

地震観測に基づく不整形地盤による 上下動増幅要因の検討

大町達夫¹・飯山かほり²

¹正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

²正会員 工修 中央復建コンサルタンツ(株) (研究当時 同上 修士課程)

鎌倉市街地の6地点で地震観測を続けた結果、西御門(NMD)と御成(ONR)の2地点は系統的に顕著な上下動を示すことが判明した。NMD地点では上下動と水平動の最大加速度比は平均的に0.75で1を越える時もあり、卓越周期は上下、水平ともに0.2~0.3secでほぼ一定している。一方、ONR地点では最大加速度比の平均は0.70で、卓越周期は上下動は0.21~0.26secでほぼ一定しているが、水平動は0.1~0.6秒で変動する傾向が強い。2地点における上下動増幅の要因を解明するため、2次元境界要素法による数値解析を行った。その結果、両地点ともに急傾斜基盤の影響が強いと考えられるものの、前者には碗形表層地盤の基本振動モードが、後者には片側開放地盤におけるRayleigh波が関与している可能性が高いことが指摘された。

Key Words: earthquake observation, vertical ground motion, irregular ground, 2-D BEM

1. まえがき

地表で強震観測を行うと、上下動は水平動よりも振幅が小さく、最大加速度値にしても前者は後者の1/2~1/3程度を示すことが多い¹⁾。従来、わが国の耐震設計で地上構造物に対する地震力としては、主として水平力が重視され、上下(鉛直)力は無視されるか、あるいは考慮される場合にも水平力の1/2程度を考慮すればよいとされてきた²⁾のは、このような事情にもよるのであろうと推察される。しかし一方で、多数の強震記録を統計解析した研究によれば^{3)~7)}、上下動の最大加速度、あるいはそれと水平動の最大加速度との比(以下、上下・水平最大加速度比、または単に最大加速度比と略称する)は、地震のマグニチュードMや観測点と震源(または震源断層)との距離Rに依存することが指摘され、MやRを変数とする距離減衰式が幾つか提案されている。これらによれば、Mが大きくRが小さいとき、すなわち大地震の震源近傍では、最大加速度比は1に近づき、ときには1を越えることが推測される。

実際、上下・水平最大加速度比が1を上回った事例は、震源近傍で観測された強大地震動の観測記録に比較的多く見られる。たとえば、文献8)の付表3からは、1976年のガズリ地震(M7.0)においてカラキル地点で水平0.75G(Gは重力加速度)、上下1.33Gが観測された事例をはじめ8例が見いだせるが、これらのうち7例はRが9km以下の事例である。また、8例中の2例は、液状化に伴って周辺地盤のせん断剛性が大幅に低減したことによる特例⁹⁾と考えられる。

近年、1994年ノースリッジ地震や1995年兵庫県南部地震などの都市直下地震が相次いで発生し、甚大な被害をもたらした。これらの地震後に行われた被害原因の究明過程において、直下地震による強い衝撃的な上下動を伴う地震動が深刻な被害を発生させた要因ではないかという見解が多く発表された¹⁰⁾。しかし震源域での強震記録は、上述の液状化に関連する特例を除けば、いずれも水平動が上下動を上回る強さを示し、特に顕著な衝撃的上下動は認められなかった。このため、これらの見解は未だに単なる憶測の域を出ていない。また、観測記録によれば、上下・水平最大加速度比は遠地震よりも近

大地震で大きな値を示す傾向があるものの、震源域で一般的に上下動が水平動に匹敵するというわけではなく、最大加速度比が1を越えるのはむしろ例外的と言える状況である。さらに震源近傍での上下動と水平動の強さの割合は、震源断層が正断層、逆断層、横ずれ断層のいずれの型であるかにも依存するという指摘もある¹¹⁾が、定説となるまでには至っていない。

以上のように、地震動の上下動成分が水平動成分と匹敵する強さを示す要因として、震源特性や距離減衰特性、あるいは液状化地盤や不整形地盤¹²⁾の震動特性などが指摘されてきたが、地震観測に基づく系統的な説明は遅れている。昨今、耐震設計の高度化や合理化のための努力が各方面で行われているが、上下動の効果を適切に評価することもその重要項目の一つとされている¹³⁾。そのためには、どのような物理的条件が強い上下動をもたらすかを実証的に説明する必要性が高い。

著者らは、約3年前から鎌倉市街地において地震観測をおこなってきた。その結果、現在までに 5cm/s^2 以上の最大加速度を示す記録が250波形以上得られている。これらの記録を概観すると、震源や観測点の相違により地震動はかなり異なるが、特定の地点では比較的大きな上下動が系統的に観測される傾向が認められる。本論文ではこの点に着目し、そのような上下動が観測される要因を不整形地盤の震動特性の観点から検討する。

2. 鎌倉の地形と地震観測点

鎌倉市街地と周辺の地形及び地震観測点の位置を図-1に示す。鎌倉市街地は雪の下(YKS)付近を頂点に由比ヶ浜(YUI)へと広がる平坦な低地にあり、これを海抜100m前後の丘陵が取り囲んでいる。北東から南へ進路を変えて流下する滑川は、河口に近づくほど土砂を厚く堆積させている。その表層の堆積厚さは、鎌倉市街地において行われている多数のボーリング調査結果¹⁴⁾によれば、由比ヶ浜付近で約25mである。

図-1に示す6地点のうち、ONR(御成)は科学技術庁のK-net地点(KNG005)であり、地震計は鎌倉市役所敷地内の地表に設置されている。これ以外の5地点の地震計は、いずれも建物内1階に設置されている。そのため厳密には、地震記録に建物振動の影響が含まれている可能性があるが、微動実測によって検討した限りでは、建物の影響は小さく無視できる。これら6地点の中で上下動の加速度が比較的大きい地点は、後述のようにNMD(西御門)とONRである。

なお、地震観測地点のうちONRでは、標準貫入試験のN値や弾性波速度が得られているので、これらを図-2に示す。

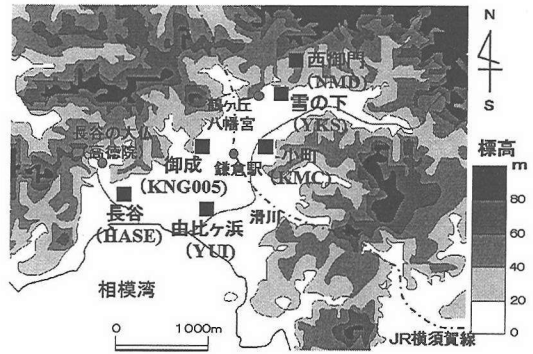


図-1 鎌倉市街地の地形及び地震観測点

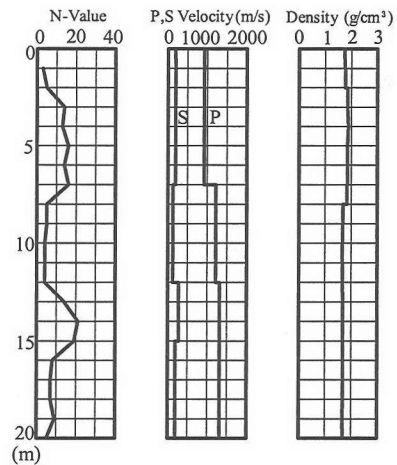


図-2 N値、弾性波速度及び密度分布(ONR地点)¹⁵⁾

3. 観測記録に見られる地震動の特性

(1) 観測記録の例

現在までに観測された52地震、450成分の記録のうちで最大の水平加速度値は 46cm/s^2 である。また最大加速度が 5cm/s^2 を超える記録は31地震、うち上下動の最大加速度が 5cm/s^2 を超える記録は13地震である。

観測された加速度記録の例を図-3に、地震のマグニチュードや震央位置などとともに示す。2つの地震は震源の位置が異なる。また、各地点ごとの時刻は厳密には同期していない。上下動を示す図-3下段に着目すると、NMDとONRにおいて上下動振幅が比較的大きいという特徴が共通して認められる。この2地点では水平動振幅も比較的大きいので、次の(2)では上下動と水平動の振幅比に注目する。なお、これらの2つの地震を含め、観測された地震の震源距離Rはいずれも $R > 50\text{km}$ である。

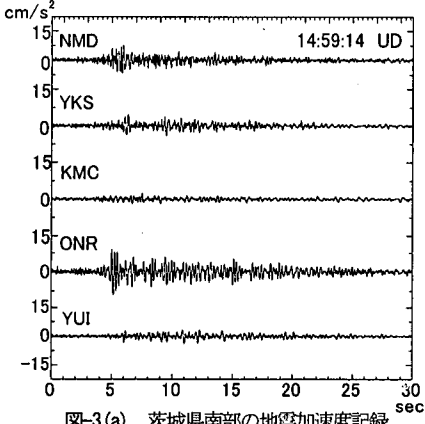
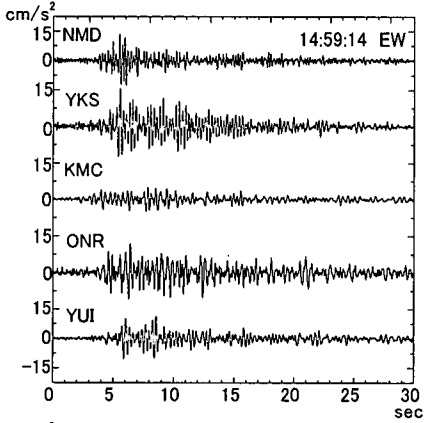
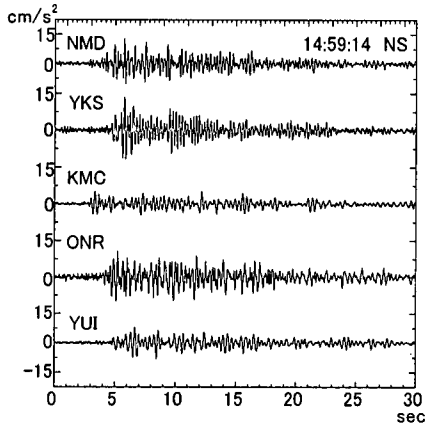


図-3(a) 茨城県南部の地震加速度記録
(97/03/23 M5.0 d=72km)

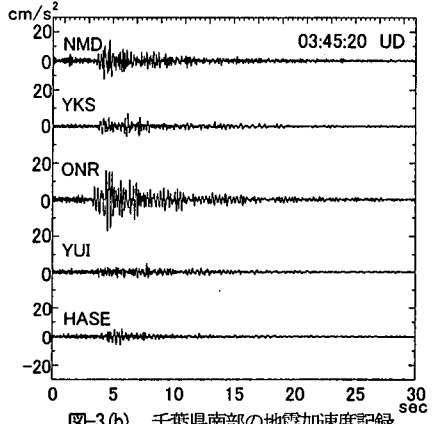
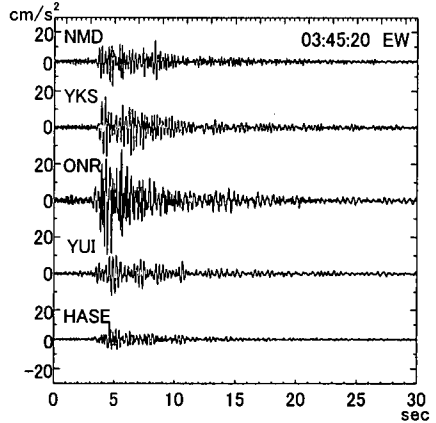
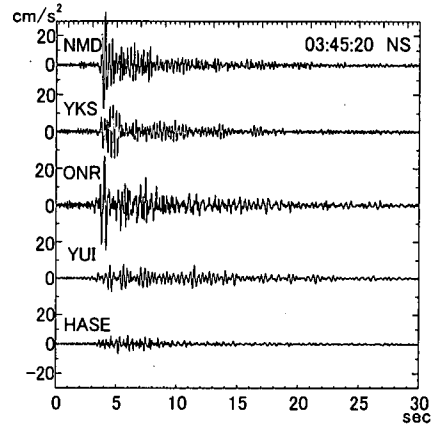


図-3(b) 千葉県南部の地震加速度記録
(98/05/16 M4.9 d=70km)

(2) 最大加速度比に見られる特性

各地点の上下動と水平動の強さの関係を表す簡単な指標として、上下成分と水平成分の最大加速度比、すなわち

$$q = AV/AH \quad (1)$$

をとり、プロットすると図-4 のようになる。NMDやONRの2地点では、微小地震時にも比較的大きな上下動が観測される傾向があるが、図-4 は上下動の最大加

速度が 5 cm/s^2 を超える観測記録を用いた場合の結果である。最大加速度比 q は変動幅が大きいが、 q の平均値 q^* に着目すると、他の4地点では $q^* < 0.5$ であるのに対し、NMDとONRの2地点では q^* はそれぞれ0.75、0.70 であり、これらの地点では平均的に上下動は水平動の7割以上の最大加速度を示すことが注目される。特にNMDでは、 $q > 1$ の場合もあることが、注目される。

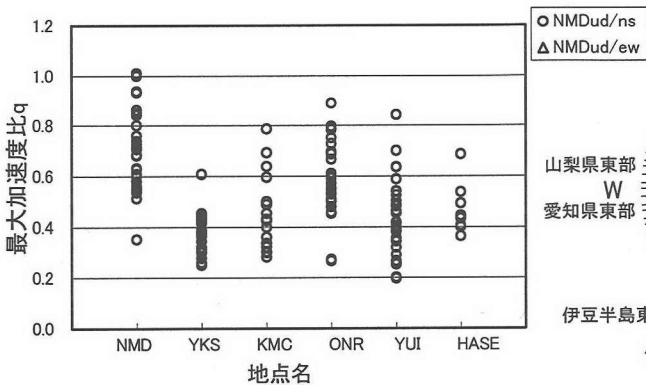


図-4 上下動と水平動の最大加速度比q

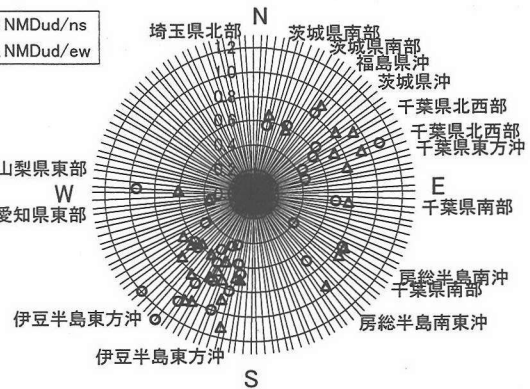


図-5 最大加速度比qと震央方位の関係(NMD地点)

(3) 最大加速度比qと震央方位との関係

観測した地震の震央は、福島県、茨城県、千葉県、埼玉県、山梨県、愛知県、房総半島沖、伊豆半島沖などに位置している。観測点に対する震央の方位と最大加速度比qとの関係を、NMD地点での全観測記録に関して示すと図-5のようになる。図中の同心円に付した0.0~1.2の数字は、qの値を示す。伊豆半島東方沖や千葉県北西部の地震で $q > 1$ が観測されているが、同じ方位の地震で $q < 0.6$ となる場合もあり、震央方向や震源位置と最大加速度比qとの間に明瞭な関係は認められない。

(4) 最大加速度と卓越周期との関係

観測記録の最大加速度と周期特性との関連性を調べるために、各加速度時刻歴のフーリエスペクトルを求め、そのピーク周期と最大加速度値との関係をプロットしたのが図-6である。図-6によれば、NMDでは上下動と水平動の卓越周期がそれぞれ、0.20sec前後と0.2~0.3secでほぼ一定している。ONRでは上下動の周期は0.21~0.26secの狭い帯域にまとまっているが、水平動の周期は0.1~0.6secと比較的広い帯域に分散している。一方、YKSでは水平動の周期は0.25sec前後でほぼ一定しているが、上下動の周期は0.1~0.6secで変動する。またKMCやYUIでは、水平動も上下動も卓越周期が一定しない。

このようにNMDとONRでは、上下動の加速度が比較的大きく、その卓越周期がそれぞれほぼ一定しているという共通点があるが、水平動の卓越周期はNMDではほぼ一定であるが、ONRでは一定しないという相違点がある。

(5) 鉛直面内における粒子軌跡の特徴

NMD, YKS, ONRおよびYUIの4地点において観測された加速度時刻歴が、NS(南北)とEW(東西)の2つの鉛直平面内で描く粒子軌跡(オービット)

をそれぞれ図-7に示す。これらの図は図-3(a)と対応し、その3~8secの5秒間の粒子軌跡である。図-7に示す加速度軌跡に関しては、YKSとYUIの地点で扁平な水平軌跡が卓越している一方、NMDやONRの地点では傾斜した楕円状ないし直線状の軌跡が多く見られる。

粒子軌跡の特徴は、観測した地震ごとにいくらか異なり、全ての観測記録に上述の特徴が常に共通して認められるわけではない。しかし本研究で対象としている、上下動加速度が比較的大きい観測記録の場合、その観測点では鉛直面内の加速度軌跡は楕円形状を示す傾向が強く、他地点でその傾向は見られない。よって、この大きな上下動の生成には当該観測地点の地盤震動特性が関与している可能性が高いと推察される。

4. 数値解析による検討

観測記録に認められた上述の特性が、不整形地盤のどのような震動特性に起因するのかを数値解析によって検討する。本来は、3次元モデルによって各地点の震動特性を抽出することが望ましいが、ここでは第一段階としてNMDとONRの2地点を対象に2次元境界要素法による線形解析を行った。

(1) 地盤モデルと入射波

地震観測地点周辺の詳細な地盤条件は明かでないが、NMD地点周辺では直径60m程度の狭い表層を楕円の基盤が囲んでいる。ONR地点周辺の基盤は北に向かって1/5程度の勾配で傾斜するとともに西方約200mにかけて2/3程度の勾配で傾斜しているが、南方と東方に向けてはほぼ平坦と考えられる。

解析に用いた地盤モデルを図-8, 9に示す。図示のように両地点ともに2層地盤とし、表-1に示す物性値を与えた。ONR地点表層の物性値はPS検層データ(図-

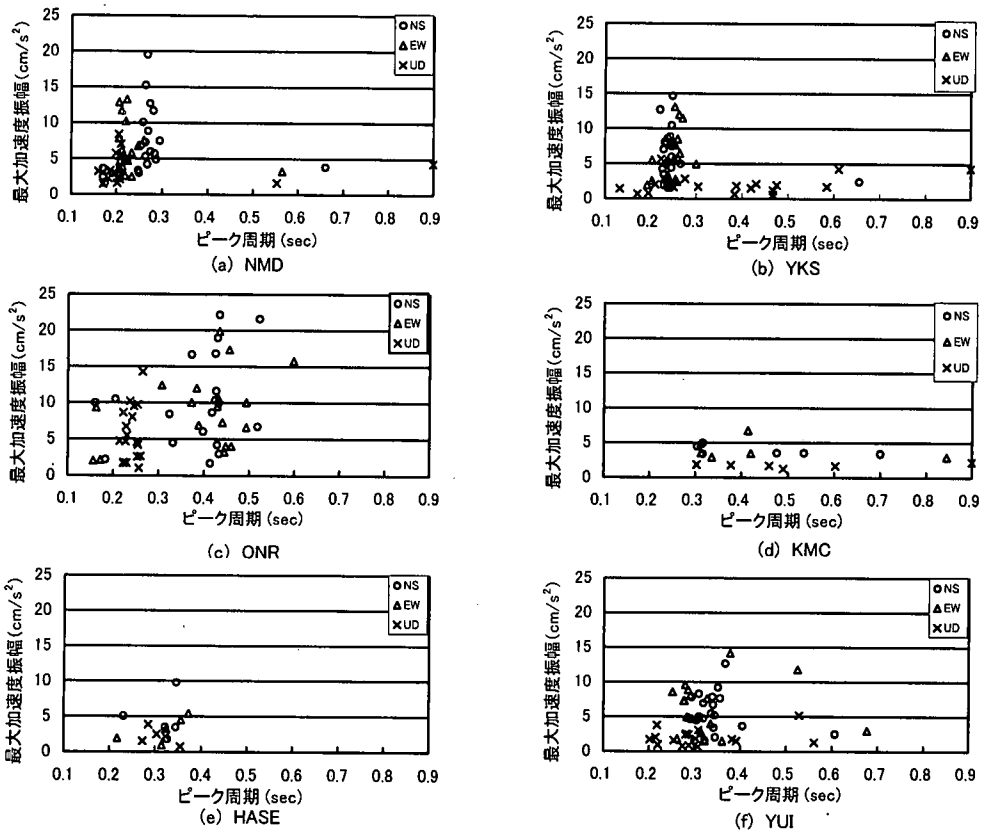


図-6 最大加速度値と卓越周期

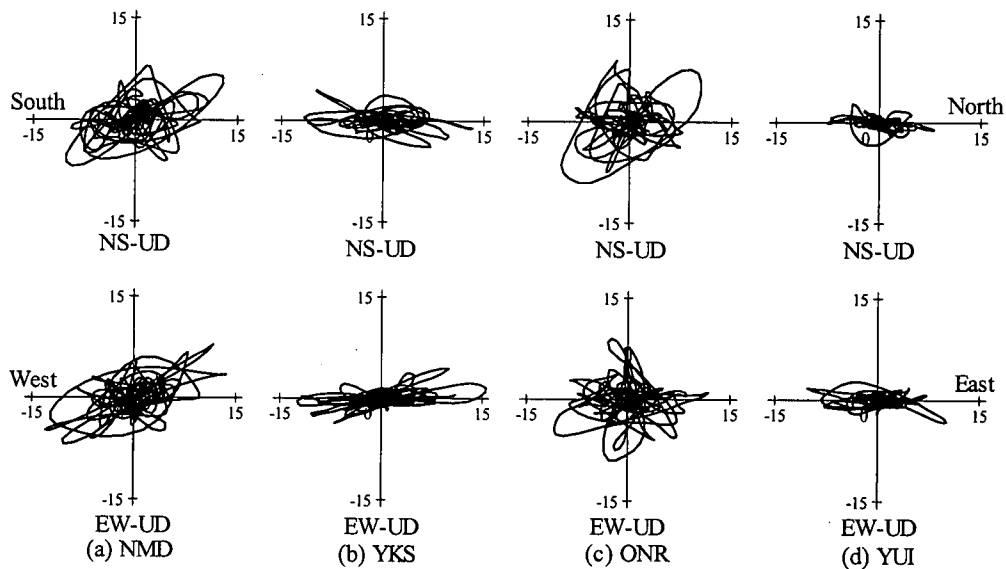


図-7 鉛直面内での粒子加速度軌跡 (3~8 秒)

(1997/3/23, M5.0, 茨城県南部地震)

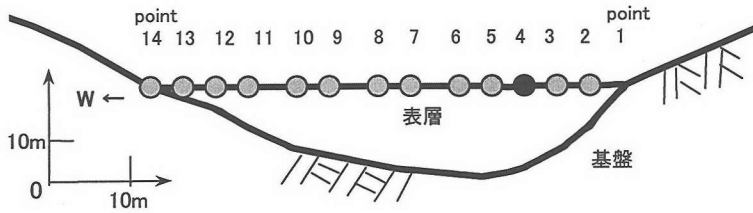


図-8 NMD 地点の地盤モデル(丸印は節点)

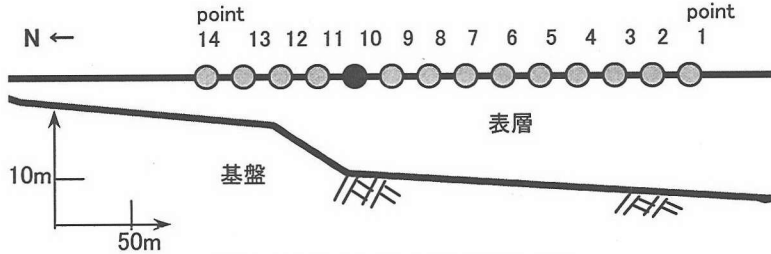


図-9 ONR 地点の地盤モデル(丸印は節点)

表-1 解析モデルの物性値

| 測点 | | Vs (m/s) | 密度 (t/m ³) | ポアソン比 | Q値 | 波動インピー ダンス(t/m ² /s) |
|-----|----|-------------|---------------------------|-------|----|------------------------------------|
| NMD | 表層 | 150 | 1.7 | 0.48 | 20 | 255 |
| | 基盤 | 500 | 2.0 | 0.48 | 20 | 1000 |
| ONR | 表層 | 180 | 1.7 | 0.48 | 20 | 306 |
| | 基盤 | 600 | 2.0 | 0.48 | 20 | 1200 |

2 参照)を平均して定めた。NMD地点ではPS 検層が行われていないため、地質柱状図のN 値分布をもとにONR地点でのN 値とS 波速度の関係から推定して物性値を定めた。

実際の解析では、図-8、9の太い実線の上に1.5~5m 間隔で境界要素を配置したが、図には一部の節点のみを丸で示している。なお、黒丸は地震計設置位置にほぼ対応する。

入射波としては、最大変位振幅1cm をもつSV 平面波のリッカーウェーブレットを鉛直に入射した。これは、明瞭な特性周期をもつ単純な入射波を用いると、地盤の震動状況や増幅特性を把握する上で好都合と考えたためである。以下では、入射波の特性周期をTip と表す。

(2) 解析結果

2次元数値解析結果のうち、以下ではNMD地点についてはEW 断面、ONR地点についてはNS 断面の解析結果を示し、観測された地震動特性との比較検討を行う。

a) NMD地点

(i) 水平動と上下動の時刻歴と位相

図-10にNMD地点を対象とした解析結果の一例を示す。この例は、NMD地点の卓越周期に近い特性周期(Tip=0.3sec)をもつ入射波に対する地表の加速度波形

であり、図中の矢印S→は地震計設置位置を示す。図-10によれば、水平動は各 point ごとに振幅の相違はあるものの、周期と位相は入射波とほぼ一致している。これに対し上下動は、point6 を境に位相が逆転している。そして振幅は、point4 および10 付近で最大を示す。地震計設置点に近い point4 では、水平動振幅に匹敵する上下動振幅を生じている。

(ii) 加速度振幅分布

水平動の最大加速度振幅AH と、上下動の最大加速度振幅AV の分布、および前者に対する後者の振幅比q の分布を図-11(a)~(c)に示す。ただし、入射波の特性周期Tip は0.1sec ≤ Tip ≤ 0.6sec であり、振幅分布は正負を無視して絶対値で示している。

図-11(a)によれば水平動振幅分布は、入射波の特性周期が0.3秒前後の場合、表層厚分布に類似した単峰性の形状をしているが、周期が0.3秒より短周期側では峰や谷の数が増えて高次モードの振動形に似る。また、0.3sec よりも長周期側では、振幅分布の形は平坦になり表層厚分布との類似性は低下する。地震計設置位置に近い point4 では、0.15~0.30sec の周期成分に対して振幅がほぼ一定なため、共振周期が明瞭でない。一方図-11(b)によれば、上下動の振幅分布は、入射波の周期によらず双峰性の形状をしており、その1つの峰の位置に point4 が対応している。そのため point4 では周期変動に伴う振幅の増減が大きく、共振周期が比較的明瞭である。

さらに図-11(c)によれば、地震計設置位置における振幅比q は、Tip の変化に伴い0.4~0.8 の範囲の値をとり0.25sec ≤ Tip ≤ 0.6sec では、0.6 ≤ q となる。

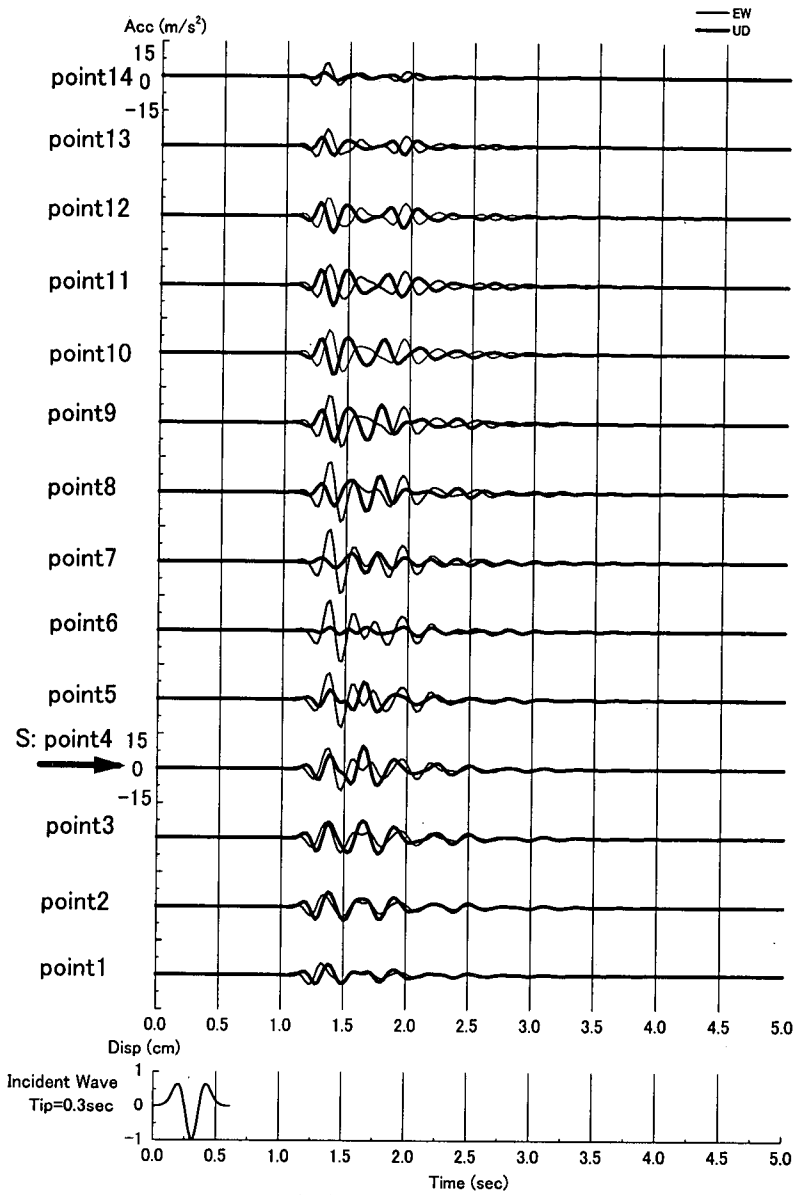
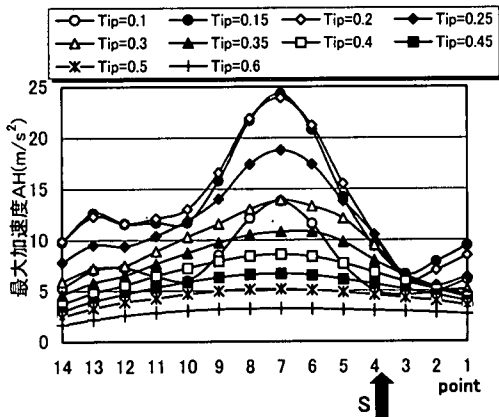


図-10 SV波入射に対する地表の応答 (NMD地点)

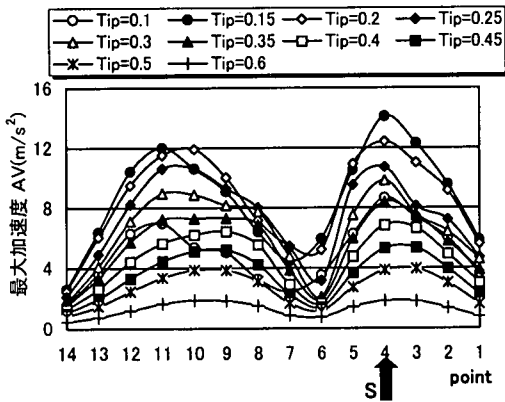
(iii) 地震観測記録の解釈

NMD地点周辺での振幅はTipが0.3sec程度の入射波に対して表層全体が一様に大きな振幅を示すことから、この周期が当表層地盤の基本振動周期にほぼ対応すると考えられる。そこで、周期0.3secでの地表の振動形を図-10から読み取って模式的に示すと、図-12の太実線のようになる。同図には、図-10に示したpoint4と11の時刻歴による粒子軌跡も示している。不整形地盤の形状や図-11(a)及び(b)の振幅分布からも推察されるように、この2点では水平動に対して上下動は比較的大きな振幅を示し、粒子軌跡は楕円状となることが多い。

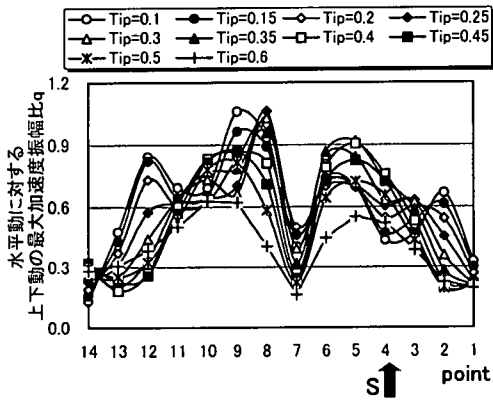
基本周期が約0.3secであれば、0.25~0.35secの入射波成分に対して、この表層地盤は基本振動モードに近い応答を示すことが図-11から推察される。そのとき、水平動と上下動の振幅や振幅比、位相、卓越周期などは、上述のような特性を示すことが期待される。実際、たとえば図-6が示すように、NMD地点では上下動の卓越周期は0.21secにほぼ一定している一方、水平動の卓越周期は0.2~0.3secの範囲にばらつき一定していない。また、図-4が示すように上下・水平加速度比は比較的大きい。これらは当地点の地盤震動において、図-12に示したような、表層地盤の振動モードが支配的であるこ



(a) 水平動加速度振幅 AH の分布



(b) 上下動加速度振幅 AV の分布



(c) 加速度振幅比 q の分布

図-11 変位振幅と振幅比の分布(NMD 地点)

の水平動と上下動の加速度時刻歴である。水平動は各 point で振幅に相違はあるものの入射波の到達とともに入射波形に類似した大きな振幅を示すが、そのとき基盤が平坦な部分で上下動はほとんど生じていない。しかし急傾斜基盤とその近傍(points9~12)では、比較的大きな上下動が発生し、それが北から南に向かって伝播している。

地震計設置地点は急傾斜基盤の終端(下端)近くであり、この直上付近で上下動は最も大きな振幅を示す。また上下動が最大振幅を示す時刻の前後では、水平動に対して90度近い大きな位相差が見られる。これらの点は、上下動が水平動と同時に発生し、しかも両者が同位相(または逆位相)である。NMD 地点の解析結果と対照的である。

(ii) 加速度振幅分布

図-14(a)~(c) に水平動の最大加速度振幅 AH と上下動の最大加速度振幅 AV の分布、および前者に対する後者の振幅比 q の分布をそれぞれ示す。ただし、入射波の特性周期 T_{ip} は $0.1\text{sec} \leq T_{ip} \leq 0.6\text{sec}$ で変動させ、加速度振幅は図-10 と同様に絶対値で示している。

まず、水平動振幅 AH の分布については、周期 T_{ip} が $0.15 \sim 0.35\text{sec}$ ではモデルの北端(図の左端)で振幅が顕著に大きい。基盤急傾斜部から南へ(図中、point12 から右へ)かけては振幅がほぼ一定している。表層の厚さは point10 から南側(図の右側)では約 20m でほぼ一定である。この水平表層地盤の基本周期を $1/4$ 波長則 ($T=4H/V_s$) から推定すれば約 0.4sec となるが、図-14 において、0.4sec よりも短周期で振幅が大きく表現されているのは、前述のように入射波の変位振幅を各 T_{ip} で一定としているためである。

上下動の加速度振幅 AV の分布は図-14(b) のように、0.35sec の T_{ip} に対し地震計設置位置 (point10) 付近で最大となる。空間的な振幅分布のピークは明瞭でその位置は point10~11 にほぼ一定している。地震計設置位置 (point10) での振幅変化に注目すると、0.1~0.6sec の周期での最小振幅に対する最大振幅の比(ダイナミックレンジ)は、水平動は3倍強であるのに対して、上下動は8倍弱であり、この意味では周期の変化に伴う上下動振幅の変化は著しいと言える。

図-14(c)によれば、加速度振幅 AV と AH の比 q は、point9~11 で最大を示す傾向がある。地震計設置位置においては、入射波周期 T_{ip} の変化に伴い q は 0.15~0.6 と変化し、 T_{ip} が 0.30~0.45sec のとき、q は 0.5 あるいはそれ以上となる。

なお、上下動の加速度振幅 AV や振幅比 q は、表層と基盤との波動インピーダンス比 α にもかなり依存する。たとえば表-1 に示したように、図-14 は $\alpha = 0.255$ に対する結果であるが、表層と基盤の S 波速度をそれぞれ

とを示唆している。

b) ONR 地点

(i) 水平動と上下動の時刻歴と位相

図-13 に、ONR 地点の NS 断面に関する解析結果の一例を示す。これは、 $T_{ip}=0.3\text{sec}$ の入射波に対する地表

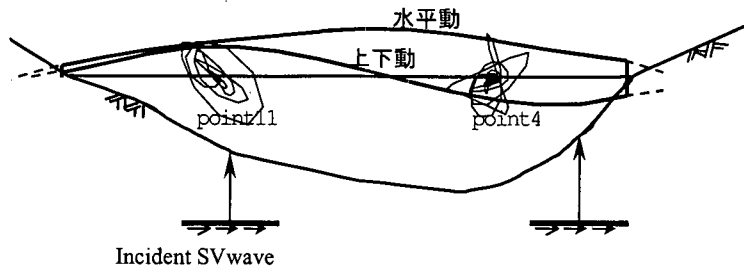


図-12 表層地盤の基本振動モード模式図(NMD地点)

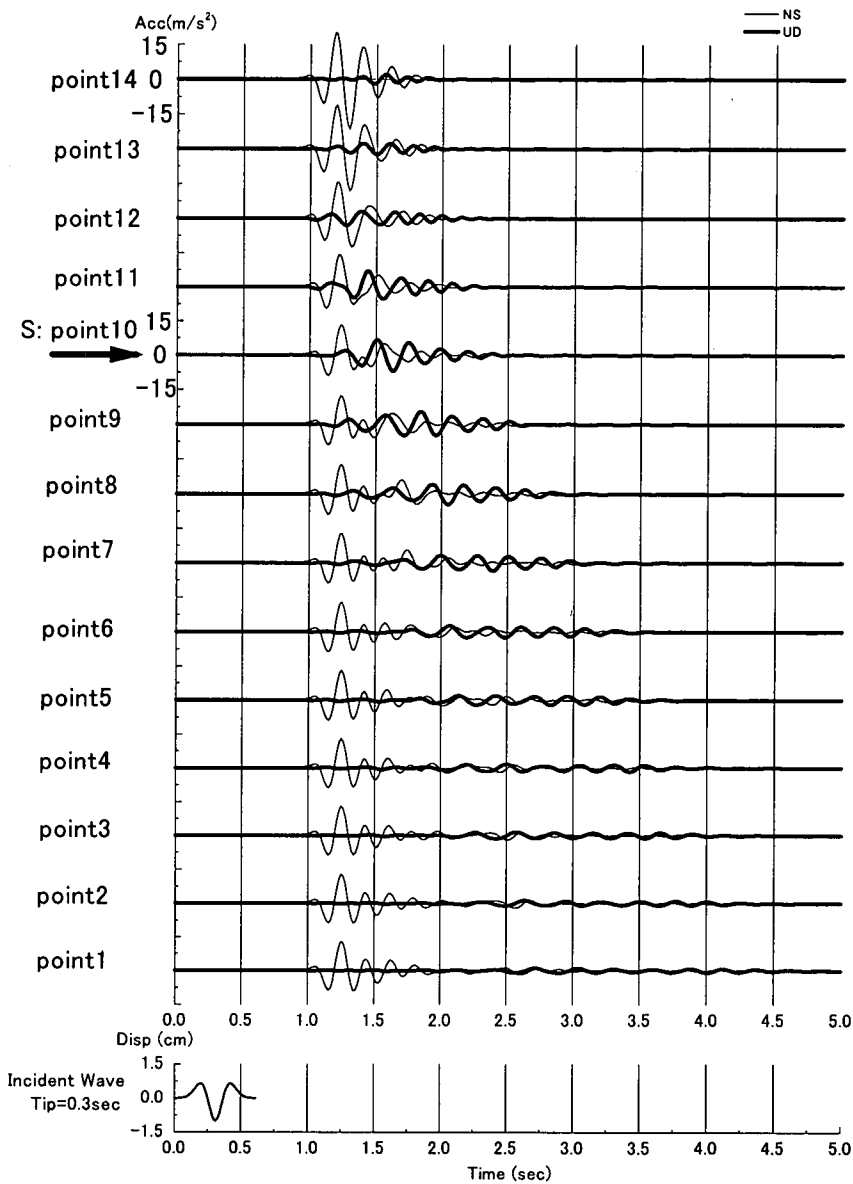
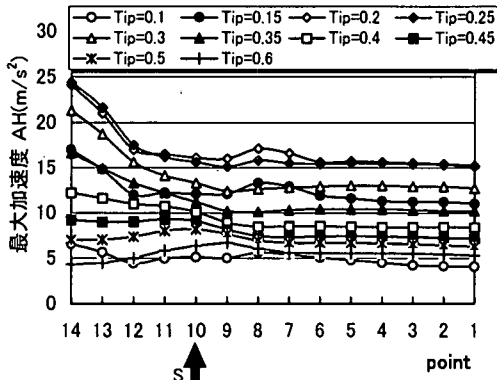
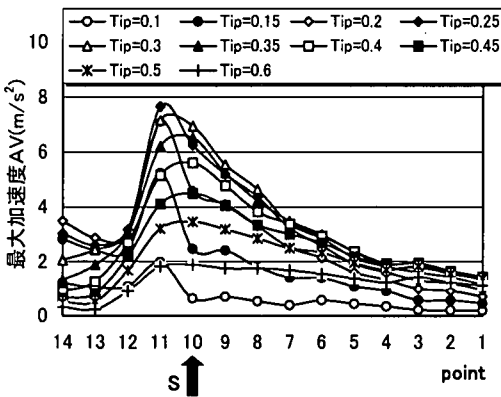


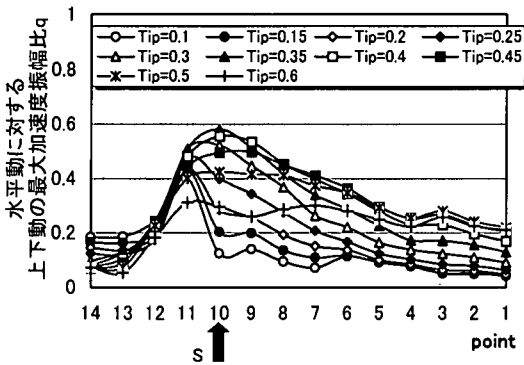
図-13 SV波入射に対する地表の応答(ONR)



(a) 水平動振幅AHの分布



(b) 上下動振幅AVの分布



(c) 加速度振幅比qの分布

図-14 加速度振幅と振幅比の分布(ONR地点)

200m/s, 400m/s ($\alpha = 0.425$) とすると、このとき r の最大は約 0.25 であり、上述の最大値の 1/2 程度にしかならない。

(iii) 地震観測記録の解釈

上記の解析結果を用いて、ONR 地点の地震記録に見られた地盤震動特性を検討してみることにする。

まず、水平動の卓越周期が地震ごとに 0.15~0.6sec で変動することについては、図-14(a)の振幅分布に関連

して述べたように、基盤傾斜の影響で表層の共振周期が明瞭でないことと関連性があると考えられる。すなわち、入射波の周期が 0.15sec 程度の短周期であれば表層の薄い北側部分が共振し、入射波の周期が長くなるにつれて表層厚さが増す南側部分へと徐々に共振場所が移動するため、大きな水平動が比較的広い周期帯域で観察されることになる。この場合、大きな上下動は急傾斜基盤部で発生するので、上下動の周期帯域は水平動の帯域よりも狭いであろうと推察される。しかし観測記録で指摘されたように、上下動の卓越周期が 0.21~0.25sec の狭い帯域におさまることは説明できない。

そこで以下では、急傾斜基盤部で発生する上下動が水平動と 90 度近い大きな位相差をもつことや、上下動が表層地盤を北から南へ伝播することに着目し、上下動と Rayleigh 波の特性との関連性を検討してみる。

半無限弾性基盤と水平一様な表層とで成る水平 2 層弾性地盤を考えると、その地表で Rayleigh 波基本モードは図-15 に示すような粒子軌跡を描くことが知られている¹⁶⁾。すなわち、長周期側と短周期側の極限では、いずれも逆転の楕円形軌跡を描くが、それらの中間周期では表層と基盤の波動インピーダンス比 α の違いによって図示の 3 つのタイプに分かれる。このうちタイプ 1 は $0.5 < \alpha$ の程度に α が大きい場合、タイプ 3 は $\alpha < 0.3$ の程度に α が小さい場合、タイプ 2 は α がこれらの中間の場合に対応する。ここで用いた ONR 地点の地盤モデルは $\alpha = 0.255$ であるので、タイプ 3 の粒子軌跡を描くものと考えられる。この場合、図示の周期 T_1 では水平動振幅が 0 となって上下動のみとなるので、上下動と水平動の振幅比 r は、 $r \rightarrow \infty$ となる。また周期 T_2 では上下動振幅が 0 となって水平動のみとなるので、 $r = 0$ となる。そして $T_1 < T < T_2$ では、地表の粒子は逆転の楕円形軌跡を描く。さらに、周期 T_2 は水平地盤の基本振動周期と一致し、 T_1 は T_2 の 1/2 となることも知られている¹⁶⁾。

図-9 に示す ONR 地点の地盤モデルは水平成層地盤ではないが、急傾斜基盤部より南側 (図の右側) の平坦な厚い表層部分に上述の知見を適用してみる。図-14(a) の振幅分布について既述したように、この平坦な表層地盤の水平振動周期は 1/4 波長則から約 0.4sec となるので、これを T_2 とおけば T_1 は約 0.2 秒となる。また図-13 に示した point10 の時刻歴を用いて加速度軌跡を描くと図-16 のようになる。同図から、上下動振幅が大きい時刻の前後では地表が逆転から逆転へと移行し、大きな縦長の楕円形を描く。これらのことから、point10 付近で現れる大きな振幅の上下動は、主として Rayleigh 波によるものであり、それが南へ伝播するにつれて正常分散することにより、急激に振幅が減少するものと考えられる。

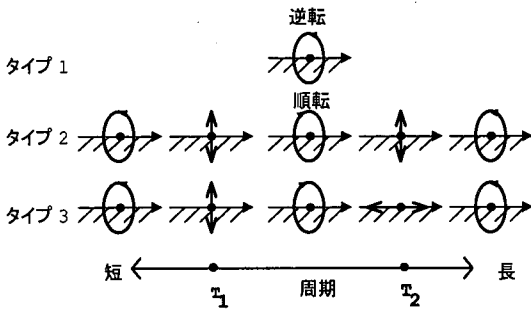


図-15 2層地盤における Rayleigh 波基本モードの粒子軌跡¹⁶⁾

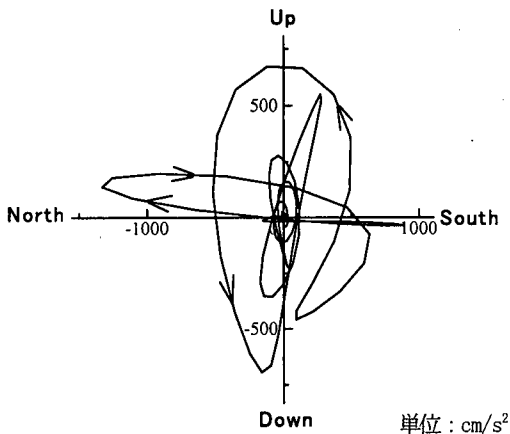


図-16 地表の加速度軌跡(ONR, point10, Tip=0.3sec)

実測の地震記録に基づく図-6を見ると、ONR地点における水平動成分(EW方向)の卓越周期で最も頻度が高いのは0.42sec前後であり、上下動は0.21~0.26secの範囲で卓越している。この2つの周期は、上述の T_2 と T_1 のように、ほぼ2:1の関係にある。また上下動が大きな振幅を示すとき、地表の粒子軌跡は図-7のように楕円形を描く傾向がある。これらのことからONR地点の地震観測記録に見られる比較的大きな上下動は、層状地盤における Rayleigh 波の特性と関連づけて考えれば大まかに説明できる。

5. 結論

鎌倉市街地での地震観測記録を分析した結果、特定の2地点で比較的大きな上下動が系統的に観察されることが判明した。この2地点の震動特性には明瞭な相違も認められることから、各地点で上下動が増幅される要因について数値解析を用いて不整形地盤の震動特性の観点から検討した。現在までに得られた知見をまとめると以下

のようになる。

- 1) 本研究で対象とした比較的大きな上下動は、従来指摘されてきたような大地震の震源近傍における地震動ではなく、中小規模で震源距離が50km以上の地震で観測されたものである。
- 2) 西御門(NMD)地点での地震記録によれば、上下動と水平動の最大加速度比 q は平均的に0.75であり、時には $q>1$ となることもある。この地点では水平動と上下動の卓越周期は、0.2~0.3secにあり、ほぼ共通している。また、上下動と水平動は東西方向の鉛直断面(EW-UD面)内に偏向した直線状ないし楕円状の粒子軌跡を描く傾向がある。
- 3) 西御門地点で観察される上記の震動特性は、碗形基盤をもつ表層の基本振動モードとの関連性が強いと考えられる。すなわち、急傾斜基盤の中間部直上では、表層の水平変位に伴って局所的に大きな上下変位を誘発する振動モードが励起され易く、そのためにこの地点で上下動が増幅される可能性が高い。
- 4) 御成(ONR)地点での地震記録によれば、上下動と水平動の最大加速度比 q は平均的に0.70程度で、NMD地点よりは小さい。この地点では、水平動の卓越周期として0.42secが最も頻度が高いが、0.15secから0.60secまで、比較的大きな範囲の周期成分の卓越も観測される。一方、上下動の卓越周期は0.21~0.26secの狭い範囲におさまっている。
- 5) 御成地点で上下動成分が増幅されるのは、一端が急傾斜基盤で他端は平坦な表層地盤が続く不整形地盤において、急傾斜基盤の下端付近で上下動振幅が大きな Rayleigh 波が誘発され易いことと強く関連していると考えられる。この場合、増幅される上下動の周期は、平坦部表層の基本振動周期の約1/2である。また励起された大きな上下動は、平坦部を伝播する過程で分散して急激に減衰するため、上下動の増幅はこの場合も局地的である。

地震観測と数値解析によって、地震動の上下動成分が増幅される要因について検討した結果、不整形地盤の震動特性に起因する2種類の異なるメカニズムが考えられることを指摘した。今後、地震記録の蓄積と地盤資料などの充実を行うことによって、本論文の内容をさらに吟味していく必要性が高い。

謝辞：本研究は科学研究費補助金「都市直下地震」により実施した。また、鎌倉市での地震観測やBEMによる数値解析ならびに論文作成に関連し、鎌倉市や防災科学技術研究所、東京工業大学の関係者各位から暖かいご支援やご助力を賜った。ここに記して、深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会編：地震動・動的物性、動的解析と耐震設計 第1巻、技報堂出版、pp.61-64, 1989.
- 2) たとえば、日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990.
- 3) Abrahamson, N. A. and Litcher, J. J.: Attenuation of Vertical Peak Acceleration, Bull. Seis. Soc. Am., Vol.79, No.3, pp.549-580, 1989.
- 4) Niazi, M. and Bozorgnia, Y.: Behavior of Near-source Peak Horizontal and Vertical Ground Motions over Smart-1 Array, Taiwan, Bull. Seis. Soc. Am., Vol.81, No.3, pp.715-732, 1991.
- 5) Bozorgnia, Y., Niazi, M. and Campbell, K. W.: Characteristics of Free-field Vertical Ground Motion during the Northridge Earthquake, Earthquake Spectra, Vol. 11, No.4, pp.515-525, 1995.
- 6) Ambraseys, N. N. and Simpson, K. A.: Prediction of Vertical Response Spectra in Europe, Earthquake Engineering and Structural Dynamics., Vol. 21, pp.401-412, 1996.
- 7) Elnashai, A. S. and Papazoglou, A. J.: Procedure and Spectra for Analysis of RC structures subjected to Strong Vertical Earthquake Loads, Jour. Earthquake Engineering, Vol. 1, No. 1, pp.121-155, 1997.
- 8) 地盤工学会：地震動, ジオテクノート9, 1999.
- 9) Sato, K., Kokusho, T., Matsumoto, M. and Yamada, E.: Nonlinear Seismic Response and Soil Property during Strong Motion, Special Issue of Soils and Foundations, pp.41-52, 1996.
- 10) たとえば、震災フォーラム第1回「地震動」, 土木学会誌, Vol. 80, pp. 37-43, 1995. 11. および、高田直俊：「突き上げるような上下動」はどこへいった, 土と基礎, Vol. 44, No. 3, pp.13-15, 1996. 3.
- 11) 前出 3)
- 12) 鈴木崇伸, 伯野元彦, 五十嵐俊一：地盤の不整形性による地震動の増幅についての3次元シミュレーション, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.103-108, 1996.
- 13) 土木学会：耐震基準等に関する第2次提言, 1996. 1.
- 14) 松島義章：鎌倉の地質, 神奈川県立博物館調査研究報告自然科学第5号, 神奈川県地質1, 1974.
- 15) 防災科学技術研究所：Kyoshin Net CD-ROM, 1998.
- 16) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年細巧：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.

(1999. 7. 2 受付)

EFFECTS OF IRREGULAR GROUND ON VERTICAL MOTION AMPLIFICATION DURING EARTHQUAKES

Tatsuo OHMACHI and Kahori IYAMA

For years, earthquake ground motion has been observed at 6 stations in Kamakura city, Japan. Among them, two stations of NMD and ONR have been found to show larger vertical motion. Especially at NMD, a maximum acceleration ratio between vertical and horizontal motions is sometimes exceeds 1, with a constant predominant period of about 0.25sec for both vertical and horizontal motions. A 2-D BEM is applied to characterize ground motion at both stations, with a result showing that steep slopes of bed rocks under the surface layers play important but different roles for both cases.