# 盛土地盤の地震時非線形応答が建物被害に与える影響\*

# 山形大学 三辻 和弥

#### 東北大学 松川 和人 前田 匡樹

# 1. はじめに

2008年岩手・内陸地震においては、同年代に建設された、ほぼ同じ構造形式を持つ3つの小学校校舎(上 野目・西大崎・真山小学校)において、被害の程度に大きな差が見られた。上野目小学校では普通教室棟が被 災度区分判定の結果、「大破」と判定されている一方、他の2つの小学校での被害は軽微なものであった。本 震後に行った余震観測を通して、これら3つの小学校サイトでは地盤振動特性の違いがあることが明らかとな ったが、上野目小学校校舎の地震被害を説明するには十分な違いではなかった。上野目小学校は敷地周辺の被 害状況から盛土地盤が本震時に非線形挙動を示したことが予想され、その影響が建物被害に大きな影響を与え たことが予想される。本稿では、等価非線形解析および建物の非線形立体地震応答解析により、盛土地盤の地 震時非線形応答が建物被害に与えた影響について検討した(三辻ら,2010:Mitsuji et.al. 2009:中神ら,2009: 前田ら,2008)。

# 2. 地震被害概要

図1には震央と被災地の関係を示す地図および3つの小学校周辺の拡大図を示す。図中において、"KMN"は 大きな被害のあった上野目小学校を、"NOS"、"MYM"は構造的な被害が見られなかった西大崎小学校、真山小 学校をそれぞれ表す。"IWD"は3つの小学校から最も近接した地点にある震度計が設置されていた大崎市岩出 山総合支所を示しており、岩出山総合支所の震度計では本震および余震の地震記録が得られている。このうち 被害の大きかった大崎市立上野目小学校は、宮城県大崎市岩出山地区の山麓に位置しており、1963年および 1982年建設の2階建RC造校舎2棟および屋内運動場が建っている。新耐震設計法により設計された1982年 建設の管理教室棟は無被害であったが、1963年の普通教室棟(写真-1)と屋内運動場に被害が生じた。本震 直後の被害調査は被害が見られた普通教室棟と屋内運動場について行っている。



図-1 震央と被災地の地図

<sup>\*</sup>The effect of non-linear seismic response of fill land to damage of buildings, Yamagata University by MITSUJI Kazuya et al.

1 階では、柱22本のうち、4本に幅10mmを超える大きなせん断ひび割れが生じ(損傷度IV・写真-2)、3本に も大きなせん断ひび割れが生じた。また、1 階の南構面は東方向に10mm 程度の残留変形が生じていた。なお、 上野目小が所在する大崎市内には、教室棟に関して建設時期、構造形式がほぼ同じである真山小と西大崎小が 位置しているが、上野目小に大きな建物被害が見られたのに対し、真山小と西大崎小では目立った建物被害は 見受けられなかった(前田・中埜, 2008)。



写真-1 上野目小学校普通教室棟



写真-2 柱のせん断ひひ割れ (1階:損傷度IV)

# 3. 余震観測記録の分析

2008年7月2日から8月1日の1か月間にわたって、上野目・真山・西大崎小学校において余震観測を行った(地表面加速度の最大が上野目の37gal)。本震時には上野目小学校から約5km離れた大崎市岩出山総合支所で地震記録が得られている。そこで、本震時の各小学校敷地での入力地震動の程度の差を抽出することを目的として、岩出山観測点と各小学校の地表面で得られた余震記録から応答スペクトル比を算出した(各サイトで記録の得られた6波、真山小については4波)。図2にEW方向の加速度応答スペクトル比を示す(h=5%)。柱断面リストなどの情報から建物モデルを作成して行った静的増分解析では上野目小学校普通教室棟の弾性固有周期は約0.3秒と推定した。図2より建物の弾性固有周期0.3秒周辺では、上野目小学校は他の2校に比べて揺れやすいことが推察される。ただし、各小学校での観測記録の長周期領域にはノイズとみられる成分が混入していることが見られたため、周期約0.8秒よりも長周期領域では信頼性が低くなっていると考えられる。



図2 余震観測記録の応答スペクトル比(各サイト/岩出山)

#### 4. 上野目小学校地盤の地震増幅特性

図3左図に示すように上野目小学校周辺でボーリングデータ得られている。N値の情報から図3右図に示す ように、各層におけるせん断波速度を太田・後藤の式を用いて算出し(Ohta and Goto, 1976)、一次元重複反 射理論を用いた等価線形解析(Schnable et. al., 1972)により、上野目小学校表層の10mによる地盤増幅特 性を求めた。地盤の非線形特性は図4に示す宮城県の調査報告によるものを用いた(宮城県, 1985)。ここで は、岩出山の本震記録を解放基盤面での地震動と仮定して解析を行った。図5に線形解析の場合と比較した上 野目の増幅スペクトルを、図6、図7に等価線形解析の結果得られた上野目の推定地震波形およびフーリエス ペクトルを示す。時刻歴波形ではそれほど顕著な差は見られないが、フーリエスペクトルおよび増幅スペクト ルの図からは、表層地盤の非線形化によってスペクトルのピークが低周波数側に移動している様子がわかる。 しかし、静的増分解析で求めた結果より、建物の弾性固有周波数が3Hz付近にあるとすると、非線形解析の結 果は建物に大きな被害を及ぼすには3Hz付近でそれほど大きく増幅しているようには見えない。

また、図3に示したボーリング情報は上野目小学校前の道路付近で得られたもので、学校はそこから2m程 度盛土された敷地に建てられている。学校関係者などへの聞き取りから、グラウンド途中に切土・盛土の境界 があり、普通教室棟はその境界をまたいで建設されているようであるが、詳細については今のところ把握でき ていない。そこで、校舎西側の地盤が盛土されていることを考慮して図3のせん断波速度構造の表層を2mだ け高くし、最上層(Vs=83m/s)のせん断波速度よりもやや小さいVs=50m/sの層を2m分だけ最上層に載せたモ デルをCase1、最上層と同じ物性値の層をそのまま2m分だけ載せたモデルをCase2として、図7に盛土によ る地盤増幅の影響を考慮した計算結果を地表面の地震応答のフーリエスペクトルについて示す。図7より、盛 土にあたる層を考慮したことにより、振幅が増幅される周波数帯が低周波数側に移動し、盛土を考慮しない Case0の結果と比較すると、1Hz~3Hzの周波数帯で大きく増幅されており、弾性固有周波数約3Hzの建物に被 害を及ぼす可能性の高い地表面の地震応答になったと考えられる。

図8には本震について、地盤の等価線形解析で得られた上野目の地表面応答と岩出山の観測記録の応答スペクトル比を示す。盛土地盤の非線形性を考慮した Case1 および Case2 の結果より周期 0.3~1.0 秒の範囲で非線形性を考慮した方が、応答スペクトルが大きくなることが示されている。



図3 上野目地盤のN値と推定せん断波速度



図8 応答スペクトル比(上野目/岩出山)

# 5. 校舎建物の非線形地震応答解析

静的増分解析に基づいて立体解析モデルを作成し、岩出山の本震記録および前節で求めた地盤の非線形増幅 特性を考慮した上野目の推定地震動を入力地震動として非線形地震応答解析を行った。柱および梁は曲げせん 断モデルで置換し、非線形特性には武田モデルを用いた。入力地震動はNS、EWの2方向とし、Case0は上野 目のボーリングデータから求めた地盤モデルに地盤の非線形性を考慮した地表面の応答波形を、Case1、Case2 は盛土の影響を考慮して求めた地表面の応答波形を用いている。図9に被害の大きかった、EW(建物長辺)方 向の第1層の層せん断力 - 層間変位関係を示す。結果は地盤を線形として地表面の応答を求めた場合と地盤の 非線形性を考慮した場合とで比較している。Case0の場合は地盤の非線形性を考慮しても線形の場合とそれほ ど結果は変わらず、これは地表面応答のフーリエスペクトルの結果が、地盤の非線形性を考慮しても、建物の 弾性固有周波数 3Hz 付近でそれほど大きく増幅していないためと考えられる。一方、Case1、Case2 の結果で は、地盤の非線形性を考慮すると、第1層の層間変位は塑性化して大きくなり、Case1 の場合で最大層間変位 が約 110mm、Case2 の場合で約 70mm となった。解析では第1層の内法階高を 3600mm と仮定しており、Case1 の場合の最大層間変形角が約 1/30、Case2 の場合は約 1/50 と、被害に対応する程度の応答結果となった。建 物モデルの精度など、他にも検討するべき項目はあるものの擁壁や道路の被害と考え合わせると、学校敷地の 西側にあると思われる盛土の影響を考慮することによって建物への入力地震動が大きくなり、建物に大きな被 害を与えたことが説明できるのではないかと思われる。



図9 非線形立体地震応答解析から得られた第1層の層せん断力 - 層間変位関係

## 6. まとめ

2008 年岩手・宮城内陸地震において、同時期にほぼ同じ構造形式で建設された 3 つの小学校校舎のうち、 唯一、大きな被害の見られた上野目小学校での被害と地盤振動特性の関係について検討した。

・各小学校で行った余震観測記録と岩出山観測点で得られた余震記録から求めた加速度応答スペクトル比の結果から、上野目小学校の敷地では建物に被害を与える影響の大きい0.3秒~0.5秒の周期帯で大きな応答が得られる可能性が指摘された。

・上野目小学校周辺の敷地で得られているボーリングデータから地盤の一次元等価線形解析を行い,地盤の非 線形性が地表面応答に及ぼす影響について検討した。ボーリングデータから得られる地盤の増幅特性だけでは 非線形性を考慮しても十分でなく,盛土の影響を考慮することにより,建物被害に影響を与える地盤の増幅特 性となった。 ・立体モデルによる建物の非線形地震応答解析の結果から,盛土の非線形性を考慮した地盤の増幅特性を考慮 することにより,第1層の最大層間変形角が約1/50~1/30と,建物の被害を説明できる結果が得られた。

盛土の非線形性の影響を考慮することにより,ある程度,上野目小学校の被害が大きかった理由は説明でき ると考えられるが,建物モデルの精度をより高めることや切土・盛土境界の不整形性の影響,建物のねじれ振 動の影響などについて,さらに検討する必要があると考えている。

#### 謝辞

調査,観測にあたり大崎教育委員会,学校関係各位に感謝いたします。地震観測記録については,気象庁から公開されている自 治体震度計のデータ,および東北大学理学研究科地震・噴火予知研究観測センター大都市圏強震動観測ネットワーク(宮城県,東 北大学工学研究科災害制御研究センター)のデータを使用しました。余震観測は鹿島建設小堀研究室と共同で行い,被害調査につ いては東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻リハビリテーション工学研究室と宮城高専(現仙台高専)の共同で行いました。 岡野創氏,山添正稔氏,迫田丈志助手,李晩在准教授および研究室の学生の方々には多大なご協力をいただきました。関係各位に 感謝いたします。

#### 参考文献

・三辻和弥・前田匡樹・松川和人(2010): 2008 年岩手・宮城内陸地震における低層 RC 造建物の被害と地盤 振動特性の関係,第13回日本地震工学シンポジウム, pp. 2705-2712

• Mitusji K., Maeda M., Nakagami H. and Matsukawa K. (2009) : Estimation of Ground Motion and Seismic Response of RC Buildings Damaged in the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, the 2009 Asian-Pacific of Network of Centers for Earthquake Engineering Research (ANCER) Workshop, Urbana, USA

・中神宏昌・三辻和弥・松川和人・前田匡樹(2009):2008 年岩手・宮城内陸地震により被災した RC 造学校 建築の入力地震動と被害要因に関する研究(その1)~(その2),日本建築学会大会学術講演梗概集.C-2,構造 III, pp. 347-350

・前田匡樹・三辻和弥・迫田丈志・五十嵐さやか・松川和人・中神宏昌・山添正稔・岡野創(2008):2008 年 岩手・宮城内陸地震により被災した学校建築物の調査と余震および常時微動観測(その1)~(その5),日本 地震工学会大会梗概集, pp. 324-333.

・前田匡樹・中埜良昭(2008): 2008 年 6 月 14 日岩手・宮城内陸地震による建築物の被害調査報告,ビルディングレター2008 年 8 月号,日本建築センター, pp63-74

• Ohta, Y. and Goto, N. (1976): Estimation of S-wave velocity in terms of characteristics indices of soil, Buturi-Tanko, 29(4), pp.34-41

• Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972) : SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley

·宮城県(1985):宮城県地震地盤図