

サイト効果と動的相互作用を考慮したトルコの RC 造建物群の耐力推定

降伏耐力 サイト効果 動的相互作用

防災科学技術研究所 国際会員 新井 洋
 防災科学技術研究所 会員 外 Nelson PULIDO

1. はじめに

強震動シミュレーション等の解析的方法により建物群の地震時被害を予測するためには、地震動だけでなく、建物群の応答と被害を再現できる解析モデルが不可欠である。このため、実際の被害統計データや地震記録あるいは解析による再現強震動を用いて被害率を最も良く説明できる建物モデルを同定する研究¹⁾³⁾が行われている。このような研究事例を蓄積していくことは、建物群の耐震性能を把握する上で重要である。しかし、既往の研究では、地盤の非線形応答増幅(サイト効果)と地盤-建物の動的相互作用の影響が十分に考慮されていない場合が多い。そこで本報では、1999年トルコ・コジャエリ地震におけるギョルジュクのRC造建物被害に対して同様の手法を適用し、サイト効果と動的相互作用の影響を考慮して建物群の降伏耐力を推定する。

2. ギョルジュクの強震動と建物被害率

ギョルジュクでは、1999年コジャエリ地震におけるRC造および組積造建物の全数被害調査が行われている(図1)⁴⁾。また、調査地域内の7地点(以下、サイトA-F, H)では、微動のアレイ観測から、深度300mまでのS波速度構造が推定されている(図2a)⁵⁾。そこで、サイトA-F, Hの本震地表地震動を強震動シミュレーション解析により再現し、これと近傍のRC造建物の被害率を用いて、建物耐力を推定する。

強震動シミュレーション解析では、先ず、既往の震源断層および地殻構造モデルに基づき、理論および統計的Green関数法による3次元線形波動伝播解析⁶⁾を行い、各サイト直下深度300mでの基盤岩露頭波を求めた。次に、これを各サイトの地盤構造モデル(図2a)への入力として1次元有効応力解析⁷⁾を行い、7地点の本震地表地震動(水平NS, EW方向)を推定した。推定された地震動の速度波形を図3に、振幅の大きなNS方向の最大せん断ひずみ・最大速度の地中分布を図2b, 2cに示す。図から、地表での地震動は、表層地盤の非線形応答増幅の影響を強く受けていることが分かる。

一方、建物被害率は、全数調査結果⁴⁾に基づき、サイトA-F, Hの微動観測アレイ中心(図1)⁵⁾から半径100m程度以内にあるRC造建物を対象に、調査に使用されたEMS98グレード(D1-D5)から小破以上(>D1 : D2+D3+D4+D5)と大破以上(>D3 : D4+D5)の2種類の被災規準を設定し、各サイト・建物階数ごとに算定した。この際、建物母数が5棟未満および被害率が0または1あるいは2種類の被災規準で同値となる場合は除外した。算定された被害率を建物階数ごとに図4に示す。図から、建物階数Nが高いほど被害率R_Dが大きくなる傾向があるように見えるが、同じ階数・被災規準でもサイトによって建物被害率のパラツキは大きい。これは、サイトによって建物への入力地震動と動的相互作用の効果が異なっていたためと考えられる。

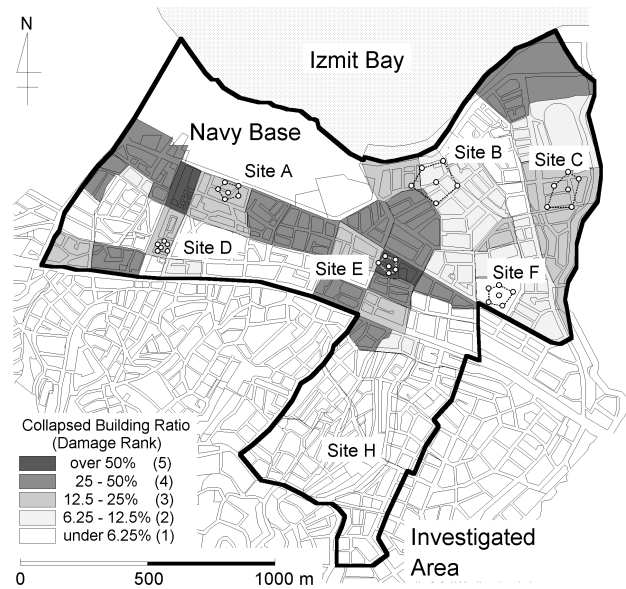


図1 1999年コジャエリ地震におけるギョルジュクの中低層RC造建物被害分布⁴⁾および微動アレイ観測点⁵⁾

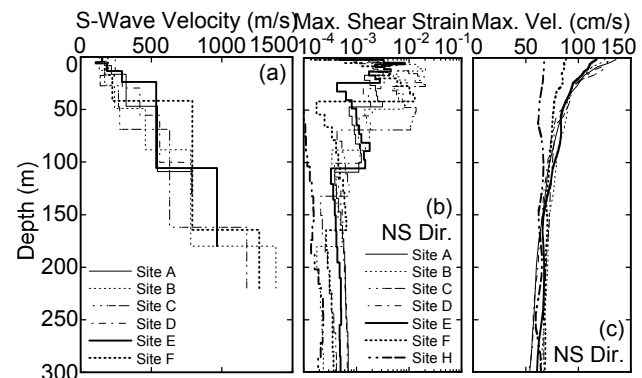


図2 サイトA-FのS波速度構造⁵⁾とその地震応答解析から得られた最大せん断ひずみ・最大速度の地中分布(NS方向)

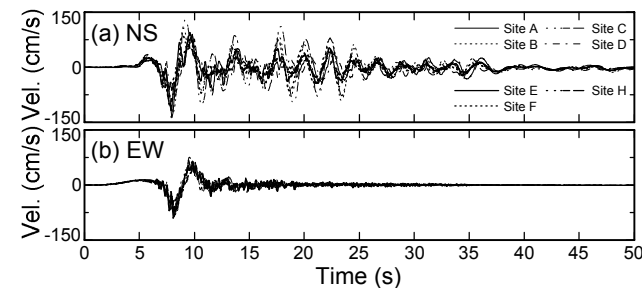


図3 サイトA-F, Hで推定された本震地表地震動(速度波形)

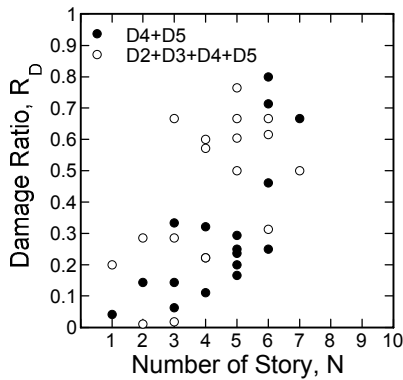


図4 建物耐力の推定に用いた被害率データ⁴⁾

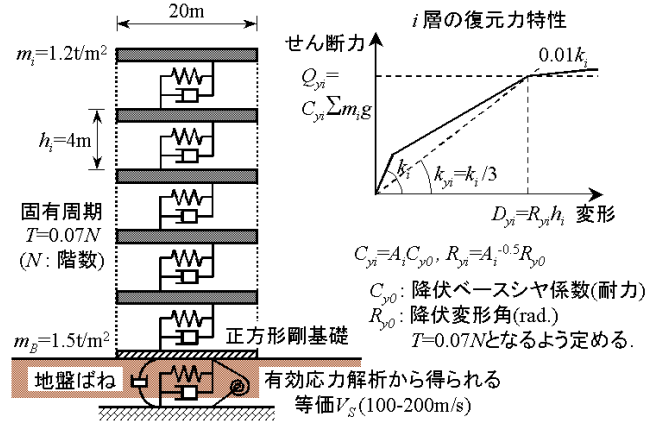


図5 建物耐力の推定に用いた解析モデルの概要

3. 建物群のモデル化と降伏耐力の推定

長戸・川瀬 (2001)³⁾と同様の方法により、建物群の耐力を推定した。すなわち、まず、建物の力学モデルとその降伏耐力の確率密度分布(規準値 C_{y0})を仮定することで建物群を表現した。次に、各サイトでの再現強震動(図3)を入力として建物モデルの地震応答解析を行い、最大応答塑性率がある被災規準 μ_D 以下となるための建物の必要耐力 C_{yD} を Iteration によって求めた。そして、 C_{yD} よりも小さい耐力を持つ建物が被災するものと考え、その存在確率が実際の建物被害率 R_D (図4)と一致するような耐力の確率密度分布を求め、その規準値 C_{y0} を建物群の推定耐力とした。ただし本報では、地盤-建物の動的相互作用を考慮するため、高橋・林 (2000)⁸⁾を参考に、図5に示す多質点せん断型 Sway-Rocking モデル(建物階数 $N=1-9$)を用いた。また、建物の被災規準は、小破以上が $\mu_D=1.5$ 、大破以上が $\mu_D=3.5$ に対応するものと仮定し、それぞれの被災規準に対して各サイト・建物階数ごとに規準耐力 C_{y0} を求めた。耐力の確率密度分布は、長戸・川瀬 (2001)³⁾と同様、Shibata (1980)⁹⁾の対数正規分布と相似とした。

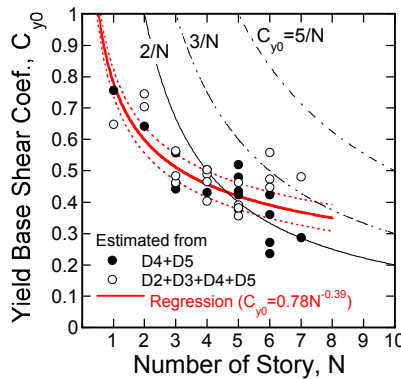


図6 推定された建物耐力と回帰式

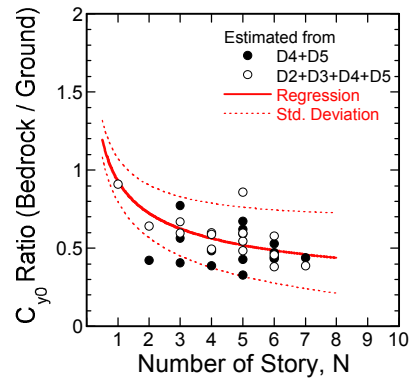


図7 サイト効果の考慮の有無が建物の耐力推定に与える影響

推定された建物耐力を階数 N ごとに図6に示す。図から、耐力の推定値は、仮定した被災規準やサイトによらず各階数ごとに概ね安定しており、そのバラツキは $\pm 0.05-0.1$ 程度である。この値は図4の建物被害率のバラツキに比べてもかなり小さいことから、建物群の耐力がある程度適切に推定されたと考えられる。図には参考のため、RC造建物の耐力 C_{y0} と階数 N の関係としてよく仮定される $C_{y0} = 1/N$ の関係¹⁰⁾ ($=2, 3, 5$)を示す。推定結果は、建物階数 N が低いほど耐力 C_{y0} が大きくなる傾向を明瞭に示しており、 $C_{y0} = 1/N$ の関係と調和的である。なお、日本の建物で $=3-5$ 、耐力の低い建物で $=2$ 程度と言われているが^{8), 10)}、推定耐力はこれよりも小さな値となっている。このことは、トルコの建物耐力が日本のそれよりもかなり低いことを示唆している。

さらに、サイト効果と相互作用の考慮の有無が建物の耐力推定に与える影響を検討するため、サイト効果を無視した場合(入力地震動として深度300mでの基盤岩露頭波を用いた場合)と相互作用を無視した場合(図5で基礎固定モデルを用いた場合)について同様の解析を行い、両者を考慮した場合の耐力の推定値(図6)との比を求めた。サイト効果を無視した場合(図7)、この比の値は0.3-0.8程度となり、階数が高いほど値が小さくなる傾向が認められた。一方、相互作用を無視した場合、この比の値は、4階以下の建物では1-1.3程度、それより高い階数ではほぼ1であった。このことは、建物群の耐力推定において、相互作用の考慮の有無よりもサイト効果のそのの方が結果に与える影響が大きく、それは建物階数が高いほど顕著に現れることを示している。

4. まとめ

1999年トルコ・コジャエリ地震時に甚大な被害を受けたギョルジュクの7地点において、強震動シミュレーション解析に基づく地表地震動と全数調査結果による建物被害率を用いて、地盤との動的相互作用を考慮したRC造建物群の地震応答解析を行い、その降伏耐力を推定した。また、建物群の耐力評価において、相互作用よりもサイト効果の影響の方が大きいことを示した。

<参考文献> 1) 宮腰ほか: 被害データと地震応答解析に基づく建物群の耐震性能に関する考察, 10th JEES, 327-332, 1998. 2) 林ほか: 1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能, 建築学会構造系論文集, 528, 135-142, 2000. 3) 長戸, 川瀬: 建物被害データと再現強震動によるRC造建物群の被害予測モデル, 建築学会構造系論文集, 544, 31-37, 2001. 4) 建築学会, 土木学会, 地盤工学会: 1999年トルココジャエリ地震災害調査報告, 384pages, 2001. 5) 新井ほか: 1999年コジャエリ地震時にギョルジュクの地盤応答が強震動と建物被害に与えた影響, 11th JEES, 317-322, 2002. 6) Pulido, N.: Broadband Source Asperity Models of Large Crustal Earthquakes from Inversion of Near-Fault Ground Motion, 地震学会秋季大会, P201, 2003. 7) 社本ほか: 一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性, 建築学会構造系論文集, 433, 113-119, 1992. 8) 高橋, 林: 地盤-建物相互作用による地震時の建物被害の低減効果 トルコ・台湾地震の観測記録を用いた検討, 建築学会大会, 構造 II, 41-42, 2000. 9) Shibata, A.: Prediction of the Probability of Earthquake Damage to Reinforced Concrete Building Groups in A City, 7th WCEE, 4, 395-402, 1980. 10) 林ほか: 1995年兵庫県南部地震における相互作用効果と建物応答, 建築学会構造系論文集, 520, 45-51, 1999.