

埋立地盤における被災構造物の残留変位計測と分析

株式会社かんこう 正会員 大前雄史、山本昌也
阪神高速道路公団 正会員 南荘 淳、川上順子

1. はじめに

本調査報告は、兵庫県南部地震により被害を受けた阪神高速道路5号湾岸線（以下「湾岸線」という）において、震災後における基礎の被害実態を間接的に評価するため GPS を利用して各橋脚基礎の残留変位を観測し、その結果を分析することにより簡便に基礎構造物の被災度を判定することを試み、震害調査への適用性について考察するものである。^{1),2),3)}

2. GPS 測量を用いた基礎構造物の残留変位計測

2.1 GPS の観測手法の適用方法

大規模地震では、液状化の発生に伴い地盤流動が生じることがある。このような地盤流動が橋脚基礎周辺で発生すると、その橋脚基礎自体が移動し、落橋につながる可能性もある。兵庫県南部地震でも、湾岸線では、特に埋立地の護岸に接する基礎において護岸側へ押し出される現象が見受けられた⁴⁾。この影響を簡便に評価する方法としては、橋脚間の距離を実測することにより、被害を受けた可能性のある橋脚基礎を特定することが可能となる。しかしこの方法は、各橋脚基礎が地震動により任意方向に移動している可能性のある場合は、相対距離が一定でも、固定点が定まらないため被害実態を把握することは困難である。そこで湾岸線では、図 2-1 に示す震源に近い阪神間の約 360 基の橋脚を対象に、地震後の橋脚基礎の座標を求め、竣工工事の座標と比較することで絶対移動量を求めた。

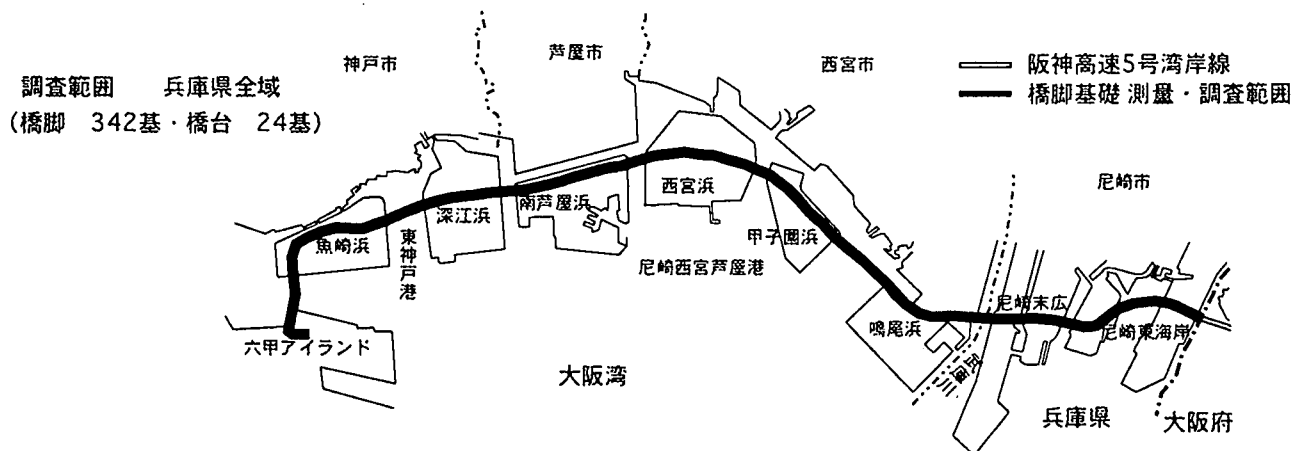


図 2-1 湾岸線橋梁基礎測量調査位置図

従来の測量方法は、国家基準点等の既知点を基本として測量網を設置、観測を実施するのが一般的である。しかしながら、地滑りや地震等によって広範囲に変位をきたした場合、既知点とするべき基準点も移動している可能性があり、範囲内の構造物を対象に測量を実施する場合は、基準点自体が測量対象物となる。

兵庫県南部地震では阪神間の国家基準点が大きく移動したことから、被災直後の湾岸線の測量に当たって任意座標系の骨格基準点を求めるためにこの GPS を採用し、その適用性や有用性を検証した。

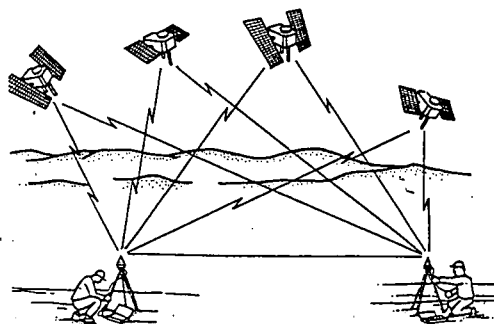


図 2-2 相対測位の原理

キーワード 兵庫県南部地震、GPS 測量、基礎構造物、残留変位、側方流動

連絡先 ㈱かんこう 住所:大阪市城東区野江1丁目12番8号 TEL:06-6935-6195 FAX:06-6935-5323
E-mail:omaet@kanko.cityis.co.jp

今回は相対測位法を採用し、受信点の絶対位置を求めるのではなく、図 2-2 に示すように 2 つ以上の受信機で同じ衛星を同時に観測して、各点間の相対的な位置関係(基線ベクトル)を求める手法をとった。受信機間の観測値の差を取ることで、軌道誤差、対流圏誤差、電離層誤差等が打ち消しあうため精度の向上が保証される。その基線長誤差 E (cm) は、 $\pm 1 \text{ cm} \pm 1 \cdot 10^6 \times \text{基線長 } L$ (cm) である。⁹⁾

2.2 基礎の移動ベクトルの算出

湾岸線の残留変位計測に当たっては、図 2-3 の●で示す点を GPS 測量により骨格基準点として現地に設置し、これらの基準点を与点として任意座標系における橋脚中心位置を観測した。橋脚および橋台の測量位置は地表面から約 1m の高さに統一した。橋脚中心は、橋脚の 4 点を計測し、交点計算によって橋脚中心座標を算出した。橋台の場合はたて壁中央位置の座標を算出した。

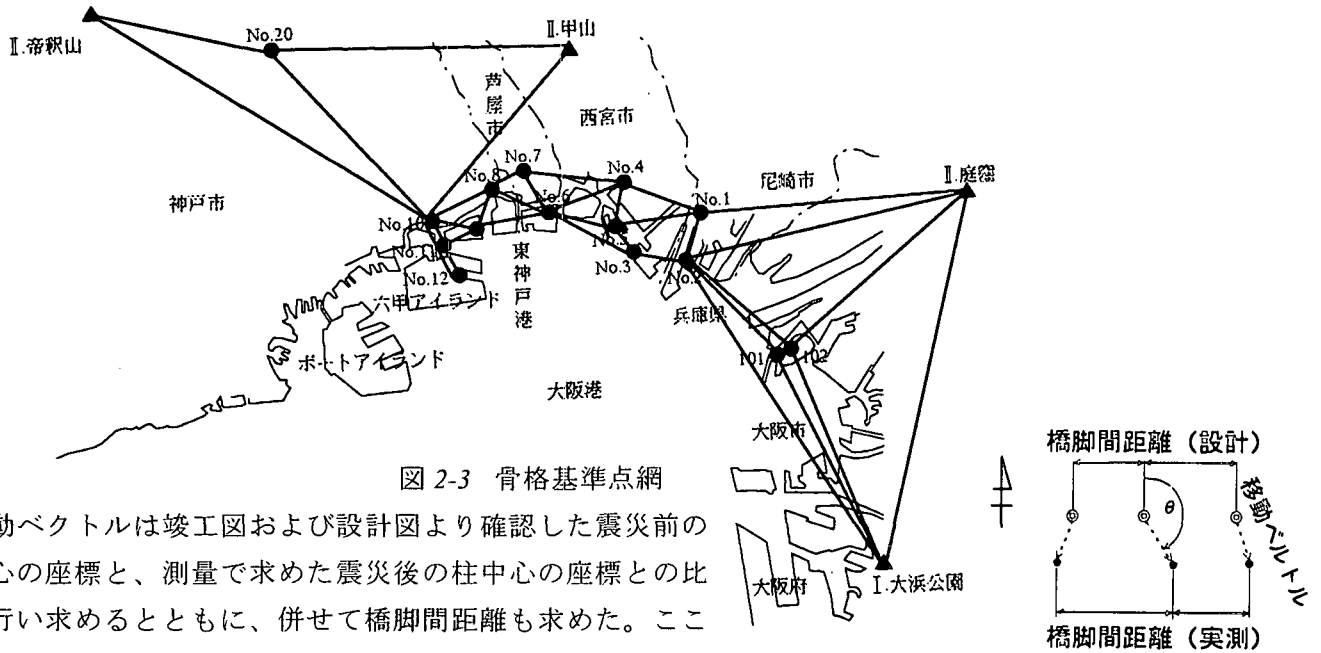


図 2-3 骨格基準点網

移動ベクトルは竣工図および設計図より確認した震災前の柱中心の座標と、測量で求めた震災後の柱中心の座標との比較を行い求めるとともに、併せて橋脚間距離も求めた。ここで移動ベクトルは、震災後の中心座標 - 震災以前の中心座標と定義している。図 2-4 にその概念を示す。

◎ 震災前の橋脚中心座標
● 震災後の橋脚中心座標

2.3 基礎の移動量ならびに移動方向の分布

前項で求めた移動ベクトルの移動量と移動方向角の分布を

図 2-5 に示す。移動方向角は $180 \sim 240^\circ$ (南西方向) に集中していることが確認できる。また埋立地毎に移動ベクトル量および絶対移動方向角の平均による埋立地全体としての動向を図 2-6 に示す。これより六甲アイランド以外の埋立地の移動ベクトルは、移動量 30 cm 以内、方向角 $180 \sim 240^\circ$ に集中していることが確認できる。六甲アイランドについては、移動量・方向角ともに他の埋立地とは異なった傾向を示しており、平均の移動量は約 45 cm、方向角は約 300° である。他の埋立地の各々の平均値と異なる傾向を示した要因として、六甲アイランドの橋脚のほとんどが護岸近傍に位置していることが挙げられる。これについては、地盤変位との関連

で改めて考察する。次に調査範囲全域における移動ベクトルを図 2-7 に示す。湾岸線で唯一落橋した西宮大橋東側アプローチ橋

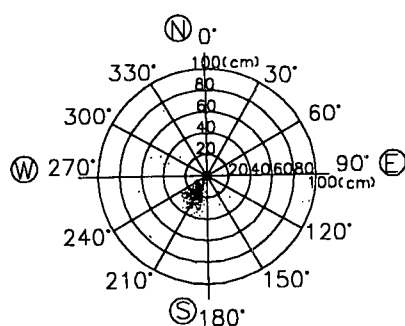


図 2-5 移動分布

図 2-4 移動ベクトルの算出方法

図 2-6 埋立地ごとの平均移動ベクトル

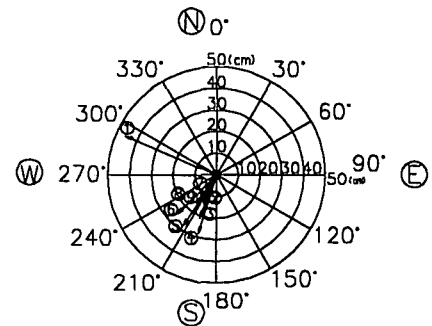


図 2-6 埋立地ごとの平均移動ベクトル

を支持する甲子園浜側端橋脚においては、護岸は明らかに海側に迫り出し、橋脚基礎も護岸側に傾斜したことが被災直後の調査で明らかになっているが、移動ベクトルは一般の橋脚基礎とあまり大差なかった。

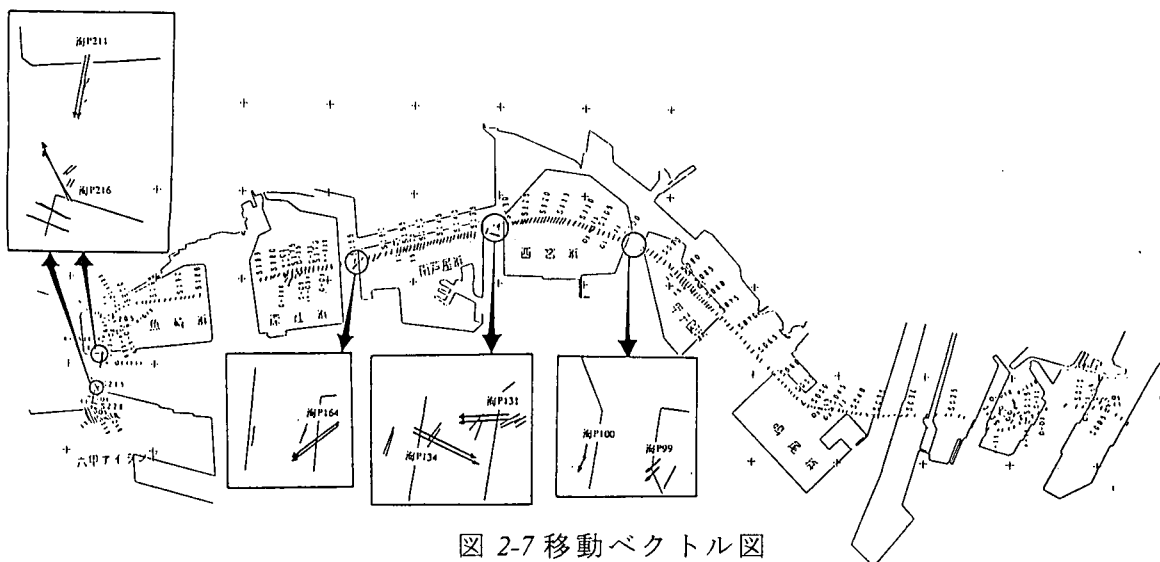


図 2-7 移動ベクトル図

2.4 橋脚間距離の変化量

本項では、絶対座標の変化から、地震前後における橋脚間距離の変化について考察する。

調査範囲の橋脚はほぼ全基がラーメン橋脚であった。そこで橋脚間距離としては、図 2-8 に示すように、橋軸方向橋脚間距離と橋軸直角方向橋脚間距離について地震前後の変化量を求めた。

橋軸方向変化量について路線延長方向に並べた場合各埋立地の境界付近の橋脚について橋軸方向変化量が大きいことがわかった。その絶対量は、最大 1m 程度にまで達している。また、橋軸直角方向変化量について同様に路線延長方向に並べた場合は、同一橋脚内における脚柱間の変動はほとんどなかったと判断された。

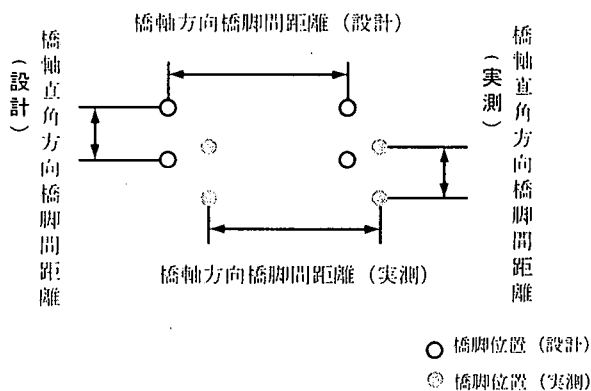


図 2-8 橋脚間距離の算出方法

3. 断層活動に伴う深層基盤移動ベクトルによる補正

3.1 移動ベクトルが含む要因

今回算出した移動ベクトルには、下記の要因が含まれていると考えられる。

- ①測量誤差 ②施工誤差 ③震災の影響

以下に順を追って考察する。

①測量誤差

橋脚の柱中心の位置を算出するまでに、下記の測量時に誤差が生じている可能性がある。

- a. GPS による基準点設置時 b. 基準点からの多角測量時 c. 橋脚の柱周りの測量時

c の段階で橋脚の柱角の座標が求められるが、これには a、b、c のそれぞれの段階での誤差が含まれている。a の段階における最大閉合差は 2.9 cm であり、b の段階における最大閉合差は 9.5 cm であった¹⁾。また c の段階については光波測距儀の性能より 5 mm 以下である。これらの誤差が同時に生じる確率は非常に少ないことから、測量誤差としては最大 10 cm 程度であったと推定される。

②施工誤差

橋脚および基礎に対する平面位置の出来形精度は 30 mm 以内であり(土木工事共通仕様書より)⁹⁾、一

方、今回の測量による柱全周の出来型の誤差は±5 cm 程度の施工精度であった。このことより施工誤差による柱中心座標の算出時に2 cm～3 cmの誤差が生じることとなる。

③ 震災の影響

今回の調査対象となった湾岸線は六甲アイランド～尼崎東海岸の埋立地間を結ぶように建設されているが、今回の地震によりこれらの埋立地では埋立層の液状化とこれに起因すると想定される側方流動現象によって、護岸や橋梁基礎に大きな被害が生じている⁷⁾。

一方、今回の調査では護岸付近以外の橋脚については、移動方向角約200°、移動量12～28 cmの移動ベクトルが求められた。これらの橋脚の橋脚間距離は、竣工時(設計時)と比較するとほとんどが約5 cm以内の変化量しか認められない。このことより各橋脚の相対的な位置は震災前後においてほとんど変化しておらず、構造系全体が一定の移動をした可能性がうかがえる。このことは、基準点の改測結果からも容易に判断できる。ここで起震構造図と基準点の移動ベクトル⁸⁾の重ね合わせたものを図3-1に示す。

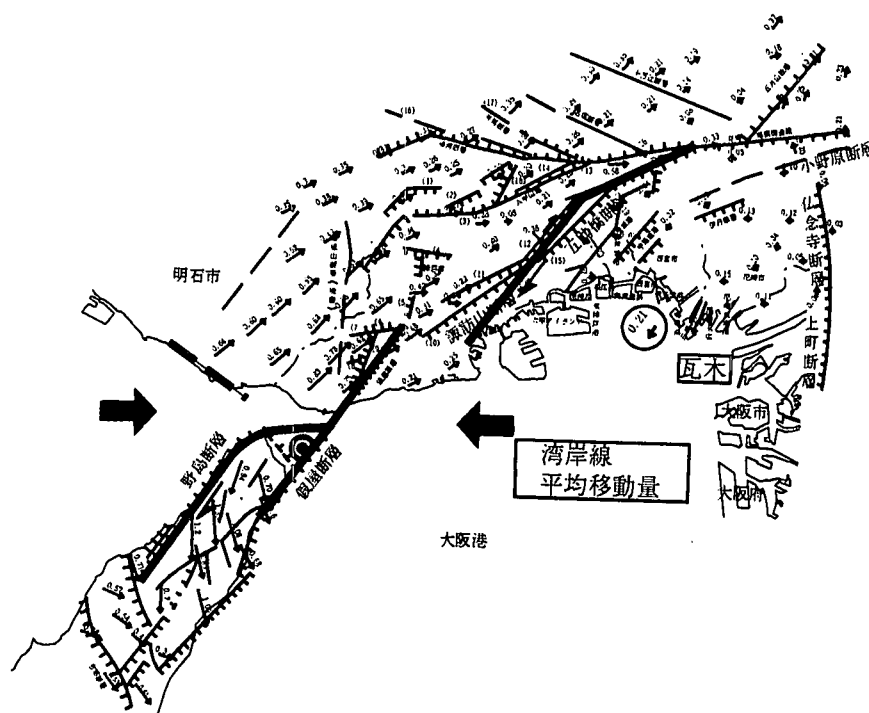


図 3-1 兵庫県南部地震の起震構造図と国家基準点改測結果の重ね合わせ

兵庫県南部地震では野島断層から六甲断層系に至る断層活動により右横ずれの地殻変動を起こしたとされているが、まさに湾岸線通過地点は断層の南東側に位置し、国家基準点の改測結果からも全体が南西方向に動いたと思われる。このことから、橋脚基礎で観測された残留移動ベクトルにおける震災の影響は、地殻全体の移動によるものと、液状化や側方流動等の周辺地盤の動きに起因する橋脚個々の移動によるものが複合したものであると想定できる。

3.2 移動ベクトルの補正

今回算出した移動ベクトルには、3.1 で述べた種々の要因が含まれているが、基礎の損傷度および健全度を判断するためには、橋脚固有の移動量を求める必要があり、移動ベクトルから地殻全体の移動等の要素を取り除いたベクトル量を算出する必要がある。このため、移動ベクトルより平均ベクトルを差し引いた。このベクトルを以下相対移動ベクトルと称する。平均ベクトルを算出する際には、全橋脚の移動ベクトルより正規分布における95%以上の特異な移動ベクトルを除いたデータの平均値をもって湾岸線の基礎の平均移動ベクトルとした。また、平均ベクトルの算出においては、データ全体の正規確率への当てはめ、各基準点の移動との相関等による検討も併せておこなった。

・平均ベクトル移動量：0.207m

・平均ベクトル移動方向角：211.3844°

3.3 湾岸線基礎の相対移動ベクトル

表 3-1 に、3.2 で求めた阪神間の各埋立地における湾岸線基礎の相対移動ベクトルの平均値を示す。これより、地殻の影響によると思われる成分を除いた橋脚基礎の残留移動量は六甲アイランドを除きほぼ 10cm 程度であり、移動方向に特徴は見られない。またあらためて護岸に接する基礎の移動方向を見ると埋立地全体の動きが相殺されたことで、護岸側への移動がより明確となっている。前節で指摘した護岸に面する西宮港大橋端橋脚に着目すると、補正を行ったことで甲子園側で約 11cm 程度、西宮浜側で約 3cm 程度移動していることが明らかとなった。震災後直ちに実測された橋脚間距離の実測値に基づき前後の橋脚の移動量を推定した結果によれば、各々 9cm 及び 3cm 移動したとされており、ほぼ同じ値となっている⁹⁾。このように補正後の相対移動ベクトルを用いることで、橋脚基礎の被災状況をより正確に分析することが可能となった。

表 3-1 各埋立地ごとの相対移動ベクトルの平均

埋立地	相対ベクトル	
	移動量(m)	移動方向角(°)
六甲アイランド	0.51	332.9
魚崎浜	0.12	86.9
深江浜	0.05	150.1
南芦屋浜	0.12	176.3
西宮浜	0.10	208.2
甲子園浜	0.10	264.5
鳴尾浜	0.12	52.1

4. 地盤の変位量調査

4.1 計測手法

地盤変位量の調査は六甲アイランドから鳴尾浜までの 7 島を対象とし、地震前後の航空写真測量の比較によって実施した。この方法は濱田らの提案している手法を基本にして、現地基準点により地上座標に変換したものである⁹⁾。

使用した航空写真は次のとおりである。

地震前：撮影縮尺 1/12,500

撮影年月日

1990 年 5 月

1993 年 5 月

1994 年 5 月

地震後：撮影縮尺 1/8,500

撮影年月日

1995 年 1 月

(18 日～21 日)

地盤変位量の測定対象は阪神高速道路より幅 200m の区域で、地震前後の写真で同定できる地盤上のポイントを選定し、地震前後の航空写真においてそれぞれ 3 次元座標を測量し、この座標値の差を変位量として求めた。¹⁰⁾

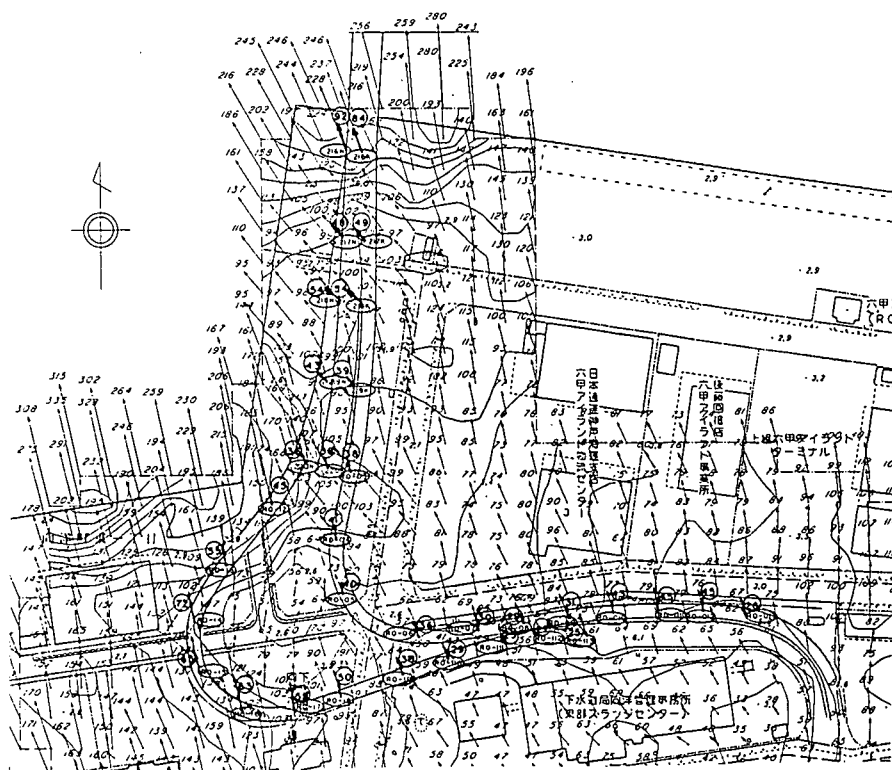


図 4-1 六甲アイランドにおける地盤の相対変位量および基礎の相対移動量

4.2 計測結果

写真測量から得られた地盤の変位量を基に、まず地盤の変位ベクトルを表示したもの(地盤変位図)を作成し、その地盤変位図をもとに、20m 方眼各点での地盤変位ベクトルを計算し、さらにその 20m 方眼各点における地盤の変位データをもとに同じ手法で、橋脚位置における地盤変位ベクトルを推定した。

このようにして求めた 20m 方眼各点での地盤変位ベクトルおよび橋脚位置における地盤変位ベクトルに対し、3.2 で示した手法で、断層活動に伴う深層基盤移動ベクトルによる補正を行った。すなわち、各座標値に平均ベクトル移動量($\Delta X=+0.1793$ 、 $\Delta Y=+0.1028$)の数値を加えて処理したものである。こうした手順で得られた基礎移動ベクトルと地盤変位ベクトルを重ね合わせたベクトル図(橋脚・地盤ベクトル二次内挿図)を図 4-1 に示す⁹⁾。図 4-1 は六甲アイランドの状況である。

六甲アイランドにおいては、地盤も橋脚基礎も調査範囲においてはほぼ全域で北側護岸に向かって大きく動いており、一部西側護岸の近傍のみ両護岸の影響を受けて北西方向に移動していることがわかる。一方対岸の魚崎浜においては、海岸付近の地盤は各々護岸方向に動いているが、一定の距離離れると変位量も少なく方向性も見られない。また橋脚基礎についても、周辺地盤の動きに影響を受けたような動きとなっている。その他の埋立地についても同様に示すことにより、護岸近傍の地盤は周辺橋脚基礎と同様に大きな変位量を示していることが明らかになった。

5.震害調査への適用性

5.1 橋脚位置、橋脚基礎の水平移動量および地盤の水平変位量の関係

以上のように、地震後に実施した GPS 測量および空中写真測量により、橋脚基礎および地盤の動きを把握することができた。いずれも護岸近傍においては大きな移動量、変位量を示していたが、その方向、絶対量は六甲アイランドと

その他の埋立地では傾向が異なっていた。そこで本節では、魚崎浜以東の埋立地と六甲アイランドに大別して、橋脚位置(護岸からの距離)と橋脚基礎の水平移動量および地盤の水平変位量の関係について考察する。

まず、魚崎浜以東の埋立地については、図 5-1 に示すように、護岸に最も近い橋脚基礎について航測図より護岸からの距離を計測し、内陸側の橋脚基礎については各々の橋脚間距離を加算して護岸からの距離とした。埋立地は東西の護岸が存在するので、各々の護岸から橋軸方向に距離を加算し、短い方をその橋脚基礎における護岸からの距離とした。なお、橋脚基礎の測定位置は柱中心としている。また橋脚基礎の護岸方向水平移動量としては、相対ベクトルの橋軸方向成分ベクトル量とした。地盤についても柱中心位置における地盤変位ベクトル量の橋軸方向成分とした。

次に六甲アイランドについては、補正後の移動ベクトルは、いずれも橋脚基礎の北側および西側の両護岸の影響を受けたような移動をしていることから、護岸からのベクトル方向距離とベクトル量について分析することとした。図 5-2 に示すように、ベクトル方向距離として、航測図より相対ベクトル方向の護岸までの距離を求めた。また橋脚基礎の移動量および地盤の変位量としては、各々の相対ベクトル量とした。以上より算出した護岸からの距離と橋脚基礎の水平移動量および地盤の水平変位量との関係を図 5-3、図 5-4 に示す。

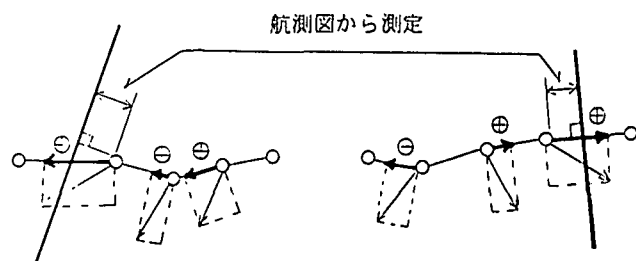


図 5-1 魚崎浜以東における護岸からの距離の算出方法

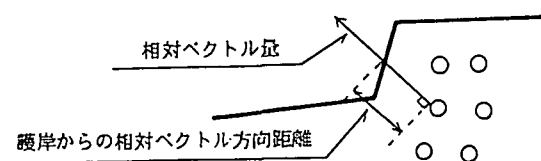


図 5-2 六甲アイランドにおける護岸からの距離の算出方法

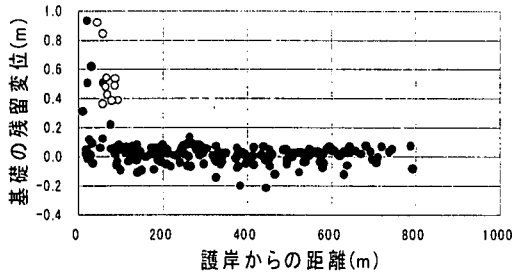


図 5-3 護岸からの距離と基礎移動量

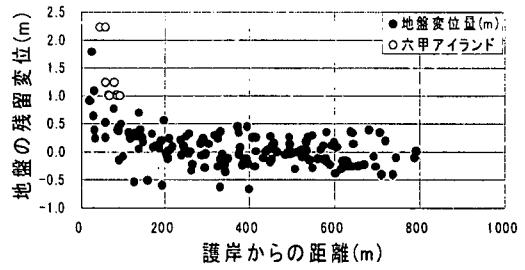


図 5-4 護岸からの距離と地盤変位量

図 5-3 より、護岸からの距離が 100m 未満の橋脚基礎は、護岸崩壊の影響を受けて大きく移動したことがわかる。この傾向は六甲アイランドにおいても同様の結果となっている。また護岸からの距離が 100m 以上になると移動量は急速に収束し、その範囲は大半が 15 cm 以内であることが確認できる。

一方図 5-4 より、地盤も基礎の移動量と同様の傾向を示している。しかし護岸の影響は橋脚基礎に対する影響よりもさらに内陸部まで広がっている傾向も窺える。また内陸部における変位量は、概ね 50 cm 以内の範囲に収まっていたが、測量精度を考慮しても、地震の影響を受けたことが窺われる。

5.2 地盤の変位量と基礎の移動量との関係

前項で橋脚基礎の移動量や地盤の変位量は護岸の崩壊の影響を受けて、護岸よりほぼ 100m 程度離れた位置まで影響があったことが明らかとなったが、それらの相関を見るため、基礎の移動量と基礎位置における地盤変位量との関係を調査した全橋脚についてプロットし図 5-5 に示す。これらより、杭基礎については、地盤変位量の増大に伴って基礎の移動量も増加する傾向が窺われ、基礎の移動量は基礎位置の地盤変位量の 1/2 ~ 1/3 程度である事がわかる。一方ケーソン基礎および地中連続壁基礎については、地盤変位量が増大しても必ずしも基礎の移動量は大きくなり、明瞭な相関は見られなかった。この結果より、基礎の移動量は基礎の剛性の大小とも関連する事が窺われる。

なお図 5-5 においてケーソン基礎のうち 2 基だけ大きな移動量を観測しているが、これは護岸沿いに建設されたオープンケーソン基礎上のラーメン橋脚柱 2 基である。本基礎は直径 6m のケーソン 2 基をフーチングで連続した構造であり、埋土層と粘土層の境界付近で大きな亀裂が入って橋脚が前傾し、湾岸線の橋脚でもっとも大きい残留傾斜角約 1 度を記録したことが判明している。その他の地盤変位の大きい護岸沿いの基礎は全て剛性の高いニューマチックケーソンであったことから大きな移動量は観測されていない。そこで、地盤の側方流動の影響を受けたと考えられる、護岸から 100m 未満の橋脚を抽出し、表 5-1 に示す影響度評価指標により基礎形式毎に分類した。図 5-6 は基礎形式ごとの影響度の比率を示したものである。ここで杭基礎①は対象となった

図 5-5 地盤の変位量と基礎の移動量との関係

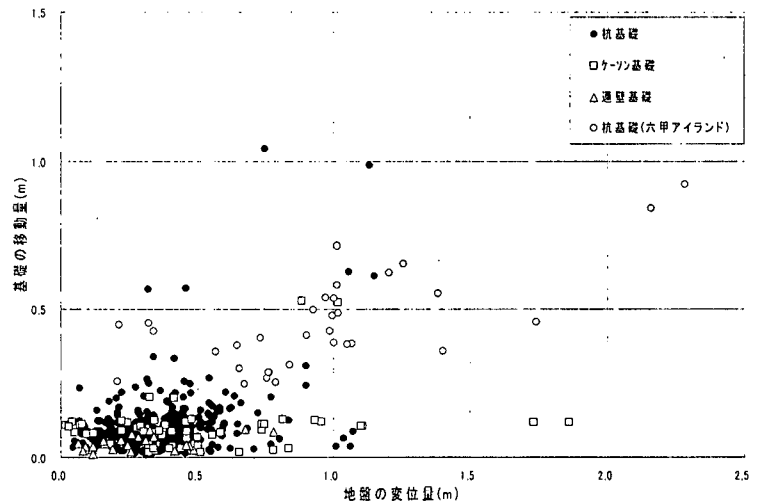


表 5-1 基礎の相対移動量による影響度評価指標 (cm)

基礎の相対移動量	影響度
$0 \leq d < 15$	I
$15 \leq d < 30$	II
$30 \leq d < 45$	III
$45 \leq d$	IV

杭基礎 34 基を示したものであり、杭基礎②は六甲アイランド以外の杭基礎 7 基について示したものである。これより、ケーソン基礎においては 7 基中 6 基が影響度 I であり、唯一影響度 IV となったケーソン基礎は前述した剛性の低いオープンケーソン基礎である。一方杭基礎については 34 基中 27 基が六甲アイランドに位置しているが、多くが影響度 IV または III であり、六甲アイランドを除く 7 基を見てもその傾向は同様である。このように、基礎の残留移動量と基礎の剛性には一定の相関が窺えた。

これらから、今後護岸近傍に建設される橋脚基礎については、必要に応じて側方流動による影響を検討するとともに、できるだけ剛性の高い基礎構造形式を採用する等の配慮が必要であることが示された。

6. まとめ

本報告では、地震による橋脚基礎の被災状況を把握する間接的手法として、地震動や地盤流動によって生ずる基礎の残留移動量を GPS 測量により計測し、その適用性について検討してきた。本調査では地震後の基礎構造物の残留変位を測量することで、側方流動のように大きな地盤変位の影響を把握することができ、今後の橋脚基礎の設計に有益な情報を得ることができた。またこれらの成果は平成 8 年 12 月に改訂された道路橋示方書 V 耐震設計編にも取り入れられた¹¹⁾。

今回用いた方法は、大地震により広範囲に高架構造物が被災した場合の定量的な被害状況を迅速に、かつ効果的に把握する方法として非常に有効である。しかしながら、この値はあくまで地震動の収まった後の値であり、特に地盤流動の影響を受けていない一般部の橋脚基礎杭では、地震主要動時において深度方向にも複雑な応答変位を示し、杭体の損傷はこの時点で発生すると予想されることから、杭体一本一本の被災度を把握するためには、杭自体の損傷状況を直接調査する必要がある。

<参考文献>

- 1) 阪神高速道路公団神戸第二建設部, (株)かんこう: 5号湾岸線災害応急復旧測量業務報告書, 1995
- 2) 阪神高速道路公団, (財) 阪神高速管理技術センター: 埋立地盤の橋梁基礎構造物に関する震災調査研究, 1996
- 3) 大窪剛文, 南莊 淳, 川上順子, 大前雄史, 平山由紀子: 阪神高速湾岸線における地震後の橋梁移動調査, 第 31 回地盤工学研究発表会講演概要集, p.1807, 1996
- 4) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書, 1995
- 5) 日本測地学会: 新訂版 GPS -人工衛星による精密測位システム-, 1989
- 6) 阪神高速道路公団: 土木工事共通仕様書 II, 建設工事編, P.289, 1992
- 7) 阪神高速道路公団: 大震災を乗り越えて -震災復旧工事誌一, 1997
- 8) 藤田和夫: 兵庫県南部地震の地質学的特性 -横ずれ断層系の活動-, 土木学会誌, vol.80, p.48, 1995
- 9) Masanori Hamada, Ryoji Isoyama, Kazue Wakamatsu: The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, Association for Development of Earthquake Prediction, The School of Science and Engineering Waseda University, Japan Engineering Consultants, 1995
- 10) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996
- 11) 南莊 淳, 安田扶律, 林勝巳, 小林弘幸: 阪神高速湾岸線における地震後の地盤変位と基礎移動, 第 32 回地盤工学研究発表会論文集, P.747-748, 1997

図 5-6 基礎形式による影響度評価

