

空中写真測量による兵庫県南部地震に伴う 地盤変位の計測

岡本 厚¹・関口秀雄²・小林俊一³・小野 徹⁴・服部 進⁵・
長谷川博幸⁶・橋 菊生⁷・西本浩司⁸

¹工博 京都大学助教授 大学院工学研究科環境地球工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五カ庄)

³正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科環境地球工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 工博 福山大学助教授 工学部情報処理工学科 (〒 729-0292 福山市学園町一丁目)

⁶(株) パスコ 主任技師 (〒 153-0043 東京都目黒区東山 1-1-2)

⁷(株) パスコ 主任技師 (〒 153-0043 東京都目黒区東山 1-1-2)

⁸工修 (株) フジタ (〒 151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-6-15)

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震に伴い、著者らは(社)地盤工学会「阪神・淡路大震災調査委員会」の1部会の活動として、地震による地盤の永久変位を空中写真測量により計測し、その変位の特性を調べた。計測は六甲山地を除く芦屋市の全域を対象とし、地震前後の撮影縮尺約1:4,000の空中写真を用いた。通常の地図作成よりも計測要求精度が高いためシミュレーションで空中三角測量の精度を検討し、解析図化機を使って700点の地盤変位と、800点のマンホール位置の鉛直変位を測定した。その結果、変位の精度が水平方向が約8cm、鉛直方向は約15cmの高精度で地盤変位を面的に計測可能となった。地盤変位パターンを整理した結果、芦屋浜埋立地では護岸線・河川からの距離や前面水深との相関性が見出された。

Key Words : earthquake, aerial photogrammetry, ground displacement, measurement, aerial triangulation

1. はじめに

1995年1月17日に兵庫県淡路島北部に震源を持つマグニチュード7.2の兵庫県南部地震が発生し(図-1参照)、阪神間、淡路地域に阪神・淡路大震災と呼ばれる大きな被害を出した。同月、(社)地盤工学会を中心として「阪神・淡路大震災調査委員会」(委員長:足立紀尚 京都大学教授)が発足した。委員会は20の部会に分かれ、著者らは「空中写真による地盤変動の調査」を担当した。上記委員会の調査研究結果は1996年に2つの調査報告書にまとめられた^{1),2)}。

これまで地盤変位を精密に計測した報告例では、基準点の変位を観測したものが多く、この計測にはセオドライト、光波測距儀、レベルを使った三辺三角測量および水準測量による方法が使われてきた。最近ではこれにレーザ測距儀、VLBI (Very Long Baseline Interferometry)、GPS観測が加わっている^{3),4)}。その精度は100kmまでの距離で5mmのオーダーである。

また多数の地上点の変位を計測したものには、従来の地上測量によるもの以外に、インターフェロメトリーを使った人工衛星マイクロ波レーダ画像から計測したもの⁵⁾、この論文と同じく空中写真測量によるもの^{6),7)}が報告されている。

マイクロ波衛星画像はSAR(合成開口レーダ)の画像である。マイクロ波を地上に発射して返ってくる電波の干渉記録から、地表までの距離を測って、その位置を求めるものである。この計測精度については現在のところ議論できるだけの情報が欠けているので、精度は不明である。文献5)ではCalifornia州Northridge地震の永久変位を扱い、干渉縞1つが12cmの変位に相当するとしている。計測精度に言及せず、著者の断層モデルがどれだけ干渉縞を説明できるかを議論している。ただしこの方法は広範囲の地域での面的な計測ができ、画像の正確な標定法が確立できれば干渉縞の単位を越える計測精度が実現できるはずであるので、将来は有望な技術である。

文献6)は1/8,000の空中写真で計測したとして、地震前は対空標識無し、地震後対空標識を置いて空中三角測量を実施すれば、20-30cmの精度で変位計測ができることを示唆している。文献7)ではこの論文と同じく震災前後の空中写真を使い、日本海中部地震と新潟地震での地盤永久変位を計測している。日本海中部地震では1:8,000、新潟地震では1:11,000および1:12,500の写真を使った。ただし基準点として周辺の三角点ないし基準点を使っているが、これらが地震前後で不動であると仮定している。

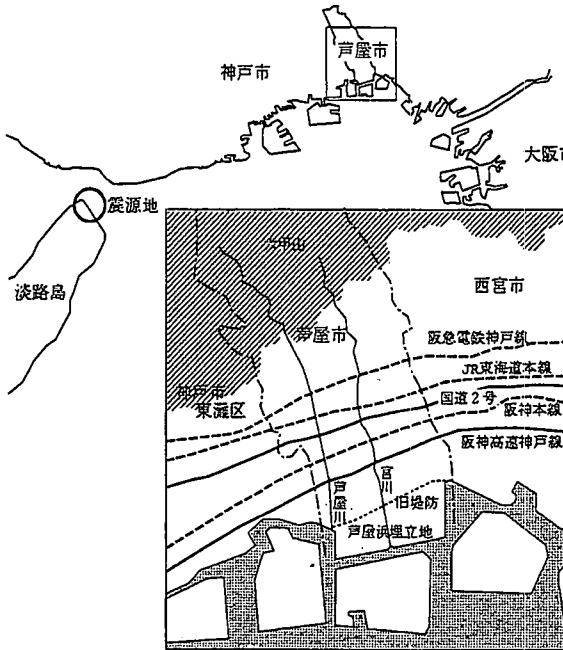


図-1 兵庫県南部地震の震源と芦屋市

とくに阪神・淡路大震災については次のような計測例がある。

- (a) 民間の測量会社と大学で縮尺 1:10,000 の震災前後の写真を使って、空中写真測量による広域の地盤変位計測を行った⁸⁾。この種の計測の例は少ないので貴重な資料である。ただしやはり不動点の基準点を仮定して計測しており、写真の縮尺も小さく、精度は水平 30cm、高さ 50cm 程度としている。
- (b) 建設省国土地理院が GPS 測量および水準測量による基準点測量を行った⁹⁾。これは震災前 1994 年から運用されている全国 GPS 観測網での観測局の測地データを解析したものである。測地座標の精度は 100-200km 平方で平面位置 5-10mm 程度、高さ位置 10-20mm とされる。
- (c) 建設省国土地理院が人工衛星 JERS-1 の SAR 画像 (1992 年 9 月と 1995 年 2 月撮影) を使って、変位の計測を行った¹⁰⁾。1 つの縞が 11cm の変位に相当し、50cm 程度の変動は観測されるとしているが計測精度は不明である。

地盤変位を面的に計測するには、現在のところ大縮尺の空中写真測量が唯一の方法であり、われわれはまず震災前後の空中写真の撮影状況および地上基準点の計測データを全域にわたって調査した¹¹⁾。当初、地震工学的あるいは地盤工学的な見地から、被災地全域の変位の計測を要求されたが、これは観測に必要な諸データが充分でないことと時間的制約のため行うことができなかった。とくに震災前については、大縮尺空中写真および高精度の地上基準点を全域で集めるのは困難であっ

た。そのため本研究は、被害の著しい地域に観測区域を限定し、精密な変位計測を行った。

計測の対象地域を兵庫県芦屋市とした。この地域を選択した理由は、撮影縮尺 1:4,000 程度の大縮尺空中写真が震災前後ともに揃っていること、信頼性の高い地上基準点のデータが多数存在すること、阪神高速道路神戸線のピルツ高架橋の倒壊や震度 7 の帯など構造物が激しい被害を受けた地域や激しい液状化が見られた沿岸の人工埋立地などを含んでいたためである。われわれは震災前後の写真から同一点を探しだして、その 3 次元変位を計測した。

なおこれとは別に震災後に芦屋市が、破損した下水道の復旧作業のために、マンホールの天端高さの水準測量を行った。この成果と同一点における震災前の高さを震災前の空中写真で計測した結果から、鉛直方向の変位量の計測を行うことができた。

さて、われわれの課題は面的にしかも高い精度で被災地の地盤変位を計測することであった。これは被害状況と地質および地盤変位の関連を調べるため、またその地域の活断層の挙動を把握するために必要であった。このため目標精度を絶対精度 10cm 以上と設定した。

誤差 10cm 以内の計測精度を出すには、地形図作成を基準にする通常の公共測量作業規定に従った空中写真測量では難しいと判断した。そのためシミュレーションによって空中三角測量の精度をあらかじめ検討するとともに、3 種類の空中三角測量のプログラムで独立に調整を行い、精度を確かめた^{1),12),13),14),15)}。

この論文では計測の過程を記述し、計測の精度を推定する。その後計測結果と現地調査、および地形・地質データとの対応を考察する。

2. 観測に用いたデータ

(1) 対象地域

計測対象とした芦屋市は、図-1 に示すように神戸市の東に位置し、東西 2-3km、南北 8-9km の細長い形をしており、北は六甲山地、南は瀬戸内海に臨む埋立地が広がる比較的狭い市域である。神戸市の東、西の官市の西に位置し人口は 7.5 万人 (1996 年) を数える。

芦屋市には右横ずれ活断層である芦屋断層、甲陽断層が北東から南西に走っている (図-6 参照)¹⁶⁾。これらの断層は市街地では位置が分かっていない。芦屋市では阪神高速道路神戸線から阪急電鉄神戸線までの細長い地域 (図-1 参照) がいわゆる「震度 7 の帯」と呼ばれる幅 1km の細長い激震区に入り、最も被害が大きかった構造物の被害はこの地域で東西に広がっているが、木造建築の被害は芦屋川以西で最も激しかった。

表-1 震災前後の基準点および空中写真のデータ

		震災前	震災後
基準点 測量	プロジェクト	平成3年芦屋市 下水道台帳図化 作業(1/500)	部会独自の 調査研究
	実施年月日	平成3年	平成7年9月 20-26日
	観測点数	標定基準点 13点 水準点 23点	標定基準点 13点 電子基準点及び 既知基準点 5点 水準点 57点
	測量成果	3級基準点成果簿	GPS測量成果簿 精度管理表 (3次元ベクトル 併合差, 重複基線差)
空中 写真	撮影	平成3年	平成7年1月 18-20日
	コース数 枚数	4コース 51枚	6コース 45枚
	縮尺 (撮影高度)	1/4,000 (600m)	1/5,000 (800m) 一部1/4,000
	カメラ 焦点距離	RC30 153.02mm	RC30 153.02mm

(2) 空中写真データ

入手できた震災前の1991年撮影の空中写真は市が行った下水道台帳作成作業のもので、縮尺約1:4,000である。これに対し、震災後のものは地震直後に撮影したもので、市街地中心部で縮尺約1:4,000、それ以外では1:5,000である。両者ともカラー写真であり、約50モデルで全市を覆う。ただし計測は白黒密着ポジフィルムで行った。表-1に写真データを示し、図-2(a),(b)に標定図を示す。撮影には3年の間隔があり経年変化が大きく、しかも撮影方向が90°違っているため、立体視しても同一点の確認には時間がかかる。また、震災後の写真は被災地の火事の煙が覆っていて、良好な撮影状態とはいえず、写真はやや暗く不鮮明である。このため地物の判別がかなり困難な場所があった。しかも震災後の写真には対空標識を置いていないため、写真で同定しやすい点を調べ、後で地上測量によって地上基準点とした。

(3) 地上基準点データ

震災前後の空中三角測量に用いた地上基準点のデータを表-1に、その位置を標定図(図-2)に示した。震災前の地上基準点は、下水道台帳図化作業を目的とする測量成果で3級基準点である。基準点座標は通常の三角測量、水準測量で計測されている。平面基準点は11点、水準点は22点であった。基準点座標の誤差についてのデータはなかったが、常識的には平面の標準誤差が3cm、高さの標準誤差が1cm程度である。なおここでの標準誤差とは、座標の最確値の不偏分散の平方根を意味する。

震災後の地上基準点は、撮影のあと1995年9月に実

施した。基準点は写真上で明瞭に確認できる点を選び、平面基準点11点、水準点40点を設置した。これらは震災前の基準点とは全く独立である。平面基準点の測量はGPSで行い、地震前に設置されていた臨時電子基準点を利用した。GPS測量には既設の臨時電子基準点を利用し、写真上で確認できる点にGPSアンテナを設置した。静的干渉測位法で計測しTrimble社のTrimnetで調整を行った。つぎに水準点の測量は通常的水準測量で行った。得られた基準点精度は、やはり平面位置の標準誤差3cm、高さの標準誤差1cmと推定された。なお水準測量のとき、二次的にGPS基準点の標高も測定した。

3. 空中三角測量^{1),17)}

(1) 実施の手順

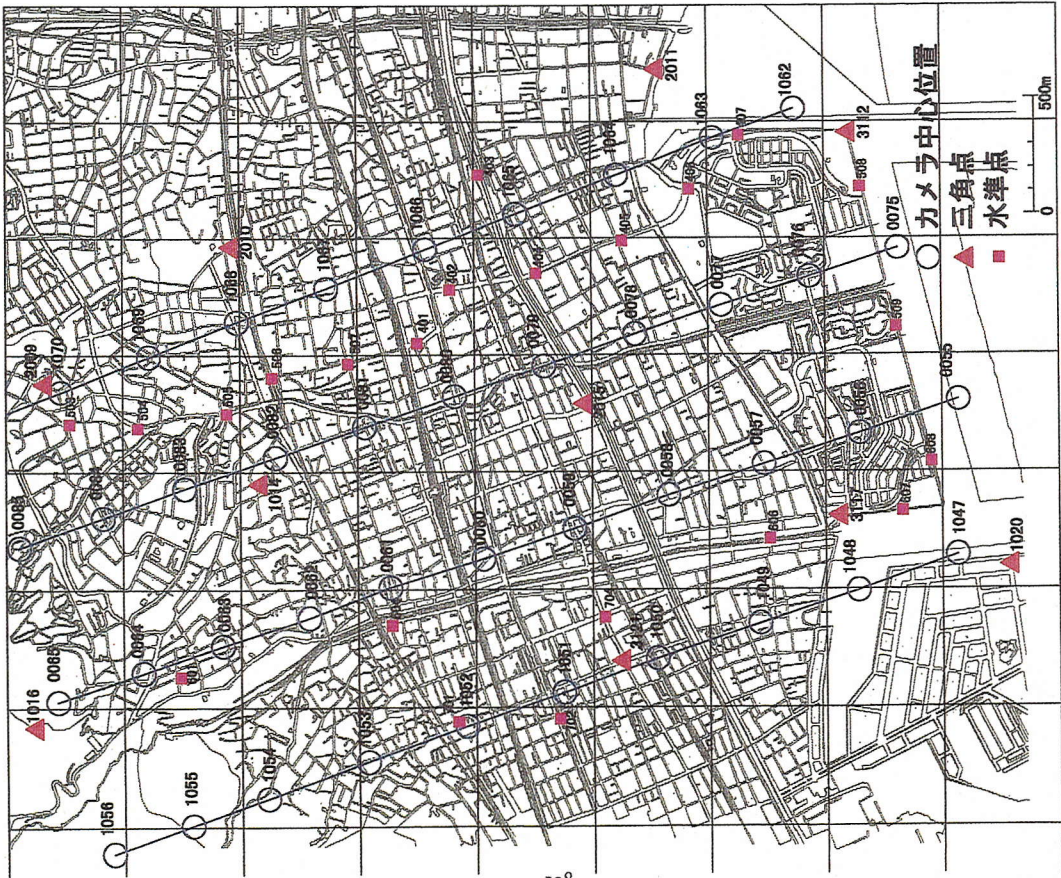
地盤変位の計測精度は地上基準点の精度とこれを使った空中三角測量の精度に大きく依存する。地上基準点の測量精度は平面位置で3cm程度、標高で1cm程度であり、画像点計測の際にも誤差が加わることから、測定対象物の3次元観測精度の目標値を10cmと定めた。

要求精度が高いので、空中三角測量を実施する前にシミュレーションを行なった。基準点の配置を既知のものとして、増設基準点(パスポイントとタイポイント)の配置と期待される標定精度の関係を調べた¹³⁾。その結果、与えられた基準点配置では、内的精度(この場合は標準誤差と同じ)と外的精度(真値との誤差)が等しくなるようにするには、モデルごとに30点程度の増設基準点を取ればよいことが分かった。またタイポイントが少ないと平面精度は保持されても高さの精度が劣化することが分かった。

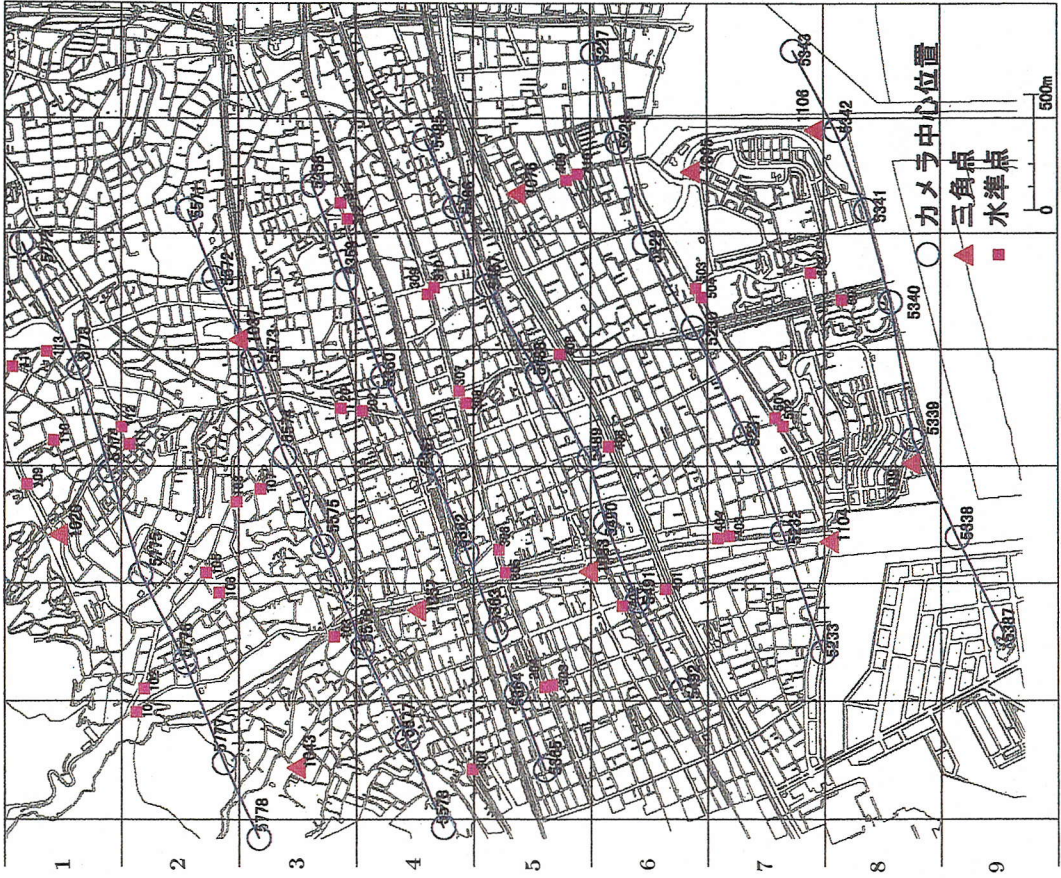
実際の空中三角測量ではモデルごとに30点の増設基準点を取るのには困難であったが、通常(6-7点)よりは多く取るように心掛けた。結局震災前の写真で311点、震災後の写真で212点取った。震災後の写真はぼけていたので数を多く取れなかった。このことはあらかじめ予想されたので、震災後の基準点測量では水準点を多く取るようにしてパスポイントの不足を補った。さらにコース間の幾何学的強度を上げるため、通常地図作成では写真の上下に1点ずつ程度取るタイポイントを写真の上下ともできるだけ3点、一直線にならないよう配置した。

震災前の空中写真については、撮影当時空中三角測量を実施したときの密着ポジフィルムを用いた。すでに当時の作業で点刻がなされていたが、コース間の接続精度を上げるため、タイポイントを増設した。

われわれはこの調査委員会で独自のバンドル調整プログラム、Kyoto-Bを開発した。Kyoto-Bの最大の特長は増設基準点の地上点座標の最確値の標準誤差を求



(a) 震災前



(b) 震災後

図-2 空中写真標定図と地上基準点配置

表-2 空中三角測量の調整結果

	震災前	震災後
写真枚数	51 枚	45 枚
地上基準点数	11 点 (平面) 22 点 (標高)	11 点 (平面) 40 点 (標高)
増設基準点数	311 点	212 点
写真座標の測定誤差の推定値	7.1 μ m	7.5 μ m
増設基準点の標準誤差	4.5cm(平面) 8.6cm(標高)	5.4cm(平面) 13.9cm(標高)

めている点である。増設基準点座標の標準誤差は、対象範囲のどの地域が幾何学的に弱く、解析結果がどの程度信用できるかを示す指標であるため、極めて重要なデータである。しかし、多大な計算容量及び計算時間を要するため、市販ソフトではこの機能を実装していないことが多い。実際の計算では Kyoto-B に加えて、実績があり定評の高い品ソフトである PAT-M (INFO 社の独立モデル法のプログラム) と ALBANY (ERIO 社のバンドル調整プログラム) を用いてそれぞれ独立に同一データを用いて計算を行い、その計算結果を比較することで Kyoto-B の信頼性を検証した。3つのプログラムでの調整結果を比較したところ、すべての増設基準点の座標の最確値の差は平面方向、高さ方向とも 5cm 以内であった。これから、Kyoto-B による調整計算の信頼性は十分高いと判断してよい。3つのプログラムの性能は同等であるため、この論文では以降 Kyoto-B の結果を使って議論を進める。

(2) 誤差の推定

Kyoto-B での調整の結果を表-2 に示した。増設基準点の写真座標の標準誤差の 2 乗平均値は、震災前後とも 7 μ m である。対空標識の計測誤差は通常 3 μ m 程度であることを考えるとあまりいい結果とはいえないが、標識のない点であることを考慮するとやむを得ない結果と考える。

この値から計算される地上での増設基準点の座標の理論誤差(標定要素に誤差がないとしたときの誤差)は、平面方向において震災前の写真縮尺は約 1/4,000 であるから 3cm 程度、震災後の写真縮尺は約 1/5,000 であるから 3.5cm 程度となる。高さ方向は倍程度の標準誤差を持つことが知られており、それぞれ 6cm, 7cm 程度である。これらのうち、悪い方をとると理論誤差は 3.5cm 程度(平面方向)、7.0cm 程度(標高)である。計測した増設基準点の地上での平面位置の標準誤差は両写真とも 5cm であり、ほぼ満足すべき結果が得られたと言える。しかし増設基準点の標高の標準誤差は劣化している。震災前の写真では 8.6cm であり理論誤差に近く(好ましくはないが)やむを得ないとしても、震災後の写真では 14cm に達した。この原因としては次のものがある。

- (a) 図-2 のように、震災後の写真撮影では海岸線に平行に飛んでいるので、海岸沿いのコースでは不完全モデルが生じて解が不安定になっている。
- (b) 震災後の写真のタイポイントの数が震災前の写真よりも少ない。

実際のところこれらの欠点を補うため、地上測量での水準点を震災前の基準点よりも 2 倍多くしている。このため、海岸沿い以外のコースでは増設基準点の標高の標準誤差は 10cm 以内を得ている。ちなみに震災後の地上基準点は GPS 測量で測定されたものであり、標高も既知であった。そこでこれら 3 次元座標が既知の地上基準点のみを拘束し、他の 40 点の水準点を検証点として、調整計算を行なったところ、計算で得られた標高値と水準測量で得られている標高値との差は最大で約 10cm であった。したがって、これら水準点を含めた標高誤差は、海岸部以外で 10cm 以内であったと結論していいだろう。

4. 地盤変位の 3 次元計測

上記の空中三角測量の成果を使って、通常の立体図化の方法で地盤変位を計測した。得られた計測の成果は以下に述べる 2 つである。

(1) 震災前後での同一点の変位量の計測

座標計測には解析図化機 (WILD 社 BC-1) 1 台で実施した。1 台で震災前後の同一点を誤りなく認識するために、次のような手順を取った。

- (a) まず、震災前後の空中写真をそれぞれ 2 倍に拡大し、両者を比較しながら同一点の識別が可能な個所を選んでマークをつけた。その際、地盤変状を忠実に表していると思われる点として道路の交差点、駐車場等の白線の角、マンホールの蓋などを選んだ。ただしマンホール位置は震災後の写真の鮮明度が低いため識別が困難な場合が多かった。
- (b) 次にこれらの点に番号付けを行い、その個所のスケッチを残した。
- (c) 標定は相互・絶対の順に行ったが、相互標定の残存縦視差が 10 μ m、対地標定の基準点残差が 10cm を越える点があれば原則として再測を実施した。各ステレオ写真の対地標定で使用した増設基準点数は 10-15 点であった。

選んだ点は芦屋市全域で 700 点であり、道路の交差点、横断歩道、停止線、文字(とまれ、40KM などの速度表示)、駐車場の白線の角が主な対象である。電柱の根本、マンホールの蓋などは多く見いだされるが、電柱の根本は視線が異なるため、またマンホールの蓋は識別が困難なため避けるようにした。しかし場所によっては

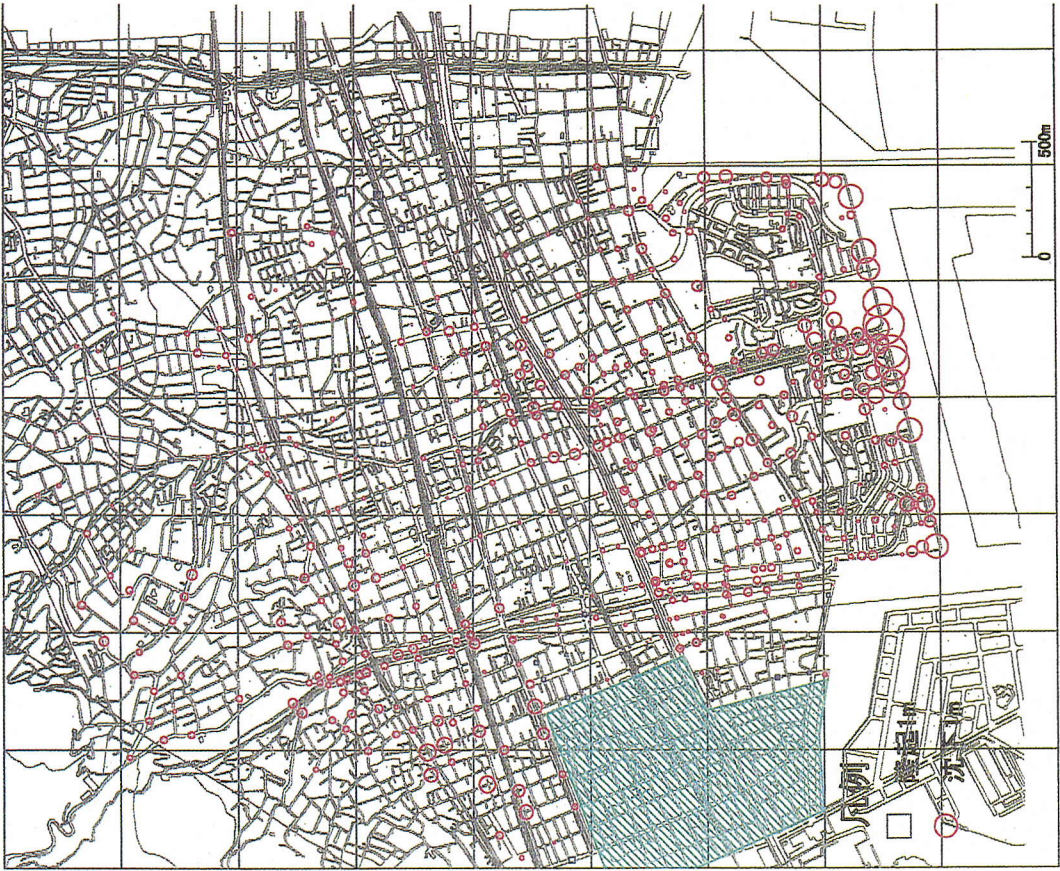


図-4 鉛直方向地盤変位図

斜線部は基準点がなく計測精度が悪いと判断して削除した



図-3 水平方向地盤変位図

↓ は写真-1(b) の撮影位置と方向を示す

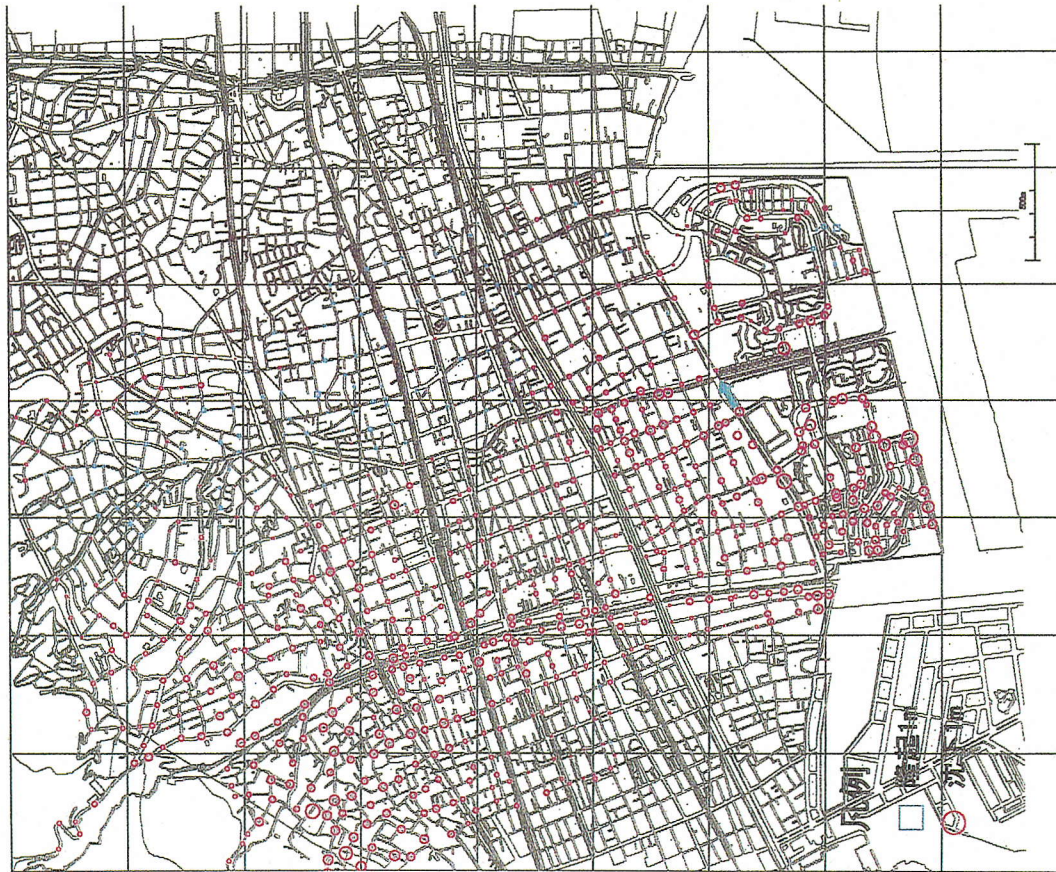
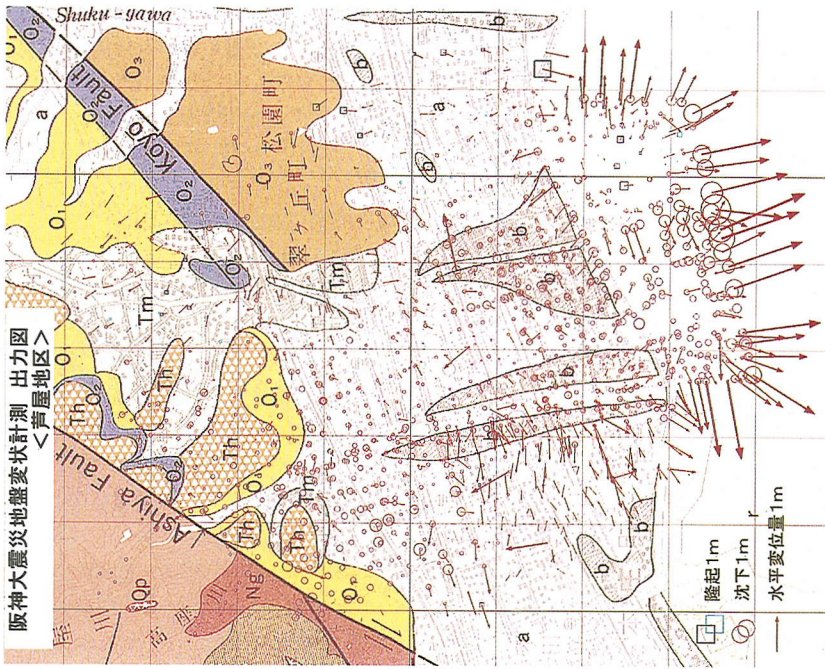


図-5 マンホールホール天端の標高変位図

⇒ は写真-1(a) の撮影位置と方向を示す



- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|----------------------------------|---|------------------------|---|---|---|-------------------------|---|----------------------------------|---|---|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|---|----------------|------------------------|---|---|----------------|
| 埋立地
Reclaimed land | r | 高台(砂丘)
Higher terrace surface | h | 上層亜群
Upper Subgroup | U | 沖積粘土・砂・礫及び火山灰
Marine clay, sand, gravel and volcanic ash | U | 中層亜群
Middle Subgroup | M | 礫・砂及び粘土
Gravel, sand and clay | a | 沖積粘土・砂・礫及び火山灰
Marine clay, sand, gravel and volcanic ash | O ₁ | 中層亜群
Middle Subgroup | 中層亜群
Middle Subgroup | O ₂ | 沖積粘土・砂・礫及び火山灰
Marine clay, sand, gravel and volcanic ash | O ₃ | 下層亜群
Lower Subgroup | L | 沖積粘土・砂・礫及び火山灰
Marine clay, sand, gravel and volcanic ash | O ₄ |
|-----------------------|---|----------------------------------|---|------------------------|---|---|---|-------------------------|---|----------------------------------|---|---|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|---|----------------|------------------------|---|---|----------------|

図-6 水平および鉛直変位と地質図

通産省工業技術院地質調査所発行 大阪西北部 1/50,000 地質図(1982)を使用。

この時点では芦屋浜の埋立地はまだ記載されていない。

道路上に表示のないところがあり、ここではマンホールも測定点に加えた。道路の表示などは3年の間にときどき引き直しがされていた。色調で判断できることが多かったが、判断に迷うこともあり、周辺と系統的な変位が大きく異なっているような測定点は、表示が引き直されていると判断し除外した。測定点は100-200mごとの格子上になるように選んだが、とくに次の場所では測定点の間隔を密にした。

- 埋立地、河川沿岸、護岸周辺 — 埋立地内では広い範囲に渡って地盤の液状化が見られ、大きな残留変位が生じた。また河岸や護岸の周辺では、外側の法線方向に沿って、1-2mもの変位が生じた。これらの河岸・護岸近傍の変位パターンが、背後地盤の変形のパターンに大きな影響を与えていることが予想された。そこで護岸近傍の地盤の変形パターンを定量的に調べるために測定点を増やした。ただし護岸構造物の変位には、構造物そのものが変形している場合や背面に大きなクラックが入っている場合が多く見られた。これらが入った値は地盤変位を表わしているとは見なせないので、計測点を護岸構造物より少なくとも10m以上内陸側になるように選んだ。
- 阪神高速道路神戸線と阪急電鉄神戸線間の地域(図-1参照) — この幅1kmの狭い地域は震災の帯と呼ばれる六甲山地南麓部に30kmも続く細長い激震区に含まれている。
- 埋立地と非埋立地の境界部、すなわち旧防波堤付近(図-1参照) — この場所では一部のマンホールの抜け上がりが観察され、地盤の鉛直方向の残留変位と後述するマンホール天端の残留変位の比較が可能である。

地盤変位の3次元計測の結果について、水平変位量を図-3に、鉛直変位量を図-4に示した。水平変位量の測定精度については次のように推定できる。空中三角測量の増設基準点の平面位置の標準誤差は震災前後とも約5cmであったので、個々のモデルでの観測点の測定精度も同じ程度と見なせる。したがって、震災前後のステレオ写真による同一点の水平変位量の測定値の誤差は誤差伝播則から高々8cmと見なせる。

鉛直変位量の精度は次のように推定できる。震災前の写真の空中三角測量で、増設基準点の鉛直方向の標準誤差は9cm弱であったが、震災後の写真では約14cmと大きかった。個々のモデルでの地上点の測定誤差が、震災前後それぞれで空中三角測量での標準誤差と同程度であると仮定すると、鉛直変位量の測定値の誤差は16.9cm程度となる。しかしながら、この誤差の主因は海岸沿いコースに不完全ステレオモデルが生じていて、この場所が幾何学的に弱くなっているためである。他の5本の

コースについては水準点を多量に配置してあるので、増設基準点の標高の標準誤差は10cm程度となっている。したがって、鉛直方向の変位量の誤差の平均値は海岸沿いでは場所によって20cmを越えているものと思われるが、それ以外では15cm程度の誤差と推定される。

また図-4の斜線部に示す場所では、震災前後とも計測区域内に基準点がない。このような場所ではモデル変形が激しく、増設基準点の標高値の標準誤差は15-20cmになっていた。さらに震災前後の同一点の変位計測の結果から類推して、この地域での最大鉛直変位量はたかだか40cm程度と推定されたため、沈下、隆起が逆転する大きさの誤差を含む可能性すらあったので、この地域の鉛直方向の計測値については図から削除した。

(2) 震災前後でのマンホール天端の標高変位の計測

芦屋市では下水道に大きな被害がでたため、震災直後の1995年2月、市の平野部ほぼ全域でマンホール天端の標高測定を直接水準測量を使って実施した。測定点数は全部で12,000点に上る。部会ではこの成果を用いて、これらのマンホールの標高値を震災前の空中写真42枚を使って計測して、両者のデータからマンホール天端の位置の鉛直方向変位を計測した。

この計測には解析図化機(Zeiss社Planicomp P-3)を使った。マンホールは写真上で判読しにくいので、対応の誤りを避けるため次の手順で計測した。まず前もってマンホールの平面位置座標を震災前の下水道台帳の図面から読み取った。震災前の写真を載せた図化機にその位置を与え、指示された位置の周辺で対応するマンホールを探した。判読できて標高を測定したマンホールは約800である。マンホール天端の沈下・隆起量を図-5に示す。

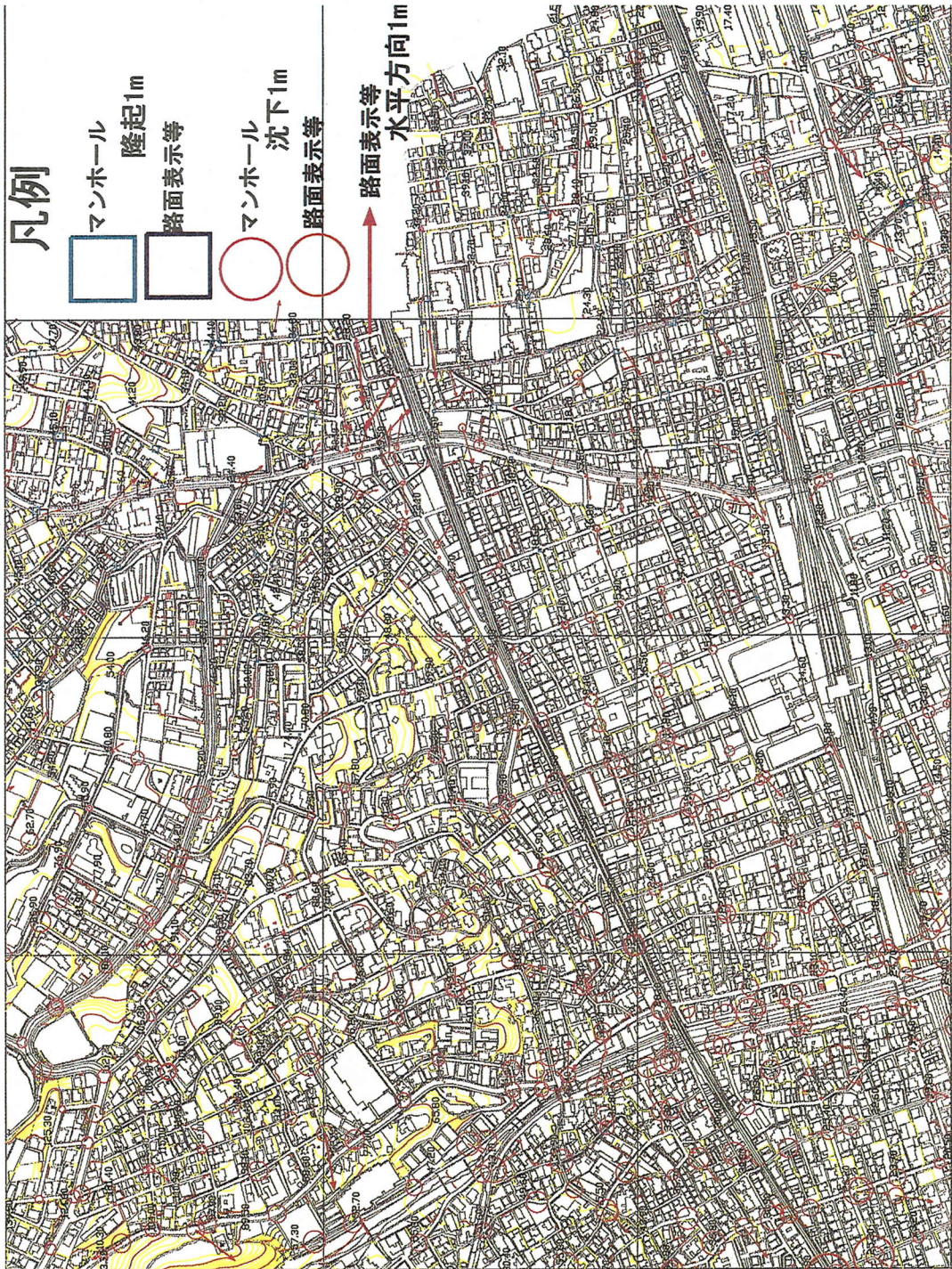
マンホールの標高変位の精度は、次のように推定できる。震災後の水準測量の精度は約1cmである。また震災前の写真の空中三角測量での鉛直方向標準誤差は8.6cmであるから、標高変位の測定誤差は10cm以内であろう。

5. 地盤変位の特徴

計測地域は大別して、(i) 海浜域以北の自然形成地盤と(ii) 海浜域の人工的な埋立て地盤(芦屋浜など)とから成る。それぞれについて地震による地盤変位の特徴をまとめる。

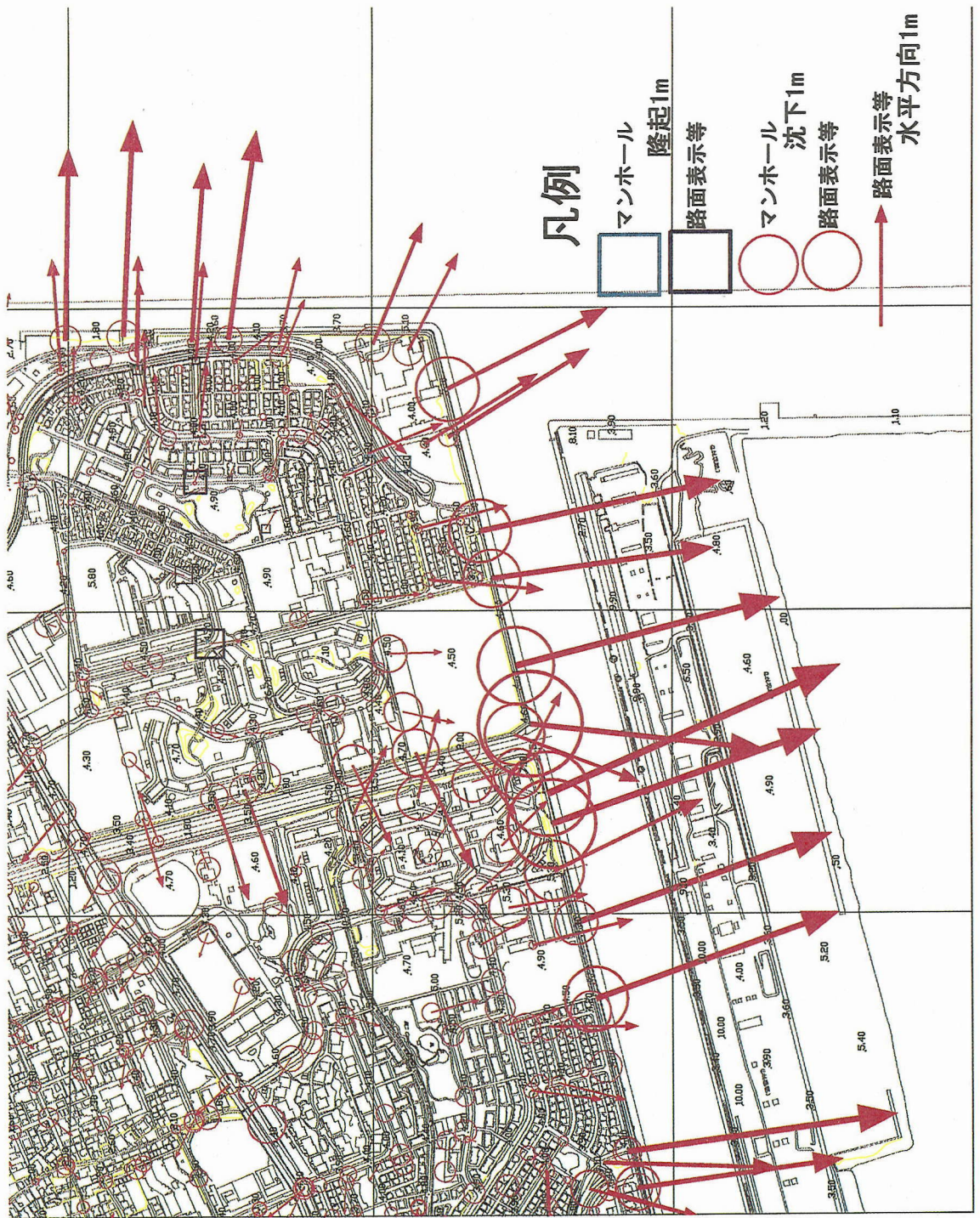
(1) 自然形成地盤の変位の特徴

まず断層運動に伴う地盤の変位性状を明らかにするため、計測地域の広域的な基盤変位について検討する。当該地域の自然地盤の地質と地盤変位分布を図-6に示す。



(a) 芦屋市東北部 (図-2(b)のB~E, 2~4に対応)

図-7 水平及び鉛直変位と地形図 (格子幅 500m)



(b) 芦屋浜東部 (図-2(b)のD~G, 7~9に対応)

図-7 水平及び鉛直変位と地形図 (格子幅 500m)

水平変位については、以下の3地域、(i) 旧防波堤以北、阪急電鉄神戸線までの地域、(ii) 芦屋川周辺、(iii) JR 東海道線以北の開析扇状地、に分けてその特徴をまとめる。いずれの地域においても各計測点の水平変位は周辺の微地形の影響を受けているが、詳細にみれば以下の特徴がある。地域(i)においては広範囲で西から南西方向の水平変位が卓越している。この地域では地形的な起伏は小さく、また水平変位の卓越方向と微地形の最大傾斜方向は必ずしも一致しないことに注意する必要がある。地域(ii)では芦屋川が天井川を形成しているため、周辺は砂質地盤より成る自然堤防の微高地である。また隣接する後背地との標高差は最大で10m程度である。したがって芦屋川から両岸の後背地に向かう水平変位ベクトルは微地形の影響と見てよい。ただし右岸側では広い範囲で西あるいは南西方向に50cm程度の水平変位が見られるのに対して、左岸側では河川近辺の僅かな範囲だけで東あるいは南東方向の水平変位が見られる点に注意する。地域(iii)では地表面の勾配が急であるので、水平変位は微地形と良い相関を示し、谷側への変位が卓越している(図-7(a)参照)。

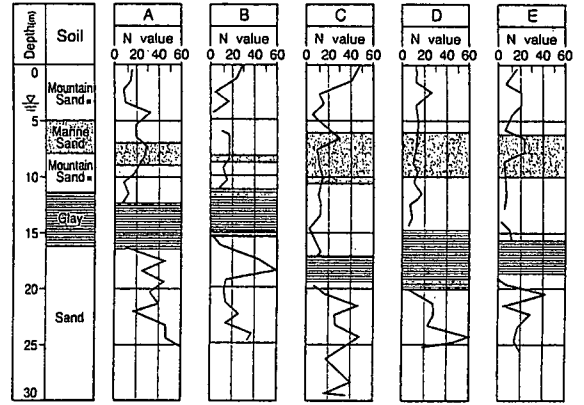
これらの特徴から、定性的ではあるが計測地域においては地震断層による広域的な水平基盤変位が西あるいは南西方向に卓越する可能性を示唆できる。実際、国土地理院が地震後に実施した基準点測量¹⁰⁾によれば、六甲山系の三角点が北東方向へおよそ20-30cm、神戸沿岸の三角点が西方向に10cm移動しており、本研究結果とも矛盾しない。

一方、鉛直変位については芦屋川右岸の国道2号線以北の地域、官川沿いの阪神電鉄本線以南の地域に60-70cm程度の比較的沈下量の大きい地域が見られる。また官川右岸のJR東海道線以北の地域の一部には若干の隆起を示す地域も見られる。しかしながら広域的な鉛直変位の分布性状と地形・地質あるいは地震断層との相関は、これらのデータだけでははっきりとは分からない。また鉛直方向の変位計測では水平方向に比べて若干ではあるが計測精度が落ちることに注意を要するべきである。

(2) 芦屋浜埋立地の変位の特徴

a) 芦屋浜埋立地の概要

芦屋浜埋立地は1967年の尼崎西官芦屋港港湾計画に基づき、兵庫県が主体となって1969年から1975年にかけて埋立てられた地域である。埋立地は周囲を北側の旧防波堤と東、西、南の各護岸に囲まれており、中央部を北から南に官川が流れている。埋立地盤のプロファイル¹⁸⁾を図-8に示す。また埋立て地域の旧海底面の深度分布を図-9に示す。図-9は、尼崎港測量原図(昭和43年測量)と神戸港東部測量原図(昭和37年測量)を基



位置 A-E は図-10 を参照のこと

図-8 芦屋浜の土質柱状図：文献(18)より再録

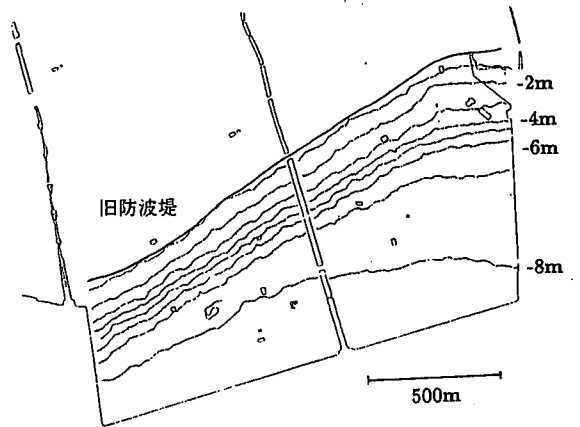


図-9 埋立地域の旧海底面の深度分布

にしてデジタイズを行い、神戸港基本水準面(KP)から東京湾平均潮位(TP)に換算したものである。埋立地の平均的な標高はTP約4-5mであるので、埋立て層厚は北側から南側にかけて徐々に厚くなっていき、最も厚い南側で15m程度となる。今回の地震による液状化マップ¹⁸⁾を図-10に示すが、埋立地西側では液状化をした範囲が限られているのに対して、東側で広い範囲で液状化が見られたことが分かる。この理由として、西側では主な埋立て材料として細粒分を含む山砂が多用されていたのに対して、東側では粒径分布が狭く液状化しやすいと言われる浚渫海砂も埋立てに利用されていたことが挙げられる¹⁸⁾。

まず図-3の水平変位分布図より、大きな水平変位は護岸線や河川付近に現れ、その方向は法線外向きにほぼ一致することが分かる(図-7(b)参照)。写真-1(b)は図-3の矢印の場所から官川河口付近を撮影したスナップであり、河川護岸が大きく河川側に変位したため歩道橋の

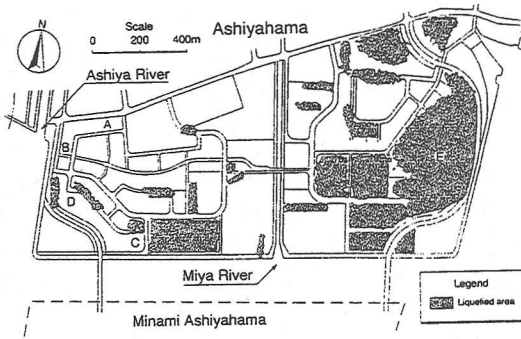


図-10 芦屋浜の液状化域：文献(18)より再録

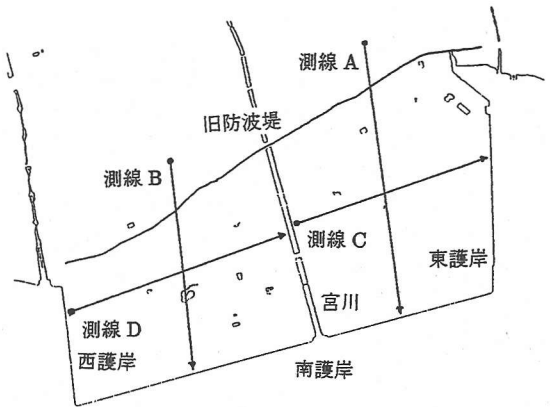
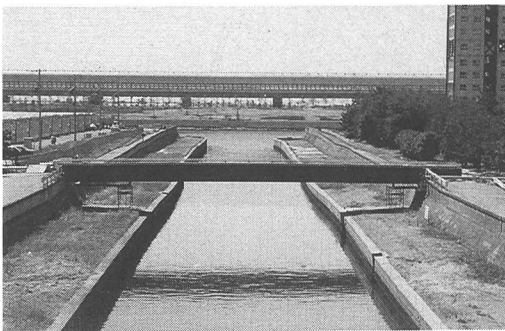


図-11 埋立地内の各測線



(a) 汐風橋西詰め(南側)のマンホールの抜き上がり



(b) 汐見歩道橋の突き出し、北側から芦屋港を望む

写真-1 震災現場のスナップ写真

端部が護岸上に乗り上げた様子が観察できる。最大の水平変位は南護岸付近で大きさは2.66mに達する。また埋立地北側の旧防波堤付近では変位ベクトルが北向きであるが、これは埋立地の標高が旧防波堤北側の土地よりも3mほど高いため、標高の低い側に側方流動したためである。

図-4の鉛直変位分布図より、大きな鉛直変位は護岸線や河川付近に現れ、南護岸付近で最大1.78mの沈下を示す。また旧防波堤付近も最大0.4m程度の沈下を示す。なお旧防波堤上の歩道では写真-1(a)に示すようにマンホールが抜け上がる現象が見られた。図-5に撮影

位置を矢印で示した。図-4の鉛直方向の変位図と、図-5のマンホール天端の鉛直方向変位図によると、この位置ではマンホールと地盤のいずれも沈下を示すが、地盤の方が約0.3mだけ大きな沈下量を示していて、現場の状況と対応している。

b) 埋立地内部の詳細な地盤変位分布

埋立地全域にわたる空間的な変位分布の性状を把握するためには、幾つかの測線に沿った変位分布を図化する方法が地盤工学的には有効である。このため埋立地内に約50m間隔を目標に計測点を設けて変位の追加測量を行った。しかしながら噴砂などで地震前後の計測点の識別が困難なケースや特徴的な計測点が周囲に見つけれないケースなどがあるため、実際には計測点間隔が50~100mとなり、追加計測点数は465点となった。また現地では必ずしも測線上の適当な位置に計測点を設定できないことが多い。このため、写真測量によって得られた各計測点での高精度地盤変位データを基に、以下の重み付き平均法により測線上の標点での地盤変位 \bar{p} を内挿評価した。

$$\bar{p} = \sum_{i \in R} w_i p_i \quad (1)$$

ここに $i \in R$ は計測点 i が標点近傍の領域 R にあることを表し、 p_i 、 w_i はそれぞれ計測点における変位と重みである。なお重み w_i としては標点と計測点の距離 $|r_i|$ に反比例する重みを採用した。

$$w_i = \left(\frac{1}{|r_i|} \right) / \left(\sum_{j \in R} \frac{1}{|r_j|} \right) \quad (2)$$

ここで近傍領域 R としては、標点を中心とした半径100m円形領域を想定したが、領域が河川を挟んだ兩岸や盛土構造物の斜面両側にまたがる場合には、水平変位の出現方向が全く異なるため、平均をとれば変位を打ち消し合うことになる。そのため、旧防波堤および宮川

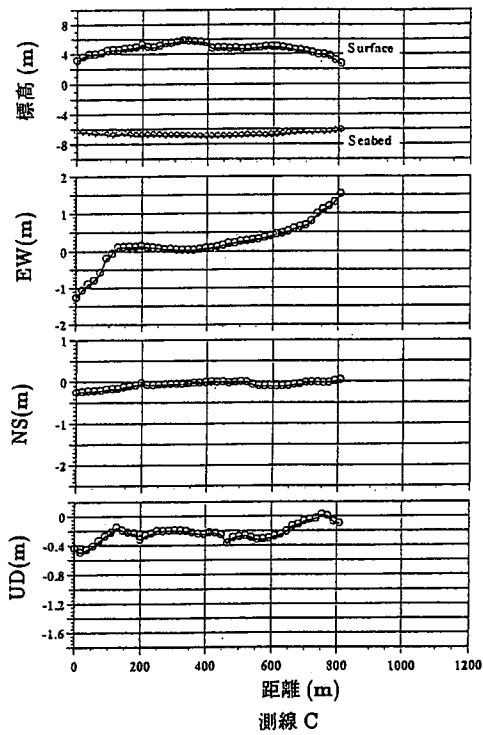
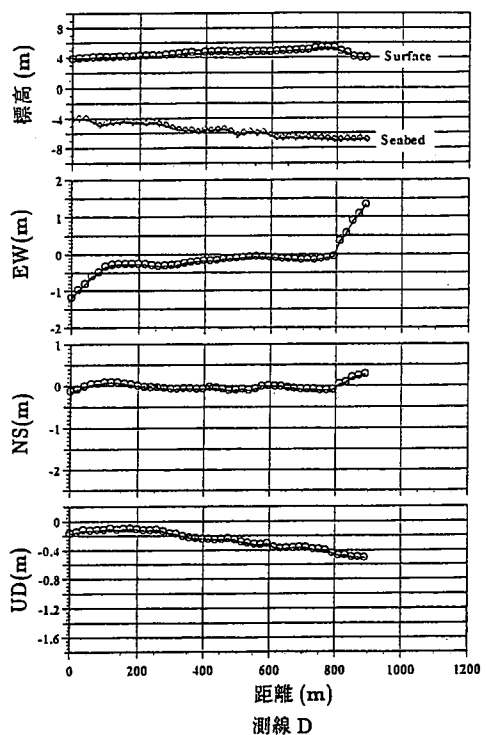
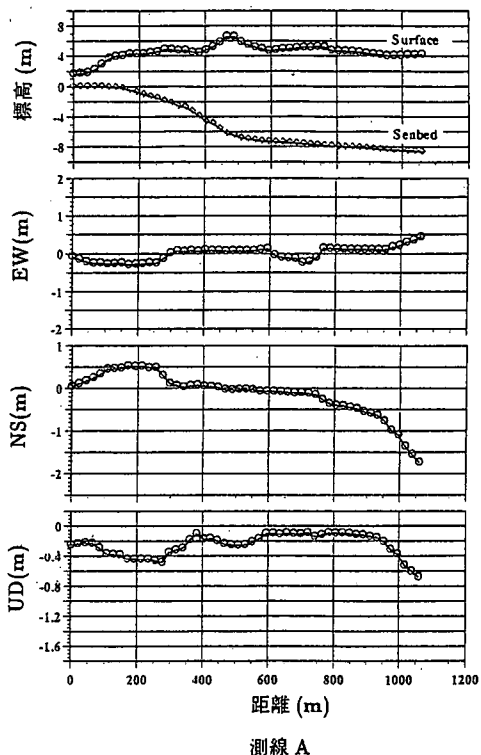
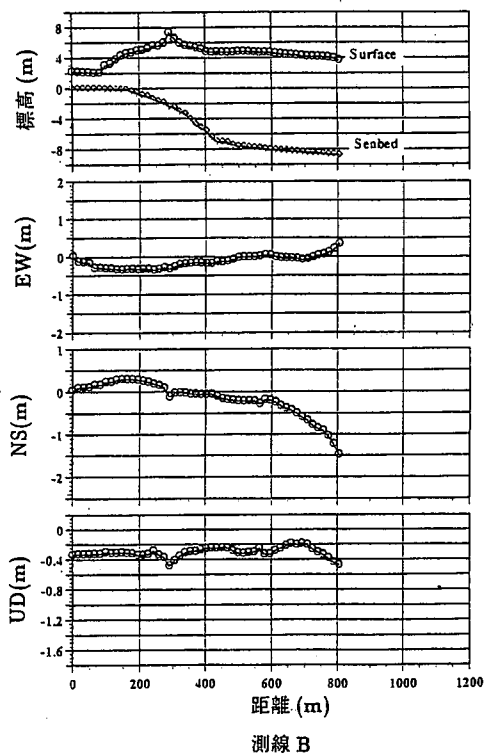


図-12 測線に沿った地盤変位分布図

EW, NS, UD はそれぞれ変位の東西方向 (東向きが正), 南北方向 (北向きが正), 鉛直方向 (鉛直上向きが正) 成分である。

周辺については、計測点が標点と異なる側の盛土斜面・河岸に属する場合には内挿計算上、その計測点を除いた。

図-11に示す代表的な測線(A-D)について、地盤変位分布をまとめたものを図-12に示す。南北方向の測線Aを見れば、東西方向の変位は護岸や河川から十分に離れているため変位量も少ないが、南北方向の変位は北側の旧防波堤から約150m程度の範囲で最大0.5m程度の北向き変位が卓越しており、また南護岸から約300mの範囲で、最大で1.8m程度の南向き変位が卓越していることが分かる。沈下量は南護岸から約200mの範囲で顕著で最大0.7m程度である。また旧防波堤付近でも最大0.4m程度の沈下が見られる。南北方向の測線Bにおいても測線Aと同様の傾向が見られるが、沈下量は概して小さく最大0.5m程度である。なお南護岸の前面水深は約9mである。

一方、東西方向の測線Cを見れば、東西方向の変位は宮川から約150mの範囲では最大1.3m程度の西向き変位が卓越し、東護岸から約300mの範囲では最大1.5m程度の東向き変位が卓越する反面、南北方向の変位は殆ど現れていないことが分かる。また沈下量は宮川から約150mの範囲で最大0.5m程度の沈下が見られるが、東護岸付近ではあまり顕著な沈下が見られない。東西方向の測線Dでは水平変位について測線C同様に、宮川から約100mの範囲で最大1.3m程度の東向き変位が卓越し、西護岸から約100mの範囲で最大1.2m程度の西向き変位が卓越しているが、沈下量については宮川の背後の広い範囲で最大50cm程度の沈下が見られる反面、西護岸付近では顕著な沈下は見られない。なお測線CおよびDにおける東護岸付近の前面水深、宮川の前面水深はいずれも約6m、西護岸付近の前面水深は約4mである。

これらの結果から芦屋浜の変位性状を簡潔にまとめると以下のようである。

- 地盤変位は護岸線・河川・盛土構造物といった変形拘束の小さい面からの距離と大きな相関が見られる。ここでは相関が見られる範囲を影響域と呼ぶことにする。影響域は地盤条件、前面水深、護岸形式などの関数であると考えられる。また護岸線などから十分離れた埋立地内部では、顕著な変位はほとんど生じていない。
- 宮川の護岸は矢板式で背後を控え杭・タイロッドで拘束している¹⁹⁾。宮川両岸における地盤変位分布(測線C, D)から、測線C, D付近では背後100-150mの範囲で堤外地(河川)側向き最大1.3m程度の水平変位と最大0.5m程度の沈下が発生している。また両岸ともほぼ同一の変位性状を示しており、地震動の方向性による変位性状の違いはここでは見られない。

- 埋立地を囲む護岸はいずれも捨石マウンド上にブロックを設置した形式である。南護岸は前面水深が約9mであり、その背後約300mの範囲で最大水平変位2.66m、最大沈下量1.78mの変位が見られた。東護岸は測線C付近では前面水深が約6mであり、その背後約300mの範囲で最大1.5m程度の水平変位が見られたが、顕著な沈下は見られなかった。西護岸は測線D付近では前面水深が約4mであり、その背後約100mの範囲で最大1.2m程度の水平変位が見られたが、顕著な沈下は見られなかった。このように背後の地盤の永久変位の程度は前面水深に大きく影響を受けることが分かる。
- 護岸線などから十分離れた埋立地内部では、局所的に0.4m程度の沈下は生じたものの、総じて顕著な沈下は見られなかった。

6. 結論

1995年1月に起きた阪神・淡路大震災について、芦屋市の六甲山地をのぞくほぼ全域に渡る詳細な地盤変位の計測を行った。方法は伝統的な空中写真測量によったが、地図作成に必要な計測精度より高い精度を要求されたので、空中三角測量の精度をシミュレーションで確認した。震災前後に撮影した縮尺1:4,000の写真を使い、おおむね水平方向8cm、鉛直方向15cmの変位の計測精度を得た。計測点は主に道路舗装面上の標識を使った。

このようにして得た各計測点における地盤変位は周辺の微地形の影響を強く受けていたが、六甲山麓の開析扇状地以南の沿岸域では西あるいは南西方向に変位が卓越しており、断層運動に伴う変位である可能性を示唆できた。この結果は、国土地理院が震災後に行った基準点測量結果とも矛盾しない。

また芦屋浜埋立地の地盤変位については写真測量によって得られた各計測点での高精度地盤変位データを基に、重み付き平均法により測線に沿った変位分布を評価した。その結果、地盤変位は護岸線・河川・盛土構造物といった変形拘束の小さい面から当該位置までの距離と大きな相関が見られ、その程度は護岸前面の水深に大きく依存すること、当該地域では地震動の方向性による変位性状の違いは認められないことが明らかとなった。

さて、今後の課題としては以下の事項が挙げられる。写真測量による地盤変位量の計測は、当初、デジタル画像をベースとした図化機(デジタル図化機)で行う予定であった。デジタル図化機は計算機の画像処理で実現する図化機である。震災前後の写真の間には3年間のずれがあり、同一点の確認は必ずしも容易ではなかった。同一点を特定するには、デジタル図化機上に両者の画像を出して、複数のオペレータが確認しながら作業

を進めるのが最も望ましいと思われた。このためわれわれは、それまで試験的に開発を進めていたデジタル図化機「ごくう」^{20),21)}をこの作業のために改造した。しかしその作業自体に多くの時間を使ってしまった上、実験の結果、現在のデジタル図化機では必要な計測精度を確保することができないことが分かった。その理由は次のようであった。(1) フィルムスキャナが8bitのものしか利用できず、砂地や陰などの微妙な部分で画像の濃度分解能が足りなかった。(2) 写真枚数が多いため、データ量の問題が起り、実用上15 μ m \times 15 μ mの画素を採用した。しかし位置の解像度が十分でなく、必要計測精度が実現できなかった(解析図化機での相互標定で平均2 μ m、「ごくう」で平均5 μ mの残存縦視差であった)。このため計画を中断し、解析図化機を使った計測に変更せざるを得なかった。これらの問題は今後デジタル写真測量の発達に伴い、解決していくものと予想される。

断層運動に伴う地盤変位量を定量的に把握するためには、断層運動が基準点網、水準点網をまたいで起こっているのを、三角点をつなぐ密な計測と高い精度での広範囲の写真測量が必要となる。一方、埋立地・人工島地盤の空間的変位分布性状を明らかにするためには、幾つかの測線に沿った変位分布を図化する方法が地盤工学的に有効であったが、限られた数の測定点での高精度変位データから任意位置での変位量を評価する手法については、その誤差評価などさらに詳しい検討が必要である。

また地盤変位場の空間的な分布と建物などの上部構造物あるいは上下水道管やガス管などの埋設構造物の被災状況との対応を調査し、これらの構造物の被災パターンを定量的に明らかにすることは今後の重要な課題である。

謝辞： この研究は(社)地盤工学会主催の阪神大震災調査委員会「デジタル写真測量による災害調査」部会によって得られた成果に基づいている。参加された部会のメンバーの方々に厚く感謝の意を表す。また大縮尺空中写真や地上基準点データの収集に関してご援助頂いた建設省国土地理院、芦屋市、神戸市、解析図化機を長期間貸与下さった(株)ADI、空中写真のデジタル化にご協力頂いた国土地理院、芦屋市都市計画基本図のデジタルマッピングデータの使用を許可して下さった芦屋市の関係各位に深く感謝する。

参考文献

- (社)地盤工学会 阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書、解説編、pp.525-575, 1996.
- (社)地盤工学会 阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書、資料編、Vol.1-4,1996.
- Lisowski, M., Prescott, W. H., Savage, J. C. and Johnston, M. J.: Geodetic Estimate of Coseismic Slip During the 1989 Loma Prieta, California, Earthquake, *Geophysical Research Letters*. Vol. 17, No. 9, pp. 1437- 1440, 1990.
- Savage, J. C., Lisowski, M. and Svarc, J. L.: Postseismic Deformation Following the 1989 (M=7.1), Loma Prieta, California, Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. B7, pp. 13,757-13,765, 1994.
- Massonnet, D., Feigl, K. L., Vadon, H. and Rossi, M.: Coseismic Deformation Field of the M=6.7 Northridge, California Earthquake of January 17, 1994 Recorded by two Radar Satellites Using Interferometry, *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 9 pp. 969-972, 1996.
- 許華祀, 佐藤裕, 有馬宜道, 垣下精三: 空中三角測量による地震断層変位の検出(対空標識によるモデル実験), *測地学会誌*, Vol. 29, No. 1, pp.1-9, 1983.
- 浜田正則, 安田進, 磯山龍二, 志本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, *土木学会論文報告集*, 第376号/III-6, pp. 211-220, 1986.
- Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K.: Liquefaction-Induced Ground Displacement and Its Related Damage to Lifeline Facilities, *Special Issue of Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, pp. 81-97, 1996.
- 石原正男, 安部義昭, 辻宏道, 畑中雄樹, 斎田諒, 吉村愛一郎, 鷲谷威: 測地測量が捉えた兵庫県南部地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, Vol. 83, pp.15-23, 1995.
- 村上亮, 藤原智, 齊藤隆: 干涉合成開口レーダーを使用した平成7年兵庫県南部地震による地殻変動の検出, *国土地理院時報*, Vol. 83, pp.24-27, 1995.
- 岡本厚, 長谷川博幸: 航空写真測量による地盤災害情報整備の現状と課題, *基礎工*, Vol. 24, No. 11, pp.42-53, 1996.
- 西本浩司, 服部進, 岡本厚, 小野徹, 長谷川博幸: 空中写真測量による神戸震災での地盤変動の計測, *写真測量学会平成8年年次学術講演会発表論文集*, pp. 91-96, 1996.
- 富久直哉, 岡本厚, 小野徹, 長谷川博幸: 写真測量による精密地盤変位計測と空中三角測量, *写真測量学会平成8年年次学術講演会発表論文集*, pp. 97-102, 1996.
- 富久直哉: 写真測量による精密地盤変位計測に関する基礎的研究, *京都大学工学部土木工学科卒業論文*, 1996.
- 西本浩司: 地震による地盤永久変位の精密三次元写真計測と地盤工学的考察, *京都大学大学院工学研究科修士論文*, 1996.
- 藤田和夫, 笠間太郎: 大阪西北部地域の地質, *地域地質研究報告*(5万分の1図幅), 地質調査所, 1982.
- 例えば, 保谷忠男: 写真測量, (社)日本測量協会, 1988 など.
- Shibata, T., Oka, F. and Ozawa, Y.: Characteristics of Ground Deformation due to Liquefaction, *Special Issue of Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, pp. 65-79, 1996.
- Takada, N., Nishi, M. and Fukuda, M.: Damage to River Levees and Retentions, *Special Issue of Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, pp. 241-254, 1996.
- 服部進, 関章良, 行司菅男, 岡本厚, 長谷川博幸: 最小2乗法による相互標定点の対話的精密計測, *電子通信情報学会論文誌*, D-II, Vol. J79-D-II, No.9, pp.1484-1491, 1996.
- Hattori, S., Okamoto, A. et al.: Development of a Digital Image-Based Plotter and its Application to Ground Displacement Measurement in the KOBE Earthquake, *ISPRS 96 Proceedings, Com. II, Vienna*, pp. 147-153, 1996.

(1998. 10. 12 受付)

MEASUREMENT OF GROUND DISPLACEMENTS DURING 1995 HYOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE BY AERIAL PHOTOGRAMMETRY

Atsushi OKAMOTO, Hideo SEKIGUCHI, Shun-ichi KOBAYASHI, Tetsu ONO, Susumu
HATTORI, Hiroyuki HASEGAWA, Kikuo TACHIBANA and Kouji NISHIMOTO

This paper reports the measurement of permanent ground displacements in Hyogoken-Nambu earthquake arising on Jan. 17, 1995. The measurement is executed over entire Ashiya-city by conventional aerial photogrammetry with photographs on the scale of 1:4,000. Three-dimensional displacements of about 700 ground points and vertical displacements of about 800 manhole lids are measured by analytical stereo plotters. Estimated measurement precision is 8cm horizontally and 15cm vertically. It is observed that the directions and magnitudes of displacements are closely connected to both distance from the dike and the front water depth there in Ashiyahama reclaimed land.