

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）—

1. 研究背景、目的
2. 西安地域の自然条件および既往の地震
3. 常時微動観測
4. 表層地盤の応答特性の評価
5. 構造物の応答特性の解析的評価
6. まとめ
7. 問題点および今後の課題

車 愛 蘭*
岩 楯 敏 広**

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 敏広教授）と西安交通大学建築工程与土木学院（担当：俞 茂宏教授）とは、平成13年度～平成15年度の3年間の研究協定を結び、都市の防災に関する共同研究「中国西部地域の地震応答特性に関する研究」を実施中である。西安地域は、古くから中国の西北、中原、西南の交通に重要な役割を担ってきており、近年、中国西部大開発の国策の一環として、新しい都市の構築を図るため道路・鉄道、電気、水道、ガス等の整備・建設が行われている。

西安地域は、過去に陝西省華県地震、寧夏省海原地震などの大地震が数多く発生し、大きな地震被害を受けており、中国において日本と同様に地盤・構造物の耐震性に関する研究は、都市防災上極めて重要な研究テーマである。本共同研究は、このような背景により立案したものである。

平成13年度においては、①中国西安地域の過去の地震被害に関する文献調査、②西安交通大学及び周辺地域の微動観測と構造物および地盤応答特性の検討、③黄土の力学的特性に関する土質試験を実施した。

本報告では、①及び②の結果について述べる。

*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

1. 研究背景、目的

1. 1 研究背景

東京都立大学大学院工学研究科、土木工学専攻、地盤講座岩楯研究室では、1999年より西安交通大学建築工程学院と、1999年より、留学生の受け入れ（研究生、大学院生）や研究成果の発表・討議を通じ研究交流に努めてきた（図1、図2）。2001年6月に、土木工学専攻（担当：岩楯徹広教授）は西安交通大学建築工程与土木工学院（担当：俞茂宏教授）と学术交流に関する協定書を締結し、都市の防災に関する共同研究「中国西部地域の地震応答に関する研究」（研究期間：2001年～2003年）を実施中である。

西安地域は、古くから中国の西北、忠言、西南の交通に重要な役割を担ってきた。近年、中国西部大開発の国策の一環として、新しい都市の構築を図るため道路・鉄道・電気・水道・ガス等の整備・建設が急ピッチに進められている。

西安地域は、過去に陝西省華県地震、寧夏省海源地震などの大地震が発生し、大きな地震被害を受けており、日本同様、地盤・構造物の耐震性に関する研究、液状化に関する研究は、都市防災上きわめて重要な研究テーマである。本共同研究は、このような背景により立案し、実施している。

平成13年度、14年度においては、両大学が協力し、①中国西安地域の過去の地震被害に関する文献調査、②西安交通大学構内およびその周辺地域の地盤・構造物の常時微動観測と応答特性に関する検討、③現地での黄土の採取とその力学的特性(強度と変形)に関する室内土質試験を行い研究を進めた。

本論文では、これらの研究成果の内①と②の結果を述べる。

1. 2 研究目的

本研究は、西安交通大学構内およびその周辺の地盤および主要な構造物の常時微動観測を実施し、その応答特性について調べるとともに過去の地震

被害の調査分析により、地盤・構造物の耐震性安全性について検討・評価したもので、今後建設する構造物の耐震性や都市の防災の基礎資料を得ることを目的としている。

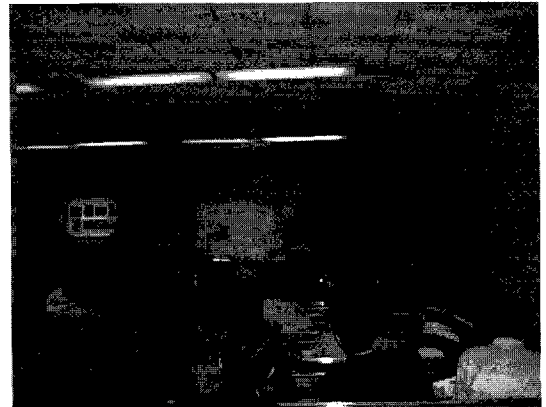


図1 H11年西安交通大学訪問



図2 H13年蘭州地震局訪問

2. 西安地域の自然条件および既往の地震

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662.1万人の大都市である。歴史で見ると、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担っている。陝西省は（緯度31°42′～39°35′N、経度105°29′～111°15′E）中国の内陸中部（図3）、黄河の中流一帯である。

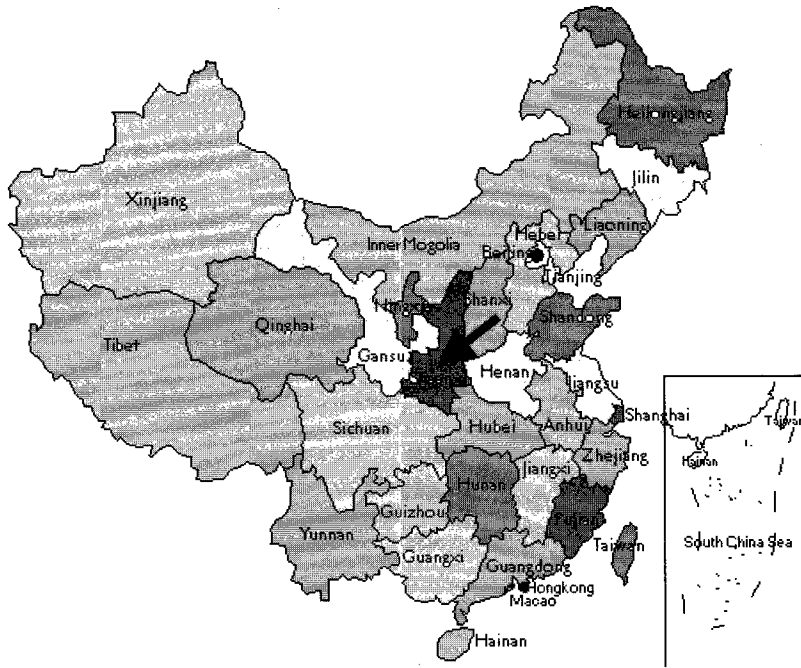


図3 中華人民共和国地図

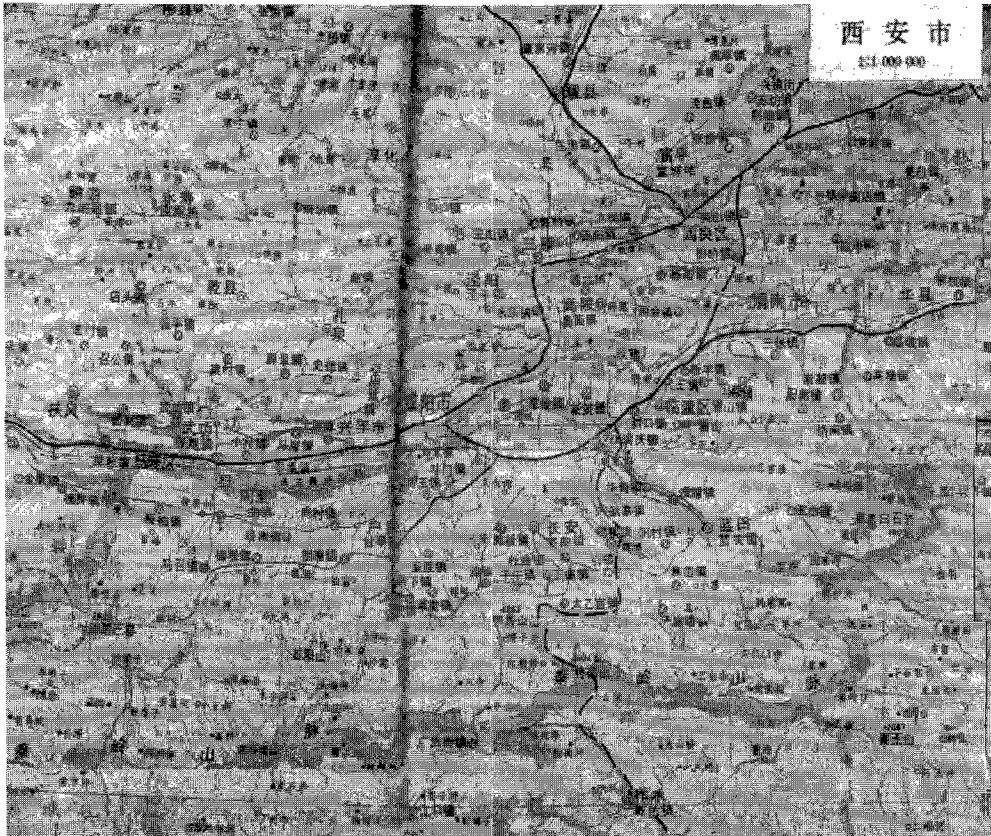


図4 西安の地形図 (1 : 1,000,000)

西安城区は陝西省中部の関中平原（渭河盆地）の中心にあり、その標高は400～700mである（図4）。

2. 2 既往の地震

(1) 中国の巨大地震

これまで、中国では、多くの巨大地震が発生している。中国（緯度25.0°～55.0°N、経度70.0°～13.0°E）で、1976年までの間に発生した $M \geq 8$ の地震の分布を図5に示す。また古くより地震の研究が進められ、中国の歴史資料によると、図6のような地震帯が存在する。

中国では、地震史料も豊富にあり、地震カタログとして「中国地震目録」としてまとめられている。表1は、このカタログより巨大地震をピックアップしたものであり、1303年～1976年に至るまで、約18件の巨大地震が発生している。炉霍地震（1976年、 $M=7.9$ ）と唐山地震（1976年、 $M=7.8$ ）を除くと、いずれの地震も $M \geq 8$ である。表1と図5から明らかなように、巨大地震は、山東、河北、山西、四川、雲南の各省の断層周辺で多く

発生しているが、新疆、西藏などの辺境においても一部発生している。これに対して、江蘇、浙江、湖北、湖南省など、湖の多い低地ではほとんど発生していない。

中国の震度階は、改正メルカリ震度階と同じであり、I～XIIの12階級に分かれている。

震度I～II：普通の人には無感で、地震計によってのみ記録される。

震度III：屋内にいる少数の人が軽い震動を感じる。

震度IV～V：程度の差はあるが人が皆感じる。屋内の物が揺れ、ほこりが落ちる。

震度VI：比較的古い家屋の多数の損害がある。一部の家屋が倒壊する。時には、湿った柔らかい地面に割れ目が生じる。一部の山岳地帯では、土や石が崩れ落ちる。

震度VII～VIII：大部分の家屋が破壊され、工場の高い煙突には割れ目ができる。少数の人畜が死傷する。

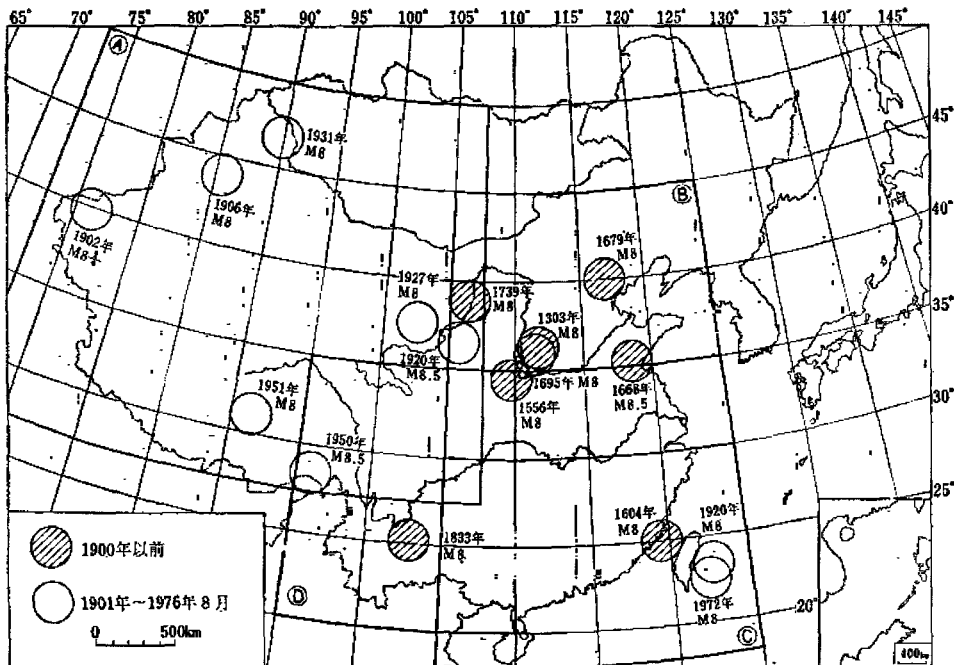
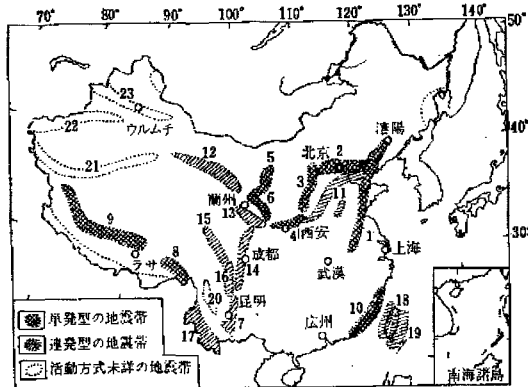


図5 1976年までの間に中国で発生した $M \geq 8$ の地震

表1 中国で発生した巨大地震

年月日	震源域	緯度	経度	M	記事
1303/ 9/17	山西洪洞趙城一帯	36.3° N	111.7° E	8.0	死200,000以上、山西省洪洞地震
1556/ 1/23	陝西華県	34.5	109.7	8.0	死820,000以上、陝西省華県地震
1604/12/29	福建泉州海外	25.0	119.5	8.0	広範囲に建物倒壊、地裂、湧水
1668/ 7/25	山東郟城莒県間	35.3	118.6	8.5	死数万、山東地震
1679/ 9/ 2	河北三河平谷	40.0	117.0	8.0	死27,000、河北省三河平谷地震
1695/ 5/18	山西臨汾襄陵	36.0	111.5	8.0	死100,000以上
1739/ 1/ 3	寧夏銀川平羅	38.8	106.5	8.0	死50,000以上、地割れよりの湧水で溺死者
1812/ 3/ 8	新疆伊寧東	43.7	83.0	7.5	人畜の死多数
1833/ 9/ 6	雲南嵩明楊林	25.2	103.0	8.0	死6,700
1902/ 8/22	新疆阿図什付近	39.7	76.2	8.2	巨大な地割れ
1906/12/23	新疆瑪納斯西南	43.5	85.0	8.0	圧死285
1920/12/16	寧夏海原	36.7	104.9	8.5	死234,000、寧夏自治区海原地震
1927/ 5/23	甘肅古浪	37.7	102.2	8.0	従来青海省地震とされていた、死数万
1931/ 8/11	新疆富蘊付近	47.1	89.8	8.0	死10,000
1950/ 8/15	西藏察隅	28.4	96.7	8.6	アッサム・チベット地震参照
1951/11/18	西藏当雄付近	31.1	91.4	8.0	
1973/ 2/ 6	四川炉霍	31.3	100.7	7.9	死2,175
1976/ 7/28	河北唐山	39.4	115.0	7.8	死243,000、河北省唐山地震



- 1. 郟城—廬江 2. 燕山 3. 山西 4. 渭河 5. 銀川
- 6. 六盤山 7. 滇東 8. チベット察隅 9. チベット中部
- 10. 東南沿海 11. 河北平原 12. 河西走廊 13. 天水—蘭州
- 14. 武都—馬辺 15. 康定—甘孜 16. 安寧河谷 17. 騰冲—澜滄
- 18. 台湾西部 19. 台湾東部 20. 滇西 21. タリム南縁
- 22. 南天山 23. 北天山の各地震帯

図6 中国の地震帯

震度IX～X：家屋がひどく破壊される。地面には、地割れが非常に多く派生する。湖やダムには大きな波が立つ。一部の鉄道のレールが曲がり、変形する。

震度XI～XII：家屋が全て倒壊する。地面の変形がひどく、巨大な自然災害となる。

(2) 西安地域およびその周辺の地震

・陝西省華県地震

史上最多の死者が出たとされるこの地震は、長安（現在の西安）の東方約80kmの渭河流域華県を中心にして、1556年1月23日に発生した。地震のマグニチュードは8.0、震源地は西安付近の華県で、震源の深さは24kmである。陝西、山西、甘肅、河北、河南、山東、安徽、湖北及び湖南の各省が影響を受け、その被害面積は900,000km²にも及んだ。図7は、華県地震の震度分布である。

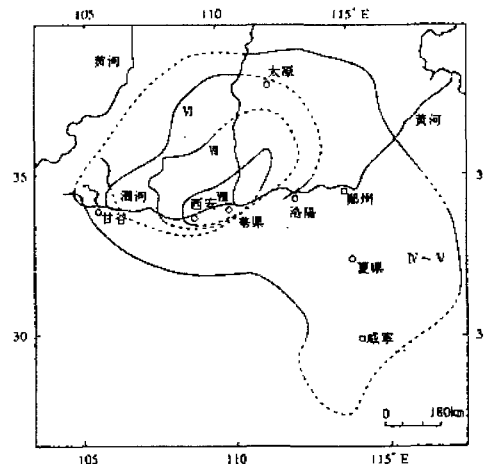


図7 陝西省華県地震の震度分布

震源地付近の華県や渭河では震度XI~XII、長安でIX~Xに達し、渭南及び長安で、住民のそれぞれ30~50%が死亡したとされている(身元の判明した死者だけでも82万人)。

この図から、沖積地に沿って震度が大きいことが分かる。地割れと噴水、地滑り等の他、河川に土砂が堆積し、流路変更などが著しく発生した。宏観前兆として、前震、地鳴り、光り物などが報告され、余震も数年にわたって続いたとされており、さらに、2年後には、華県は甚大な損害を出す大きな余震に見舞われていた。

・寧夏自治区海原地震

この地震は、1920年12月16日に発生したものであり、マグニチュードは8.5であった。3,000,000 km²の範囲で有感とされ、世界最大級の地震であった。震度分布は、図8に示す通りである。長さ200 kmにも及ぶ左横ずれ断層が出現したと報告されている。

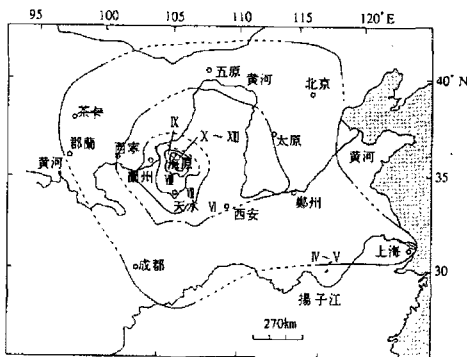


図8 寧夏自治区海原地震の震度分布

表2 寧夏自治区海原地震の死者数とその割合

県名	震度	死者数	死者パーセンテージ
海原	XI-XII	73,604	59
固原	IX	36,176	45
涇源	VIII-IX	31,933	40
隆德	IX	21,372	36
会寧	IX	13,942	20
静寧	IX	12,447	15
通渭	VIII-IX	10,206	15
庄浪	VIII	5,376	9
秦安	VIII	3,130	8
同心	VII-VIII	3,090	7
鎮原	VIII	3,005	8
天水	VIII	2,324	5
庆陽	VII	2,320	3
定西	VIII	1,669	4

この地震による人的被害は莫大で、死者総数234,117人、各県ごとの内訳は表2のようにになっている。最悪の海原県では、死亡率が59%に達している。この時西安地域は震度VIとなっている。

3. 常時微動観測

平成13年9月に西安交通大学構内および周辺地域を対象に地盤・構造物の常時微動観測を行い、観測データに基づいて地盤・構造物の応答特性(卓越振動数や振動モード等)について検討した。

3.1 常時微動観測の概要

(1) 常時微動データ

地盤は、地震以外にも色々な微小な外乱(人間が無感)により常に揺れている。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、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)と自然によるもの(風、波の震動)が考えられる。すなわち、地盤で観測された常時微動は、明確な震動特性を有する特定震動源からの震動では無い雑震動であり、地震動とは異なるが、実体波と表面波の特性が含まれているものと考えられる。

また、常時微動観測による地盤の応答特性は、必ずしも実地震によるものと同じでないが、微小ひずみレベルでは、地震動による特性とほぼ同じ特性を示すことが過去の研究⁹⁾で明らかとなっている。

一方、地表面で観測された常時微動観測波形を実体波とし、以下に示す仮定に従い、表層地盤の応答特性を水平成分と上下成分のスペクトル比(Hs/Vs)で評価した。

(a)基盤(岩盤)における常時微動データには方向性がなく、水平成分のスペクトル特性(Hb)と上下成分のスペクトル特性(Vb)同じと考える。すなわち $Hb = Vb$ となる。

(b)表層地盤の応答特性を、地表と基盤とのスペクトル比(伝達関数: $Hs/Hb, Vs/Vb$)で評価する。

(c)地表面における水平成分(Hs)は増幅されるが上下成分(Vs)は増幅されない。

すなわち、 $V_s=V_b$ となる。(a)と(c)より、 $H_b=V_b=V_s$ となる。

(d)表層地盤の応答特性(H_s/H_b)を(c)より、 H_s/V_s として評価できる。

また、構造物については、得られたデータスペクトル特性から評価した。

・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-35 F：VSE-15D型速度計、分析能16ビット、東京測振製）である。(図9、表3)



図12 行政楼 (4F)



図9 携帯用地震計

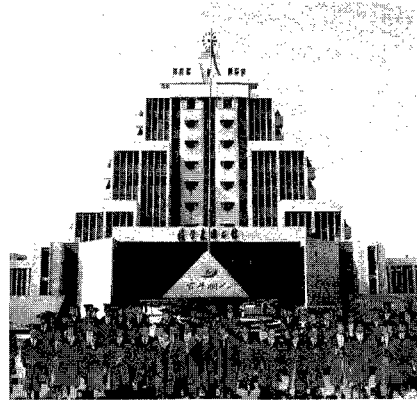


図13 新図書館 (12F)



図11 遼河



図14 青年教師公寓 (9F)

表3 携帯用地震計の仕様

型式	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 10 μ kine、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: 100 μ m, 10mm の2レンジ、分解能 0.01 μ m、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

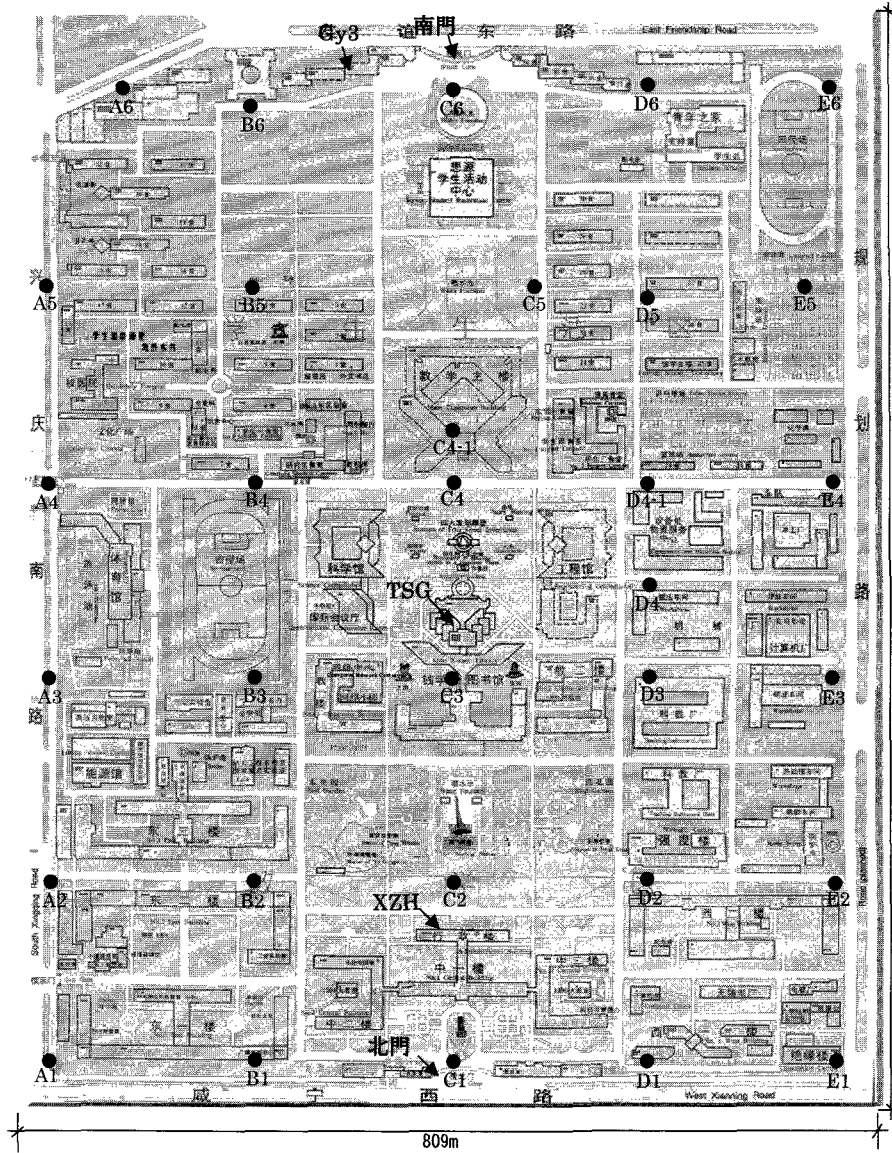


図10 交通大学構内観測点

3. 2 観測地域と観測点

常時微動は、西安交通大学構内および周辺の地盤 (38地点) と構造物 (4地点) を対象に行った。

(1) 地盤の観測点と観測方法

西安交通大学構内 (1084m×809m) を200m×200mメッシュで分割し、各メッシュ内で1点、合計30点を選んだ (図10)。また、交通大学から滻河 (図11) に向かって咸寧路に1000m間隔で 8点

選んだ。各観測点では、水平2方向 (NS成分、EW成分)、上下方向 (UD成分) を、同時に0.01秒サンプリングで5分間 (30000個) 観測した。

(2) 構造物の観測点と観測方法

西安交通大学の4Fの行政楼 (図12)、12Fの新図書館 (図13) および9Fの青年教師公寓 (図14) の代表的な階の床1カ所で、水平2成分、上下1成分観測した。観測方法は、各成分毎に別々に分けて、高さ方向に対して3カ所同時に観

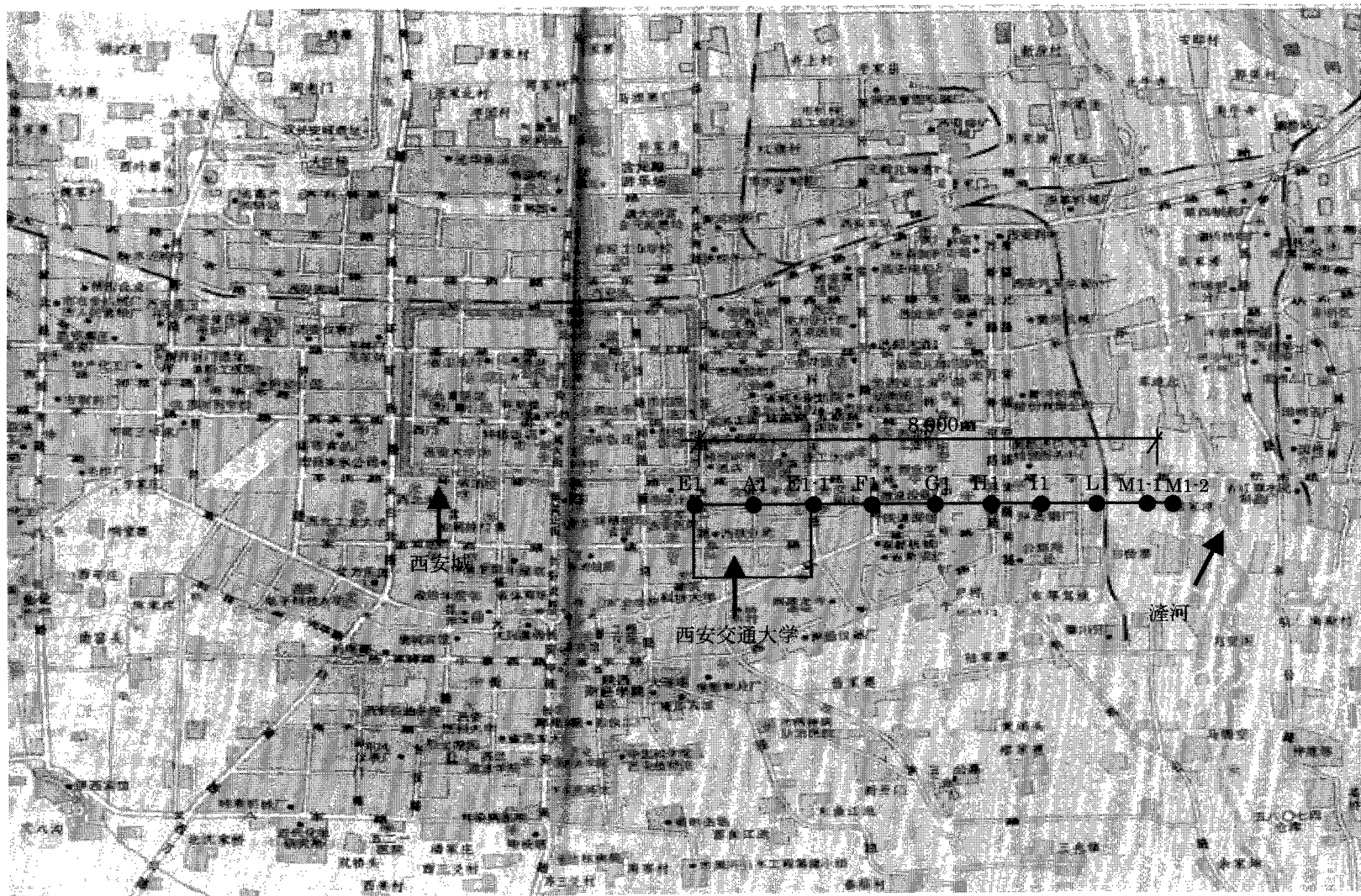


図15 咸寧路微動観測点

測し、各階の卓越振動数と応答（振動モード）を評価した。

3. 3 観測結果

(1)地盤データに関しては、解析用データ（1回）として各観測データ（データ数：5分間、30000個）(図16)の中から外乱の影響の少ない定常な部分を20.48秒間（データ数：2048個）(図17)を選択し、FFT解析により、各成分のフーリエスペクトル（NS, EW, UD）とスペクトル比（NS/UD, EW/UD, および $H/V=\sqrt{NS \cdot EW/UD}$ ）を算定した。これを5回行い、これらの結果を平均して、地盤の卓越振動数（f）を評価した。

(2)構造物データに関しては、地盤の解析と同様2048個のデータを用いて各成分のフーリエスペクトルを算定し、卓越振動数および振動モードを求めた。

4. 表層地盤の応答特性評価

(1) スペクトル特性

図18に、代表的な観測点（A3, B3）の各成分のフーリエスペクトル（5個の結果とその平均値）を示す。これらの図から、各点の卓越振動数と振幅を求めた。この場合、A3地点では、卓越振動数として、3.22Hz（NS成分）、3.03Hz（EW成分）、2.83Hz（UD成分）、振幅比として0.07mkine（NS成分）、0.04mkine（EW成分）、0.005（UD成分）となった。同様にして、各観測点の卓越振動数と振幅を求め、一覧表にして表4、表5に示す。また、図19、図20に、分布図を示した。また、図21に、すべての観測点の各成分に対し、卓越振動数（横軸）とスペクトル振幅（縦軸）の関係を示す。

この結果、西安交通大学構内の卓越振動数およびその周辺地盤の表層地盤の卓越振動数は、2.83Hz～3.22Hz（NS成分）、2.54Hz～3.81Hz（EW

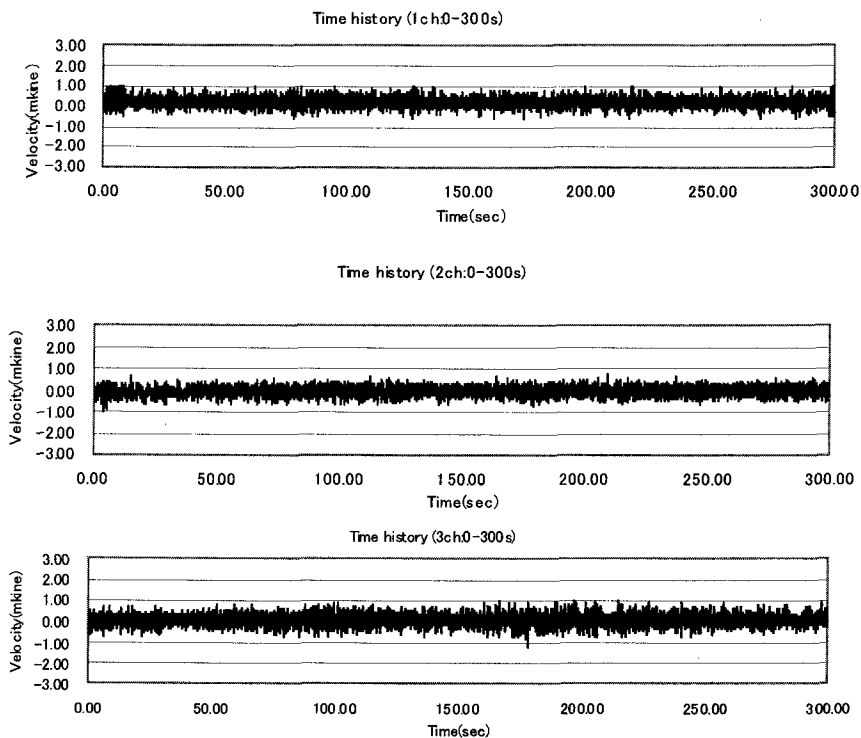


図16 常時微動観測波形5分間(A3)

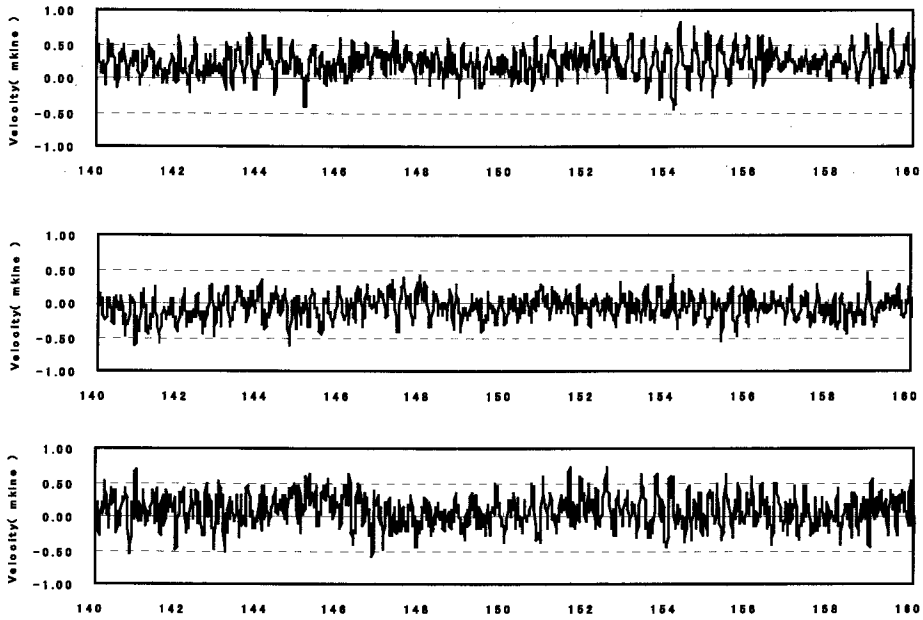


図17 常時微動観測波形20秒間(A3)

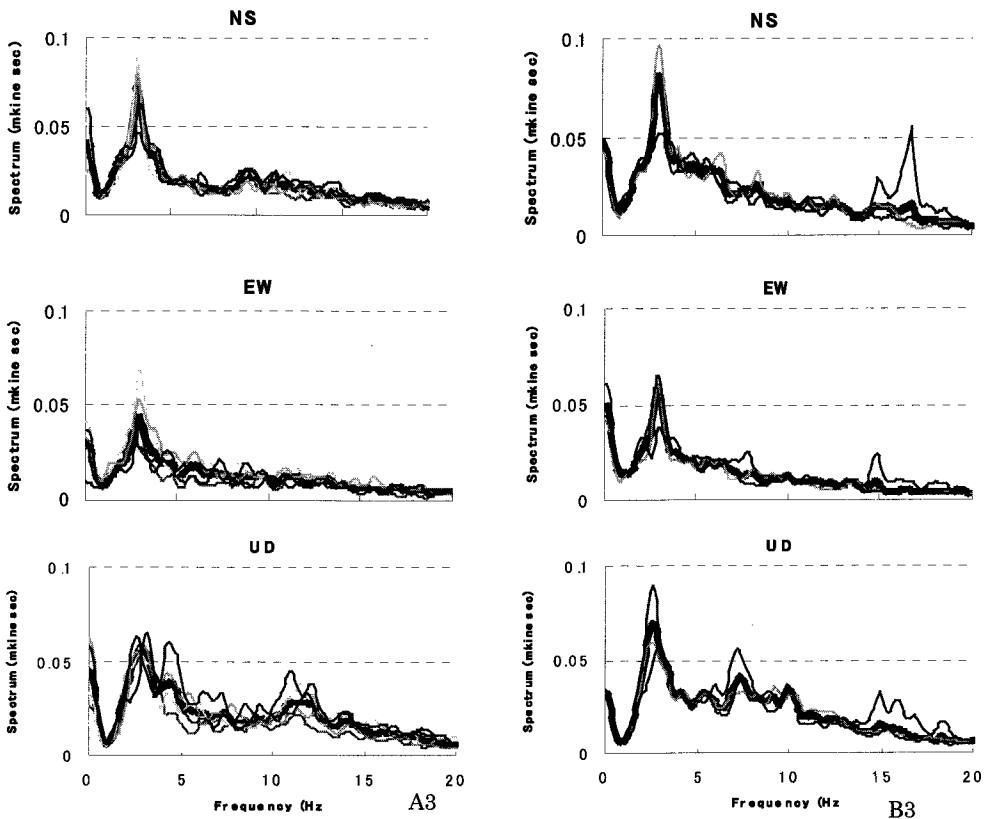


図18 常時微動観測波形のフーリエスペクトル

表4 スペクトル解析の卓越振動数一覧表

観測点	卓越振動数			観測点	卓越振動数		
	NS	EW	UD		NS	EW	UD
A 1	3.22	2.83	2.83	D 2	3.03	2.15	2.73
A 2	3.03	2.93	2.54	D 3	2.93	2.54	2.64
A 3	3.22	3.03	2.83	D 4	2.73	2.73	2.93
A 4	3.22	2.73	2.93	D 4-1	3.125	3.125	2.83
A 5	3.22	3.22	2.83	D 5	2.64	2.64	2.54
A 6	2.93	3.22	3.22	D 6	2.73	3.32	3.42
B 1	3.22	3.22	2.54	E 1	3.22	3.03	2.83
B 2	3.125	3.22	2.44	E 2	2.83	2.83	3.03
B 3	2.83	2.83	2.73	E 3	3.03	2.83	2.25
B 4	3.22	3.03	2.93	E 4	3.22	2.54	2.93
B 5	2.83	3.125	3.81	E 5	2.64	2.73	2.53
B 6	3.125	2.54	3.22	E 6	2.44	3.03	3.125
C 1	3.22	3.125	2.64	E 1-1	3.03	3.03	2.73
C 2	3.125	3.125	2.64	F 1	2.34	3.03	2.44
C 3	2.83	2.83	2.73	G 1	2.73	3.71	3.22
C 4	3.03	3.03	2.93	H 1	2.93	2.64	2.44
C 4-1	2.83	3.125	2.73	I 1	2.93	3.42	3.03
C 5	2.92	3.52	2.73	L 1	2.83	3.03	2.73
C 6	3.03	2.83	2.64	M 1-1	3.03	2.83	3.03
D 1	3.22	2.54	2.83	M 1-2	2.83	3.125	3.03

表5 スペクトル解析の振幅一覧表

観測点	振幅値 (mkine)			観測点	振幅値 (mkine)		
	NS	EW	UD		NS	EW	UD
A 1	0.08	0.06	0.07	D 2	0.05	0.05	0.06
A 2	0.06	0.06	0.06	D 3	0.04	0.04	0.06
A 3	0.07	0.04	0.05	D 4	0.04	0.04	0.05
A 4	0.06	0.06	0.05	D 4-1	0.06	0.06	0.06
A 5	0.14	0.07	0.06	D 5	0.06	0.06	0.06
A 6	0.15	0.14	0.12	D 6	0.04	0.04	0.07
B 1	0.06	0.08	0.05	E 1	0.05	0.03	0.05
B 2	0.07	0.05	0.06	E 2	0.08	0.06	0.07
B 3	0.08	0.06	0.07	E 3	0.07	0.06	0.06
B 4	0.06	0.07	0.08	E 4	0.05	0.04	0.06
B 5	0.1	0.07	0.07	E 5	0.05	0.06	0.06
B 6	0.12	0.07	0.12	E 6	0.07	0.05	0.09
C 1	0.12	0.04	0.05	E 1-1	0.05	0.04	0.06
C 2	0.05	0.06	0.07	F 1	0.05	0.06	0.08
C 3	0.06	0.06	0.06	G 1	0.09	0.07	0.14
C 4	0.04	0.03	0.04	H 1	0.06	0.04	0.04
C 4-1	0.06	0.04	0.09	I 1	0.05	0.04	0.04
C 5	0.08	0.06	0.06	L 1	0.04	0.04	0.05
C 6	0.05	0.05	0.07	M 1-1	0.04	0.04	0.03
D 1	0.07	0.04	0.05	M 1-2	0.06	0.07	0.05

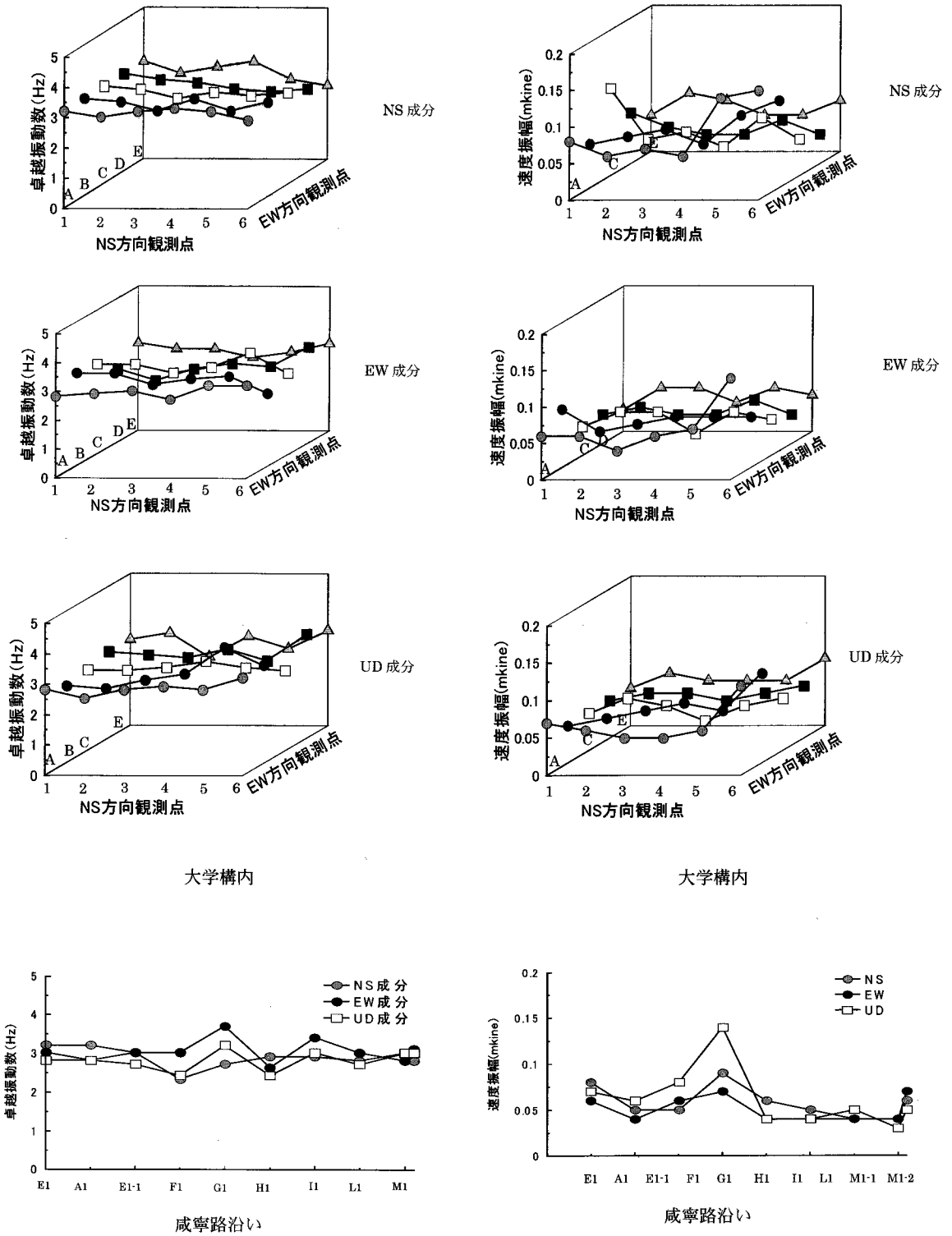


図19 地盤の卓越振動数の分布

図20 地盤の振幅の分布

成分)、2.54Hz~3.42Hz (UD成分) となり、また、振幅値も0.04~0.15 (NS方向)、0.03~0.14 (EW方向)、0.03~0.14 (UD方向) となっており、各成分の値に大きな差が見られない。平均すると、卓越振動数は 3 Hz、振幅は 0.07 でほぼ均質な地盤構造を示していると推定される。

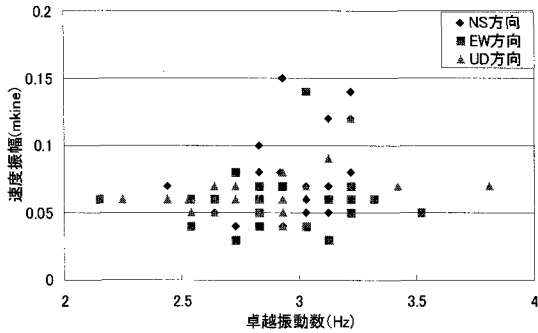


図21 周波数スペクトル分布図

造を示していると推定される。

(2) スペクトル比 (伝達関数) (NS/UD, EW/UD, H/V)

図22に観測点 (A 3, M 1-1) のスペクトル比を示す。これによると、1 Hz付近にピークが見られるが、振幅は最大で3程度であり、殆ど増幅されていない。他のすべての観測点のスペクトル比から得られた卓越振動数とその振幅を一覧表にして表6 (卓越振動数) 表7 (振幅) に示す。

この結果、地盤の卓越振動数として、若干のばらつきはあるが1.0Hz~1.5Hzが得られた。また、振幅については、かなりばらついている。振幅がばらついているのは、観測時間が異なるため、外乱のレベルに差があるためと考える。

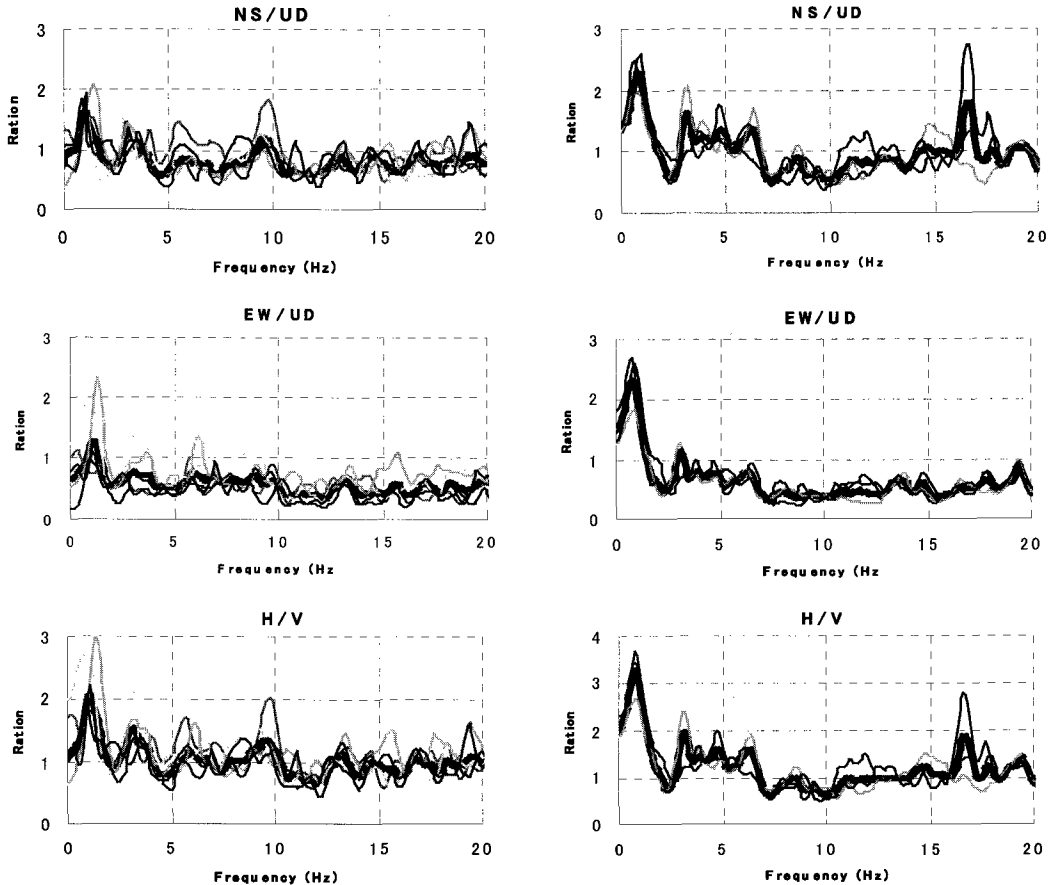


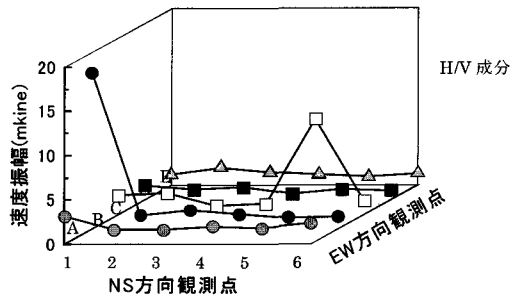
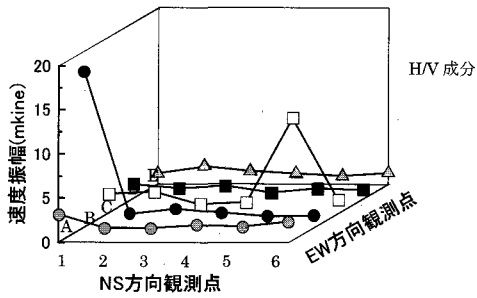
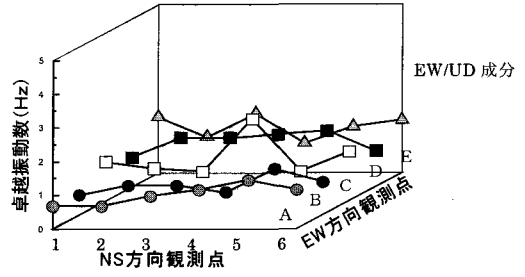
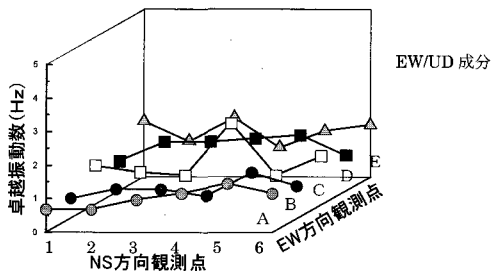
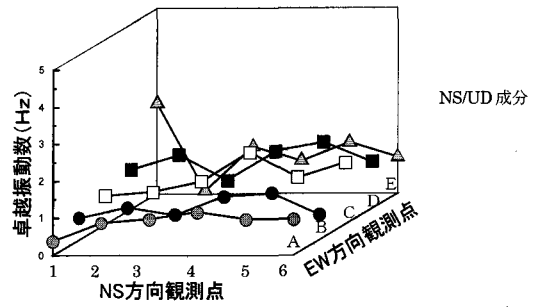
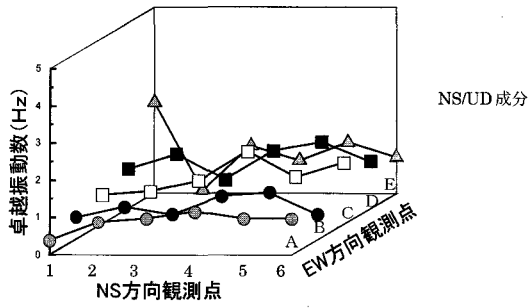
図22 常時微動観測波形の周波数スペクトル比

表6 周波数スペクトル解析の卓越振動数一覧表

観測点	卓越振動数			観測点	卓越振動数		
	NS/UD	EW/UD	H/V		NS/UD	EW/UD	H/V
A 1	0.68	0.39	0.68	D 2	1.46	1.46	1.37
A 2	0.68	0.88	1.07	D 3	1.46	0.78	0.88
A 3	0.98	0.98	0.98	D 4	1.56	1.56	1.46
A 4	1.17	1.17	1.37	D 4-1	0.87	1.17	0.98
A 5	1.46	0.98	1.27	D 5	1.66	1.8	1.86
A 6	1.17	0.98	1.17	D 6	1.07	1.27	1.17
B 1	0.59	0.59	0.59	E 1	1.66	2.44	1.66
B 2	0.88	0.88	0.88	E 2	1.07	0.078	0.88
B 3	0.88	0.68	0.98	E 3	1.76	1.27	1.76
B 4	0.68	1.17	1.07	E 4	0.88	0.88	0.78
B 5	1.37	1.27	1.27	E 5	1.37	1.37	1.56
B 6	0.98	0.68	0.78	E 6	1.56	0.98	0.68
C 1	1.17	0.78	0.78	E 1-1	1.07	1.17	1.27
C 2	0.97	0.88	1.07	F 1	1.07	0.78	0.88
C 3	0.88	1.17	0.78	G 1	0.98	0.68	0.98
C 4	2.44	1.95	2.54	H 1	0.88	1.07	0.98
C 4-1	1.95	1.86	1.86	I 1	0.88	1.46	1.07
C 5	0.88	1.27	0.88	L 1	0.88	1.17	1.17
C 6	1.46	1.66	1.46	M 1-1	0.98	2.34	0.98
D 1	0.88	1.07	0.88	M 1-2	1.37	1.37	1.27

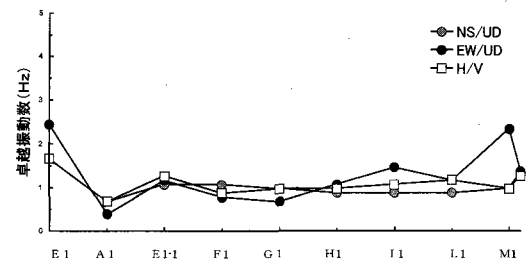
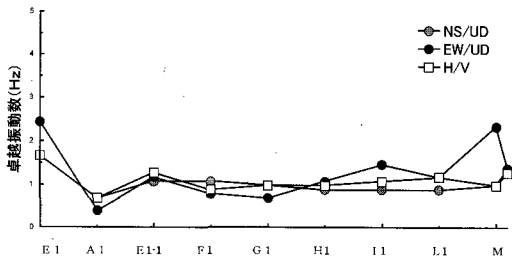
表7 周波数スペクトル解析の振幅一覧表

観測点	振幅値 (mkine)			観測点	振幅値 (mkine)		
	NS/UD	EW/UD	H/V		NS/UD	EW/UD	H/V
A 1	3.16	2.6	4	D 2	1.2	1.38	1.99
A 2	1.66	1.68	2.31	D 3	1.45	1.19	1.89
A 3	1.63	1.38	0.9	D 4	0.67	0.84	1.07
A 4	2.02	0.81	2.66	D 4-1	3.23	2.08	3.75
A 5	1.84	1.67	2.16	D 5	1.19	0.97	1.37
A 6	2.42	1.81	3.14	D 6	1.05	1.08	1.58
B 1	17.7	4.31	18.2	E 1	1.18	1.05	1.52
B 2	1.63	1.48	2.2	E 2	2	2.43	3.11
B 3	2.19	2.29	3.2	E 3	1.43	1.07	1.55
B 4	1.73	1.88	2.5	E 4	1.21	1.52	1.88
B 5	1.36	1.53	2.16	E 5	0.94	0.97	1.43
B 6	1.46	1.45	2.06	E 6	1.32	1.37	10.1
C 1	2.2	1.76	2.53	E 1-1	2.58	2.38	3.55
C 2	2.43	2.27	3.23	F 1	2.23	1.88	2.99
C 3	1.02	1.94	2.18	G 1	4.85	2.09	5.23
C 4	1.24	0.78	1.43	H 1	2.5	2.42	3.29
C 4-1	2.11	1.83	2.72	I 1	3.9	2.95	4.15
C 5	10.8	1.73	10.9	L 1	1.96	1.87	2.97
C 6	1.54	1.4	2.13	M 1-1	9.34	2.34	9.76
D 1	1.66	1.82	2.52	M 1-2	3.05	3.04	4.35



大学構内

大学構内



咸寧路沿い

咸寧路沿い

図23 地盤の卓越振動数の分布

図24 地盤の振幅比の分布

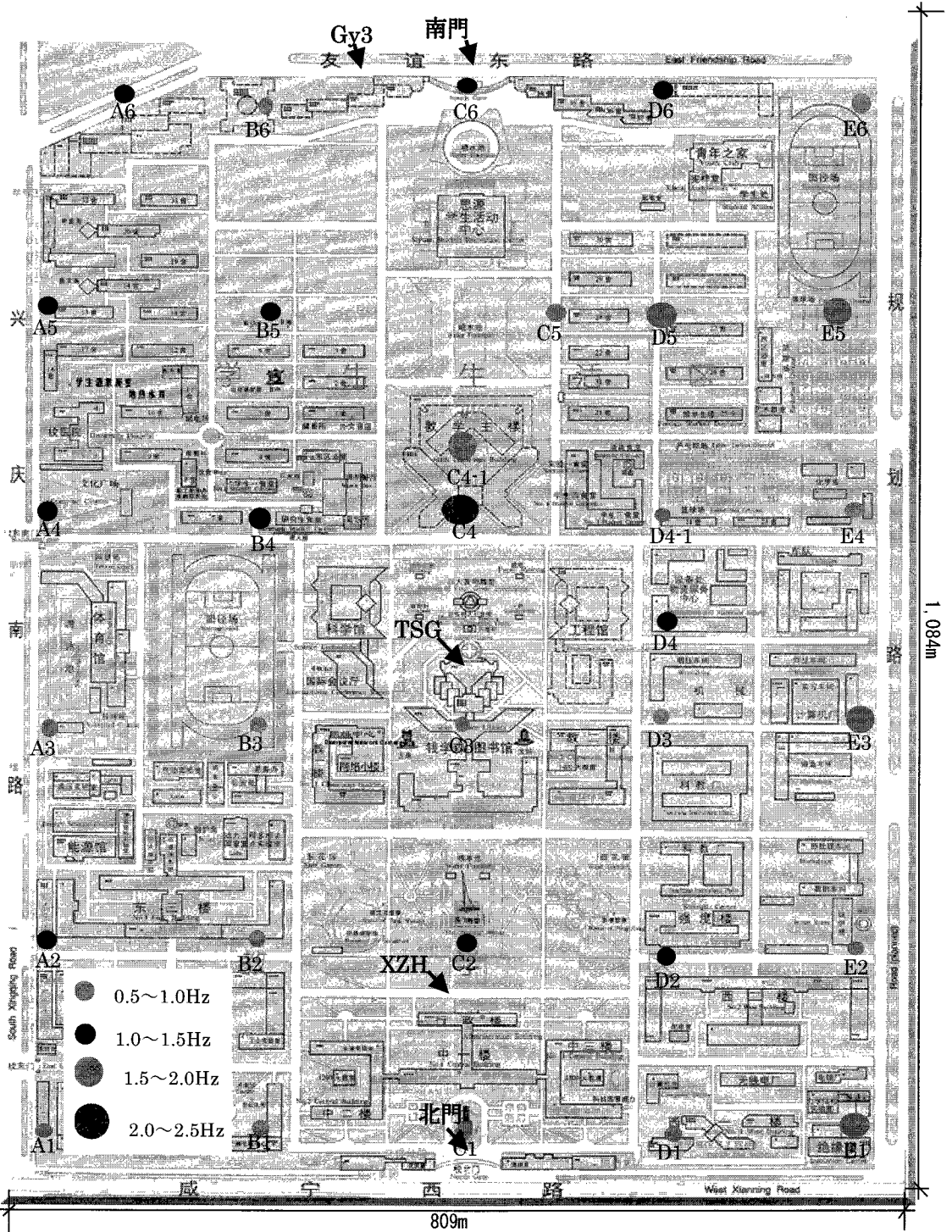


図25 地盤の卓越振動数の分布(H/V)

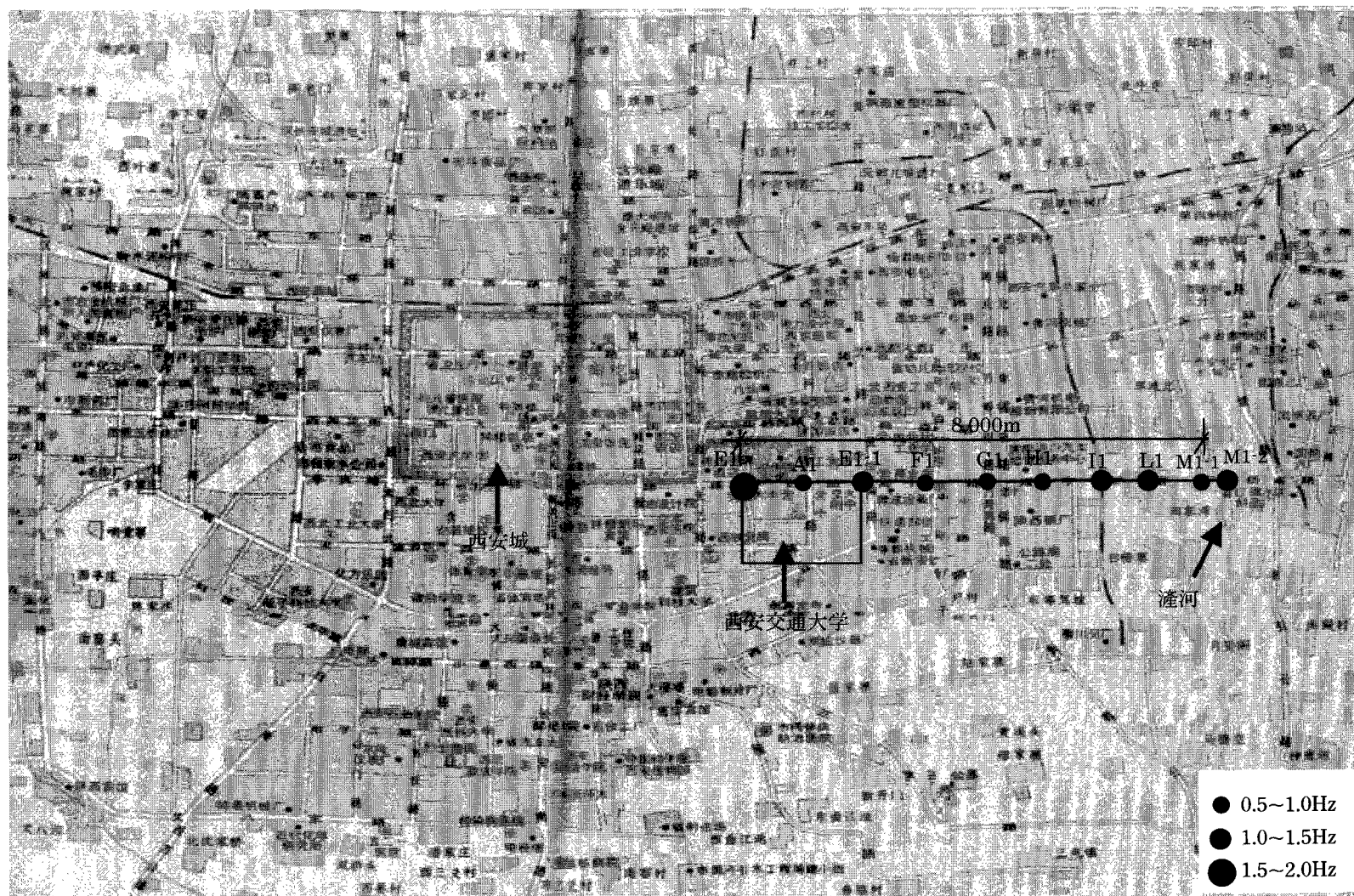


図26 地盤の振動数の分布(H/V)

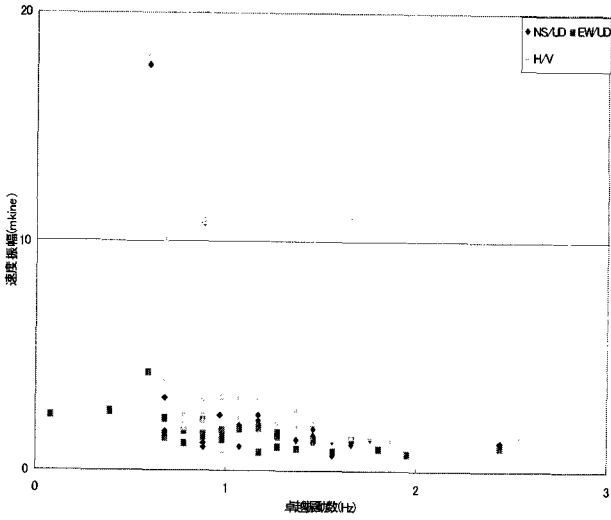


図27 地盤の卓越振動数の分布

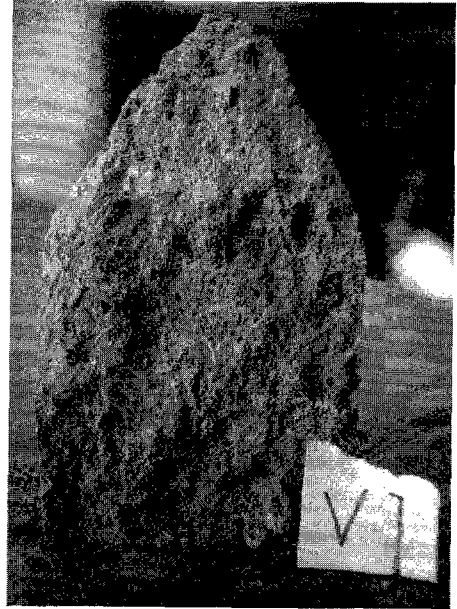


図28 Q3黄土

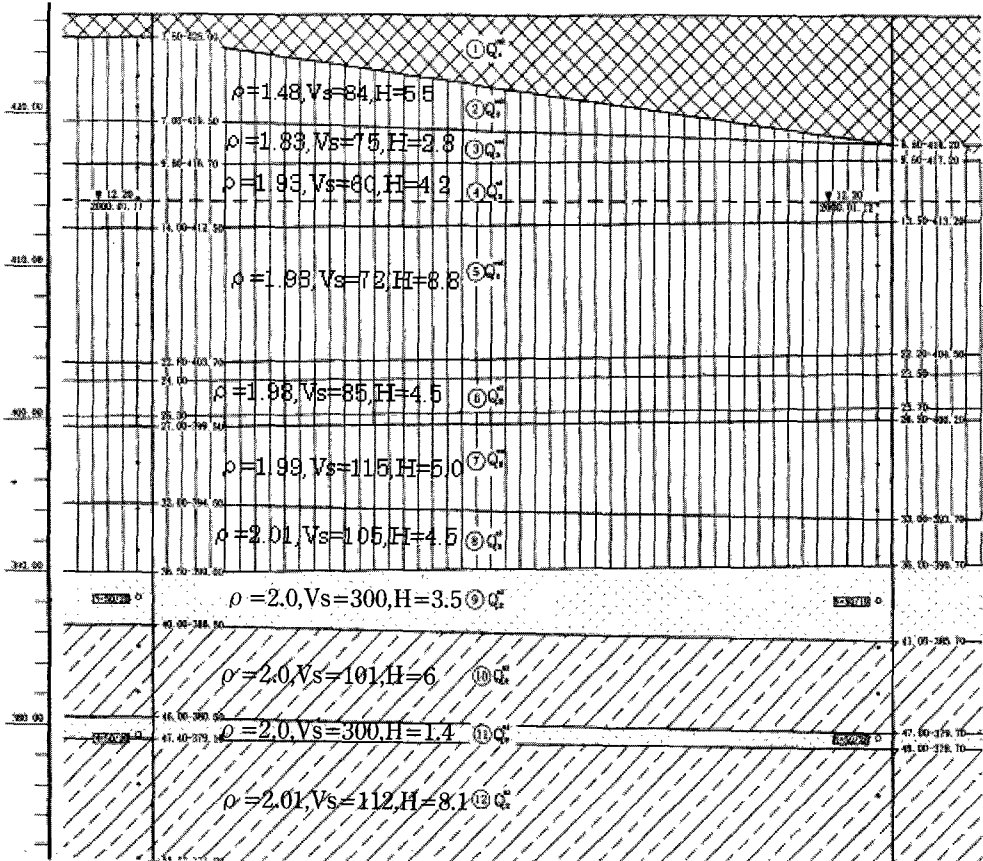


図29 地盤調査データ

(3) 1/4波長則による表層地盤層厚の算定

地震被害の想定は地震防災の基礎である。そこで表層地盤諸施設の地震動応答特性を詳しく把握しておく必要がある。表層地盤についてはボーリング調査資料などを基にした推定がよく行われるが、こうした調査には多くの人手と時間と莫大な経費がかかる。そこで、簡単に測定できる常時微動を使って、表層地盤の層厚を推定する。

地盤を水平成層構造と仮定した場合、4分の1波長則により、卓越振動数は以下の式で近似的に表される。

$$f = \frac{V_s}{4H} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、H は表層地盤の厚さ、 V_s はせん断波速度である。

スペクトル比を表層水平動の伝達関数とみなす方法は簡便であるが、表層地盤についての定義があいまいである。日本の地盤は硬い洪積層の上に軟弱な沖積層が載っている場合が多く、図31(a)のような基盤層と表面層を分けて考えているが、中国西安地域では、地盤が長い歴史のある風積黄土(図28)になって、明確な境界面がないと考え

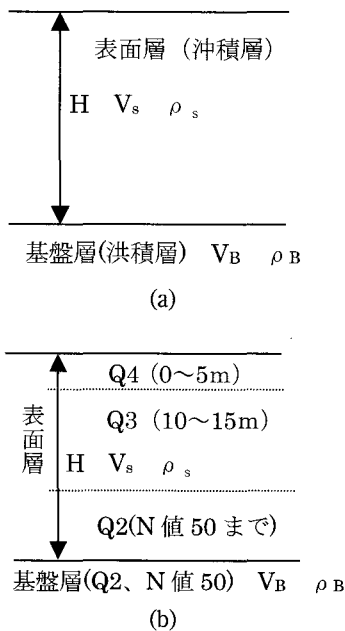
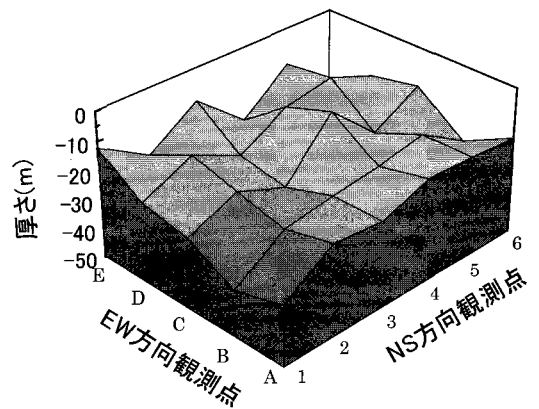


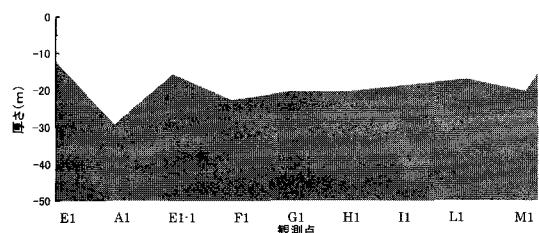
図30 2層構造地盤モデル

られる。ここでは交通大学構内にある学生寮の地盤調査データ(図29)を用いて、黄土(Loess soil)地盤特性を分析した。黄土は境界面が生成する年代によってQ1(早更新世地層、73~250万年)、Q2(中更新世地層、13~73万年)、Q3(晩更新世地層、1~13万年、10~15m)、Q4(全新世地層、0~1万年、0~5m)になっている。Q1とQ2は黄土の粒が細かく、中に砂礫あるいは砂が混在している。Q3とQ4は相対的に粗い黄土になっている。以上の結果を踏まえてここでは図30(b)のようなモデルを考えた。

表層地盤(標高一定)の V_s (=80m/s)と常時微動の伝達関数(H/V)から求めた卓越振動数(表6)を用いて、1式により表層厚さを算定した。その結果、大学構内の表層厚さは8m~34mに分布し、また咸寧路沿いでは、深いところ(30m)を除けば、ほぼ20m(一定)であることが分かった。以上の結果より求めた基盤面位置を図31に示す。



(a) 大学構内



(b) 咸寧路沿い

図31 表層地盤の厚さから推定した基盤面(Q2)

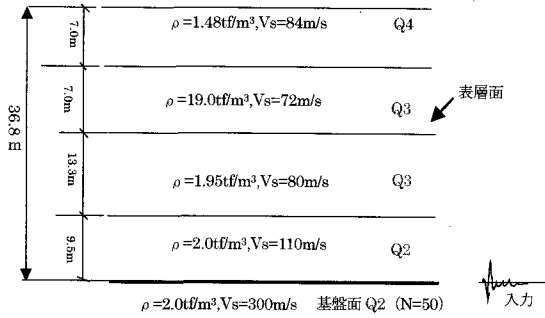


図32 地盤モデル

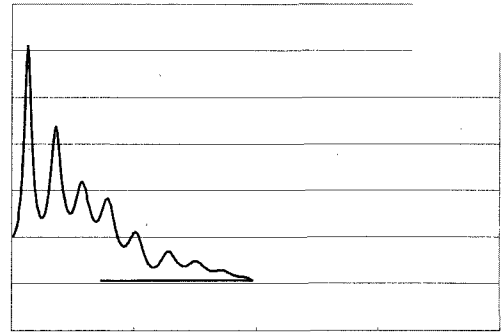


図33 観測値と解析値の比較

(4) 重複反射理論による地盤の応答特性の評価

a) ボーリングデータによる地盤モデルの作成
西安交通大学構内の常時微動観測点の内、ボーリングデータが得られている地点図 (31) を対象に、地盤モデル (図32) を作成した。

b) 重複反射理論による地盤の応答特性
重複反射理論により算定した地盤の卓越振動数は1.0Hzとなり常時微動観測データから算定した伝達関数を比較すると解析値と観測値は比較的に良く一致しており (図33)、西安交通大学および周辺地盤についてここに示した地盤モデルとして妥当と考える。

5. 構造物の応答特性の評価

解析手法：構造物の各階に観測した5分間 (30000個) のデータ (図34) の中から、ノイズの少ないと思われる2048個のデータを選んで、FFT解析によりフーリエスペクトルを算定した。

図35は代表的な観測点の常時微動観測波形のフーリエスペクトルの例を示す。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8に示す。図36に構造物の卓越振動数の分布を表す。この図から構造物の卓越振動

表8 スペクトル解析の卓越振動数および振幅一覧表

構造物	階数	卓越振動数 (Hz)			速度振幅 (Kine・sec)		
		NS	EW	UD	NS	EW	UD
TSG	1 F	1.95	1.66	2.93	0.95	0.72	1.03
	3 F	1.86	1.66	2.05	1.38	0.53	0.76
	5 F	1.95	1.76	2.05	1.92	1.07	0.42
	7 F	1.95	1.66	1.95	2.42	1.95	0.63
	9 F	1.95	1.66	2.64	3.11	3.86	0.64
	11 F	1.95	1.75	1.95	4.23	4.31	0.69
	12 F	1.95	1.66	2.15	4.3	4.57	0.81
GY3	1 F	2.83	2.93	2.93	1.14	1.11	0.91
	3 F	3.03	3.03	2.93	1.88	2.84	1.08
	5 F	2.64	3.22	3.125	3.06	2.16	0.63
	7 F	3.03	3.125	2.44	4.54	3.22	0.79
	9 F	3.03	2.93	3.125	6.14	4.9	0.78
XZH	1 F	4.39	3.91	3.32	1.48	0.79	0.82
	2 F	4.1	3.42	3.03	1.62	0.42	0.76
	3 F	4.1	4	3.125	1.55	0.89	0.62
	4 F	4.39	4.98	2.83	2.01	0.9	0.69

数と高さは比例していることがわかった。

式(2)に日本建築学会の提案式を示す。この式は、RC造の建物の1次固有振動数(f_1)と建物の高さ(H)の関係を示したものである。図37に、観測で得られた平均卓越振動数(共振点)と建物の高さの関係をプロットし式(2)による結果と比較して示した。常時微動観測結果と計算結果はほぼ対応している。

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0.015H} = \frac{66.7}{H} [\text{Hz}] \dots\dots\dots (2)$$

また、図38に、共振点における構造物の振動モードを示した。構造物は1次モードを示していることがわかった。

以上の結果、常時微動観測により、構造物の応答特性が概略把握出来た。

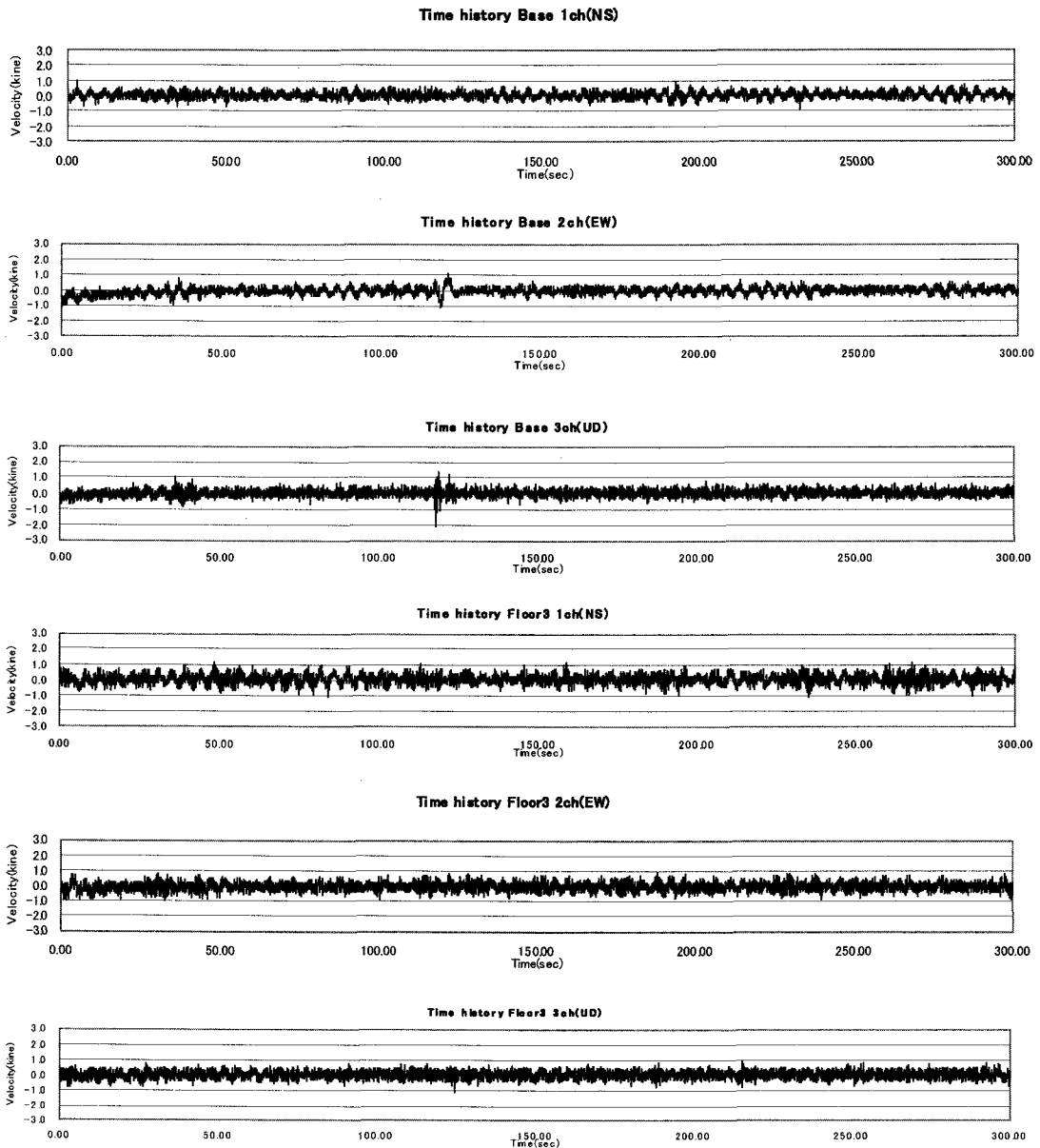


図34 常時微動観測波形5分間(TSG、1F&3F)

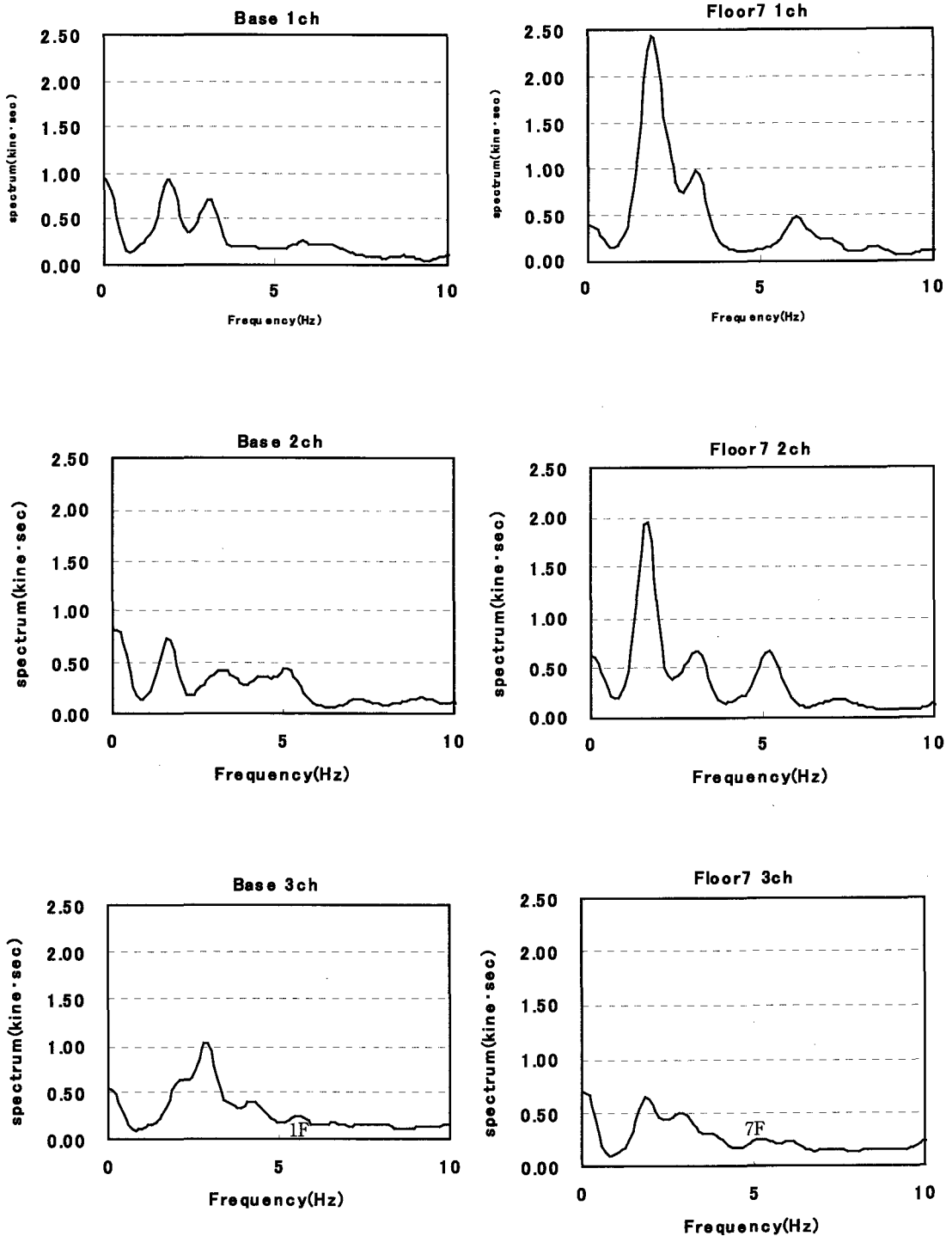


図35 常時微動観測波形のフーリエスペクトル(TSG、1F&7F)

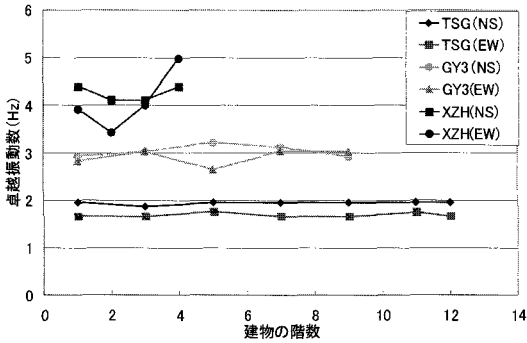


図36 構造物の卓越振動数の分布

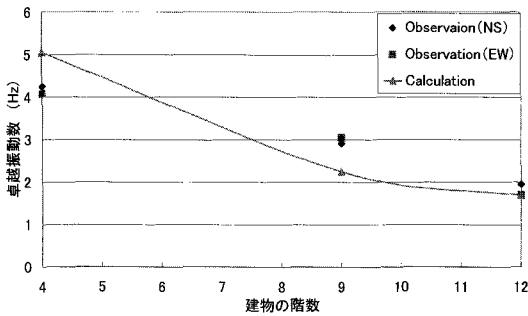


図37 構造物の卓越振動数と高さの関係

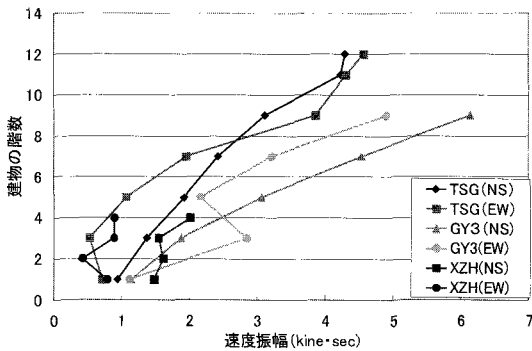


図38 構造物の応答と高さの関係

6. まとめ

6. 1 表層地盤の応答特性

- (1) 西安交通大学および周辺地盤の伝達関数 (H/V) から得られた卓越周波数には大きな差がなく、0.5 Hz~2.5 Hzとなった。

- (2) 4分の1波長則により、Q2のN値50までの地盤まで、推定した表層地盤の厚さは8m~34mになっている。
- (3) 西安交通大学および周辺地盤の表層地盤に対して、常時微動観測データと重覆反射理論による算定値は、ほぼ対応しており比較する結果、地盤モデル化はほぼ妥当と考える。

6. 2 構造物の応答特性

- (1) 構造物の応答特性常時微動観測により、西安市の幾つかの構造物の応答特性 (卓越振動数と振動モード) を把握できた。
- (2) これらの構造物の高さ卓越振動数の関係を建築学会の提案式により評価した結果、ほぼ対応することが分かった。

7. 問題点および今後の課題

常時微動観測を用いて、日本では硬い洪積層の上に軟弱な沖積層が堆積している地域において、表層地盤の応答特性の検討が多く行われている。しかし、中国西安地域のように風積地盤における、常時微動の適用性はまだ検証されていない。今回はじめて黄土地盤について常時観測を行った。常時微動の適用性の検討と中国西部地域の地盤のデータベース化として、今後表層が相対的に薄いと思われる蘭州でも、常時微動観測を行いたいと思っている。

今回黄土地盤の地形、ボーリング、せん断波速度などの資料が少ないため、表層地盤の厚さについて推定の結果になっているが、今後西安地域では、物理探査により地下構造探査を行いたい。

西安地域は中国の陝西省の政治、経済、文化の中心であり、歴史的には、西安地域には過去に陝西省華県地震、寧夏省海原地震など大きな地震が数多く発生し、地盤・構造物には大きな地震被害を受けてきた。近年、中国の西部大開発の一環により、西安地域も全長19.42kmの地下鉄 (西郊の新西北~東郊の紡織城) が施工される予定である。本研究は、2001年9月に西安交通大学および周辺

地域地盤と構造物の常時微動観測を行い、波形のスペクトル特性、伝達関数、地震の増幅特性等を調べることによって、地盤および代表的な構造物の耐震安全性を評価し、今後建設する構造物の耐震性の基礎資料を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 陕西省地图册、西安地图出版社
- 3) 尾池和夫、中国の地震・日本の地震、東方書店、1979
- 4) 中村豊、常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告、1988年4月
- 5) 中村豊、地表面の常時微動観測結果に基づく表層層厚と基盤S波速度の推定、第20回地震工学研究発表会、1989年7月
- 6) 大町達夫、常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用、土木学会論文集、No.489/I-27, pp.251-260, 1994.4
- 7) 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
- 8) 澤田義博、微動のH/V法の適用性に関する検討—濃尾平野における深部構造との比較—、物理探査学会第104回学術講演会論文集、2001
- 9) 岩楯敏広、久木崎隆、川畑次郎、逗子地域における表層地盤の地震応答特性に関する研究、第26回土木学会地震工学研究発表会、2001年8月

Key Words (キー・ワード)

Microtremore Measurement (常時微動観測), Seismic Characteristics of Surface Ground (表層地盤の応答特性), Seismic Characteristics of Structure (構造物の応答特性), Seismicity of Xi'an Area (西安地域の地震活動)

Dynamic Characteristics of the Surface Ground and Structures in Xi'an Area by Micro Tremor Observation

Ailan Che* and Takahiro Iwatate**

*Graduate Student, Tokyo Metropolitan University

**Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No.80, 2003, pp.53-78

This paper reports the international joint research between Tokyo Metropolitan University and Xi'an University on seismic response of the surface ground and the existing buildings in Xi'an area as follows.

1 The earthquake disasters of the ground and structures in Xi'an area due to old earthquake events were clarified by the survey of the existing papers and data.

2 Microtremor measurements were conducted on the surface ground and the existing building in Xi'an University campus and the surrounding area.

The dynamic properties (predominant frequency, the depth of the surface layer)of the ground, and the natural frequencies and vibration modes of the structures, were clarified.

From these studies, the basic data for earthquake disaster mitigation for Xi'an were obtained.