

台北市における高密度地震観測による 地盤増幅特性評価

清水善久¹・小金丸健一¹・末富岩雄²・山崎文雄³

¹正会員 東京ガス(株) 防災・供給センター (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

²正会員 博(工) 佐藤工業(株) 中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

³正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

1999年9月21日に台湾中部で発生した集集地震の際に、台北市で新SIセンサーによる高密度観測記録が得られた。最大地点でのSI値は30cm/sに近く、最大と最小で約3倍という観測地盤条件による違いが見られた。そのメカニズムを明らかにするために、常時微動の単点観測およびアレー観測を実施した。そして、地下構造と関連した地域性があり台北市は6つの地域に分類でき、周期1秒付近での増幅が大きい地域で大きなSI値が観測されることを明らかにした。また、地盤の卓越周期や平均S波速度とSI値増幅度の間に良い相関が見られることを示した。

Key Words : earthquake observation, site amplification, microtremor, Taipei city, SI value

1. はじめに

1999年9月21日未明に台湾中部で発生した集集地震は、約2300人の死者、約1万件の建物崩壊という甚大なる被害をもたらした。地震規模は、台湾中央気象局によるローカルマグニチュードで7.3、遠地の地震記録から評価されるモーメントマグニチュードで7.5~7.7である¹⁾。車籠埔断層の活動により地表地震断層が出現し、数mの段差が生じたために多くの構造物が崩壊したのが集集地震の大きな特徴である。

台湾での活断層は南北に伸びており、北部の断層が活動した場合には、台湾で第一の都市であり政治の中心でもある台北市に大きな被害を及ぼす可能性がある。地点の地質・地盤条件が地震動分布に大きく影響することは、1995年兵庫県南部地震など近年の被害地震でよく知られている。台北市での地震防災を考えるためには、まず台北市での揺れ易さ分布を知る必要がある。台北市は台北盆地の東部に位置し、約240km²の台北盆地のうち、台北市は80km²を占める。台北市に都市ガスを供給する大台北区ガスが、新SIセンサーにより大地震発生時に自動遮断するシステムを1999年6月より運用している。

集集地震の際には、新SIセンサーによる観測記録が16点で得られた。最大地点でのSI値は30cm/sに近く、地点によりSI値は大きく変動している。

台北市は震源から約160kmも離れており、盆地内では震源特性や伝播経路特性の影響による差異はほとんどないと考えられ、地盤増幅特性を反映したものと考えられる。

また、台湾では1991年以来中央気象局地震センター(CWB)により、台湾全土をカバーする600点以上の自由地盤上での強震観測(TSMIP)が行われている²⁾。台北盆地にも40点以上の観測点があり、この観測記録を用いた研究が継続的に行われている。Wen and Peng³⁾は3Hzまでの低い周波数を対象とし、Sokolovら⁴⁾は12Hzまでの工学的に興味ある範囲までを対象とした分析を行っている。そして、台北盆地内の地震動分布には大きな空間変動が見られ、それは地質・地盤構造と深く関連していることが報告されている。

本研究では、CWB観測点より高密度に配置されている新SIセンサーにより観測された集集地震の記録の分析から台北市の揺れ易さ分布について、ガスの感震遮断の指標であるSI値に着目して、従来より高密度・高精度な検討を行う。また、台湾中央気象局により1999年12月に公開された集集地震の記録²⁾も合わせて検討する。また、新SIセンサーによる弱震記録も加えて台北市内の揺れ易さ分布を把握し、弱震時と大地震時との揺れ易さの比較を行う。さらに、常時微動のH/Vスペクトルおよび微動アレー探査法により地盤構造を把握し、ポーリング情報

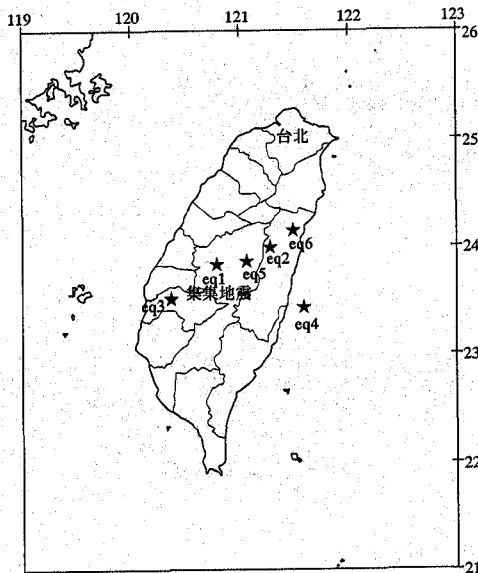


図-1 観測地震の震央位置

も収集して、揺れ易さ分布と地盤構造の関係について考察する。

2. 新 SI センサー記録による揺れ易さ分布

(1) 観測概要

台北市では約 80km² のエリアで台湾最大の都市ガス事業者である大台北区ガスが約 33 万戸の需要家に都市ガスを供給している。地震時の二次災害防止を目的として整圧器の感震遮断のために、新 SI センサーを全ガバナ（圧力を下げ、中圧導管と低圧導管をつなぐところ）31ヶ所に設置し、SI 値が 40cm/s 以上の場合に自動遮断するように設定している。なお、本論で用いる SI 値は日本でガス供給停止の判断等に用いられているものであり、次式で与えられる。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} SV(T) dT \quad (1)$$

ここで、 $SV(T)$ は減衰 20% の速度応答スペクトル、 T は周期である。

新 SI センサーは、超小型ピックアップと高性能小型 CPU、RAM を採用している。SI 値の大きい波形から 6 地震の記録が内部メモリに保存される。1/8cm/s² の分解能、100Hz サンプリングで 50 秒間、最大 ±2000cm/s² まで記録できる⁵⁾。

台北市内の新 SI センサーでは、9 月 21 日に発生した集集地震の後にも、いくつかの中小地震観測記録が得られている。これまでに観測された主な地震の諸元を表-1 に示す。eq1 は集集地震である。これらの震央位置を図-1 に示す。

表-1 観測地震の諸元

地震番号	発生日時	北緯	東経	M _L	深さ (km)
eq1	1999.9.21 1:47	23.85	120.81	7.3	7.0
eq2	1999.10.13 9:39	23.99	121.35	5.3	10.2
eq3	1999.10.22 10:19	23.51	120.40	6.4	12.1
eq4	1999.11.2 1:53	23.43	121.63	6.9	30.4
eq5	2000.6.11 2:23	23.89	121.11	6.7	10.2
eq6	2000.9.10 16:54	24.05	121.62	6.2	20.0

(2) 地質概要^{3),4)}

台北盆地は、南西、北西、東の 3 つのコーナーを有する三角形をなしている。東西方向に基隆河が流れ、淡水河が南から盆地中央を流れて北西の海へと流れている。北部・東部の丘陵部は中新世の砂岩及び頁岩の互層である。盆地内は主にシルト質粘土やシルト質砂から成る松山層に覆われている。その下に、Chingmei 層、Wuku 層、Panchiao 層があり、基盤岩に達する。基盤岩の S 波速度は 1200m/s であり、盆地西部で約 400m と最も深く、台北駅周辺で約 200m 程度である。Wen and Peng³⁾ は、中央気象局による中小地震観測記録や常時微動の分析より、周期 2 秒程度の長周期側では基盤が深くなる盆地西部での増幅が大きく、周期 0.5 秒程度の短周期側では、北部、東部、南部の盆地端部で増幅が大きいことを示している。さらに、数値解析により、上述の増幅特性は基盤構造と対応していることを示している。

(3) 集集地震における地震動分布

集集地震では、震央から 160km 離れた台北市内でも震度 4 級（台湾中央気象局）を記録し、新 SI センサーでは 16 地点で本震記録が観測された。新 SI センサーで測定された最大 SI 値は社子における 27.4cm/s であり、ガスの供給停止には至っておらず、大台北区ガスでの被害は支管 2 件のみと軽微なものであった。ガス漏洩に起因する二次災害は起きておらず、社子を大きく上回る地震動に見舞われた地点は台北市内にはなかったと考えられる。

図-2 に集集地震における大台北区ガスと中央気象局（TAP で始まるコードがつけられている）による観測 SI 値の分布、表-2 に大台北区ガスによる 6 地震における観測 SI 値を示す。集集地震の際に新 SI センサーの内でも最大大きな SI 値を観測したのは 27.4cm/s の社子であり、最大加速度は 139.6cm/s² である。SI 値の最小は圓山の 8.3cm/s である。その比は 3.3 となるが、この 2 点はわずか 1 ~ 2km しか離

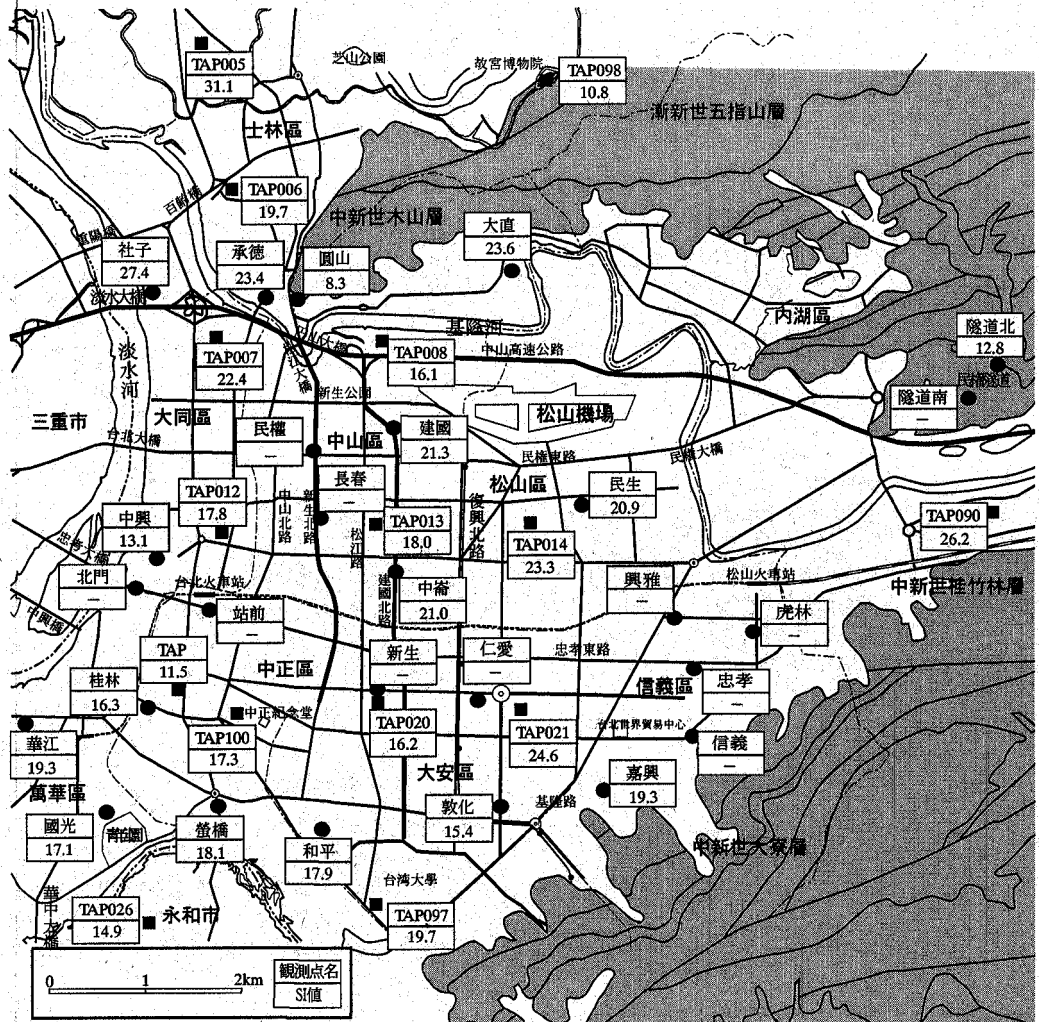


図-2 1999年集集地震の際の台北市における観測SI値の分布 (●:新SIセンサー, ■:中央気象局観測点)

れていない。2点での加速度波形を図-3に示す。社子では周期約1秒の波が繰り返し大きく増幅されている様子がわかる。図-4に2点の加速度応答スペクトル(減衰5%)の比較を示す。周期3秒以下の広い周期帯で社子の方が大きく、表層地盤による増幅を受け、大きなSI値が観測されたと考えられる。

2点のボーリング柱状図を図-5に示す。圓山は中新世木山層の砂岩及び頁岩の互層であり堅固であるのに対し、社子は2つの川に挟まれた軟弱な沖積地盤である。岩盤点と軟弱地盤が隣接し、軟弱地盤で大きな増幅が観測された例としては、1989年ロマプリエタ地震の際のイエナブレナ島(岩盤)とトレジャーアイランド(埋立地)の場合などがあり⁹⁾、同様に、社子では表層地盤の増幅を大きく受け、大きな地震動が観測されたと考えられる。

上述のように、増幅度を評価するための基準点と

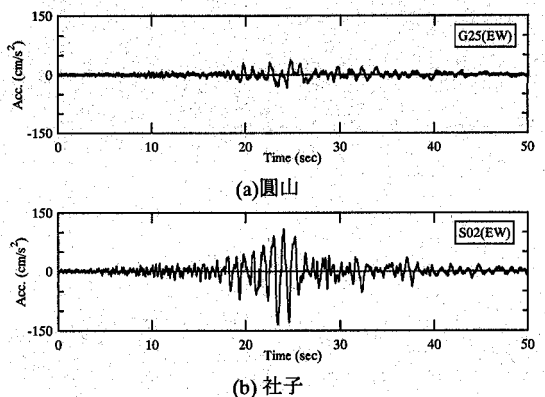


図-3 社子と圓山の加速度波形の比較

して圓山が最も適しているが、表-2に示すように欠測も多い。また、まだ地震記録が得られていない観測点もある。これは、交通振動や点検時のノイズ

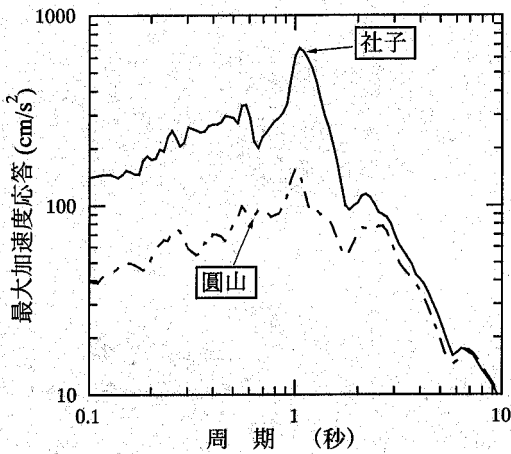


図-4 社子と圓山における加速度応答スペクトルの比較

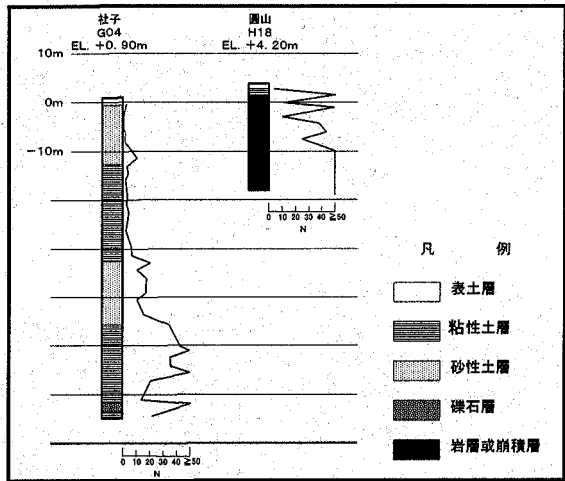


図-5 社子と圓山におけるボーリング柱状図

表-2 新 SI センサーによる観測 SI 値 (—: 欠測)

コード	観測点名	eq1	eq2	eq3	eq4	eq5	eq6
S02	社子基地	27.4	—	—	—	2.1	3.3
G01	大直	23.6	0.8	—	3.4	2.4	3.8
G02	興雅	—	—	—	—	—	—
G03	民生	20.9	—	—	4.8	—	—
G04	復興	—	—	0.8	3.4	2.6	5.1
G05	中崙	21.0	—	—	3.4	—	4.8
G06	虎林	—	1.0	1.1	6.4	5.1	7.6
G07	忠孝	—	—	—	6.4	5.8	7.6
G08	信義	—	0.9	—	4.9	5.4	5.6
G09	嘉興	19.3	—	0.8	4.3	3.3	—
G10	敦化	15.4	0.8	0.6	3.0	2.9	4.5
G11	仁愛	—	0.9	0.8	3.8	2.9	5.6
G12	新生	—	—	—	—	—	—
G13	和平	17.9	—	—	4.8	3.1	7.0
G14	螢橋	18.1	0.9	0.8	4.3	3.0	5.4
G15	國光	17.1	0.9	0.5	4.0	3.0	3.8
G16	桂林	16.3	0.8	—	3.0	2.4	3.8
G17	華江	19.3	—	—	4.0	2.1	—
G18	北門	—	0.6	—	3.4	2.0	3.4
G19	站前	—	0.4	—	1.8	—	—
G20	建國	21.3	—	0.9	4.1	2.5	4.1
G21	民權	—	—	—	3.8	2.4	—
G22	長春	—	0.9	0.6	3.9	—	—
G23	中興	13.1	0.5	0.5	2.5	1.5	2.3
G24	承德	23.4	—	—	3.5	—	—
G25	圓山	8.3	—	—	—	0.6	—
E01	隧道北	12.8	—	0.4	1.6	1.6	2.0
E02	隧道南	—	—	—	—	—	—

が大きいことが主因である。以後の検討では、基準点として圓山を優先するものの、中小地震においては丘陵上にあり欠測が少ない隧道北を代用する。

加速度応答スペクトル(減衰 5%)の分布を図-6に示す。社子、大直、嘉興等、盆地端部で周期 1 秒付近におけるピークが明瞭であるのに対し、中興、中崙等、盆地中央の基盤が深いところではピークが明瞭でない。この周波数特性の差異が SI 値と関連していることは明らかであり、この周波数特性は台北市の地盤構造に起因する地盤増幅特性を反映したものである。したがって、台北市の地盤構造を把握し、それと地盤増幅特性の関係を明らかにする必要がある。

(4) 中規模地震における揺れ易さ

地震防災システムが有効に機能するためには精度良く被害分布を推定することが必須であり、地震動分布の推定手法と地震動と対象とする構造物の被害率との被害関数が鍵を握っている。即時に精度良く地震動分布を推定するためには、表層地盤特性の違いに起因する揺れ易さの差異を適切に評価することが重要である。実現は複雑であり多点での観測記録を蓄積し、観測記録に基づき SI 値の増幅度を定めることが高精度評価のためには必要である⁷⁾。その際、中小地震観測記録から定めた増幅度を将来起こる大地震へ適用した時の精度が課題となる。末富ら⁸⁾は、SI 値の増幅度を 1995 年兵庫県南部地震等の観測記録や地震応答解析で検証し、中小地震観測記録から求めた増幅度を 30~60cm/s 程度までは適用できるという結果を示している。大規模地震である集集地震において 30cm/s に近い値が得られているので、本論文ではこの適用性について検討する。

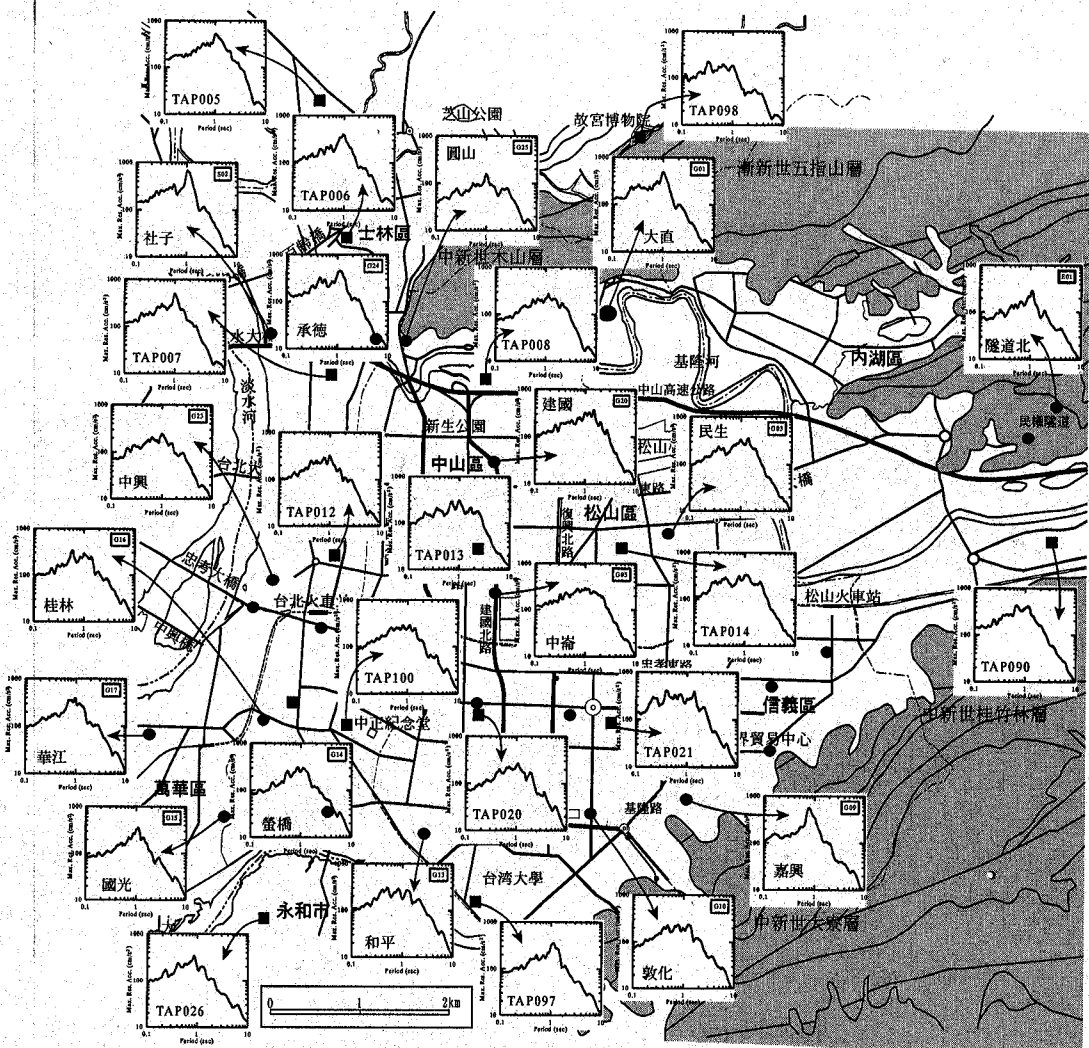


図-6 集集地震における観測記録の加速度応答スペクトル（減衰5%）の分布

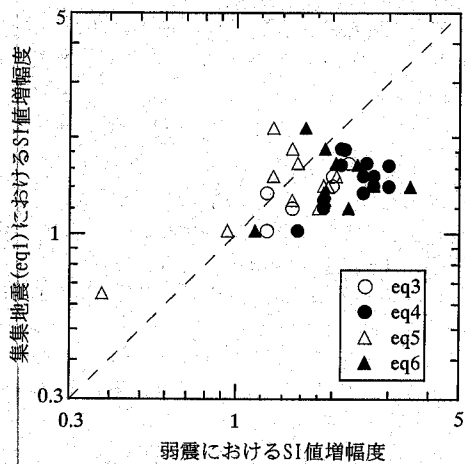


図-7 集集地震と弱震におけるSI値増幅度の関係

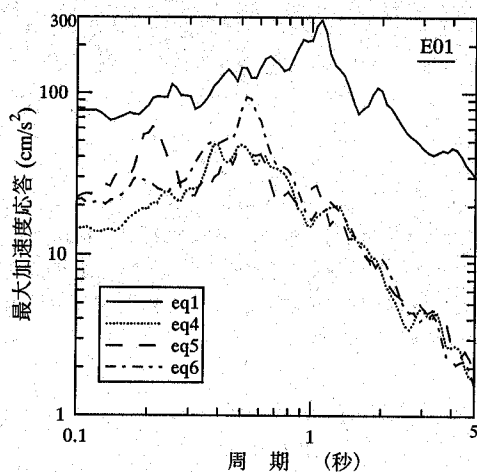


図-8 基準点（隧道北）でのスペクトル特性

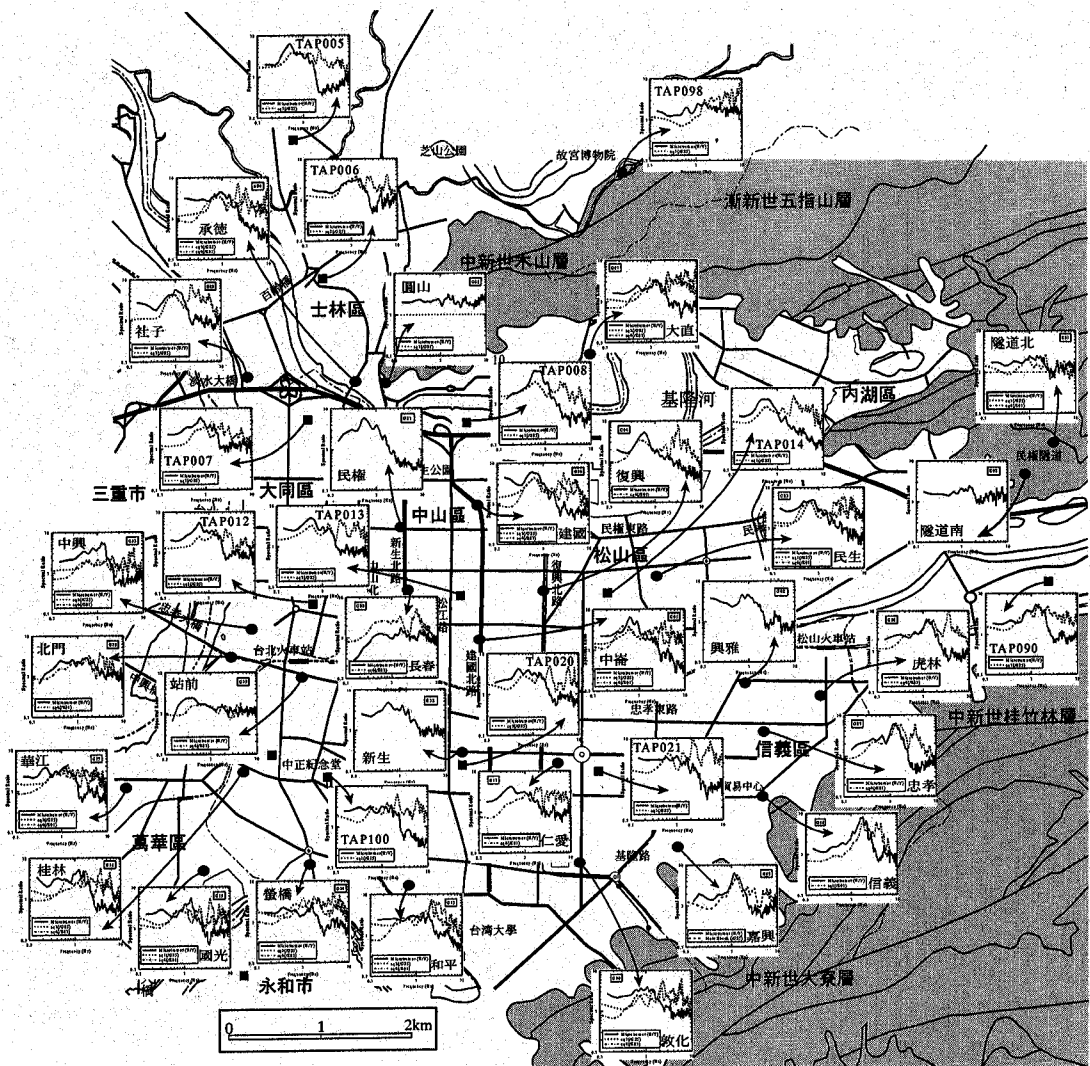


図-9 台北市内における常時微動の H/V スペクトルと地震動の基準点に対するスペクトル比の分布

図-7 は、隧道北(E01)を基準点として算出した SI 値増幅度を、大地震と中規模地震で比較したものである。図-8 に基準とした隧道北における加速度応答スペクトル（減衰 5%，水平 2 成分合成）を示す。集集地震(eq1)では周期 1 秒付近が卓越しているのに対し、他の地震では周期 0.5~0.6 秒付近以下が卓越している。大規模地震での入力地震動では、このように中規模地震よりも長い周期成分が卓越することは当然予測されることであり、SI 値のような代表値の増幅度はその影響を受ける。図-7 において比例関係の傾向にあるものの、地震によって 1:1 に比べ大小の傾向が見られる。図-8 において、中規模の 3 地震 (eq4, eq5, eq6) のスペクトル特性、大きさとも大きな違いはないが、eq6 では周期 0.5 秒付近が特に卓越するのに対し、eq5 では周期 0.2 秒付近

が卓越している。震源特性や伝播経路特性の差異の影響と思われる、この差異が、図-7 に反映されていると考えられる。しかしながら、全体的には比例関係にあり、また表-2 に示したように地点の SI 値の大小関係が大きく変化することはなく、中規模地震での観測値を大規模地震へ適用することは妥当と考えられるので、中規模地震で得られる地盤増幅度は大変有用と考えられる。

3. 常時微動の H/V スペクトルの特性

台北市内の地震観測点で常時微動観測を実施し、地盤構造と揺れ易さの関係について検討する。携帯用振動計（固有周期 1 秒）を用いて計測する。計測は日中に実施しており、自動車等の交通量が多い。

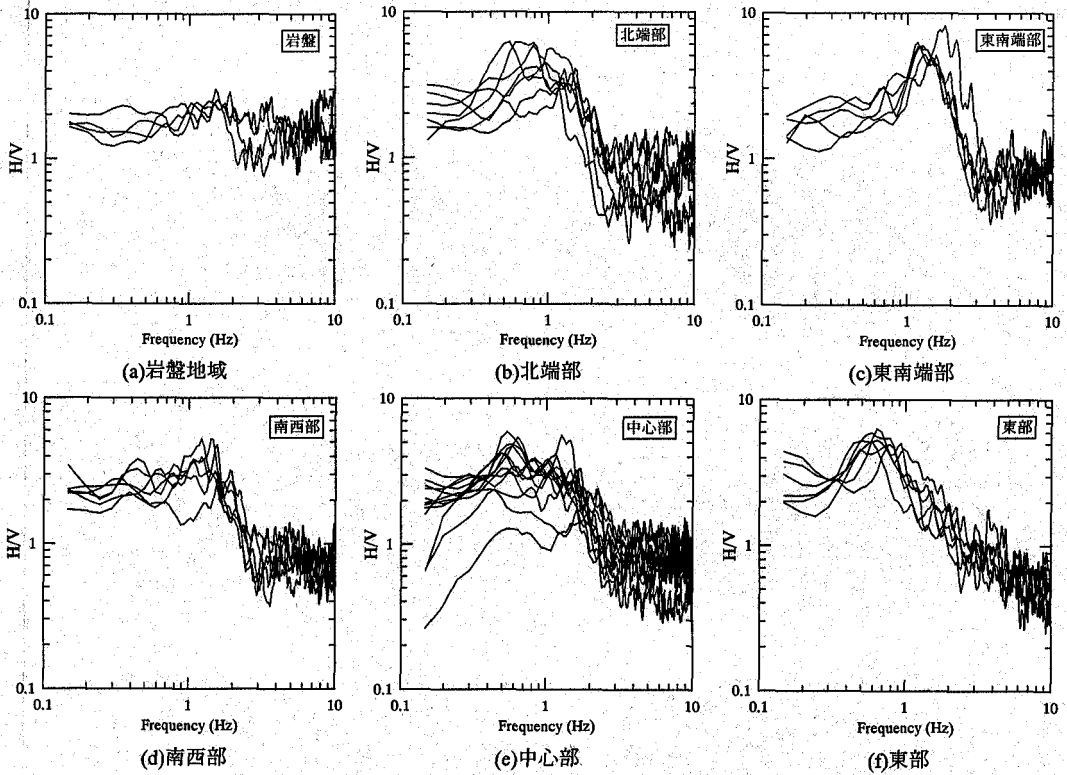


図-10 6つの地域における常時微動のH/Vスペクトル

水平成分と鉛直成分のスペクトル比をとる中村⁹⁾の方法を用いることにより、日変化が小さい安定した卓越周波数の評価を行う。計測を行った3分間の記録から比較的定常な20.48秒の区間を5つ取り出して、バンド幅0.2HzのParzenウィンドウにより平滑化したフーリエスペクトルを算出し、水平成分と鉛直成分の比(H/Vスペクトル)を求める。そして、その相乗平均を算出する。なお、水平成分のフーリエ・スペクトルを算出する際には、中村¹⁰⁾によるベクトルスペクトルを用いて水平2成分を合成する。

各点で得られた平均H/Vスペクトルを図-9に示す。また、地震観測記録による増幅関数として、eq1について圓山(G25)を基準点としたスペクトル比を点線で、eq4について隧道北(E01)を基準点としたスペクトル比を一点鎖線で重ねて示す。

図-9より、地震動のスペクトル比(点線・一点鎖線)と微動のH/Vスペクトル(実線)の一次の卓越周波数は概ね対応していることがわかる。微動のH/VスペクトルをそのままS波の伝達関数とは見なせないとは言え、両者の一次の卓越周波数は良く対応し、スペクトル比の値も相対関係は良く表される場合が多い^{11),12)}。そこで、地震記録が得られていない地点があること、さらに詳細なゾーニングが可能

となることから、常時微動のH/Vスペクトルの形状から分類を行う。

H/Vスペクトルの形状には地域性が見られ、その形状から、6つの地域、

- 1) 岩盤地域 (圓山, 隧道北, 隧道南, TAP098)
- 2) 北側端部 (社子, 大直, 承德, TAP005, TAP006, TAP007, TAP008)
- 3) 東南端部 (虎林, 忠孝, 信義, 嘉興, TAP090)
- 4) 南西部 (敦化, 和平, 螢橋, 國光, 桂林, 華江)
- 5) 中心部 (仁愛, 新生, 北門, 站前, 民權, 長春, 中興, TAP012, TAP013, TAP020, TAP021, TAP100)
- 6) 東部 (興雅, 民生, 復興, 中崙, 建國, TAP014)

に台北市域を分類できる。それぞれの地域における常時微動のH/Vスペクトルを図-10に示す。地域による形状の違いが明瞭に見られる。岩盤地域では、明瞭なピークは見られず、観測されるSI値は小さい。集集地震(eq1)で大きなSI値が観測された社子, TAP005等、北端部では0.5~1Hz(周期1~2秒)で増幅が大きい。これにより集集地震の際に大きなSI値が観測されたと考えられる。東南端部では山地境界に平行に観測点が並んでおり、1~2Hz(周期

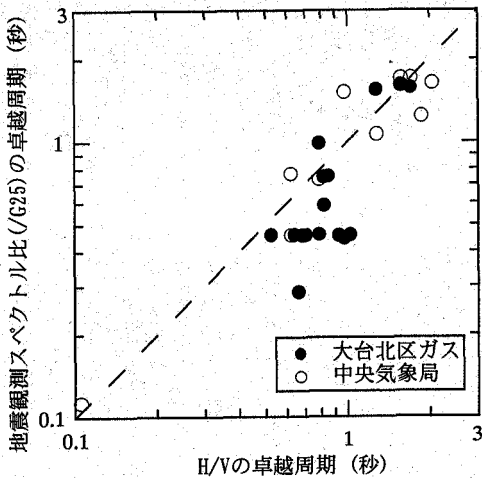


図-11 地震動と微動の卓越周期の関係

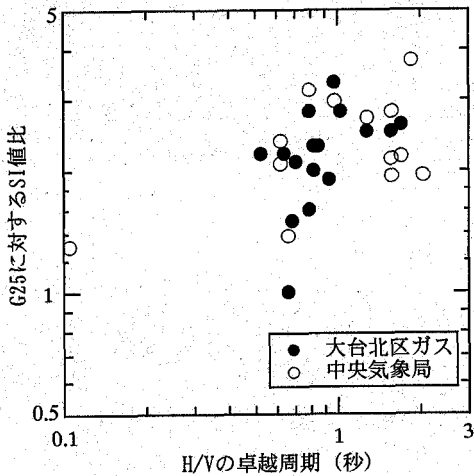


図-12 微動の卓越周期と揺れ易さの関係

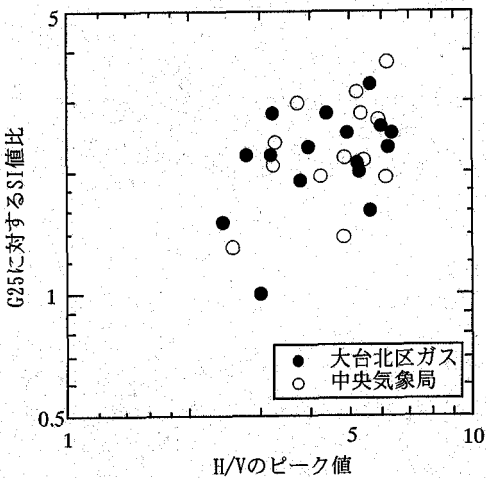
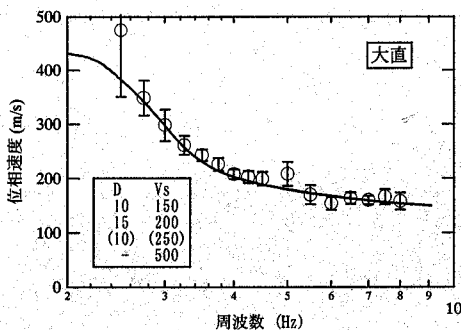


図-13 微動ピーク値と揺れ易さの関係

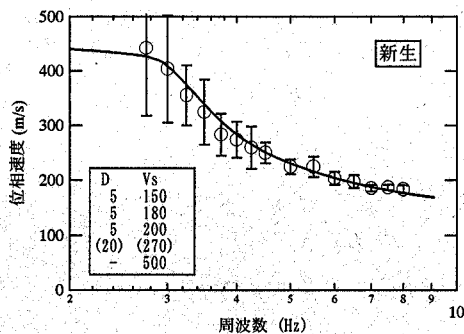
0.5~1 秒) で明瞭なピークが見られる。集集地震の際には欠測が多いが、他の地震では虎林、忠孝での SI 値が台北市内で最大である場合が多い(表-2)。図-8 に示した通り、eq1 以外の地震では 1Hz 以下(周期 1 秒以上)の成分が卓越しているの、1~2Hz (周期 0.5~1 秒)の成分が大きく増幅される東南端部で大きな SI 値が観測されるものと考えられる。南西部でも基盤が浅くなるので、卓越周波数は東南端部と同様に 1~2Hz であるが、H/V スペクトルのピークが小さく、観測される SI 値も大きくない。中興、北門等、台北駅(火車站)周辺の中心部では基盤が 150~300m と深くなるので卓越周波数は 1Hz 以下と低くなるが、ピークが緩やかであり、観測される SI 値も大きくない。東部での基盤深度は中心部より浅くなる。卓越周波数は 1Hz 以下であるが、中心部よりピークが明瞭であり、観測される SI 値も中心部より大きい。

今回得られた知見は、Wen and Peng³⁾による結果と整合しており、基盤構造に起因するメカニズムによると考えられる。また、東南部観測点はエッジ効果を受けている可能性もあり、詳細な地下構造調査が望まれる。

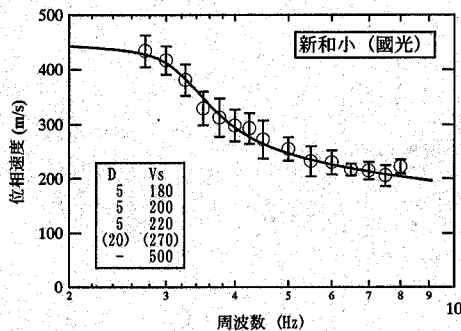
図-11に地震動のスペクトル比(集集地震における圓山における観測スペクトルに対する比)と微動のH/Vスペクトルの卓越周期の関係を示す。地震動で評価されるのは圓山に対応する層以浅の構造しか反映されないが、常時微動では深い地盤構造を反映する可能性もあり、常時微動の卓越周期の方がやや長い傾向にあるが、全体的にはよく対応している。ただし、新SIセンサー観測点では両者の違いが大きい地点も見られる。CWB観測点は小学校等の敷地内の自由地盤上に設置されているのに対し、新SIセンサー観測点は高架橋下など交通振動の影響を大きく受ける観測点が少なくないことによると思われる。新SIセンサー観測点の内、ほぼ岩盤点と見なせる圓山(G25)に対する集集地震(eq1)におけるSI値の比を地震動の揺れ易さ係数とし、これと卓越周期の関係を図-12に、H/Vスペクトルのピーク値との関係を図-13に示す。常時微動のH/Vスペクトルの卓越周期、ピーク値とも、地震観測記録のSI値の基準点に対する比と緩やかな比例関係が見られる。また、新SIセンサー観測点とCWB観測点とで差異は見られない。地震観測記録に基づいてSI値等の増幅度を評価する方が信頼性が高く様々な情報も得られるが、詳細なゾーニングを行うために地震計が設置されていない地点の増幅度評価を行うには、常時微動も有効と考えられる。



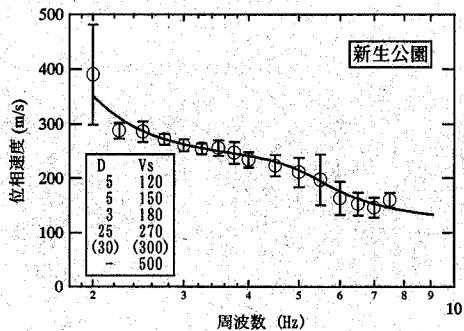
(a)大直



(b)新生



(c)國光



(d)新生公園

図-15 常時微動アレー観測から得られた観測位相速度と推定地盤構造

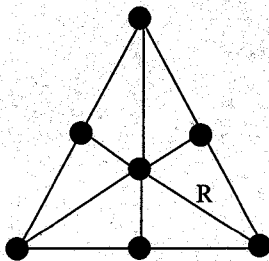


図-14 センサーの配置

4. 地盤パラメータと揺れ易さの関係

地震防災のためのゾーニングを、より信頼性が高く詳細なものにするためには、ボーリング・データや地質情報等も活用することが望ましい。横浜市による地震観測記録と地盤情報を用いた検討では、深度20mまでの平均S波速度がSI値増幅度と良い対応を示している¹³⁾。そこで、台北市内のボーリング情報を収集し、N値から道路橋示方書¹⁴⁾による式(2)、(3)を用いて、S波速度(V_s)を推定し、AVS(20)を評価する。台北でのデータに、日本での相関関係を適用しているので、精度は高くないかもしれないが、相対的な関係は充分把握できると考えられる。

$$\text{粘土} : V_s = 100N^{1/3} \quad (2)$$

$$\text{砂} : V_s = 80N^{1/3} \quad (3)$$

台北市ではPS検層データが少ないので、近年地震被害の調査などで利用される機会が増えている常時微動のアレー観測を行って、S波速度構造の推定を行う¹⁵⁾ことにより補足する。大直、新生公園、新生、國光の4点(図-16に●で示す)で、小規模の微動アレー観測を実施する。図-14に示すように7点で鉛直成分を観測し、F-K法により位相速度を算出する。測定場所の空間的制約によりアレーの半径Rを、大直16m、新生10m、國光20m、新生公園30mとした。図-16には既往の調査から推定されている基盤深度を一点鎖線で示しており、4点の中では新生における基盤が最も深い。いずれの地点についても基盤までのS波速度構造を推定するにはアレー径が小さい(特に新生)が、ここでは表層20m程度までのS波速度の推定に主眼をおく。東南部におけるPS検層による砂岩層の値に基づき、最下層のS波速度を500m/sと設定して最適化により4点のS波速度構造を求める。この層はS波速度が1000m/sを越える基盤岩ではなく、Chinmei層やWuku層に対応している。位相速度に関する感度が低い密度、P波速度については地質構造等から推測される標準的な値を採用し、層厚については5m単位で試行錯誤により設定して、観測位相速度と適合するようにS波速度を求める。4点について得られた観測位相速度と推定地盤構造から得られる理論位相速度の比較、および推定S波速

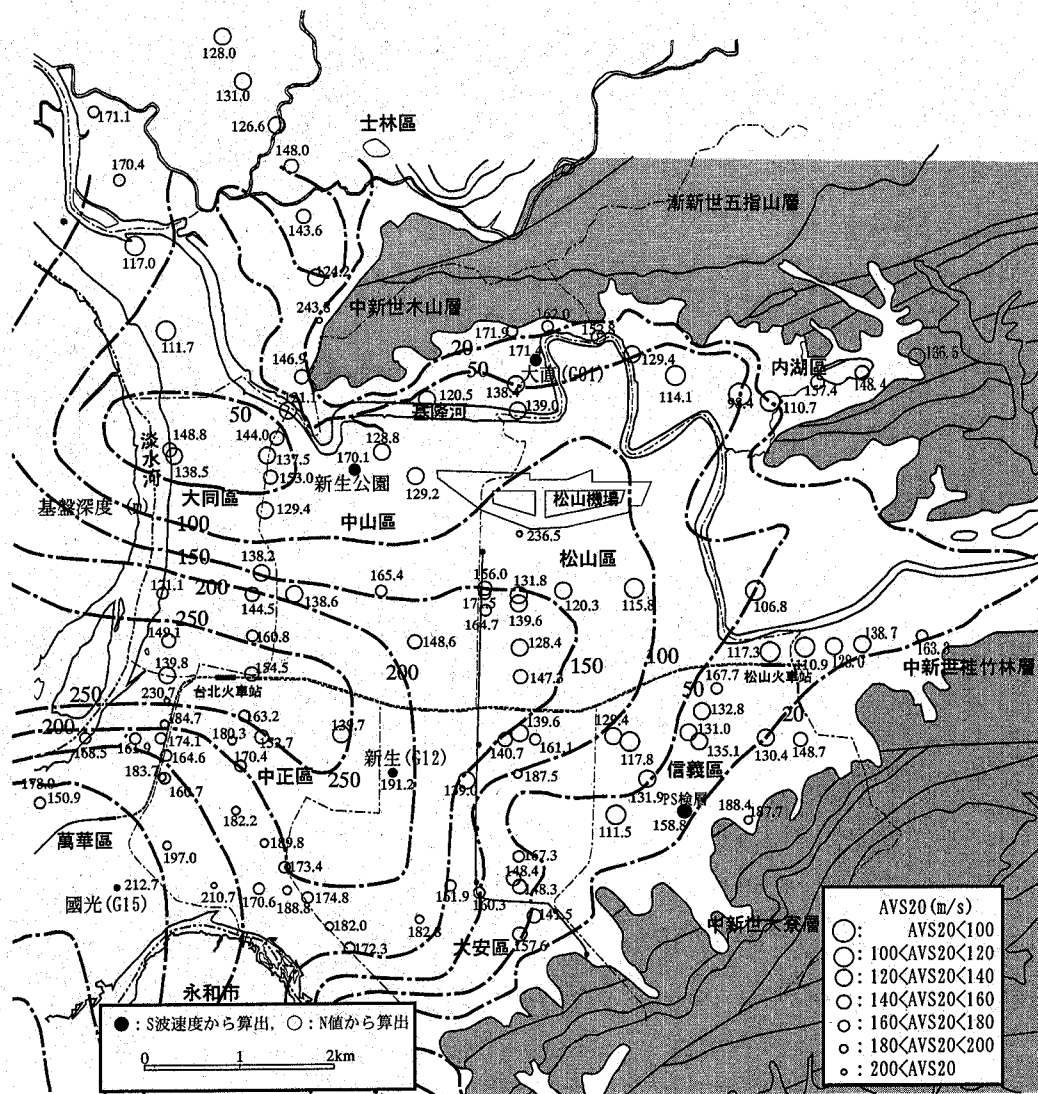


図-16 深度20mまでの平均S波速度 (AVS20) の分布

度構造を図-15に示す。○は観測位相速度の平均値と土標準偏差、実線は推定地盤構造によるレイリー波の理論位相速度である。また、500m/sの最下層の上の層の層厚とS波速度については感度が低いので、参考値として () で示す。浅い場合でも15m以深であるので、この値のAVS(20)への影響は小さい。

N値および微動アレー観測から得られたAVS(20)の分布を図-16に示す。AVS(20)が小さいほど、表層と基盤との速度インピーダンスのコントラストが大きいことに対応し、増幅度は大きくなる。○が大きいほど揺れやすく、小さいほど揺れにくい。基隆河に沿って、AVS(20)が小さいところが点在し、東南部でも比較的小さい。一方、南西から中心部では

比較的AVS(20)が大きい。中心部では基盤が深いにも関わらず、表層のS波速度が大きいためにAVS(20)が大きく、H/Vスペクトルのピーク値も小さいために、観測されるSI値が小さいと考えられる。南西部でも観測SI値は小さくAVS(20)は大きい。

地震観測点に近いボーリング地点におけるAVS(20)とSI値増幅度の関係を図-17に示す。台北市のデータにおいても、AVS(20)が小さいほど、SI値増幅度が大きい傾向が見られる。実線は、日本のK-NETについて得られている $V_s=600\text{m/s}$ の層を基盤とした時のAVS(20)とSI値増幅度の関係¹⁰⁾である。圓山、隧道北の観測点のS波速度は600m/sより小さいので、図-17の台北での値より実線の方が大きい、

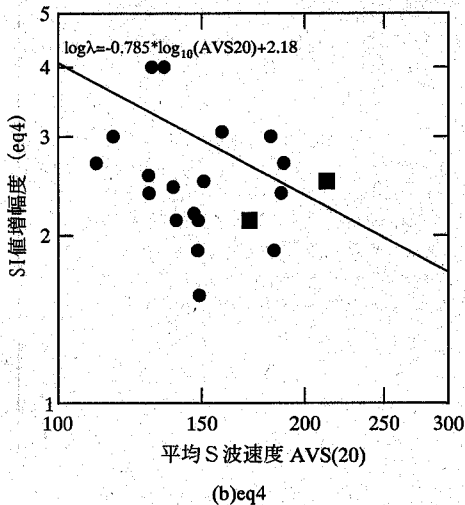
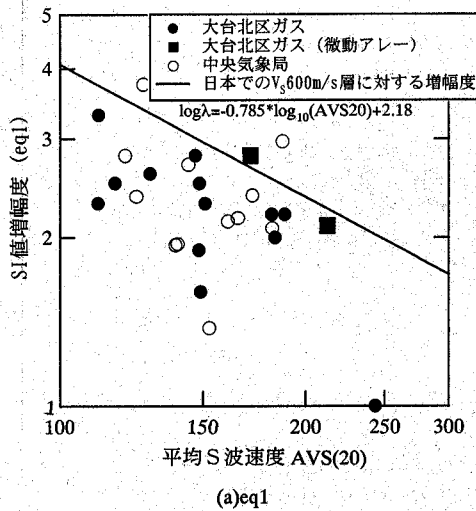


図-17 AVS(20)と揺れ易さの関係

傾きはよく対応しており、日本と台湾で定性的には同様の関係が成立していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、新 SI センサーによる 1999 年集集（台湾）地震などの地震観測記録と常時微動観測、および地盤情報の分析を行い、台北市域における地震動増幅特性について検討を行った。本研究により得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 台北市では地形地質の影響で揺れ易さが地点により大きく異なり、集集地震の際には最大地点と最小地点で SI 値で 3 倍以上の違いが見られた。
- 2) 中小地震記録から得られる SI 値増幅度は、30cm/s 程度において、大地震の際にも利用できる。
- 3) 常時微動の H/V スペクトルの形状は地点増幅特性

を反映し、その卓越周期とピーク値は SI 値増幅度と良い関係にある。

- 4) 台北市では北部および東南部の盆地端部で大きな地震動が観測される。沖積層は中心部の方が厚いが、深度 20m までの平均 S 波速度は川沿いなど盆地端部の方が小さい傾向にあり、これが地震時揺れ易さ分布と対応している。

謝辞：地震観測・常時微動観測に際しましては、大台北区ガス会社と Elite Gas Equipment & Engineering Co., Ltd. の皆様にご多大なご協力を頂きました。また、TSMIP 観測点における常時微動観測に際しましては、中央気象局および観測点の小学校によるご協力を頂き、また 1999 年 12 月に研究用に公開された CD-ROM を使用させて頂きました。地盤情報の分析につきましては日本技術開発（株）磯山龍二氏・石田栄介氏、常時微動観測におきましては東京大学生産技術研究所大学院生の田村勇氏にご助力頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) JSCE: The 1999 Ji-Ji earthquake, Taiwan -Investigation into damage to civil engineering structures-, 1999.
- 2) Lee, W.H.K., Shin, T.C., Kuo, K.W. and Chen, K.C.: CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake, Volume 1. Digital Acceleration Files on CD-ROM, Pre-Publication Version (December 6, 1999), Seismology Center, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan., 1999.
- 3) Wen, K. H. and Peng, H.Y.: Strong motion observations in the Taipei basin, *Proceedings of the Second International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama*, pp.263-270, 1998.
- 4) Sokolov, V.Y., Loh, C.H. and Wen, K.L.: Empirical study of sediment-filled basin response: the case of Taipei city, *Earthquake Spectra*, Vol.16, No.3, pp.681-707, 2000.
- 5) 小金丸健一、清水善久、築田貴、古川洋之、田久保光：新 SI センサーの開発、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、1-B, pp.852-853, 1998.
- 6) Hryciw, R.D., Rollins, K.M., Homolka, M., Shewbridge, S.E. and McHood, M.: Soil amplification at Treasure Island during the Loma Prieta earthquake, *Proc. of 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics*, St Louis, MS, Vol.II, pp.1670-1685, 1991.
- 7) 清水善久：東京ガスの新リアルタイム防災システム-SUPREME-と今後の展望、第 1 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集 -リアルタイム地震防災の現状と今後-、土木学会、pp.13-18, 1999.
- 8) 末富岩雄、清水善久、小金丸健一、中山涉、山崎文雄：地震動代表値の増幅度特性に及ぼす影響因子、第 2 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集 -リアルタイム地震防災の近未来の姿を探る-、土木学会、pp.25-32, 2000.
- 9) 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、Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988.

- 10) 中村晋：ベクトルスペクトルによる地震動の増幅特性評価とその適用，土木学会論文集，No.519/I-32，pp.161-173，1995.
- 11) 時松孝次，宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文報告集，第439号，pp.81-87，1992.
- 12) 趙伯明，堀家正則，竹内吉弘，川瀬博：微動と地震動から推定された地盤特性の比較，地震，第2輯，第50巻，pp.67-87，1997.
- 13) 末富岩雄，吉田望，清水善久，中山涉，山崎文雄，阿部進，鈴木誠：横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討—卓越周期との関係—，第25回地震工学研究発表会，pp.157-160，1999.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V.耐震設計編，1996.
- 15) 堀家正則：微動の位相速度及び伝達関数の推定，地震，第2輯，第33巻，pp.425-442，1980.
- 16) 田村勇，山崎文雄，K.T.Shabestari：K-NET地震記録を用いた平均S波速度による地盤増幅度の推定，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，I-B，pp.714-715，2000.

(2001. 2. 13 受付)

SEISMIC MOTION OBSERVED BY NEW SI SENSORS AND MICROTREMOR MEASUREMENT IN TAIPEI BASIN

Yoshihisa SHIMIZU, Kenichi KOGANEMARU, Iwao SUETOMI
and Fumio YAMAZAKI

The Chi-Chi earthquake occurred in the central part of Taiwan on September 21, 1999. In Taipei city, which is located 160km north of the epicenter, 31 new SI sensors have been installed by Great Taipei Gas Co., Ltd. and earthquake ground motion were recorded in several events. After analysis of these data, it is found that the site amplification factor of strong motion can be estimated by that of weak motion. In other words, seismic observation in small earthquakes is quite important for seismic zonation. Furthermore, we conducted the microtremor measurement and estimated the average S-wave velocity of surface soil for seismic micro-zonation. Those results were also demonstrated to be correlated with the site amplification.