

回転動揺地震動が構造物に及ぼす影響

村田 晶¹・小谷 武司²・北浦 勝³・宮島 昌克⁴

¹正会員 修士(工) 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

²修士(工) 石川県土木部 (〒920-8001 石川県金沢市広坂 2-1-1)

³フェロー 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

⁴正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

一般的な構造物の耐震設計においては、地盤は地表面の各点において同位相等振幅で震動すると仮定されている。しかしながら、実際の地盤においては地盤構造の不規則性等が影響するため、地表面の各点が同位相等振幅で震動しないことは明らかである。特に地表面の各点で上下方向成分の地盤震動が異なっている場合には、地表面の傾きが生じるため、構造物の転倒を引き起こす入力作用が作用すると考えられる。

そこで本研究では、こうした震動入力を動揺成分として捉え、その発生要因特性、並びに構造物に及ぼす影響について検討した。その結果、地盤の不規則性が動揺成分発生に支配的要因となること、水平・動揺成分同時入力の場合、両入力の位相差により動揺成分の存在が無視できないことを明らかにした。

Key Words : rocking component, earthquake ground motion, earthquake response analysis

1.はじめに

構造物の耐震設計においては、地盤は地表面の各点において同位相等振幅で震動すると仮定される場合が多い。しかしながら、実地盤が有する地盤構造の不規則性や波の伝播特性を考慮すれば、地表面の各点が同位相等振幅で震動しないことは明らかである。

特に地表面の各点で上下方向の地盤震動が異なっている場合は地表面の傾きが生じるため、構造物の転倒を招く入力作用が作用すると考えられる。こうした入力は1つの地震計で直接記録することが困難であることから、耐震設計にこれまでほとんど考慮されてこなかった。

しかしながら、動揺成分を直接記録することは困難ではあるが、地盤上の異なる2点以上の同時地震観測によって、位相差を伴う地盤応答として動揺成分の存在を探ることができる。同時地震観測はいくつかの研究機関で行われているが、筆者らは東京大学生産技術研究所千葉実験所で行われているアレー観測記録を用い、動揺成分の存在について既に検討している¹⁾。一例として1987年12月17日の千葉県東方沖地震で観測された記録から、アレー観測の任意の2地点間に発生している、同一時刻における上下応答加速度の差と、2地点間距離の関係を図-1に

示す。図に示すように、上下応答加速度に明確な差が生じていることから、位相差を伴う地盤震動が発生していることを確認できる。また、2点間距離に比例して上下応答差は大きくなっており、その分布の傾きは単位長さ当たりに発生している上下応答差、すなわち動揺成分として考えることができる。

地表面に位相差を伴う応答が発生する原因には、地震波の伝播特性と、地盤の不規則性が挙げられる。しかし、前者は波の伝播速度や波長に大きく依存するため、図-1のような数10mの距離で数10galにも達する、局所的な位相差応答の原因とは考えにくい。図-1で見られた上下応答差は数10mの距離において発生していることから、その発生要因の1つは地盤の不規則性と考えられる。

そこで本研究では、地盤の不規則性と動揺成分の関係、ならびに動揺成分が構造物に及ぼす影響について解析的に考察する。

2.動揺成分の発生要因と特性

(1) 地盤の不規則性と動揺成分

図-2は水平方向に不規則性を有する地盤をモデル化した解析地盤である。地盤モデルは表-1に示される地盤剛性の異なる5つの領域に大きく分けられ、一様で比較的軟弱な地盤領域(領域番号1)を囲む

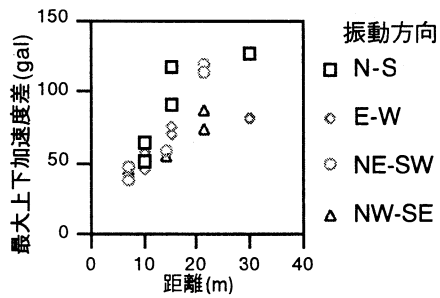


図-1 2地点間距離と上下応答差の関係

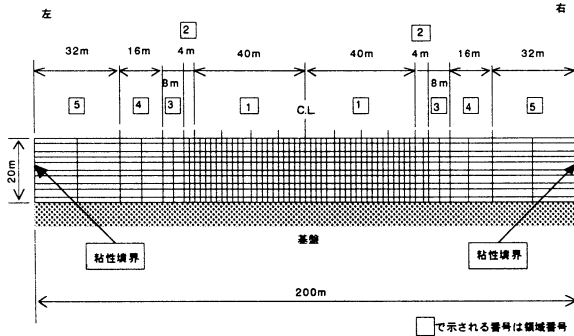


図-2 解析地盤モデル

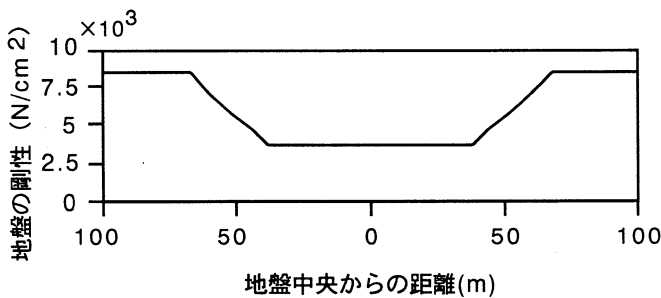


図-3 地盤の剛性分布

ように、地盤剛性が段階的に変化する領域（領域番号2から5）が配置されている。なお、深さ方向における地盤物性値は、水平方向の地盤物性変化を強調するため、各層で一様とする。図-3は地盤の剛性分布を示しているが、地盤中心から左右に40m離れた地点から剛性が変化している。この地盤全体に基礎から水平方向のみの振動が作用した場合の地表面の上下応答に注目する。入力波形は、振幅が100gal、振動数が地盤の1次固有振動数に相当する2.0Hzの正弦波とし、5秒間基礎から入力する。なお、地盤は線形地盤として解析を行った。本解析により得られる水平方向最大加速度は領域番号1において約1,000galとなっている。

図-4は時刻が4.8秒、4.9秒、5.0秒の際の地表面各点の上下応答変位を示している。入力水平方向の振動のみであるにもかかわらず、地表面には上下方向の応答が発生していること、しかもその応答は地盤の剛性が変化する40m付近で最も大きくなってい

表-1 地盤の物性値

層番号	1	2	3	4	5
地盤中央からの距離 (m)	40.0		44.0		52.0 68.0
せん断波速度 V_s (m/s)	140.0	158.0	175.0	193.0	210.0
単位体積重量 γ_f (kN/m ³)	18.62				
ポアソン比 ν	0.4				
基準ひずみ γ_r	4.2×10^{-4}				
無限大ひずみでの減衰定数 β_{max}	0.4				

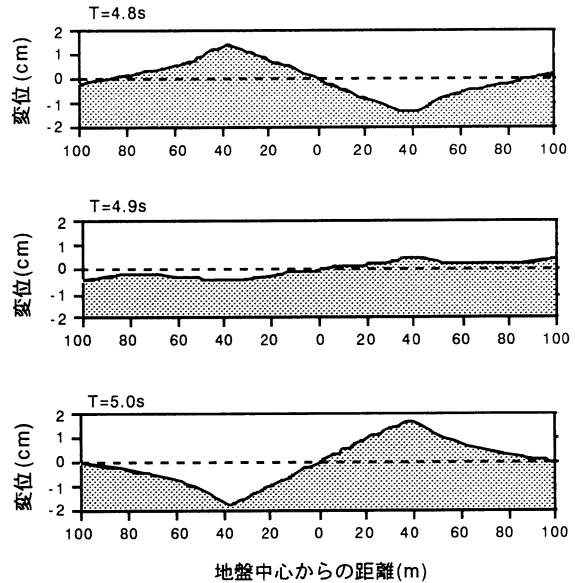


図-4 地表面各点の上下応答変位

ることが確認できる。また、地盤の中心を境として左右の地盤領域で上下応答の方向が逆転しており、地表面には振動に伴う傾斜が発生していることから、動揺成分が存在していると考えられる。

半無限で一様な地盤においてはこうした現象は理論的に現れないことを踏まえれば、地盤の不規則性は動揺成分発生における支配的要因であると考えられる。

図-5は入力波の振動数変化(2.0~4.0Hz)に伴う地表面形状を、上下応答が顕著に現れた地盤中央部(領域番号1)に注目して示した図である。先の2.0Hzの入力においては地表面は一様な傾斜を示していたが、入力波の振動数が高くなると、相応した高次の波形が地表面で発生していることがわかる。0.5Hzの振動数増加に対して半波長分の波が新たに地表面に発生している様子が読み取れる。地盤の不規則性は地盤内に境界条件を生み出すため、そうした境界条件によって囲まれる地盤領域においては、振動数ごとに特有の振動モードが存在するものと思われる。

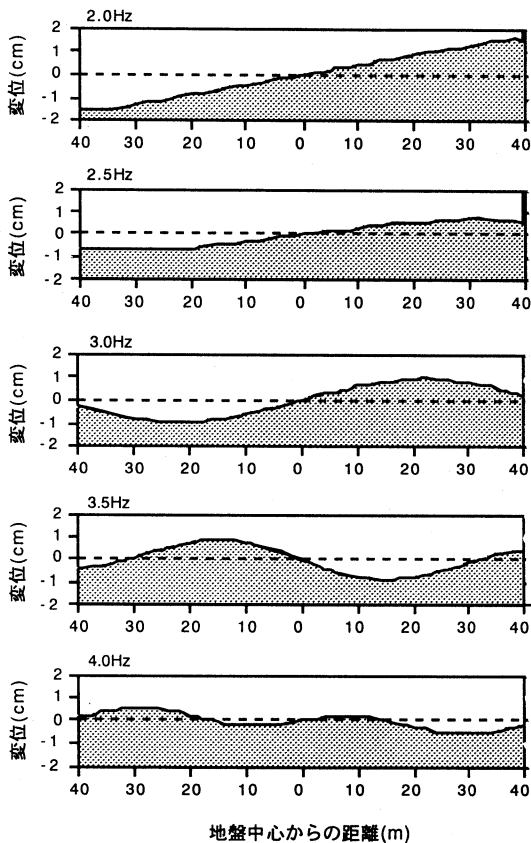


図-5 入力波の振動数と地表面形状

地表面形状から明らかであるが、入力波の振動数の変化に伴って動揺成分も変化することがわかる。そこで、地盤中心付近の任意の地表面上 2 点の上下応答差から動揺成分を算出し、入力波の振動数との関係を示した図が、図-6 である。3.5Hz の入力時に最も大きな動揺成分が地盤中央部で発生していることがわかる。動揺成分の大きさは、上下応答差を上下応答差が発生した距離で除することによって求められる。低振動数入力においては上下応答差は大きい、位相差の発生距離は長い。一方、高振動数入力においては上下応答差は小さいが、位相差の発生距離は短い。3.5Hz は動揺加速度が最も大きくなるように上下応答差と応答発生距離の影響を反映させる振動数と言える。

以上のことより動揺成分は、位相差を持った上下応答が影響すると考えられるため、ここまでは上下方向の応答にのみ注目していた。しかしながら、基盤より水平加速度成分を入射させていることから、動揺成分と同時に水平方向の応答も地表面上で発生していることは明らかである。このことを考慮すれば、地盤の応答が構造物に作用する場合について考える際は、動揺成分と水平成分の関係を明らかにしておく必要がある。

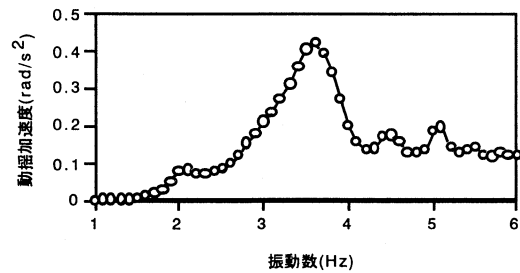


図-6 動揺成分の振動数特性

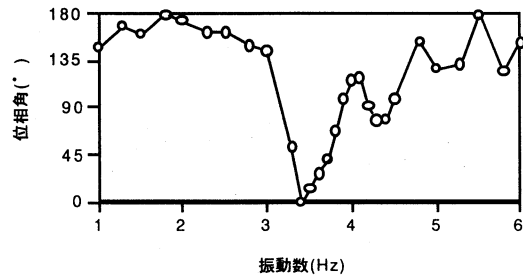


図-7 水平成分と動揺成分の位相関係

図-7 は地盤の水平成分と動揺成分の位相関係を示している。ここで、例えば図-8 のように水平成分と動揺成分が同じ方向に作用した時を同位相とする。両者の位相が逆位相 (180°) の場合は構造物への入力には損失が生じるが、同位相 (0°) の場合は入力の増加が発生する。図-7 から入力波の振動数変化に伴って、水平成分と動揺成分の位相が変化していることがわかる。特に、3.5Hz の入力において両者の位相角が同位相であることが読み取れる。ゆえに、最も大きな動揺成分が発生する振動数で同位相になるという結果は、構造物に対してこれまで考慮されなかったような大きな入力作用する危険性を示唆している。

しかしながら、実際の基盤からの入力波は様々な振動数の成分を含んでいること、実際の地盤は非線形性を有していることから、実地震時にはさらに複雑な動揺成分が地表面に発生していることが予測される。

4. 動揺成分が構造物に及ぼす影響

21m の高さを有する 7 階建て RC 造をモデル化して解析を行った。図-8 に示すように、水平入力では構造物の各層に一樣な入力作用するのに対し、動揺入力では構造物の高さに比例した入力作用する。構造物頂部に 200gal の入力作用するように、水平入力、動揺入力を正弦波形で作成し、それぞれ構造物に作用させた。

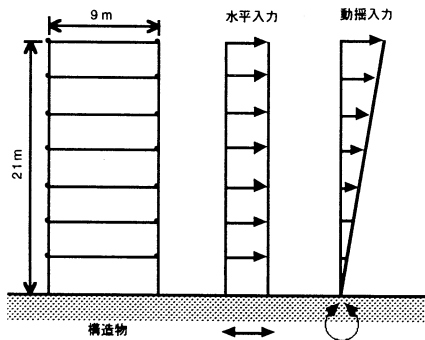


図-8 構造物への入力の違い

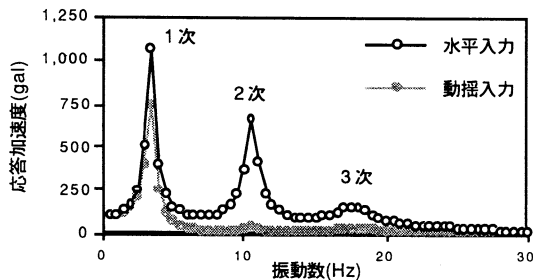


図-9 入力の振動数と応答の関係

図-9 は入力波の振動数と構造物頂部の応答の関係を示した図である。動揺入力の場合、2次以降の共振点がほとんど現れていない。これは、動揺入力による応答は1次のモードに集約されることを示唆している。

図-10 は構造物の1次固有振動数に相当する3.5Hzの入力時の構造物各層のせん断力を表している。図に示すように、おおよそ水平入力時の2/3程度の断面力が、動揺入力時に各層で発生している。また、各層間における水平入力と動揺入力に対する断面力の関係は、両入力において大きな違いが見られず、断面力の比もほとんど変化しないことから、動揺入力を等価な水平入力として置き換えることができるものと考えられる。以上のことより、構造物頂部における動揺成分の入力を水平成分と同一の大きさにしたときには、動揺成分は構造物頂部に作用する水平成分での力の大きさの2/3程度として捉えられる。

図-7 で示されるように、地表面における水平成分と動揺成分の位相は、基盤からの波の振動数特性によって変化する。図-11 は、水平入力と動揺入力が構造物に同時に作用した場合の構造物頂部の応答について示しているが、両入力の位相によって応答が変化することがわかる。位相角が同位相の場合に最も大きな応答が発生し、位相角が逆位相の場合に最も小さな応答が構造物に発生する。これまでの耐震設計においては、水平入力だけが考慮されていたが、

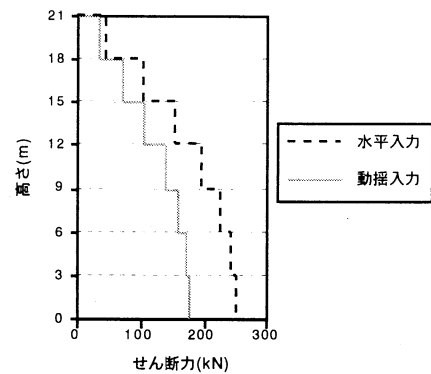


図-10 各入力によって生じる構造物のせん断力

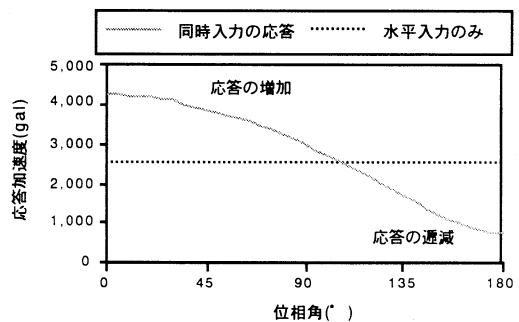


図-11 水平・動揺同時入力の応答

動揺入力の存在によって、応答の増加もしくは応答の低減が発生することを、この図は示唆している。ただし、本解析は動揺入力の影響に着目しているために線形解析を行ったことから、応答加速度はかなり大きな値を示している。今後は非線形解析時にも動揺成分が影響していることを明らかにする予定である。

5.まとめ

本研究によって地盤の不規則性が動揺成分発生の支配的要因であること、ならびに基盤からの波の振動数特性が動揺成分に影響することを示した。

さらに、構造物への影響を探ることにより、動揺入力は等価な水平入力に置き換えられることを示した。また、水平・動揺同時入力の場合、両入力の位相が構造物の応答に大きく影響することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 北浦勝・村田晶・宮島昌克・深谷正俊：地震動の回転成分が構造物の水平応答に及ぼす影響、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、Vol.2、pp.1769-1774、1998.12.