

論文 2011 年東北地方太平洋沖地震で沈下と傾斜の被害を受けた学校建物の被害調査と被害要因に関する検討

山添 正稔*1・迫田 丈志*2・三辻 和弥*3・前田 匡樹*4

要旨: 2011 年東北地方太平洋沖地震において、大崎市立 A 中学校では、杭基礎を有する校舎建物に最大 80cm 程度の沈下と最大 1/25 程度の傾斜の被害が生じた。杭頭部分の掘削調査によって、杭頭の回転と曲げ圧縮破壊による破損を確認し、杭の引抜調査によって、GL-3m 程度の杭中間部の破損や曲げひび割れを確認した。建物-杭-地盤の非線形相互作用を考慮した地震応答解析では、杭の最大塑性率は終局点を越えたが、地盤変形のみの場合には杭の塑性率は最大 1 程度であった。このことから、杭頭付近の軟弱な腐植土層の影響で、建物からの慣性力の大部分が杭に伝達し、杭頭位置が曲げ圧縮破壊に至ったことが被害要因であると考えられる。

キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 建物沈下, 杭被害, 非線形相互作用, 地震応答解析

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) では、仙台市から北に約 40km の距離に位置する大崎市古川地域において、震度 6 強の強い揺れが観測された。JR 古川駅の西側地域を対象とした被害調査¹⁾では、木造家屋の倒壊や液状化によるマンホールの浮き上がり、低層 RC 造集合住宅の傾斜等の被害が報告されている。

古川地域内には、防災科学技術研究所による K-NET 古川(MYG006)観測点と気象庁による JMA 古川観測点が設置されている。本震時には、それぞれの観測点で最大加速度 570cm/s^2 と 460cm/s^2 (いずれも EW 方向) の記録が観測された。また、両観測点ともに、その記録の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) は、周期 1 秒前後で約 200cm/s のレベルとなっており、古川地域では本震時にかなり強い揺れが生じていたことが分かる。

K-NET 古川から南東約 2km の距離に位置する大崎市立 A 中学校では、このような強い揺れの影響で、杭基礎を有する校舎建物に沈下および傾斜の被害が生じた。このような杭基礎の学校建物の沈下被害は、2003 年十勝沖地震の際にも生じており²⁾、その際には、杭頭部分の掘削調査と杭の引抜調査によって杭頭部分や杭地中部の損傷が確認され、地震応答解析によって被害要因の検討が行われている。しかしながら、同様の被害を対象として杭基礎の詳細な被害調査を行い、被害要因の検討を行った既往の事例は他にはほとんど見られない。

このことから、今回の被害についても、杭基礎の詳細な被害調査を行ってその発生要因について検討し、知見を蓄積することは、今後も発生が予測される大地震の際に、同様の構造形式の建物で生じる被害を減少させる上

で重要であると考えられる。

そこで本論では、まず校舎建物の被害概要について報告する。杭基礎については、文献²⁾と同様に杭頭部分の掘削調査と杭の引抜調査を実施しており、その結果も報告する。次に、建物-杭-地盤の非線形相互作用を考慮した地震応答解析を行い、被害要因について検討する。

2. 建物概要と被害概要

2.1 建物概要

A 中学校の校舎建物は、昭和 53 年に特別教室棟と普通教室棟が建設され、その後平成元年に給食棟、平成 3 年に新校舎棟が増築されている。RC 造の各建物間は Exp.J によって連結されている。建物概要を表 2-1、校舎南側外観を写真 2-1 に示し、1 階平面図兼基礎伏図を図 2-1、特別教室棟の D 通り軸組図と普通教室棟の A 通り軸組図を図 2-2 に示す。

表 2-1 建物概要

建物名称	建設年	延床面積(m ²)	階数	構造	規模(m) 梁間×桁行
特別教室棟	S53	2677	3	RC	9.8×72.3
普通教室棟	S53	2942	3	RC	9.8×80.5
新校舎棟	H3	334	3	RC	9.8×17
給食棟	H元	150	1	RC	10×15



写真 2-1 校舎南側外観

*1 (株)小堀鐸二研究所 (正会員)

*2 東北大学大学院都市・建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 山形大学地域教育文化学部 准教授 博士 (工学) (会員外)

*4 東北大学大学院都市・建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

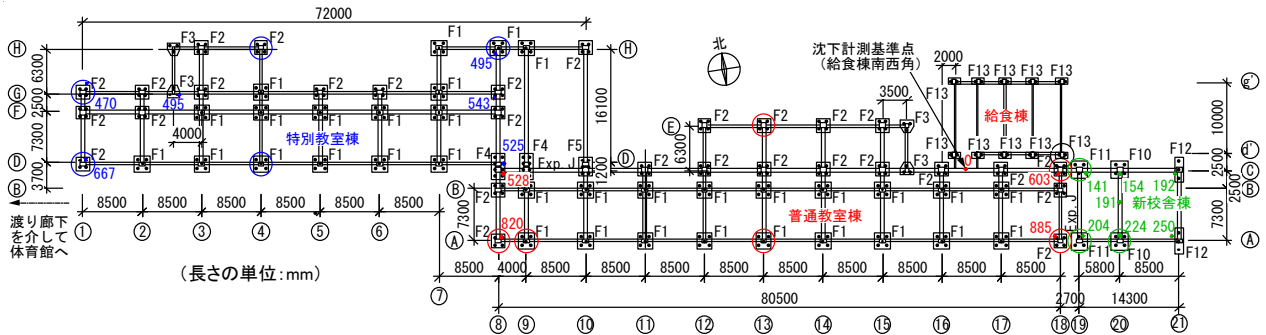


図 2-1 1 階平面図兼基礎伏図 (○印は各校舎の杭頭掘削調査の位置、色つき数字は各位置の沈下量 (mm))

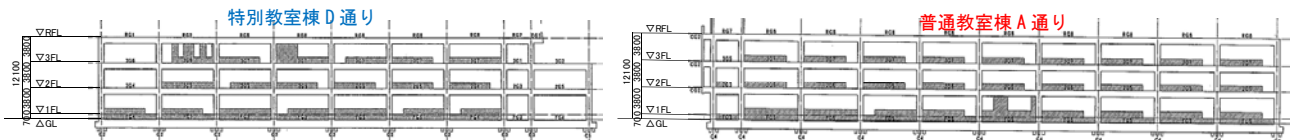


図 2-2 特別教室棟 D 通り軸組図と普通教室棟 A 通り軸組図 (長さの単位 : mm)

2.2 被害概要

大崎市教育委員会の実測 (2011/7/7 実施) による、給食棟を基準とした建物の各位置の沈下量を図 2-1 に示す。特別教室棟と普通教室棟には最大 80cm 程度の沈下と、最大 1/25 程度の南側への傾斜が見られた。普通教室棟は、写真 2-2、写真 2-3 に示すように、地盤よりも建物が大きく沈下して入り口前の階段が損傷し、新校舎棟との Exp.J 部に段差が生じた。また、建物傾斜によって特別教室棟との Exp.J 部に隙間が生じた。一方、構造躯体の損傷は柱のせん断ひび割れ (損傷度 II ~ III 程度) と桁行方向の RC 雑壁にせん断破壊 (損傷度 IV、写真 2-3) が生じている程度であったが、基礎構造の被害による沈下と傾斜から、被災度区分は大破と判定された。

平成 3 年に増築された新校舎棟では、建物傾斜は 1/200 程度であり、上部構造の損傷も Exp.J 部以外では殆ど見

られなかったが、20cm 以上の沈下が生じて中破となった。

普通教室棟の北側にある RC 造平屋の給食棟の周辺地盤は、写真 2-4 に示すように 50cm 程度の沈下が見られたが、給食棟自体の沈下は見られなかった。これによって、普通教室棟との Exp.J 部に 60cm 程度の段差が生じた。構造躯体にはひび割れも殆ど見られず軽微であった。

また、各建物の沈下に伴い、校舎内では写真 2-4 (b) 以外にも、写真 2-5 に示すような大きな段差が生じ、1 階床には幅 2cm 程度の大きな亀裂や床傾斜が生じた。なお、これらの被害によって、2011 年 11 月末時点で給食棟を除き建物は解体済みである。



写真 2-2 普通教室棟の沈下による各部の被害



写真 2-3 普通教室棟の傾斜による被害と壁の損傷



写真 2-4 給食棟前の地盤沈下と普通教室棟との段差



写真 2-5 校舎内の段差

3. 杭基礎の被害調査

3.1 杭と地盤の概要

基礎伏図と基礎調査位置を図 2-1 に示す。特別教室棟

5 箇所（梁間通り名 D-桁行通り名 1（以下同様）, G1, D4, H4, H8）, 普通教室棟 6 箇所（A8, A9, A13, E13, A18, C18）, 新校舎棟 3 箇所（A19, C19, A20）, 給食棟 1 箇所（D18）の全 15 箇所については、建物外周側の掘削による杭頭調査を行い、D4, A9, A19 の 3 か所については、各建物の代表杭として杭の引抜調査を実施した。

杭の仕様については表 3-1 に示す通り、特別教室棟と普通教室棟では直径 $\phi 350$ の PC 杭 A 種が上杭（11m または 10m）と下杭（9m または 10m）に用いられており、杭頭補強は図 3-1 に示す中詰工法によるものである。新校舎棟については、直径 $\phi 450$ の PHC 杭 B 種が上杭（10m）, A 種が下杭（11m）として用いられている。

敷地内地盤のボーリング柱状図を図 3-2 に示す。GL-20m 程度の N 値 50 程度の砂礫層を支持地盤として、打撃工法によって杭が施工されている。また、この柱状図より、表層 4m 程度は N 値がほぼ 0 の軟弱な腐植土層で、GL-8m 付近に N 値の大きな中砂が表れている。それ以深は N 値が 10 前後の砂層とシルト層が互層になり、GL-20m 程度で N 値 50 程度の砂礫層が表れるという構成になっている。この構成は、K-NET 古川や、宮城県地震地盤図³⁾に示されている「古川市駅南」など、他地点で

表 3-1 杭の仕様

建物名称	杭種別	杭径 ϕ (mm) 厚さ t (mm)	長期許容 設計軸力	杭頭補強	杭の深さ方向 の位置
特別教室棟	PC杭	$\phi 350$	45t/本	6-D13	杭頭位置
普通教室棟	A種	t=65		中詰	GL-1.5m
新校舎棟	PHC杭	$\phi 450$	60t/本	不明	杭先端位置
	B種(上杭) A種(下杭)	t=70			GL-20m

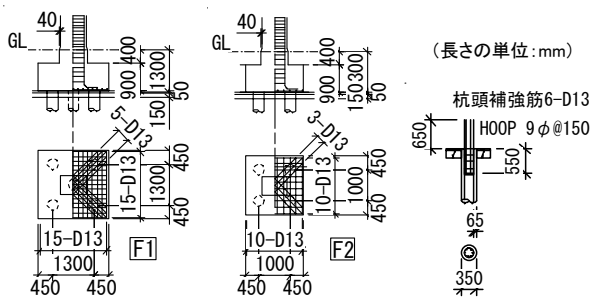


図 3-1 基礎 F1, F2 の詳細図と杭頭補強工法

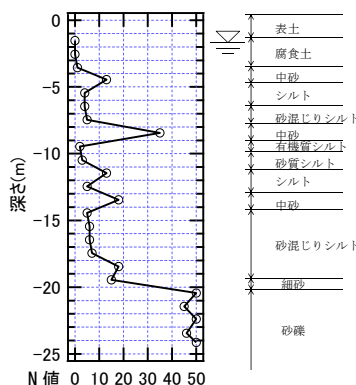


図 3-2 敷地内地盤のボーリング柱状図

も概ね同様となっており、古川地域では全体的に概ねこのような地層構成となっているものと考えられる。

3.2 杭頭部分の掘削調査および杭の引抜調査結果

掘削調査および引抜調査による杭頭の損傷状況や、杭地中部の被害を図 3-3 に示す。60cm 程度の沈下が生じた特別教室棟 D4 基礎では、写真 3-1 に示すように杭頭に幅 2mm 程度の曲げひび割れと杭頭部の回転が生じ、杭自体に最大 5% の残留傾斜角が生じていたが、杭自体の被害は小さかった。杭の引抜調査では、杭先端から 15,550mm~16,150mm（杭頭から 2,800mm~3,400mm）の位置の破壊と、長さ 60cm 程度の欠損が確認された。

80cm 程度の沈下が生じた普通教室棟 A9 基礎では、写真 3-2 に示すように杭頭に圧縮破壊が生じており、沈下要因は杭頭部破損によるものであった。杭中間部には、幅 2mm 程度の曲げひび割れが先端から 14,790mm の位置に生じていた。A13 基礎では、写真 3-3 に示すようにフーチングのパンチング破壊も生じていた。

20cm 程度の沈下が生じた新校舎棟では、写真 3-4 に示すように杭頭部が曲げ圧縮破壊していた。杭中間部は軽微な曲げひび割れ程度であった。杭先端にコンクリートの欠損が見られたが、破損部の先端に付着した支持層の砂礫や沈下量から、杭打設時のものと考えられる。

沈下の生じなかった給食棟では、写真 3-5 に示すように杭頭部に曲げせん断ひび割れが生じていた。軸力が小さいために圧壊までは至らなかったと考えられるが、幅 2mm 程度の明確な斜めひび割れが多く生じていた。

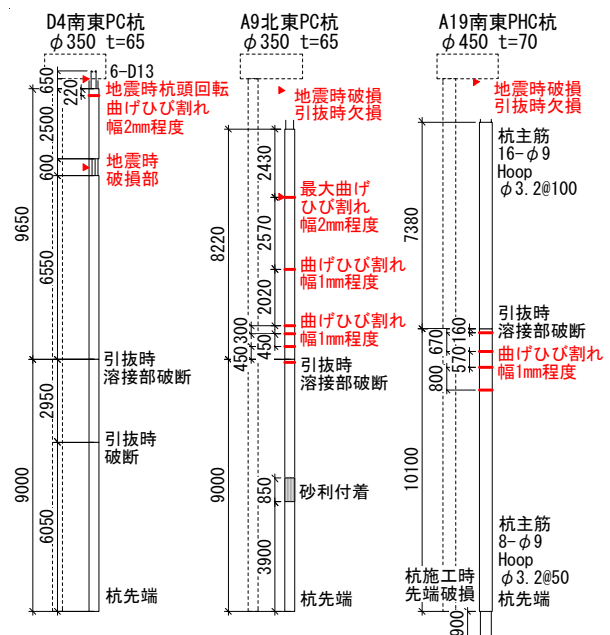


図 3-3 杭の引抜による被害調査結果
(長さの単位: mm)



写真3-1 D4杭頭ひび割れと杭先端+15550~16150mm (杭頭から2800~3400mm)の位置の破損



写真3-2 A9杭頭破損と杭先端+14790mm位置の曲げひび割れ



写真3-3 A13フーチングの破壊と杭頭破損



写真3-4 A19杭頭の破損と打込施工時の杭先端破損



写真3-5 給食棟無沈下基礎D18杭頭部のひび割れ

4. 建物-杭-地盤の相互作用を考慮した地震応答解析

4.1 本震時の地盤応答の推定

本章では、3章に示した杭基礎の被害要因を推定するために、建物-杭-地盤の非線形相互作用を考慮した地震応答解析を行う。その解析に用いるために、本節ではA中学校の敷地地盤の応答解析を行い、本震時の地盤応答を推定する。

本検討では、まずA中学校から北西に約2kmの地点に位置するK-NET古川の地表観測記録を用いて、地盤の非

線形性を考慮した時間領域における逆地震応答解析⁴⁾を行い、工学的基盤での地震動を評価する。次にその地震動をA中学校の工学的基盤に入力して、地盤応答を評価する。K-NET古川と宮城県地震地盤図³⁾に示されている「古川市駅南」のPS検層結果、および図3-2のボーリング柱状図に基づいて設定した、K-NET古川とA中学校のGL-71mまでの地盤モデルを表4-1に示す。工学的基盤はGL-71mの頁岩、泥岩層(Vs700)とした。表層地盤の非線形特性は、宮城県地震地盤図³⁾に示されている動的変形試験結果に基づいてROモデルで設定した。

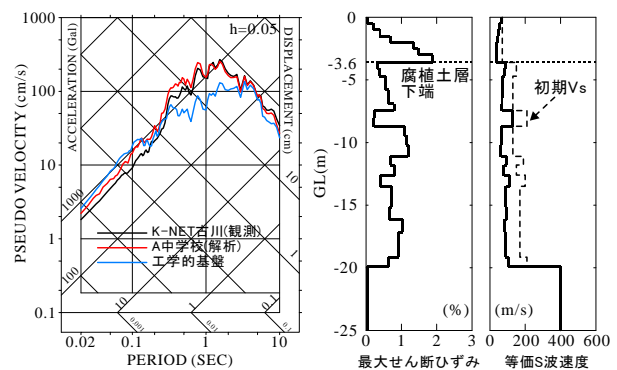
表4-1 地盤モデル

(a)K-NET古川 (b)A中学校

深さ(m)	土質	S波速度(m/s)	密度(t/m ³)	非線形特性	深さ(m)	土質	平均N値	S波速度(m/s)	密度(t/m ³)	非線形特性
2.0	腐植土	70	1.43	腐植土	3.60	腐植土	0	70	1.43	腐植土
6.0	砂	130	1.79	砂質土	4.70	中砂	13	150	1.79	砂質土
11.0	シルト	130	1.73	粘性土	7.45	シルト	4	130	1.73	粘性土
13.0	砂	130	1.79	砂質土	8.70	中砂	35	210	1.79	砂質土
17.0	シルト	130	1.73	粘性土	11.10	シルト	3	130	1.73	粘性土
32.0	砂礫	400	2.11	(線形)	11.80	細砂	13	190	1.79	砂質土
38.0	シルト	210	1.70	(線形)	12.60	シルト	5	150	1.73	粘性土
46.0	シルト	300	1.70	(線形)	13.50	中砂	18	200	1.79	砂質土
66.0	砂礫	500	2.10	(線形)	19.15	シルト	8	170	1.73	粘性土
71.0	砂礫	500	1.80	(線形)	19.90	細砂	15	210	1.79	砂質土
(基盤)	頁岩 泥岩	700	1.80	(線形)	(19.9m~71mはK-NET古川と同一)					
					(基盤)	頁岩 泥岩	>50	700	1.80	(線形)

地盤応答解析で用いる観測記録は、後述の建物の地震応答解析で検討対象とした桁行(長辺)方向とほぼ一致するEW方向の観測記録とする。

工学的基盤の地震動とA中学校の地表面応答波の擬似速度応答スペクトルを図4-1(a)に示す。工学的基盤の地震動は、GL-71mで浅の地盤増幅の影響によって、周期1秒前後ではK-NET古川の地表記録よりも小さいレベルである。また、A中学校の地盤モデルのGL-19.9m以深はK-NET古川と同一であるため、地表面応答波はK-NET古川の地表記録とほぼ同程度である。A中学校の地盤応答の深度分布を図4-1(b)に示す。最大せん断ひずみは、S波速度が70m/sの軟弱な腐植土層の下端位置のGL-3.6mで約2%である。等価S波速度は、GL-19.9m以浅では初期S波速度に対して約半分に低下している。



(a) 擬似速度応答スペクトル (b) 深度分布
図4-1 A中学校の本震時の地盤応答(EW方向)

4.2 建物と杭の解析モデル

本検討で対象とする校舎は、4つの校舎のうち、沈下量や傾斜量が最大で、杭頭部分の掘削調査によって損傷が確認された普通教室棟とする。検討方向は、柱やRC雑壁等の被害が見られた桁行方向とする。

建物(上部構造)と杭の解析モデルを図4-2に示す。建物は3質点の1本の曲げせん断棒とし、曲げ剛性は剛として、せん断変形に対して3折線型の復元力特性を設定した。杭は、各フーチング下に位置する全182本の杭を質点を有する1本の曲げせん断棒に集約した。杭の曲げ変形には、長期軸力時の曲げ解析によるM- ϕ 関係に基づいて、3折線型の復元力特性を設定した。杭周ばねには、杭と地盤の相対変位により生じる非線形性を考慮した。杭頭の接合条件は、普通教室棟の杭頭掘削調査で杭頭の損傷が見られたことから剛接合を設定した。また、隣接の特別教室棟の調査では、杭頭が回転して杭自体には大きな損傷が見られなかったことから、接合条件の影響度合いの把握のために、ピン接合の場合も検討対象とした。

解析モデルの構造用階高と重量を表4-2、建物の復元力特性を図4-3(a)に示す。この特性の第二折点の耐力は、旧古川市による2005年実施の耐震診断報告書に示されている桁行方向のF値=1でのC値に基づいて設定し、降伏変形角は1/250とした。杭の復元力特性を図4-3(b)に示す。曲げ解析時の長期軸力は277kN、杭のコンクリートの設計基準強度は80MPa、PC鋼棒の降伏点強度は1300MPa、引張強度は1450MPaとし、第二折点(M_y, ϕ_y)はPC鋼棒の降伏点、終局点(M_u, ϕ_u)はコンクリートの圧壊点として設定した。なお、本検討で対象とした普通教室棟の杭はPC杭であるが、実際に用いられているPC杭の材料特性が不明であるため、ここでは現在の一般的なPHC杭の材料特性を用いて復元力特性を設定した。

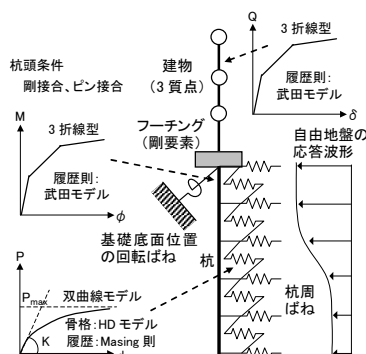


図4-2 解析モデル

表4-2 構造用階高と重量

階	構造用階高(m)	重量 w_i (kN)	$W_i = \sum w_i$ (kN)
3階	3.80	12251	12251
2階	3.80	14515	26766
1階	4.65	15528	42294
基礎	-	8058	50352

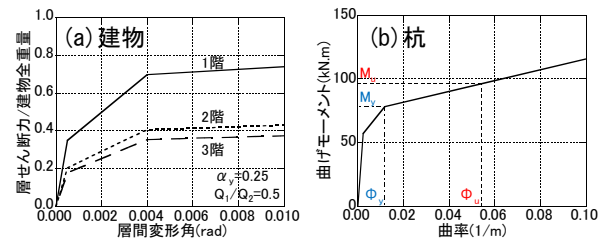


図4-3 建物と杭の復元力特性

4.3 地震応答解析

(1) 解析ケースと解析条件

地震応答解析の解析ケースを表4-3に示す。杭体と杭周ばねの非線形性の影響と杭頭接合条件の影響に着目して、Case-1,2,3の解析を行う。また、杭応答に対する建物からの慣性力と地盤変形の影響について分析するために、Case-2に対して建物を取り除いて杭のみのモデルとした場合をCase-2'として解析を行う。

建物への入力地震動は、桁行方向とほぼ一致するEW方向の地震動とし、4.1節で求めた本震時の地盤応答を、杭の各質点に取り付けた杭周ばねを介して入力した。建物の減衰は、建物の連成系の1次周期(剛接合0.51秒、ピン接合0.58秒)に対して $h=3\%$ の瞬間剛性比例型とした。

(2) 建物の解析結果

建物-杭全体の最大相対変位と建物の最大層間変形角を図4-4に示す。Case-1,2の杭頭位置の相対変位を比較すると、杭体と杭周ばねを非線形とした影響で、Case-2の方が大きくなっている。これに応じて建物の変形はCase-1の方が大きくなり、2階の層間変形角は1/100を超えている。杭頭条件をピン接合としたCase-3は、Case-2よりもさらに杭頭位置の相対変位が大きくなっている。その分、建物の変形はCase-2よりも小さくなり、1,2階ともに層間変形角は1/250程度である。

建物の実被害との対応については、3章で示したように、1階ではRC雑壁の損傷が見られたことから、普通教室棟の杭頭条件に対応していると考えられるCase-2の結果と比較した場合、1階の解析結果と実被害は概ね対応しているものと考えられる。

また、相対変位の図中には、杭先端位置に対する地盤の最大相対変位を示している。これを杭部分の相対変位と比較すると、腐植土層下端のGL-3.6m以深は地盤と杭部分の相対変位はほぼ一致しており、杭が地盤に追従して変形している。一方、GL-3.6m以浅の杭部分は、Case-1,2,3ともに、建物からの慣性力の影響で地盤よりも大きく変形している。これは、この部分の軟弱な腐植土層の影響で、建物からの慣性力の大部分が、地盤には伝わらずに杭にそのまま伝達するためと考えられる。

(3) 杭の解析結果

杭の最大曲げモーメントと第二折点に対する最大塑性

率を図 4-5 に示す。Case-1 は杭体線形のため、杭頭位置において終局モーメント M_u を大きく超えている。杭体非線形として杭頭条件を剛接合とした Case-2 の結果は、杭頭位置において M_u および第二折点に対する終局点の塑性率 μ_u を超えており、杭頭部分が損傷した実被害と概ね対応しているものと考えられる。杭頭条件をピン接合とした Case-3 の結果は、杭頭位置よりもやや深い位置の腐植土層下端の GL-3.6m で M_u および μ_u を超えている。隣接の特別教室棟の杭頭掘削調査では、杭頭が回転して杭自体には損傷が見られずに、杭の引抜調査の際に GL-3m 程度の位置で破損が見られた。ここでの対象は普通教室棟であるため建物は異なるが、Case-3 の結果はこのような実被害と概ね対応しているものと考えられる。

建物を取り除いて杭のみのモデルとして、杭に地盤変形のみを作用させた Case-2' の結果は、杭頭位置において曲げモーメントは M_u には至らず、塑性率は 1 程度である。これは、先に述べたように、GL-3.6m 以浅の軟弱な腐植土層の影響で、杭の応答に対しては建物からの慣性力の影響が支配的になっているためと考えられる。

また、GL-10m 以深の各ケースの応答はほぼ同じである。これは、GL-10m 程度までは建物からの慣性力の影響が大きいためケースごとに異なるが、それ以深は Case-2' と同程度であることから分かるように、地盤変形の影響が大きいため同程度になるものと考えられる。

5. まとめ

本被害調査と要因検討による結果を以下に示す。

- (1) 校舎建物では、最大 80cm 程度の沈下と最大 1/25 程度の傾斜が生じた。また、杭頭部分の掘削調査によって、杭頭の回転と曲げ圧縮破壊による破損を確認し、杭の引抜調査によって GL-3m 程度の杭中間部の破損や曲げひび割れを確認した。
- (2) 地震応答解析では、杭頭剛接合の場合は杭頭位置、杭頭ピン接合の場合は腐植土層の下端位置で、最大塑性率が終局点塑性率を超えた。一方、地盤変形のみを入力した場合は、塑性率が最大 1 程度であった。
- (3) このことから、今回の被害は、杭頭付近の軟弱な腐植土層のために、建物からの慣性力の大部分が杭に伝達することで杭応答が大きくなり、杭頭位置が曲げ圧縮破壊に至ったことが要因であると考えられる。

以上のように、地震応答解析結果は実被害と概ね対応するものとなった。ただし、Case-2 の建物 2 階の層間変形角が 1/100 近くとなり、実際よりも大きめと推測されることや、Case-3 の GL-3.6m 以浅の杭の変形角が 2% 程度で、掘削調査時に確認された最大 5% よりも小さめとなっていること等、実被害と対応していないと考えられる点もある。これらについては今後の検討課題である。

表 4-3 地震応答解析の解析ケース

解析ケース	杭体	杭周ばね	杭頭接合条件	解析モデル
Case-1	線形	線形	剛接合	建物-杭一体
Case-2	非線形	非線形	剛接合	建物-杭一体
Case-2'	非線形	非線形	剛接合	杭のみ(建物を除外)
Case-3	非線形	非線形	ピン接合	建物-杭一体

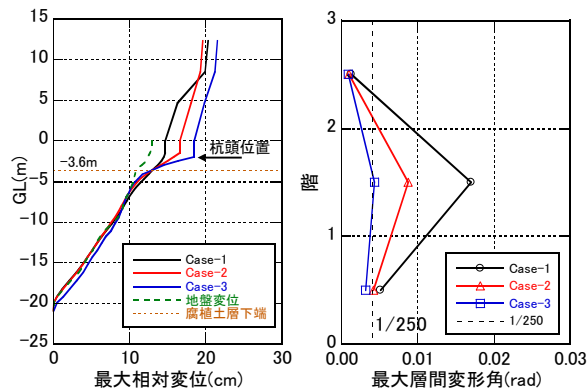


図 4-4 建物の地震応答解析結果

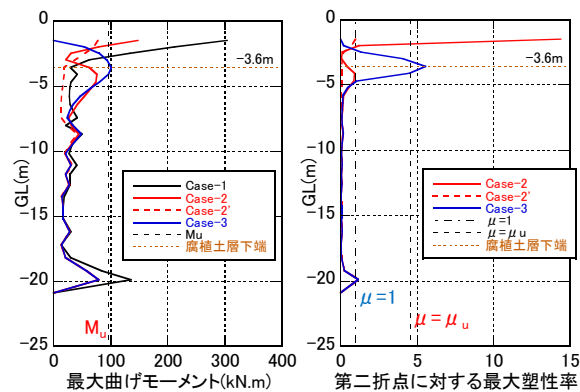


図 4-5 杭の地震応答解析結果

謝辞

本調査に際しては、地震災害直後のご多忙の中、構造図面や施設台帳等の資料提供及び、基礎調査の実施に際し宮城県大崎市教育委員会柴原一雄氏、吉田秀男氏、飯田幸弘氏、黒田幸司氏に多大なご協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げますとともに、被災住民の方々の生活が一日も早く復興することを祈願する。

参考文献

- 1) 後藤浩之：第 4 章 地震及び地震動の特性，土木学会東日本大震災被害調査団 緊急地震被害調査報告書，pp.4-18～4-25, 2011.5
- 2) 古山田耕司，宮本裕司，福田孝晴：2003 年十勝沖地震における杭の実被害調査とその解析的検討，日本建築学会構造系論文集，No.589, pp.97-104, 2005.3
- 3) 宮城県：宮城県地震地盤図作成調査報告書，1985.3
- 4) 山田有孝，三浦賢治：特性曲線法を用いた 2000 年鳥取県西部地震の地盤震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No.558, pp.77-83, 2002.8.