論文　2011 年東北地方太平洋沖地震による鉄筋コンクリート造学校建築における基礎の被害

秋田　知芳[*1]・石塚　圭介[*2]・菅澤　和真[*2]・和泉　信之[*3]

要旨：2011 年東北地方太平洋沖地震では海岸地域や河川流域等において地盤の液状化による建築物の傾斜が発生し，鉄筋コンクリート造建築物の基礎にも多数の被害が見られた。本研究では鉄筋コンクリート造学校建築を対象として基礎に被害が生じた事例を収集し統計的な分析を行うと共に，著者らが被害調査を行った千葉県の被害事例に基づいて，液状化による杭基礎の被害を解析的に検討した。その結果，調査対象とした建物の約 2 割で基礎の被害が発生していたことや上部構造の被害が大きいと基礎構造の被害が大きい傾向があることを明らかにすると共に，液状化によって杭頭の損傷が拡大した可能性が高いことを解析的に示した。

キーワード：基礎被害，被害分析，被災度，杭基礎，線形解析，液状化

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では，海岸地域や河川流域などの緩い砂地盤等において広範囲にわたり表層地盤の液状化が生じ，液状化による建築物の傾斜や周辺地盤の沈下・変状が見られた [1)]。鉄筋コンクリート造（以下，RC 造）学校建築においても地盤の液状化により杭基礎が損傷し，不同沈下等の基礎構造の被害が生じると共に，噴砂や地盤沈下が生じたため外構や地盤に埋設された設備配管に大きな被害が生じた。このように 2011 年東北地方太平洋沖地震では，これまでの地震被害に比べて，基礎の被害が比較的顕著であったといえる。

過去の地震被害で基礎の被害が顕著であった例としては，1995 年兵庫県南部地震が挙げられる。1995 年兵庫県南部地震における基礎の被害に関しては，数多くの個別事例の被害調査報告や被害要因の検討がなされているほか，文献 2)～6)において統計的な分析がなされており，基礎被害に関する貴重な資料となっている。しかしながら，1995 年兵庫県南部地震の資料以外には，基礎の被害を統計的に分析した資料はほとんどない。2011 年東北地方太平洋沖地震における基礎の被害に関しても，個別事例の被害調査報告や被害要因の検討以外に，統計的な分析を行って，基礎被害に関する統計的な資料を残すことは，非常に有意義である。

上記のような背景の下，筆者のひとりは既往の報告 [7)] において文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書（以下，文教施設調査報告書）[8)]に記載されている建築物について基礎・地盤の被害を統計的に分析した結果を示している。しかしながら，文献 7)では，文教施設調査報告書で示された間接的な情報に基づいて分析を行っているため，扱っているデータの数や信頼性に限りがあった。本論では，文献 7)において行った分析をより充実させることを目的に，アンケート等によって調査者から直接的に被害調査資料を再収集することで，扱うデータの数の増加と信頼性の向上を図ったうえで，基礎の被害に関して再度分析を行った。また，併せて液状化によって杭基礎に被害を生じた事例についても紹介し，液状化による杭基礎の被害を解析的に検討した。

2. データ収集と分析対象

2.1 データの収集方法

データの収集はアンケート調査によって行った。アンケートが回収できない場合については，可能な限り資料の提供を受けることによって代用した。アンケートの対象は，文教施設調査報告書において基礎被害が報告された建物 60 棟をそれぞれ調査した担当者である。回答はアンケートの返答と資料の提供を合わせて 47 棟分あり，回収率は 78%であった。

2.2 分析対象とする学校建築

文教施設調査報告書に記載された上部構造あるいは基礎構造に被害が生じた RC 造学校建築を分析対象として，基礎被害の特徴を分析する。上部構造あるいは基礎構造に被害が生じた棟とは，被災調査により大破，中破，小破，軽微と判定された棟である。本論において，対象とする RC 造学校建築（以下，被害棟）は 249 棟で，このうち上部構造に被害が生じた棟（以下，上部被害棟）は 243 棟，基礎構造に被害が生じた棟（以下，基礎被害棟）は 55 棟である。そのうち，基礎の被害内容について十分な資料が得られた 42 棟（以下，基礎被害詳細棟）についてはより詳細に分析する。なお，津波による被害は対象外としている。

*1 千葉大学大学院　工学研究科建築・都市科学専攻助教　博（工）　（正会員）
*2 千葉大学大学院　工学研究科建築・都市科学専攻博士前期課程　（学生会員）
*3 千葉大学大学院　工学研究科建築・都市科学専攻教授　博（工）　（正会員）

3. 被害の分析

3.1 被災度に関する分析

(1) 被害棟の被災度

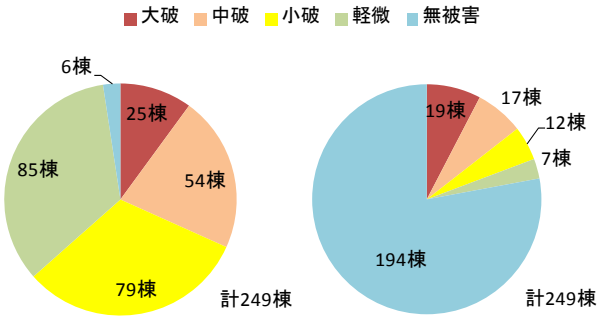
被害棟について上部構造および基礎構造の被災度の比率を**図－１**に示す。上部被害棟は被害棟全体の約 98%，基礎被害棟は被害棟全体の約 22%であった。基礎被害を受けた建物が全体の 1/4 程度あり，比較的多いことが分かる。また，被害棟全体に占める上部構造の大破の比率は約 10%，上部構造の中破以上の比率は 32%であり，被害棟全体に占める基礎構造の大破の比率は約 8%，基礎構造の中破以上の比率は 14%であった。

上部被害棟および基礎被害棟の被災度の比率を**図－２**に示す。上部被害棟では大破・中破が全体の約 32%であるのに対して，基礎被害棟では大破・中破が全体の約 65%であり，その比率が上部被害棟の概ね 2 倍となっていることが分かる。これは基礎の被害が上部構造のような外観調査が難しく，建物の傾斜や沈下量等の測定により比較的損傷が大きい被害事例が調査対象となるためと考えられる。小破や軽微に相当する基礎被害の発生数は，**図－２**に示す値より実際はかなり多いと推測される。

(2) 上部構造と基礎構造の被災度

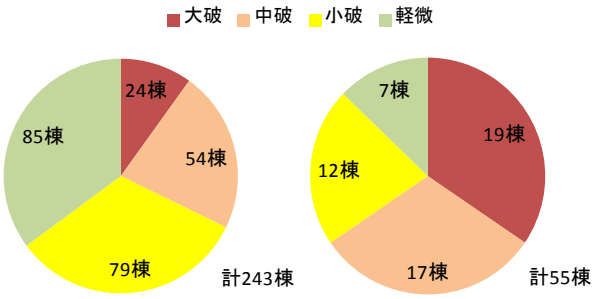
図－３は基礎構造の被災度を上部構造の被災度別に示したものである。上部構造が大破の棟では，基礎構造が大破である棟が約 20%であり，被害棟全体に占める基礎構造の大破の比率 8%（**図－１**）に比べて大きくなっている。上部構造が中破の棟では，基礎構造が中破以上である棟の比率は約 22%であり，被害棟全体に占める基礎構造の中破以上の比率 14%（**図－１**）に比べてやや大きくなっている。また，上部構造が小破の棟では，基礎構造が小破以上である棟の比率は約 8%であり，上部構造が軽微の棟では，基礎構造が軽微以上である棟の比率は約 26%である。このように，上部構造が大破や中破の棟では，基礎構造が上部構造の被災度以上となる棟の比率が被害棟全体に比べて大きい傾向がある。この要因として，上部構造の被害が大きい棟では，基礎構造の耐震性も低いことや建設地の地震動入力が大きいこと等が考えられる。

一方，**図－４**は上部構造の被災度を基礎構造の被災度別に示したものである。基礎構造が大破の棟では，上部構造が大破である棟が約 26%であり，被害棟全体に占める上部構造の大破の比率 10%（**図－１**）に比べて大きくなっている。基礎構造が中破の棟では，上部構造が中破以上である棟の比率は約 59%であり，被害棟全体に占める上部構造の中破以上の比率 32%（**図－１**）に比べて大きくなっている。基礎構造が小破の棟では，上部構造が小破以上である棟の比率は約 67%であり，基礎構造が軽微の棟では，上部構造が軽微以上である棟の比率は約



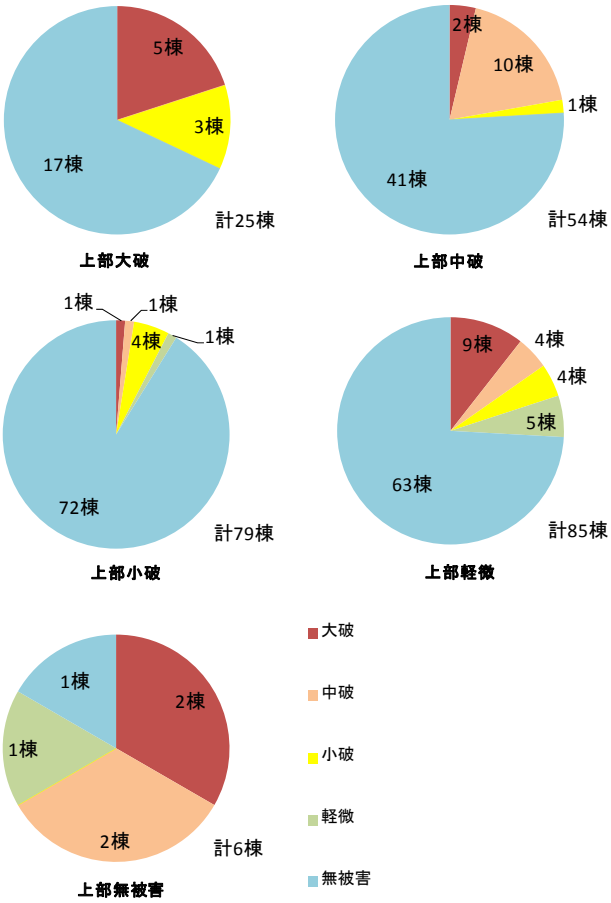
(a) 上部構造の被災度　　(b) 基礎構造の被災度

図－１　被害棟の被災度

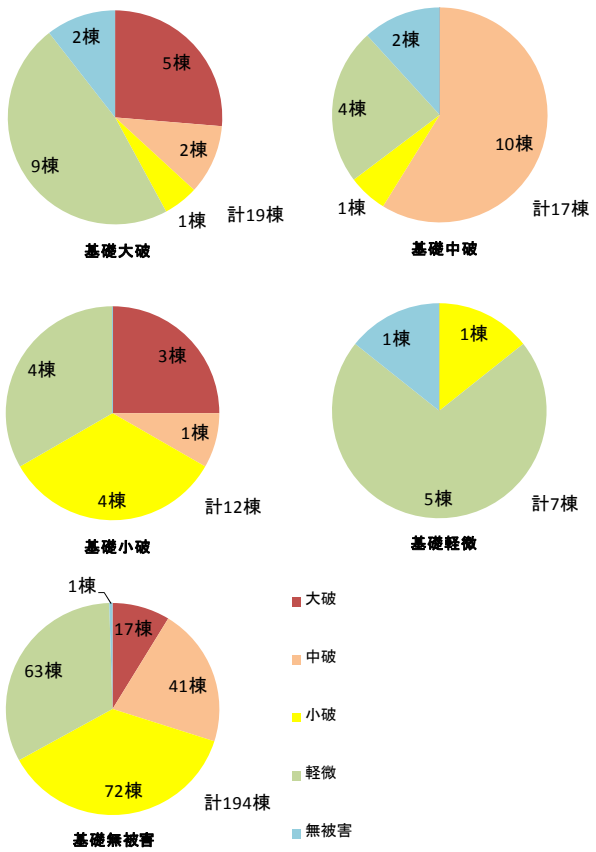


(a) 上部被害棟の被災度　　(b) 基礎被害棟の被災度

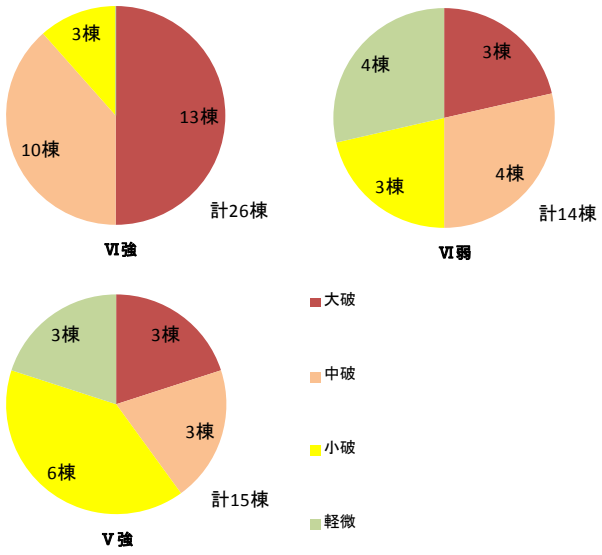
図－２　上部被害棟・基礎被害棟の被災度



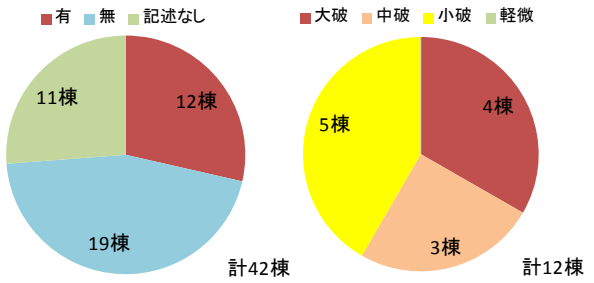
図－３　上部構造の被災度別の基礎構造被災度



図－４　基礎構造の被災度別の上部構造被災度



図－５　震度別の基礎構造被災度



(a) 液状化の発生　　(b) 液状化地盤の基礎被災度

図－６　地盤の液状化と基礎構造被災度

86%である。また，基礎構造が大破の棟では，上部構造が軽微以下である棟の比率が約 58%であり，上部構造では耐震補強が実施され耐震性が向上している建物に基礎被害が生じていることも影響していると考えられる。

(3) 震度と基礎構造の被災度

基礎被害棟について基礎構造の被災度の比率を震度別に表したものを**図－５**に示す。基礎構造が中破以上の棟の比率は，震度 6 強の地域では約 88%，震度 6 弱の地域では 50%，震度 5 強の地域では 40%となっており，地震動が強いほど基礎構造の被害が大きいことが分かる。

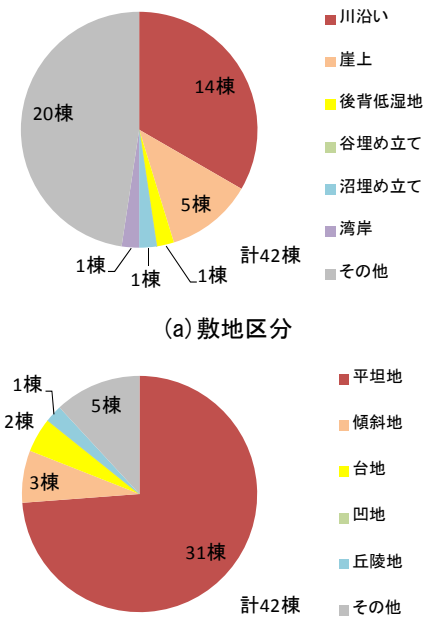
(4) 地盤の液状化と基礎構造の被災度

基礎被害詳細棟について地盤の液状化と基礎構造の被災度の関係を**図－６**に示す。基礎被害詳細棟のうち，地盤の液状化の発生が確認された棟は全体の約 29%であり，基礎構造の被害が全棟で発生している。基礎構造の被害は大破が約 33%，中破が約 25%であり，中破以上の被害が約 6 割に達している。このように，地盤の液状化は基礎構造の被害発生の大きな要因のひとつといえる。

3.2 被災度以外の分析

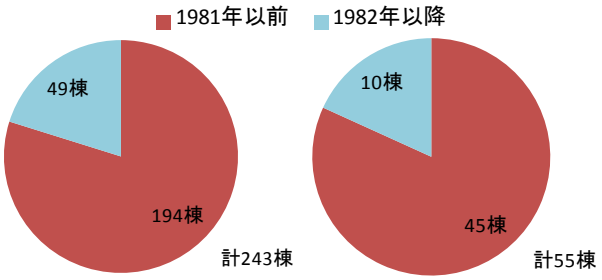
(1) 敷地・地盤区分

基礎被害詳細棟について敷地区分と地盤区分を**図－７**に示す。敷地区分では，川沿いや湾岸など地盤の液状化が発生しやすい地域，地震動が増幅しやすい崖上など



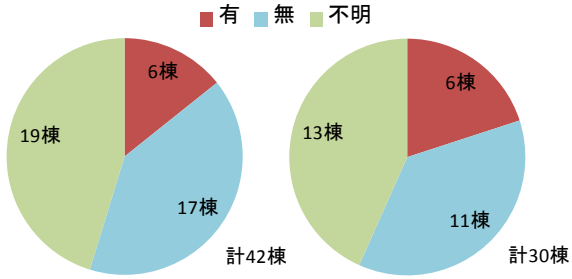
図－７　基礎被害建物と敷地区分と地盤区分

が見られる。また，地盤区分では一般的な平坦地が多い。



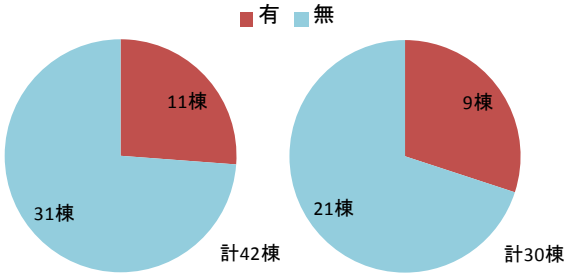
(a) 上部被害棟　　(b) 基礎被害棟

図－８　上部被害棟・基礎被害棟の建設時期



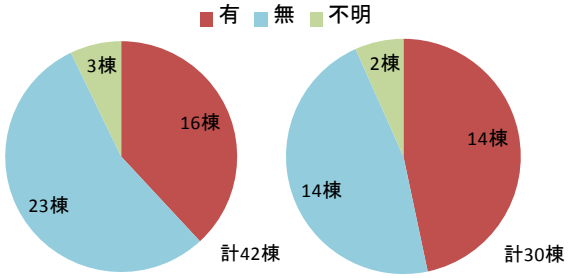
(a) 全体　　(b) 基礎中破以上の場合

図－１０　余震による基礎被害の進展



(a) 全体　　(b) 基礎中破以上の場合

図－９　基礎被害建物と耐震補強



(a) 全体　　(b) 基礎中破以上の場合

図－１１　基礎被害建物の詳細調査

(2) 建設時期

上部被害棟および基礎被害棟の建設時期を旧耐震時期（1981 年以前）と新耐震時期（1982 年以降）に分けて**図－８**に示す。上部被害棟では，全体の約 80%が旧耐震時期に建設されている。基礎被害棟でも，ほぼ同様の比率である。上部構造および基礎構造ともに，新耐震時期においても被害が生じていることが分かる。

(3) 耐震補強の有無

基礎被害詳細棟について上部構造の耐震補強の有無を**図－９**に示す。基礎被害詳細棟のうち，耐震補強された棟の比率は，全体では約 26%である。基礎構造の被災度を見ると，中破以上では耐震補強された棟の比率は約 30%であり，全体との差異はあまりない。耐震補強時においても，基礎被害発生の可能性を考慮する必要がある。

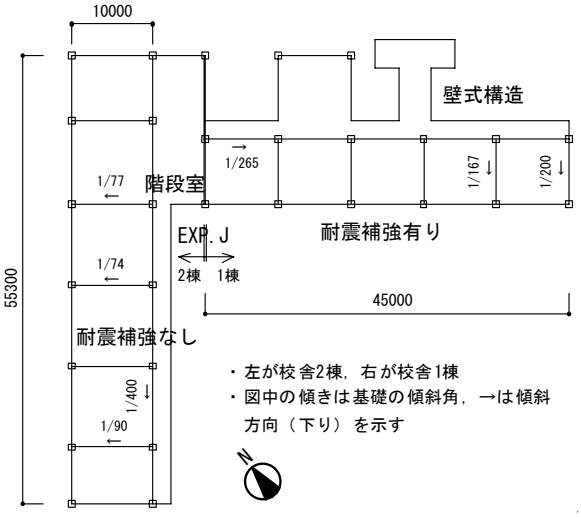
(4) 余震による基礎被害の進展

基礎被害詳細棟について余震による基礎被害の進展の有無を**図－１０**に示す。余震により基礎被害の進展が確認された棟は全体では約 14%である。中破以上の基礎被害が生じた場合には余震による被害拡大に注意が必要である。

(5) 基礎被害の詳細調査

基礎被害詳細棟について基礎被害の詳細調査の有無を**図－１１**に示す。基礎被害の詳細調査は全体の約 38%で実施されており，中破以上の基礎被害が生じた棟では約 47%で実施されている。詳細調査としては，基礎や杭頭周囲の土砂掘削調査や杭の健全性試験などが実施されている。

写真－１　SI 中学校の RC 造校舎



図－１２　SI 中学校の校舎配置と基礎の傾斜

4. RC 造学校建築の基礎被害の事例と解析的検討

4.1 SI 中学校の被害概要

(1) 構造概要

本建物は千葉県香取市に建つ RC 造 3 階建の学校施設である（**写真－１，図－１２**）。建設地は利根川流域に位置しており，表層地盤は軟弱な細砂層およびシルト層である。1 棟は RC 造地上 3 階建（地下なし）であり，1970 年に建設されている。耐震補強として，長辺方向には鉄骨ブレース補強などが実施済みである。一方，2 棟は RC 造地上 2 階建（地下なし）であり，1971 年に建設されている。2 棟には耐震補強は実施されていない。基礎は両棟とも杭基礎である。1 棟の基礎は PC 杭であり，杭径は直径 350mm，杭長は 16m であるが，杭耐力は不明である。2 棟の杭は 1 棟と同様であると推定される。

(2) 地盤および上部構造の被害

周辺地盤が液状化し，校舎より 30～50cm 程度沈下しており，2 棟では西側面の地盤と建物の間に 60cm 程度のあきが生じた。1 棟の上部構造は耐力壁にひび割れが見られたが，柱には目立った損傷は見られず，被災度は 1 階で軽微であった。一方，1 棟では張間方向の教室間の耐震壁に縦方向にひび割れが生じると共に，柱には水平方向にひび割れが生じており，被災度は 1 階で小破であった。耐震補強を実施している 1 棟に比べ，耐震補強を実施していない 2 棟は損傷がやや大きくなっている。

(3) 基礎の被害

基礎の被災度は 1 棟が中破，2 棟が大破であった。また，被災度調査後に杭の詳細調査 [9] が実施されており，基礎の不同沈下および杭の損傷が確認されている。基礎の傾斜は，1 棟では短辺方向へ 1/200～1/170 程度，2 棟では短辺方向へ 1/90～1/70 程度の傾きが見られた。**写真－２**に杭の被害を示す。杭頭が圧壊している様子が確認できる。耐震補強された 1 棟と耐震補強されていない 2 棟は，地震による付加軸力および地盤の液状化の影響により，杭が損傷して建物全体が傾いたと考えられる。

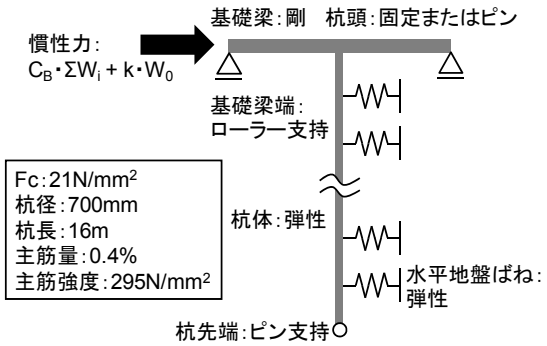
4.2 基礎被害事例の解析的検討

(1) 解析概要

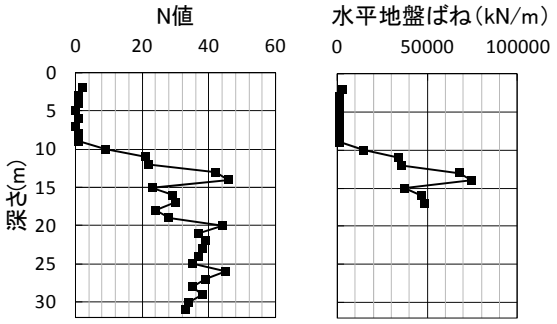
4.1 節で示した SI 中学校の地盤条件および杭基礎を模擬した下部構造モデルを作成し，線形解析を行って杭基礎の被害を解析的に検討する。解析モデルと杭の諸元を**図－１３**に示す。杭は SI 中学校の杭（杭径 350mm，杭長 16m の 4 本杭）を想定して，断面積が等価となる直径 700mm，杭長 16m の 1 本杭とし，主筋量は被害写真（**写真－２**）から判断してやや少な目の 0.4%とした。解析対象地盤の N 値を**図－１４**に示す。地下 9m まで N 値が 1 程度しかなく非常に軟弱なものとなっている。

解析モデルは基礎梁を剛，杭体を弾性とした。水平地盤ばねも弾性として文献 10)に基づいて算出し，1m ごとに設置した。解析時の外力は慣性力のみとし，地盤の強制変位は無視した。杭頭に作用させる慣性力（211.2kN）は，上部構造の単位面積当たりの重量 W_i を 12kN/m^2，基礎の単位面積当たりの重量 W_0 を 18kN/m^2 とし，32m^2 の床支配面積を持つ 2 階建ての建物を仮定し，1 次設計時を想定してベースシア係数 C_B を 0.2，基礎震度 k を 0.1 として算出した。解析時のパラメータとして，液状化によって地盤の剛性が低下することを想定して，表層 3m 分の地盤の水平地盤ばねを 0.5 倍，0.2 倍したものを設定した。また，杭頭の固定度の影響を見るため，杭頭固定と杭頭ピンの両極端なケースを設定した。

写真－２　SI 中学校の杭の損傷



図－１３　解析モデルと杭の諸元



図－１４　解析対象地盤の N 値と水平地盤ばね

(2) 杭の曲げモーメントおよび変位

図－１５に杭の曲げモーメントと変位を示す。曲げモーメント図には軸力を無視した時の終局曲げ耐力の略算値（Mu）を参考として示している。杭頭固定のケースでは，地表面付近の地盤が非常に弱いため，杭頭付近で

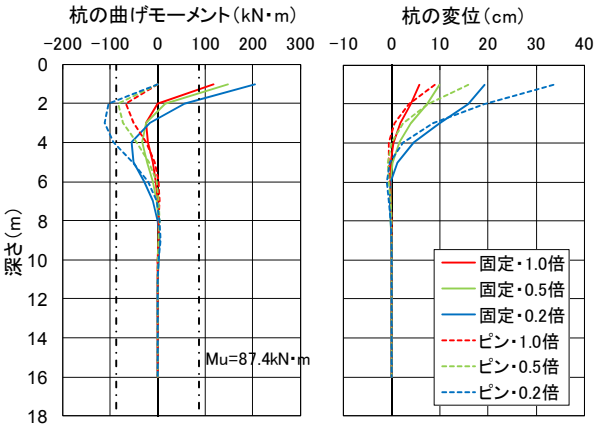
モーメントが急激に大きくなる傾向がある。ただし，実際の杭頭モーメントは杭頭固定と杭頭ピンのケースの結果の中間に位置すると考えられる。一方，杭の変位を見ると杭頭固定および杭頭ピンのケースともに地盤ばねが小さくなると杭頭変位が大きく増加することが分かる。以上のことから，地表面付近の地盤が非常に弱いために杭頭モーメントが大きくなり易い傾向にあったものが，液状化で地盤の剛性が低下したことでその傾向がより顕著になり，杭の損傷が生じたものと推測できる。

5. まとめ

本論では，2011 年東北地方太平洋沖地震によって被災した RC 造学校建築の基礎被害について分析を行った。以下に得られた知見を示す。

1) 分析対象とした建物 249 棟（上部構造あるいは基礎構造に被害が生じた建物）のうち約 22%に基礎被害が生じており，基礎被害を受けた建物が比較的多かった。
2) 基礎の被害調査は，上部構造のような外観調査が難しく建物の傾斜や沈下量等の測定によるため，比較的損傷の大きなものが調査対象となり易く，基礎に被害が生じた建物 55 棟（基礎被害棟）のうち約 65%で中破以上となっていた。
3) 上部構造の被害が大きいと下部構造の被害が大きい傾向があった。上部構造の被害が大きい棟では，基礎構造の耐震性も低いことが一因と考えられる。
4) 基礎に被害が生じた建物 42 棟（基礎被害詳細棟）のうち上部構造の耐震補強がなされていたものが約 26%あった。上部構造の耐震診断・耐震補強の際には地盤の液状化の危険度，液状化による基礎・地盤の被害発生の可能性，杭基礎の耐震性について診断者・補強設計者の所見を明示する必要がある。
5) 基礎に被害が生じた建物 42 棟（基礎被害詳細棟）のうち約 29%で液状化が発生しており，液状化が基礎構造の被害発生の大きな要因のひとつとなっていた。大地震後に継続使用する建築物では，大地震に対する杭の耐震性を向上させるため，建築物の規模・構造，地盤の特性・液状化の危険度等に応じて，杭の 1 次設計用地震力の割増し等による簡易な設計や，地盤・杭・建物の一体解析等による詳細な設計を行って，大地震時の杭の耐震性を検討する必要がある。
6) 基礎被害を生じた学校建築の杭基礎および地盤を模擬した下部構造モデルの線形解析を行って，液状化によって杭頭モーメントの増大が助長され，杭基礎の被害が拡大した可能性が高いことを確認した。

杭基礎の被害に関して，静的非線形解析や時刻歴地震応答解析によるより詳細な検討を行って，杭の耐震性について論じて行くことが今後の課題である。



図－１５　杭の曲げモーメントと変位

謝辞

本研究の遂行にあたって，被害調査に関する貴重な資料を提供頂きました多くの方々に厚く御礼申し上げます。またデータ整理にあたっては，千葉大学和泉・秋田研究室の卒論生・佐古彩香氏の多大なる協力を得ました。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

1) 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011.7
2) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会・兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告集，1996.7
3) 日本建築学会，土木学会，地盤工学会，日本機械学会，日本地震学会：阪神・淡路大震災調査報告集 建築編-4 建築基礎構造，pp.266-293，1998.3
4) 日本建築学会構造委員会，基礎構造運営委員会：杭基礎の耐震性に関する諸問題，pp.151-156，2000.4
5) 日本建築学会構造委員会，基礎構造運営委員会：杭基礎の耐震性に関する諸問題（その 2），pp.137-155，2006.4
6) 日本建築学会近畿支部，同支部基礎構造部会耐震基礎研究会：地震被害からみた建築基礎構造の設計・施工の留意点，pp.1-7，2010.9
7) 和泉信之：2012 年度建築学会大会（東海）構造部門（鉄筋コンクリート構造）パネルディスカッション資料「東日本大震災における鉄筋コンクリート建物の被害と分析」，pp.57-64, 2012.9
8) 日本建築学会文教施設委員会耐震性能等小委員会：文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書，2012.3
9) 香取市教育委員会：香取市教育委員会調査資料，2011
10) 日本建築学会：基礎構造設計指針，2001.10