

(53) 常時微動による神戸市街における表層地盤の地震動特性
 - 阪神淡路大震災に関連して -

(財) 鉄道総合技術研究所 正員 上半 文昭

(財) 鉄道総合技術研究所 正員 中村 豊

1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震は、死者およそ5500人・全半壊建物20万棟以上におよぶ甚大な被害を阪神・淡路地区にもたらした。震動被害が幅1~2kmの幅を持った带状地域に集中したが、我々は被害要因のひとつとして神戸周辺地盤の地震動増幅特性を考えている。そこで、神戸市およびその周辺都市において常時微動を用いて表層地盤の地震動増幅特性を調査して被害との比較検討を行ったので報告する。

2. 常時微動の測定と分析

2月16日~18日と4月17日~20日の2回にわたり、図1に示した計14の測線上で約200点の常時微動測定を行った。測定には、我々が開発したPIC91を用いた。センサーをアスファルト舗装上に設置し、1回約41秒(4096データ)の東西・南北・上下の3成分同時測定を各測点3回ずつ行った。各測点におけるフーリエスペクトルは3個の記録波形のフーリエスペクトルを平均して推定しており、交通振動などによるノイズの影響が大きいときには各記録波形から外乱の少ない部分1024データを抽出し、そのフーリエスペクトルの平均から推定している。表層地盤の卓越振動数Fおよび増幅倍率Aは、各測点ごとに算出したフーリエスペクトルの水平成分を鉛直成分で除したものの3回の測定分を平均して求めたQTスペクトル(以下QTS)の卓越成分から求める¹⁾。

3. 測定結果

全14測線の測定結果から神戸周辺の地盤の地震動特性の概要を述べる。また、図1に示した鷹取・長田地区と三ノ宮周辺を採り上げて被害に対する表層地盤の地震動増幅特性の影響について検討を加える。

3.1 神戸周辺の地盤の地震動増幅特性

図2・図3に常時微動により推定した神戸周辺の地盤の卓越振動数Fと増幅倍率Aを示す。図2は被害種別との関係を示し、図3は地域別の分布を示したものである。各測点の被害状況については、測定者の主観的判断と国土地理院の災害現況図²⁾によっている。図2・図3によると、神戸周辺の地盤の卓越振動数Fは1.2~2.5Hz付近に集中していることがわかる。山側では震動被害が比較的少なく卓越振動数は高くなるので

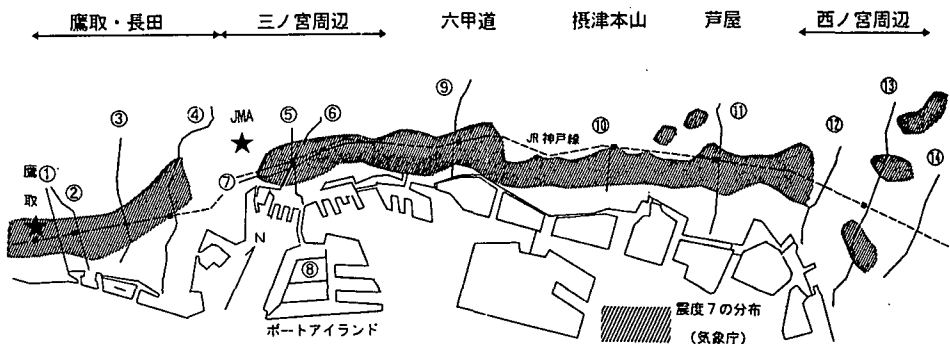


図1 神戸周辺の市街地常時微動測線と震度7の分布

良好な地盤と考えられるが、軟弱な地盤や海側の埋め立て地などの低地や盛土地では液状化が生じており卓越振動数は1 Hz 以下と低い。神戸周辺の地盤の卓越振動数Fは、六甲山地の近傍で高く、そこから海側に1~2kmの幅の帯状地域で1.2~2.5Hzの値を示し、海側の埋め立て地で1Hz以下になる傾向がある。振動による建物被害のほとんどがこの卓越振動数1.2~2.5Hzの地盤に発生しており、被害が帯状に見えるのはこの地盤の影響ではないかと考えられる。山側は構造物に影響を与える周波数帯の増幅倍率が小さいため被害が少なく、海側では液状化により構造物に大きな地震力が伝えられず震動被害があまり大きくならなかったものと推察される。そのため、中間の帯状地域で建物被害が際立つ結果になったものと思われる。

帯状地域で際立った震動被害は、地盤の卓越振動数が構造物の固有振動数に近かったことと関係している可能性がある。文献3)によると、建物の固有振動数は木造2階建てで2~5Hz程度、また被害が目立った5~10階建て程度のRC・SRC・S造建物では1~3Hz程度である。建物は損傷すると固有周期がのびるので、固有振動数と同じかそれより少し低い成分が入力地震動の中に卓越すると破壊に至りやすい。常時微動の調査によれば、帯状地域の地盤は被害建物の固有振動数と同じかそれより少し長い1.2~2.5Hzを増幅させる。

次に図3をみると、六甲道・摂津本山・芦屋の0.5Hz付近のデータを除けば(後述)、大きく4つに分類した地域間に地盤の特性の差はあまりみられない。

神戸周辺の地盤のその他の特徴として、局所的に悪い地盤があることもあげられる。天井川の氾濫により局所的に地盤条件が異なることが考えられるほか、早くから開発された土地であるため人工的な手がひろい範囲に加えられた結果、局所的に悪い地盤が存在する結果となったのであろう。図3の卓越振動数0.5Hz、増幅倍率5倍付近のデータは、芦屋測線のかかなり標高の高い地域で得られたものであり、その測点近傍では局所的に構造物が被害を受けていた。おそらく、それらの測点は盛土や埋土によって平坦化された土地であり、常時微動測定により人工的な地盤の影響も評価することができることを示す結果であると考えている。このような局所的な地盤条件の変化は、次の鷹取・長田地区にもみられる。

3.2 鷹取・長田地区の地盤の地震動増幅特性と家屋の倒壊率の関係

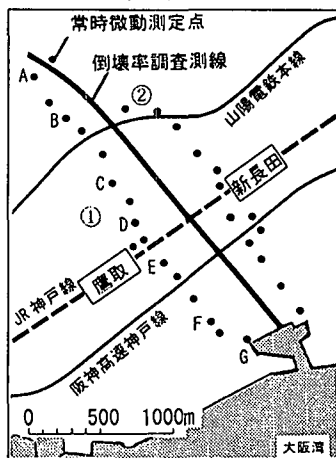


図4 長田地区測定点

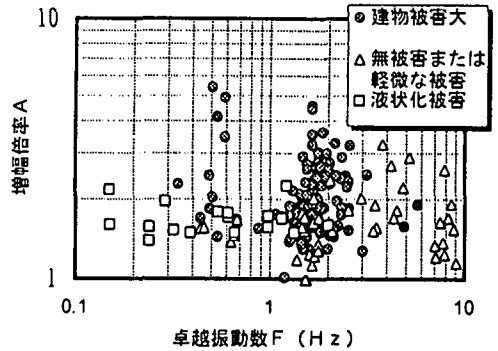


図2 A・Fと被害の関係

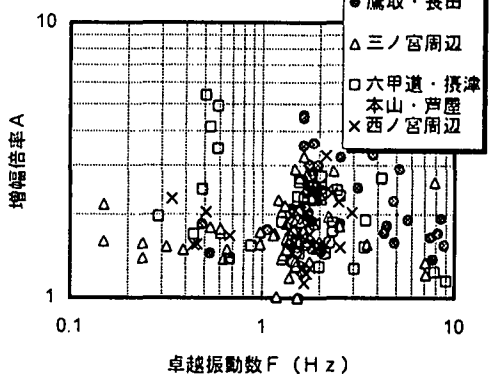


図3 A・Fの地区別の分布

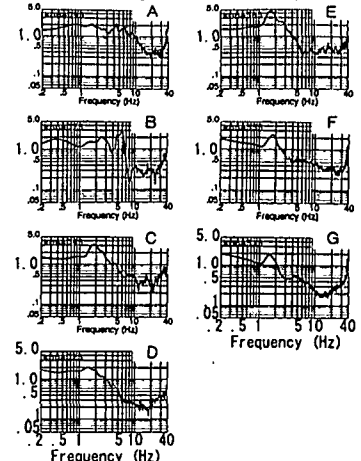


図5 測線①のQTS

長田地区はもっとも甚大な被害を受けた地区のひとつであり、家屋の倒壊も著しい。図4に鷹取・長田地区の測線①・測線②の位置を示し、図5に長田地区のQTSの山側から海側への変化を示す。増幅倍率は山側では小さくC地点で約3倍、D地点でいったん2倍程度に小さくなった後E地点で約4.5倍と最大値を示し海側に向かって小さくなる。

文献4)に我々の測線①と②のほぼ中間を通る測線上で家屋の倒壊率を調査した結果がある。そこに報告された倒壊率と我々が表層地盤変状評価指標として提案しているK値(=A²/F)¹⁾とを比較する。K値は、表層地盤に生ずる地震時せん断ひずみγを概略推定するための指標であるが、地盤上の物体に及ぼす地震動の仕事率とも関係している⁵⁾。

図6に測線①と②上の各測点のK値と、倒壊率調査結果を示す。距離はJR神戸線を起点として線路直角方向の距離を示している。図より、両測線のK値の最大値と倒壊率の分布はよく似た傾向を示していることがわかる。我々の2測線と、文献4)の測線が完全に一致しているわけではないが、測線①・②を合わせた傾向は、倒壊率と非常によく対応している。

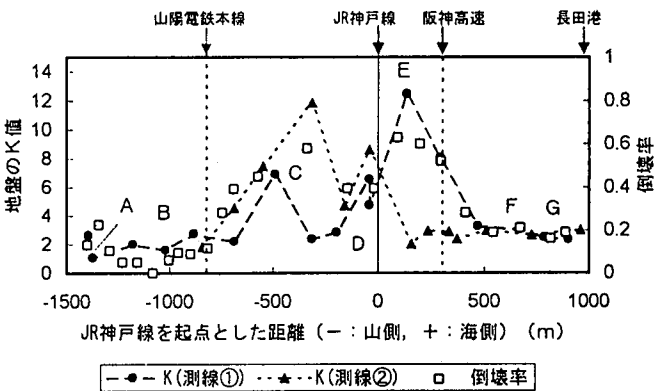


図6 K値と倒壊率の比較

また、基盤のせん断波速度V_bを600m/s、基盤加速度αを200~300galと仮定すると地盤のせん断ひずみγは、

$\gamma = K \times \alpha / (\pi^2 V_b) \approx K \times 10^{-3} / 2 \sim 3$ となり、K値がおおよそ2~3でせん断ひずみが10⁻³に達することになる。実際、K値が3より大きい観測点付近では路面に変状が確認されている。

以上のように、表層地盤評価指数として提案しているK値は被害とよく対応することが確認された。長田地区の例を見ると、わずかな距離で地盤の特性が大きく異なっており、少なくともこの地域の地震被害予測にはきめ細かな地盤調査が不可欠であることがわかる。

3. 3 三ノ宮周辺の地盤の地震動増幅特性と被害種別の関係

この地域は、山側の良好な地盤、卓越振動数1.5Hz程度の扇状地や三角州などの砂質地盤、およびポートアイランドなどの埋め立て地盤の三つに大別でき、常時微動の特性もこれらに対応している⁶⁾。被害の特徴は、三ノ宮駅、灘駅などの周辺でRC・SRC・S造の被害が非常に多くみられたことと、埋め立て地で大規模な液状化が生じたことがあげられる。ここでは、三ノ宮周辺の被害と微動により推定された地盤の地震動特性の関係について検討する。

図7に三ノ宮周辺の測点を示し、図8に常時微動による地盤の増幅倍率A、卓越振動数Fと被害の関係を示した。図8を見ると、被害のない山側の地域(F:3Hz以上、A:2.6倍以下)、震動被害の大きい地域(F:1.5Hz前後、A:最高4倍)、液状化を起こした海側の埋め立て地域(F:1Hz以下、A:

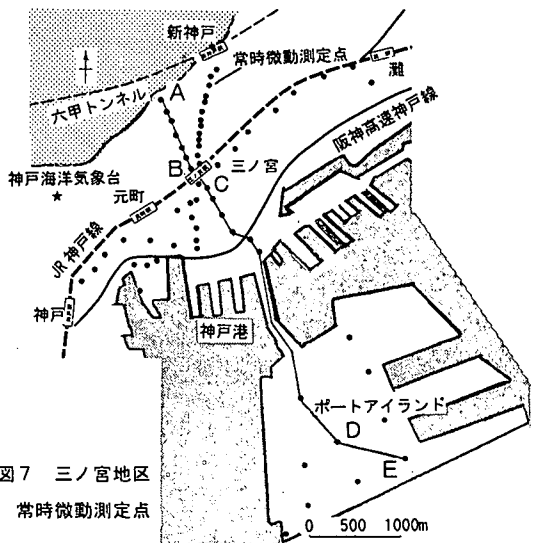


図7 三ノ宮地区 常時微動測定点

2.2 倍以下)にははっきりと分かれている。このように、常時微動の特性は地質条件とよく対応している。

図9は増幅倍率A、卓越振動数FおよびK値の山側から海側への変化例(図7:測線A→E)を示したものである。甚大な被害を受けた阪急三宮駅のすぐ北側のB測点や、大規模な液状化被害が発生したポートアイランドのD測点ではK値が非常に大きくなっていることがわかる。ただし、JR線の両側では多くの鉄筋ビルが大破しているにもかかわらず、QTSから推定される地盤の増幅倍率やK値は小さくなっている。この点については今後さらに調査・検討を進める。

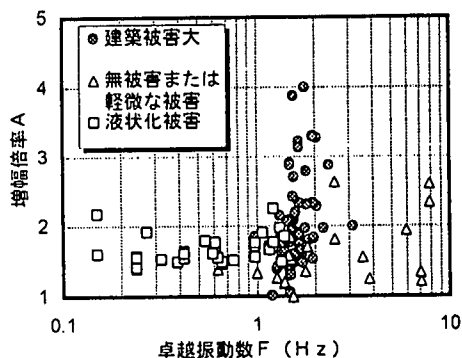


図8 三ノ宮地区のA・Fと被害の関係

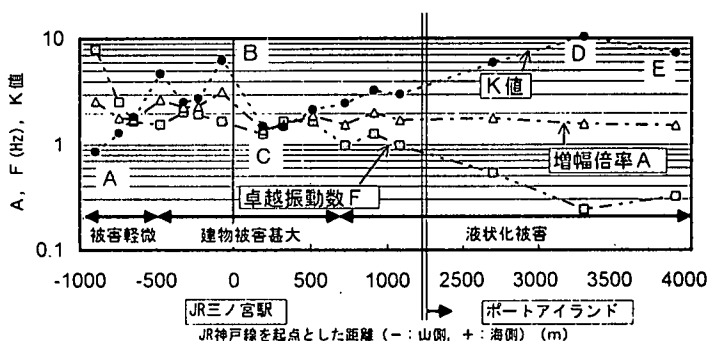


図9 三ノ宮地区のA、FおよびK値の変化と被害状況

4. まとめ

常時微動の水平成分と上下成分のスペクトル比から算出したQTスペクトル(疑似伝達関数)から神戸市街および周辺都市の地盤の卓越振動数F・増幅倍率Aを推定したところ次のことがわかった。

- ①神戸周辺では良好な山側の地盤と非常に軟弱な海側の埋め立て地盤に挟まれた卓越振動数 1.2Hz~2.5Hzの地盤が市街の大半を占めており、建物被害はその部分に集中している。
- ②常時微動により推定されたAとFから良好な地盤、震動被害の大きい地盤、液状化被害の大きい地盤を分類することができた。
- ③AとFから求めたK値は家屋の倒壊率や地盤変状とよく対応しており、K値は地震時の災害予測などに有効であることが確認された。

今後さらに地盤と構造物の常時微動の測定調査を進めるとともに、必要な模型実験・数値解析を実行して、より定量的な被害分析を行う予定である。

謝辞：測定をお手伝いいただいた(財)鉄道総合技術研究所、(株)システム70デベロッパーズ、(株)神戸製鋼所のみなさまに心から感謝いたします。

参考文献：1)中村他：常時微動による地盤変状予測の試み、鉄道総研報告 Vol.7 No.10 1993.10、2)国土地理院：平成7年度兵庫県南部地震災害現況図(1)~(21)、平成7年4月、3)久田俊彦：地震と建築、鹿島出版会、4)中央開発株式会社：阪神大震災災害調査報告書、平成7年3月、5)中村：兵庫県南部地震による留置列車の脱線・転覆と周辺地盤の常時微動特性の関係、土木学会第50回年次学術講演会(投稿中)、6)上半・中村：常時微動による神戸市内三ノ宮周辺地盤の地震動特性調査、土木学会第50回年次学術講演会(投稿中)