

2016年熊本地震における中層RC造杭基礎建物の地震時挙動に関する研究

名古屋大学工学部環境土木・建築学科建築学コース 護研究室 丹裕也

1. 研究の背景と目的

2016年4月に九州・熊本地方で一連の地震活動である2016年熊本地震が発生した。これらの地震のうち4月16日1時25分に発生した地震(以下、本震)については、熊本県の益城町に建つ庁舎内の震度計と、Hata *et. al.*¹⁾によってこの建物と隣接する駐車場に設置された臨時観測点(以下、site1)で観測記録が得られている(図1)。当該建物は1981年3月に建てられた地上3階、塔屋1階建ての中層RC造杭基礎建物である(写真1)。そのため当該建物では地盤と建物の動的相互作用効果が大きいものと考えられる。図1の観測記録において建物震度計とsite1では異なる挙動をしていることが分かる。被害の実被害としては、震度7を観測したにも関わらず外観上の被害は小さく、建物の被災度判定区分は中破であった。また震度7の大地震が建物内と周辺の地盤で同時に観測されることは非常に稀である。よって本建物の解析的研究は地盤と建物の非線形動的相互作用現象を明らかにし、知見を蓄積することは研究的にも実務的にも重要である。



写真1 建物外観

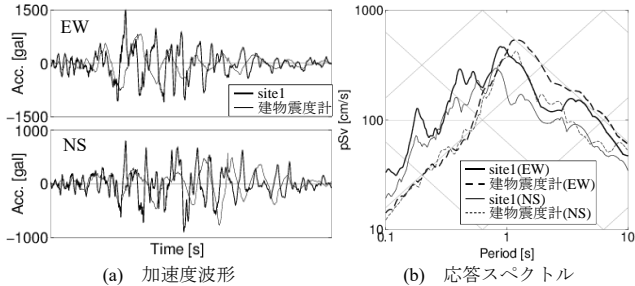


図1 site1と建物内で観測された本震の記録の比較

動的相互作用を考慮した地震応答解析では基礎入力動と動的な地盤ばねを考慮するが、そのためには基礎入力波と地盤応答を推定する必要がある。地盤応答計算は地中の杭応力を評価するためにも重要である(図2)。しかし本地盤では深部までの詳細な地下構造の調査がされていないため、地盤構造を推定する必要がある。ここで図3にsite1とKiK-net 益城²⁾(以下、KMMH16)地表における本震のEW方向の観測記録を比較して示す。これより両者は良く対応していることが分かる。なおNS方向も同様の傾向であることは確認している。このことから両者は類似の地下構造を有しており、本震時には同様の揺れ方をしていたと推測される。

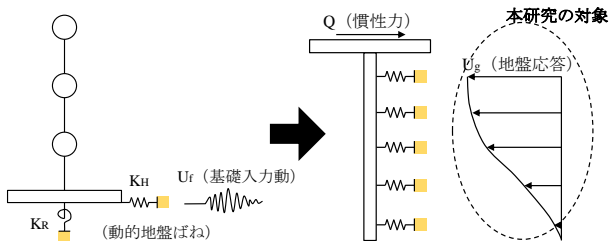


図2 動的相互作用を考慮した地震応答解析

KMMH16ではS波速度構造が既知であるため応答計算が可能である。

以上の背景より、本論では地盤と建物の振動特性の分析、また対象地盤構造の推定のためにKMMH16の地盤震動の分析を行い、動的相互作用を考慮した地震応答解析を行うために必要な地盤応答の解析を試みた。

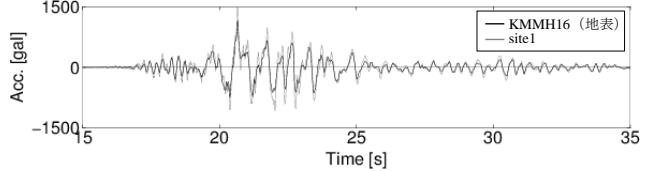


図3 site1とKMMH16の加速度波形の比較 (EW方向)

2. 地盤と建物の常時微動計測

地盤と建物の振動特性を把握するために建物内と地表で常時微動計測を行った。また計測の対象である建物は地震によって被災しており、建物の被災状況を把握しておくためにも本計測は有用である。計測体制の模式図を図4に示す。地表観測点の1つはsite1と同地点で行ったが、本建物とsite1の間には約1.5mの高低差が存在する(図4)。以下、本建物レベルの地盤を高いレベル、site1の地盤レベルを低いレベルと示す。

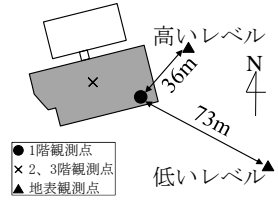


図4 常時微動計測の計測体制

計測は3ケース行い、それぞれ30分間ずつ計測した。以下にケースごとの計測地点を示す。

- ケース1: 建物1階、高いレベル、低いレベル
- ケース2: 建物1階、建物3階、高いレベル
- ケース3: 建物1階、建物2階、建物3階

図5にH/Vスペクトル、図6に地表に対する1階の伝達関数(EW方向)、図7に高いレベル及び建物1階に対する建物3階の伝達関数を示す。H/Vスペクトルより高いレベルと低いレベルのいずれも約2Hzに明瞭なピークが見られるため、この振動数が地盤の一次固有振動数だと考えられる。

図6より3Hz以上で増幅スペクトルが1以下となり、入力損失効果が見られる。これはNS方向でも同様の傾向で

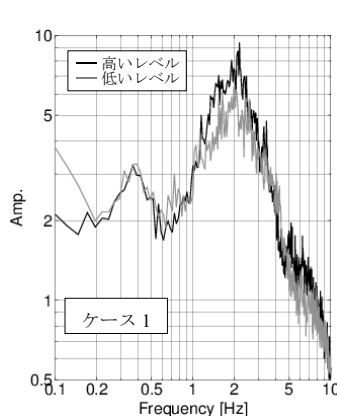


図5 H/V スペクトル

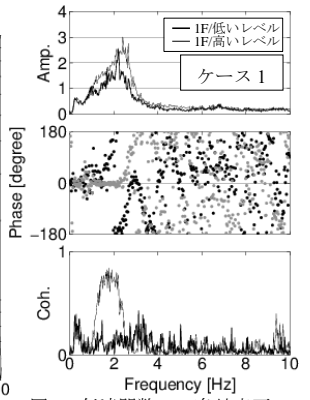


図6 伝達関数 (1F/各地表面のEW方向)

あった。ただし低いレベルと建物 1 階では計測点間に距離があるためコヒーレンスが小さい。

図 7 より建物 3 階に対する建物の固有振動数は基礎固定系（ロッキング動を含む）で 3.5~4Hz、地盤一杭一建物連成系で 2~2.3Hz である。これは当該建物の剛性が地盤に対して高く、地盤と建物の動的相互作用効果が大きいため、固有振動数が低振動数側に移動したからだと考えられる。なお上下方向については明瞭なピークは見られなかった。

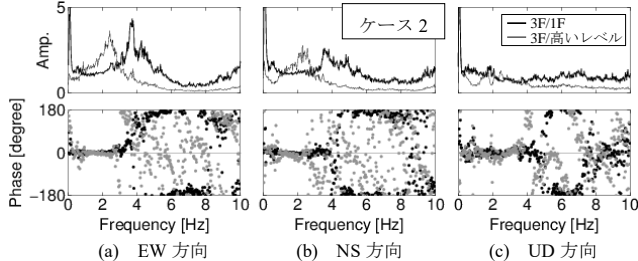


図 7 伝達関数 (3F/高いレベル及び 3F/1F)

3. 一次元重複反射理論による PS 検層モデルの検討

KMMH16 で実施された PS 検層の妥当性を検討するため、複数の中小地震の観測記録による分析を行う。分析に用いた中小地震は地盤が弾性領域に収まると予想される、地表最大加速度が 100gal 未満の 20 波である。図 8 に中小地震のそれぞれの伝達関数とそれらを平均した伝達関数（以下、平均伝達関数を示す）、また一次元重複反射理論による理論伝達関数を示す。まず平均伝達関数について、EW 方向と NS 方向で増幅特性が異なっていることが分かる。また平均伝達関数と理論伝達関数を比較すると EW 方向の 2Hz あたりまでは良く対応しているが、高振動数域にはあまり対応しておらず、NS 方向では全体的に対応が良くない。このことについては地盤の不整形性によるものと考えられているが³⁾、明確な理由は明らかになっていない。そのため本論では EW 方向と NS 方向のそれぞれについて検討を行う。

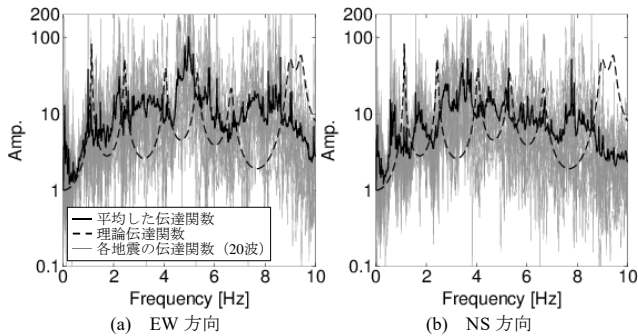


図 8 観測記録と理論伝達関数の比較

4. 地盤構造の同定及び地表面応答解析

本節では地盤構造の同定を行い、本震の地表面応答解析を試みる。同定には遺伝的アルゴリズム（以下 GA）を用いて、地盤構造を仮定し、その地盤構造から計算される伝達関数と観測記録による伝達関数の差が最小になるものを選択した。観測記録には先述した中小地震を用いた。GA による推定は 1 つの地震動に対して複数回を行い、推定したそれぞれの地盤構造を用いて本震の地表面応答解析を行った。解析にあたっては表面 2 層の非線形特性に HD モデルを採用し、粘性土を想定して $\gamma_{0.5} = 0.18\%$ 、 $h_{max} = 17\%$ とした。

地中に本震の観測記録を入力したときの応答解析結果のうち、観測記録を比較的良い対応を示したものを図 9、図 10 に示す。

今回の検討結果から、2 つの傾向が見て取れた。1 つは応答スペクトルにおいて 1 秒での応答を過大に評価していることであり、もう 1 つは 1 秒より短周期の応答が低減することである。前者の要因として、入力した本震の地震動では 1 秒の成分が卓越しており、これが地盤深部の S 波速度コントラストによって増幅されることによるものと推定される。後者は短周期成分が卓越する表層地盤の非線形化の影響が大きく、応答が低減されたものと推定される。実際に今回示した両モデルの応答計算結果では最大ひずみが約 10% となった。このことから、等価線形解析によって本震の応答を評価することは困難であり、非線形を考慮した時刻歴地震応答解析を実施する必要があると考えられる。

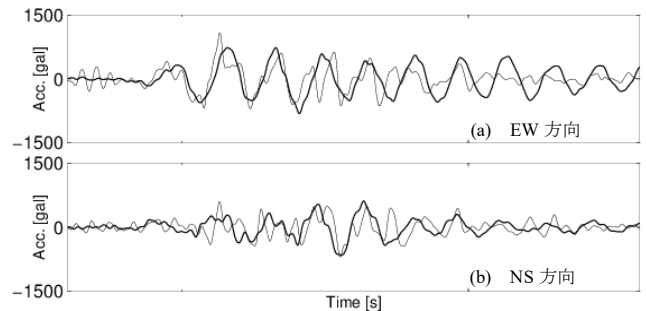


図 9 推定モデルから計算した地表の加速度波形

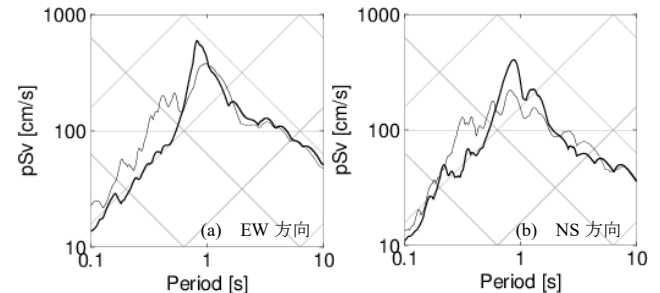


図 10 推定モデルから計算した地表の応答スペクトル

結論

常時微動計測を行って地盤や被災した建物の振動特性を分析した。また KMMH16 の地盤構造を推定し、本震の応答解析を行った。特に EW 方向では加速度レベルが大きく、等価線形解析では非線形の影響が大きくなってしまふ。非線形性を逐次評価できる時刻歴応答解析などを行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Yoshiya HATA, Hiroyuki GOTO, and Masayuki YOSHIMI : Preliminary Analysis of Strong Ground Motions in the Heavily Damaged Zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the Main Shock of the 2016 Kumamoto Earthquake (Mw7.0) Observed by a Dense Seismic Array, Seismological Research Letters, Vol.87, No.5, pp.1044-1049, 2016
- 2) 防災科学技術研究所：強震観測網 (K-NET, KiK-net) 、
<<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>>、
2017.1 参照
- 3) 元木健太郎、友澤裕介、加藤研一：益城町宮園周辺と断層極近傍における被害と地盤震動、第 44 回地盤震動シンポジウム、pp.55-64、2016.12