁東門-箭楼 (DM-1) の一次卓越振動数は2.95Hzになっている。西安城壁と独立する箭楼は建築物4Fの増幅率がNS、EW方向とも同じ(8倍)である。西安城壁上の城楼は城壁と平行する方向には建築物3Fの増幅率が2倍であるが、城壁と鉛直する(EW) 方向には建築物3Fの増幅率が13倍になっている。

(3) 西安鐘楼 (ZHR) の一次卓越振動数はNS方向には4.7Hz、西安鼓楼 (GR) の一次卓越振動数は3.13Hzになっている。西安鐘楼 (ZHR) は建築物の水平断面形状が正方形になっており、建築物3Fの増幅率がNS、EW方向とも同じ(8倍)である。一方、西安鼓楼 (GR) の形状は長方形 (NS÷EW ≒ 3 : 5) となっており、建築物3Fの増幅率がNS方向には8.6倍、EW方向には建築物3Fの増幅率が7.4倍になっている。

(4) 西安鼓楼について、2次元有限要素解析を行った、常時微動解析の観測結果とよく一致し、解析条件、物性の設定などは妥当であるとする。これらの研究成果は、西安地域の地震防災のための基礎資料となると考える。

謝 辞

本研究は、東京都立大学大学院工学研究科と西安交通大学建築工程与力学学院との共同研究により実施したもので、西安交通大学 劉 奉銀講師他西安交通大学の先生および学生には、多大なご助言とご協力を頂いた。また、小田急建設株式会社には、受託研究として多大なご協力を頂いた。ここに記して、深い感謝の意を表す次第です。

参 考 文 献

- 1) 岩楯敏広、小田義也：強地震観測アレーがとらえたローカルサイトエフェクター地震観測データに基づく逗子地域の不整形表層地盤の地震応答特性一、総合都市研究、第80号、東京都立大学都市研究所、pp.41-51, 2003, 3
- 2) T. Iwatate, Y. Kobayashi, K. Nishimura, T. Domon, T. Nishikawa, K. Suzuki, H. Yamazaki: Seismic site response characteristics of Tokyo Metropolitan University (TMU) area, Memoirs of graduate school of engineering, Tokyo Metropolitan University, No.48, pp.5631-5646, 1998
- 3) 車愛蘭、岩楯敏広、兪茂宏、徐栓強：西安地域の地盤・構造物の地震時応答特性、第37回地盤工学研究発表会、2002
- 4) 劉俸銀、吉嶺充俊、車愛蘭、岩楯敏広：Test investigation on mechanical anisotropy of Q3 loess、中国岩土工程学会研究発表会、2002
- 5) 車 愛蘭、岩楯敏広：中国西部地域の地震応答特性に関する総合研究—西安地域の地盤・構造物の応答特性その1(常時微動観測による応答特性一、総合都市研究、第80号、東京都立大学都市研究所、pp.53-78, 2003, 3
- 6) Takahiro Iwatate, Study on seismic site response characteristics of Tokyo Metropolitan University (TMU) area, Proceeding of the second international symposium on the effect of surface geology on seismic motion, 12, 1998
- 7) 陕西省地図冊、西安地図出版社
- 8) 尾池和夫、中国の地震・日本の地震、東方書店、1979
- 9) 中村豊、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、1986
- 10) 兪茂宏、西安古城壁研究、西安交通大学出版社、1994
- 11) 方東平、宮本裕、岩崎正二、出戸秀明、兪茂宏、中国古代木構造物の動的及び耐震性について、構造工学論文集、日本土木工学会、Vol.38A、1992

Key Words (キー・ワード)

Xi'an Area (西安地域), Ancient Buildings (古建築物), Microtremor Observations (常時微動観測), Seismic Exploration Test (物理探査試験), Seismic Response Analyses (地震応答解析)

Study on the Seismic Characteristics of the Surface Ground and
Structures in Xi'an City :
The Dynamic Characteristics of the Ancient Buildings in Xi'an City Obtained from
Microtremor Observations and Seismic Response Analyses — Part 2 —

Ailan Che*, Takahiro Iwatate**, Mitsutoshi Yoshimine**, Yoshiya Oda** and M. H. Yu***

*Graduate Student, Tokyo Metropolitan University

**Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University

***School of Civil Engineering and Mechanics, Xi'an Jiaotong University Xi'an
Comprehensive Urban Studies, No.82, 2003, pp.73-92

In order to clarify the seismic characteristics of the surface ground and the ancient buildings of Xi'an city, the seismic exploration test, the microtremor observations and the seismic response analyses of the surface ground and the structures were performed.

The main results are shown as follows.

1. The surface ground of Xi'an city was formed from Loss soil and the shear velocity of the surface ground was 233m/s from the exploration tests.

The predominant frequencies of the surface ground can not obtained from the microtremor measurements. It can be considered that the condition of the surface is very hard and has not a sharp contrast to its substratum.

2. The natural frequencies of the ancient buildings (the west gate of Xi'an ancient city wall (Chenglou and Jianlou), the east gate of Xi'an ancient city wall (Chenglou and Jianlou), the Gulou (GR) and Zhonglou) of Xi'an city were obtained from the microtremor measurements.

Furthermore, the amplifications between the base and top floor of each building were obtained from the microtremor measurements. From the results, it can be concluded that amplifications are depended on the form and the basis of the buildings.

3. The results obtained from microtremor observations were agreed well with the calculated results from the 1-D and 2-D dynamic analyses. Moreover, the distributions of stress in the foundation of the ancient building (GR), due to the Hyogoken-Nanbu earthquake, were clarified.

This study will be useful for the seismological micro zoning and planning seismic disaster mitigation in Xi'an area.