東北地方太平洋沖地震等による鉄骨造文教施設の被害と地盤変状

DAMAGE OF STEEL SCHOOL BUILDINGS AND GROUND TRANSFORMATION IN THE 2011 TOHOKU EARTHQUAKE

島田侑子 ——— * 1 山田 哲 ——— * 2
吉敷祥一 ——— * 3 伊山 潤 ——— * 4
松本由香 ——— * 5 浅田勇人 ——— * 6

Yuko SHIMADA ——— * 1 Satoshi YAMADA ——— * 2
Shoichi KISHIKI ——— * 3 Jun IYAMA ——— * 4
Yuka MATSUMOTO ——— * 5 Hayato ASADA ——— * 6

キーワード:

2011年東北地方太平洋沖地震, 被害調査, 鉄骨造建物, 体育館, 地盤変状

Keywords:

2011 Tohoku Earthquake, Reconnaissance, Steel building, Gymnasium, Ground transformation

Under the 2011 Tohoku earthquake, many buildings were suffered by strong ground motion and tsunami. A total of 216 of damaged steel buildings of public educational institutes including 147 of gymnasiums were investigated from April to June 2011 by AIJ. In this paper, correspondences between seismic damage of steel school buildings and the ground transformation are reported.

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および4月7日, 11日に発生した余震では, 東北・関東の広範囲で多くの文教施設が震動被害を受けたが, 被災した施設の多くで, 敷地および周辺における地盤沈下や地割れ, 斜面崩壊などの地盤変状が観察された。

これまでの地震被害調査¹⁾²⁾やそれらに基づく研究³⁾において, 地盤変状と基礎構造における被害の関係や, 基礎構造に被害を受けた建物における上部構造の傾斜や被災度等の関係について検討されているが, 上部構造の被害分析において, 地盤変状の影響や基礎構造の被害の影響に着目して検討した例は, 鉄骨造建築の分野ではあまり例が無い。この理由の1つとして, これまで一度の地震で多くの鉄骨造建物が大きな被害を受けた例は, 梁端接合部における破断が大きな問題となった兵庫県南部地震に限られ, 被災した建物が建っていた地域も限定的であることから, 上部構造の被害と地盤変状の関係などを検討する上で十分な情報が得られていないことが考えられる。

しかしながら今回の地震では, 鉄骨造建物についても広域にわたる多くの被害が発生しており, それらの被害に地盤変状の影響があることは既に報告されているところである⁴⁾。また日本建築学会文庫施設委員会耐震性能等小委員会 S-WG による鉄骨造文教施設の被

害調査⁵⁾でも, 基礎構造や地盤条件については必ずしも十分な情報が得られているわけではないものの, 調査対象となった建物周辺においては地盤変状が多く観察され, 上部構造の被害と敷地における地盤変状や基礎構造の被害の関係を検討する上で少なくない数のデータが得られた。このことから本報では, 震動被害を受けた鉄骨造文教施設における上部構造の被災度と, 周辺地盤における地盤変状や基礎構造が受けた被害の關係に着目して整理した結果を報告する。

2. 被害の概要

既報⁵⁾の調査は岩手県, 宮城県, 福島県, 茨城県, 栃木県, 千葉県, 東京都の屋内運動場, 実習室など216棟の鉄骨造文教施設について行った。本報では上記のうち震動被害を受けた建物172棟を扱う。調査結果に基づき, 地盤変状と関連する現象として基礎の傾斜, 建物周辺の地盤沈下, 土間コンクリート(以下土間コン)や体育館におけるアリーナ床の沈下, 犬走りの亀裂に着目する。検討対象である建物のうち, 上記の現象のうち少なくとも1つが観察された建物は52%であった。残りの48%のうち, 敷地内に地盤変状が確認されなかったものが37%, 敷地内に地盤変状が確認されたものの, 対象建物の近辺に発生したものではないため被害への影響はなかったと判

¹⁾ 千葉大学建築・都市科学専攻 助教・博士(工学)

(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

²⁾ 東京工業大学建築物理研究センター 准教授・博士(工学)

³⁾ 大阪工業大学建築学科 講師・博士(工学)

⁴⁾ 東京大学建築学専攻 准教授・博士(工学)

⁵⁾ 横浜国立大学都市イノベーション研究院 准教授・博士(工学)

⁶⁾ 神戸大学建築学専攻 助教・博士(工学)

¹⁾ Assist. Prof., Chiba Univ., Dr. Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

³⁾ Lect., Osaka Institute of Technology, Dr. Eng.

⁴⁾ Assoc. Prof., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

⁵⁾ Assoc. Prof., Yokohama National Univ., Dr. Eng.

⁶⁾ Assist. Prof., Kobe Univ., Dr. Eng.

図1 被災度ごとの棟数

図2 基礎種別ごとの被災度

図3 敷地地形ごとの被災度

図4 大破の判定を受けた建物の基礎種別と地形

図5 傾斜地・台地での地盤変状と被害

断したものが 11%であった。ただし、今回の調査は文部科学省を通して設置者より調査の依頼があった建物について実施されたものに限られている。この調査において対象となった建物には、液状化に起因する不同沈下などを生じた建物は含まれていない。

図 1 に基礎の傾斜や周辺地盤の沈下等、本報で着目した地盤変状に関連する現象が観察された建物数を、震災建築物の被災度区分判定基準⁹⁾に拠って判定した被災度との関係で示す。図 1 より、軽微・無被害で 19%、小破で 49%、中破で 50%、大破で 63%と、建物の被災度が大きくなるに従い地盤変状に関連する現象の発生割合も大きくなっている。なおこのような傾向について、地域による違いは殆ど見られなかった。これらのことから、上部構造の大きな震動被害と地盤変状に関連する現象との間にはある程度の相関性があると考えられる。本報では、まず建物の被災度と地盤変状に関連する現象との関係について示す。次いで個々の現象と被災度や被害詳細との関係について報告する。

3. 基礎種別・地形と構造被害

対象建物の中で、図面などで基礎種別が確認できたのは 62 %であった。これらについて、被災度と基礎種別との関係を図 2 に示す。個々の基礎種別について、図中左側に示した棒が震動被害を受けた建物全体における分布、図中右側に示した棒が震動被害を受けた建物のうち地盤変状に関連する現象が観察された建物の分布を示す。基礎種別が確認できた建物のうち 53%が杭基礎、38%が独立基礎と大部分を占めていた。この 2 つの基礎種別に着目すると、地盤変状に関連する現象が観察されたのは杭基礎を有する建物の 64 %、独立基礎を有する建物の 47%であった。なおかつ大破・中破の判定を受

図6 平坦地での地盤変状と被害

けた建物の棟数に限定して比較すると、杭基礎においてはほぼ全ての建物で地盤変状に関連する現象が観察されたのに対し、独立基礎においてはおよそ半数程度であった。このように独立基礎と比較すると杭基礎は被害棟数が多く、かつ大破・中破に相当する被害を受けた場合には地盤変状に関連する現象が観察された割合が多い。その他の基礎種別については被害棟数が少ないものの、布基礎や併用基礎を有する建物で大破・中破に相当する被害を受けた場合には 80%以上で地盤変状に関連する現象が観察された。

次に被災度と敷地地形の関係を図 3 に示す。図 3 も図 2 と同様、図中左側に示した棒が震動被害を受けた建物全体における分布、図中右側に示した棒が震動被害を受けた建物のうち地盤変状に関連する現象が観察された建物の分布を示す。被災した建物の敷地は平坦地が 70 %を占めるが、地盤変状に関連する現象が観察された建物は平坦地で 44%、傾斜地で 77%、台地で 50%であり、比較的傾斜地の

割合が多い。また地盤変状に関連する現象が確認された建物のうち大破・中破の判定を受けた建物は、平坦地で 50%、傾斜地で 67%、台地で 57%と、傾斜地・台地では約 60%以上の建物で大きな被害が生じていた。更に傾斜地・台地では、地盤変状に関連する現象の有無に関わらず大破・中破の判定を受けた棟数はあまり変わらなかった。ここで大破の判定を受けた建物に限定して、地形と基礎種別との関連を図 4 に示す。地形や地質によって基礎種別が決まることを反映して、地形によって被害を生じた建物の基礎種別の内訳は多少異なっている。以上、被災度と地形には相関性があるという既往研究と整合していることを確認できた^{りなど}。また今回の調査結果から地形ごとの地盤変状と基礎の被害の関係をみると、大別して以下の 2 種類となった。

①傾斜地・台地において、地盤沈下や斜面崩落などにより建物が沈下・回転する（図 5）

②平坦地において、地盤沈下や盛り土の陥没などにより建物が沈下・回転する（図 6）

本章ではこの 2 つのパターンと被害の関連性について述べる。

4. 地盤変状と上部構造の被害の関係

4.1 基礎の傾斜

残留変形の計測によって判明した基礎の傾斜は、震動被害を受けた 172 棟のうち 10%で観察され、そのうち大破の判定を受けた建物が 11 棟、中破の判定を受けた建物が 5 棟、小破以下の判定を受けた建物では 0 棟であった。大破の判定を受けた建物で確認された基礎の傾斜角は、 $1/300 \sim 1/150$ （被災度区分で I_s ）が 3 棟、 $1/150 \sim 1/100$ （被災度区分で II_s ）が 2 棟、 $1/100 \sim 1/50$ （被災度区分で III_s ）が 0 棟、 $1/50 \sim 1/30$ （被災度区分で IV_s ）が 1 棟、 $1/30$ より大きいもの（被災度区分で V_s ）が 5 棟であった。これら大破の判定を受けた建物の殆どで、基礎の傾斜に伴って柱の傾斜（写真 1）や曲げ捩じれ座屈、柱脚アンカーボルトの破断、鉛直ブレース接合部の破断といった、構造部材において IV_s 、 V_s に相当する大きな被害も発生していた。一方で写真 2 に示すように、建物隅部の著しい地盤沈下（約 1m）と敷地斜面の崩壊に伴い杭頭付近で杭の傾斜が観察された（写真 3）ものの、それ以外の構造要素は殆ど被害を受けなかった建物のように、基礎のみに顕著な損傷が見られた建物もあった。なお図 2 と図 3 の地盤変状を生じた建物についての分布の大破と中破の建物には基礎の傾斜の有無を併せて示しているが、基礎の傾斜を生じた建物に関して、基礎種別や地形による明確な違いは見られなかった。以下に大破の判定を受けた建物について分析する。

基礎の傾斜を生じて大破の判定を受けた 11 棟のうち、7 棟が 3 章で示した①のパターン、4 棟が②のパターンで被害を生じていた。大部分が①であるのは、一般的に傾斜地や台地といった多少なりとも起伏のある土地に学校を建てる場合、重量の大きな RC 造校舎は切り土上に、比較的軽量の鉄骨造の屋内運動場等は盛り土の上や斜面沿いに建てられることが多いことが原因の一つとして考えられる。①の例として写真 2 に示した屋内運動場を挙げる。この建物周辺の土地条件図を図 7 に示す。平野の中で所々隆起した谷間に盛土をした上で平坦化した土地に敷地があり、その中で当該建物は敷地北側の平野に接する斜面に立地している。地震動により尾根と尾根に挟まれた部分の盛土が崩落し、当該建物の北端隅部を主として建物が

写真1 基礎の回転に伴う柱の傾斜

写真2 斜面崩落で基礎の傾斜を生じた建物

写真3 写真2の白丸部（杭頭付近）拡大

図7 写真2の建物の周辺土地条件

傾斜し、杭も露出した（写真 3 参照）。また盛土自体が粘着性に乏しい土質を有するために斜面がより崩れやすい場合もあり、土地条件だけでなく整地や周囲の変化などにも関連して被害が発生したと考えられる。また写真 4 に示す①のパターンでの被害例では、斜面沿いの敷地に生じた地盤沈下により屋内運動場全体が不同沈下し、柱の傾斜角で 1/25 程度と大きく傾斜していた。

一方で土地の利用上、埋め立てた池や川の中州といった場所に建物を建てる場合もあるが、そのような場所は軟弱な地盤であるため、②のパターンで被害が発生したと考えられる。写真 5 に②のパターンでの被害例を示す。敷地は川の中州であり、敷地各所で地盤沈下を生じ地割れや護岸の傾斜が多く見られる。特に建物の中央部で大きく地盤が沈み込んだため桁行方向の基礎が約 1/30 傾斜し、それに

伴って中柱は約 1/90 傾斜し、床や壁にも大きく亀裂が生じていた。

なお基礎の傾斜を伴って中破の判定を受けた建物の殆どでは、基礎の傾斜以外には構造要素の顕著な損傷は観察されなかった。中破の判定を受けた建物のうち①のパターンの被害例を写真 6 に示す。写真中白丸印の付近で地盤沈下が生じて矢印方向に基礎が傾斜したために、写真中央部の扉の脇や写真右部分の外壁にも大きな亀裂が生じていた。

4.2 建物周辺の地盤の沈下

前節で示したような明確な基礎の傾斜が見られない場合でも、地盤変状により基礎が露出したり、地盤と基礎の間に隙間が生じることがある。例えば写真 7 に示す例では、斜面に隣接した屋内運動場の敷地で斜面崩落が生じたことに伴い建物隅周辺の地盤が沈下し、

写真4 基礎の傾斜による柱の傾斜

写真5 平坦地の不同沈下による基礎の傾斜

写真6 基礎の傾斜による建物の沈下

写真7 基礎下部と地面との剥離

写真8 基礎立ち上がり部の割裂

図8 建物周辺地盤の相対沈下量

この部分の上部構造と基礎立ち上げ部の間に隙間が見られる。そのため、この部分で伝えられるべき上部構造からの水平応力を他の部分で負担しなければならないことから、地上で顕著な損傷が確認されなくても、一部の基礎に大きな応力が作用している可能性がある。また写真 8 に示す例のように、基礎立ち上がり部の一部が割裂して地盤と基礎が密接しなくなり、部分的に上部構造に作用する水平力を基礎に伝達できなくなることや、平坦地で地盤が不同沈下したために基礎の下部が地盤と離れてしまうことも挙げられる。地盤変状を生じていない建物の周辺にはこのような地盤沈下は見られないことから、ここでは建物周辺の地盤沈下の程度と地盤変状による建物の被害の関連性を分析する。

図 8 に建物周辺における地盤の建物からの相対沈下量を示す。地盤変状を生じた建物棟数に対して相対沈下が観察されなかった建物が 45%，相対沈下量が 1 ～ 49mm であった建物が 22%，50 ～ 100mm であった建物が 10%となっている。相対沈下が観察されなかった建物では、大破もしくは中破の判定を受けた建物の割合は 40%であるが、相対沈下が観察された建物では半数以上が大破もしくは中破の判定となっており、階級によりばらつきはあるが、相対沈下量が大きいくほど上部構造の被害が大きくなる傾向が見て取れる。

また、相対沈下量と併せて基礎の傾斜が観察された場合に上部構造の被害の程度に影響があるかについては、相対沈下が観察されなかった場合(0mm)，相対沈下量が 1 ～ 49mm の場合、50 ～ 100mm 場合の各階級において、大破および中破の判定となった棟数は基礎の傾斜の有無に関わらずほぼ同数であり、基礎の傾斜の有無による明確な違いは見られなかった。

4.3 土間コン・アリーナ床の沈下

地盤変状と直接関係する非構造被害として顕著であるのが、土間コンや体育館アリーナ床の沈下である(写真 9)。これらは被災度によらず多く発生しており、その沈下量によっては内部機能を著しく損なう被害であるが、沈下の状況は建物もしくは地盤により異なる。調査対象の中で土間コン・アリーナ床の沈下が発生した建物は 42%であった。そのうち約 30%は土間コン・アリーナ床の沈下自体は確認されたものの、沈下量は明確になっていない。

土間コン・アリーナ床の沈下量を計測できた建物について、図 9 に沈下量分布を示す。沈下量は殆どが 30mm 以下の値であり、1 ～ 10mm が約 1/3 を占めている。30mm 以下での各沈下量帯での内訳を見ると大破が 1/3 ～ 1/2 程度を占めているが、この程度の沈下は、大きな地盤沈下や地割れが生じていなくても床下のコンクリートブロックや木材などの床を支える束材のずれ(写真 10)、捨てコンクリートや地盤の亀裂といった局所的な損傷が原因で発生した場合もあった。一方で沈下量が 80mm より大きくなった建物もあったが、これらは全て大破の判定を受けた建物であり、いずれも建物だけでなく敷地内で著しい地盤沈下や地割れを生じたものであった。以上のことから土間コン・アリーナ床に沈下が生じた場合は、一見して地盤変状が見られなくても上部構造に大きな被害を受けることが多いことがわかった。なお 4.1 で示した基礎の傾斜を生じた建物については、数棟を除き土間コン・アリーナ床の沈下は観察されなかった。よって基礎の傾斜が生じた場合は、建物の極めて近くに著しい地盤沈下や斜面崩落など地盤変状が生じていた場合を除いて、床ご

写真9 アリーナ床の沈下

図9 アリーナ床の沈下

写真10 床束(コンクリートブロック)のずれ

写真11 犬走りの亀裂

と傾斜していたことがわかる。

4.4 犬走りの亀裂

犬走りは基礎や地盤の保護として存在しているため、亀裂などの損傷（写真 11）が比較的良好に見られるものの、被害事例として取り上げられることは少ない。調査対象の中で犬走りの亀裂が確認された建物は 76%と、床・アリーナ床の沈下と比べて発生棟数が多い。これは地盤被害によるものだけでなく、犬走りと接触している柱や鉛直ブレースなどの変形に伴い犬走りに亀裂が発生したものが含まれるためである。確認された犬走りの亀裂幅について、図 10 に分布を示す。犬走りの亀裂幅はほぼ 20mm 以下であり、1～10mm のものが約 2/3 を占めている。ここで大破の判定を受けた建物の割合を見ると、1～10mm の範囲では 35%、目視でも容易に目に付く亀裂幅 11～20mm の範囲では 64%を占めており、犬走りに亀裂が生じた場合も一見して地盤変状が見られなくても、上部構造に大きな被害を受けることが多いことが確認された。更にそれ以上の亀裂幅を生じた建物は、大破または中破の判定を受けた建物であったが、犬走り内に埋められたブレース脚部の周辺に被害が著しく、震動によってブレースが揺さぶられたことが亀裂を大きくした原因の 1 つと考えられる場合や、斜面崩壊に伴って犬走りも一部崩落した場合（写真 12）であった。なお犬走りの亀裂幅が不明であっても大破の判定を受けた建物では、敷地各所において全体的に地割れが見られた。

図10 犬走りの亀裂幅

写真12 犬走りの崩落

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震等で被災した鉄骨造文教施設の被害調査結果に基づき、建物が受けた震動被害と地盤変状に関連する現象との関係について報告した。震動被害を受けた建物の半数以上で、何らかの地盤変状が見られた。建物の敷地形状と建物の被災度の関係を見ると、傾斜地や台地では平坦地に比べて、大破・中破と判定される被害が生じていた。地盤変状により基礎に大きな傾斜が生じた場合は、柱やブレースなどの構造部材も大破相当の被害を受ける可能性が高いことが確認できた。また基礎の損傷が見られなくても、建物周辺の地盤に沈下が生じた建物では、大破・中破と判定される大きな被害を生じる場合が多いことを確認した。建物のアリーナ床・床に沈下が見られた場合は、顕著な地盤変状が周囲に確認されなくても上部構造に大きな被害が生じる傾向がある一方で、基礎の傾斜を生じた建物には床の沈下が殆ど見られず、床ごと回転・沈下したことが確認された。更に犬走りに目視でわかる程度以上に亀裂の被害がある場合には、構造被害も比較的大きい場合が多かった。

謝辞

本報告で取り纏めた調査は、日本建築学会文教施設委員会 耐震性能等小委員会 S-WG（主査：山田 哲）で行ったものである。調査にあたっては、植松 康、五十子 幸樹、池永 昌容、ガヴァンスキ 江梨（以上東北大学）、小山 毅（東京大学）、見波 進（東京電機大学）、伊藤 拓海（東京理科大学）、田中 剛（神戸大学）、桑原 進（大阪大学）、高木 次郎（首都大学東京）、野澤 寿一（東北工業大学）、李 晚在（仙台高専）、中野 達也（宇都宮大学）の各先生にご尽力頂いた。また、調査対象となった施設では、施設関係職員の方々に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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書，1996.7
- 2) 日本建築学会：2007 年能登半島地震災害調査報告 2007 年新潟県中越沖地震災害調査報告，2010.3
- 3) 山肩邦男：兵庫県南部地震による基礎構造の被害と地盤変状との関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1 分冊，pp.583-584，1996.9
- 4) 時松孝次，田村修次，鈴木比呂子，勝間田幸太：2011 年東北地方太平洋沖地震における地盤災害，東京工業大学都市地震工学センター，地震工学研究レポート No.118，pp.21-47，2011.6
- 5) 山田哲，松本由香，伊山潤，五十子幸樹，吉敷祥一，池永昌容，島田侑子，小山毅，見波進，浅田勇人：東北地方太平洋沖地震等で被災した鉄骨造文教施設の調査 ー調査の概要ー，日本建築学会技術報告集 第18巻 第40号，pp.935-940，2012.10
- 6) 日本建築防災協会：震災建物の被災度区分判定基準および復旧技術指針第2版，2002.8

[2012 年 6 月 20 日原稿受理 2012 年 9 月 3 日採用決定]