

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震 建築物被害調査報告

Damage to Buildings Observed from the March 11, 2011 Tohoku Earthquake

緑川 光正¹・岡崎 太一郎¹

1, 北海道大学工学院工学研究院

Mitsumasa Midorikawa¹ and Taichiro Okazaki¹

1, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract

The 2011 Tohoku earthquake, officially named the 2011 Earthquake of the Pacific Coast of Tōhoku, produced strong motion over four prefectures, and produced a massive tsunami that washed the Pacific coast of the Japanese archipelago. The tsunami caused devastating damage and claimed nearly 20,000 lives in the prefectures of Iwate, Miyagi, and Fukushima. This paper reports damage to building structures examined by a reconnaissance team from Hokkaido University. The team observed that the majority of buildings constructed over the last thirty years withstood the severe ground motion with minimal structural damage. Buildings that used older cladding installation methods sustained damage to their claddings even if their structural performance was excellent. In the areas attacked by violent tsunami, the majority of steel buildings stood upright after the tsunami subsided, although these buildings lost much of their external and internal finishes.

Key Words: 2001 Tohoku earthquake and tsunami, building structures, ground motion, tsunami

キーワード：東北地方太平洋沖地震, 建築物, 地震被害, 津波被害

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日（金）14 時 46 分ごろ、宮城県牡鹿半島沖を震源としたモーメント・マグニチュード（Mw）9.0 の巨大地震が発生した。東北地方太平洋沖地震と命名されたこの地震により、岩手県から茨城県にかけて広い範囲で震度 6 弱ないし 6 強の地震動が記録され¹⁾、列島全域の太平洋沿岸部に津波が襲来した²⁾。殊に津波がもたらした被害は甚大で、三陸海岸沿岸の港湾設備や街区が壊滅し、岩手県、宮城県、福島県を中心に死者

行方不明者をあわせて二万人近い方が犠牲になった³⁾。平成 24 年 2 月 23 日付の警察庁広報資料³⁾から、被害状況を一部抜粋して記載する。

人的被害	死者	15,853 名
	行方不明者	3283 名
	負傷者	6013 名
建物被害	全壊	128,746 戸
	半壊	245,239 戸
	全焼・半焼	281 戸
	床上浸水	20,427 戸
	床下浸水	15,508 戸
	一部破損	678,932 戸
	非住家被害	57,271 戸

地震動の影響としては、振動による構造損傷、地盤の液状化による被害、高層ビルで長時間続いた揺れ、天井の落下などが、東日本の太平洋沿岸を中心に極めて広い範囲で報告されている⁴⁾。なお、本震に続いて多数の余震と誘発地震が発生しており、3 月 12 日(木) 3 時 59 分ごろに長野県北部を震源として Mw 6.7、3 月 15 日(金) 22 時 31 分ごろに静岡県東部を震源として Mw 6.4、4 月 7 日(木) 23 時 32 分ごろには本震と同じ震源域で Mw 7.1 の地震が発生し、Mw 5 を超える余震は 3 月中に四百回以上観測された。

筆者らで構成された北海道大学の災害調査チームは、本震から二か月近くを経て日本建築学会東北支部の要請を受け、5 月 13 日(金) から 16 日(月) にかけて仙台市卸町地区の悉皆調査を実施し、あわせて石巻漁港の鋼構造建築物被害を調査した。次いで、日本建築学会と米国地震工学会 (Earthquake Engineering Research Institute、以下 EERI と略す) の合同調査の一環として、6 月 3 日(金) から 6 月 5 日(日) にかけて仙台市、名取市、女川町、石巻漁港、石巻港を調査した。なお、筆頭著者は日本建築学会鋼構造運営委員会の主査として、岩手県と宮城県の主だった漁港における鋼構造建築物の被害調査を実行し、学会の調査速報⁴⁾の『6.5 節 鉄骨造建物の被害』をとりまとめた。

本報告は、二回の調査で収集した建築物被害に関する情報をまとめたものである。震度 6 度弱と推定される仙台市を中心とした地震動による被害と、甚大な津波被害を受けた宮城県名取市、仙台市、石巻市、女川町の被害を分類して記述する。これは、地震動と津波という異なる二つの被害要因をもたらした、東北地方太平洋沖地震の特徴を踏まえた方針である。以下、2 章で調査方法と調査地域を示し、3 章で地震動による被害を、4 章に津波による被害を述べ、5 章で調査結果を総括する。

2. 調査方法

二回に分けて実施した調査の概要を以下にまとめる。受入担当者とは、日本建築学会東

北支部の調査協力者を指す。

第一次調査

- 日時： 2011 年 5 月 13 日（金）から 5 月 16 日（月）
- 区域： 宮城県仙台市宮城野区（震度 6 弱）、石巻漁港（震度 6 弱）
- 調査者： 緑川光正、岡崎太一郎、村木泰輔、大友啓徳（北海道大学）
- 受入担当者： 源栄正人、柴山明寛（東北大学）
- 概要： 5 月 13 日に主に仙台市の太平洋岸沿いを視察し、14 日と 15 日に日本建築学会東北支部災害調査委員会が主導する悉皆調査を、仙台市宮城野区卸町の 304 棟の物件について実行した。16 日に石巻漁港の津波被害を調査した。

第二次調査

- 日時： 2011 年 6 月 3 日（金）から 6 月 5 日（日）
- 区域： 名取市（震度 6 弱）、仙台市若林区と宮城野区（震度 6 弱）、石巻市（震度 6 弱）、女川町（震度 6 弱）
- 調査者： 緑川光正、岡崎太一郎（北海道大学）、ジェイムズ・リクルス（リーハイ大学土木工学科教授）、ディミトリオス・リグノス（マクギル大学土木工学科助教授）、ジェイ・ラブ（デゲンコルプ事務所首席）
- 受入担当者： 源栄正人（東北大学）
- 概要： 日本建築学会と米国地震工学会の合同調査の一環で調査を実施した。6 月 3 日に名取市の津波被害と仙台市の地震動被害を、4 日に石巻市と女川町の津波被害を、5 日に仙台市の地震動被害と仙台港の津波・火災被害を調査した。仙台市と石巻漁港では、5 月 13 日から 16 日に実施した前回調査で確認済みの構造物を再調査した。

悉皆調査には、日本建築学会東北支部が準備した調査シートを使用し、鋼構造建築物については、日本建築学会鋼構造運営委員会で準備した調査シートを使用した。

調査地域を図 2.1 と 2.2 に示す。図 2.2 には、本報告で用いる表記名を用いて、建築物の位置も示す。第一次調査では、5 月 13 日（金）に仙台港と七ヶ浜を視察したあと、14 日（土）15 日（日）に悉皆調査を実行し、15 日（日）午後に悉皆調査の担当地域の近辺を調査し、16 日（月）午後に石巻漁港を調査した。第二次調査では、6 月 3 日（金）に東北大学源栄教授の案内で仙台市と名取市を視察したあと、4 日（土）に女川町と石巻市を調査し、5 日（日）に悉皆調査で担当した地域を中心に、仙台市の被害を調査した。



図 2.1 調査地域 (Google マップ <<http://maps.google.co.jp>> を利用して作成)

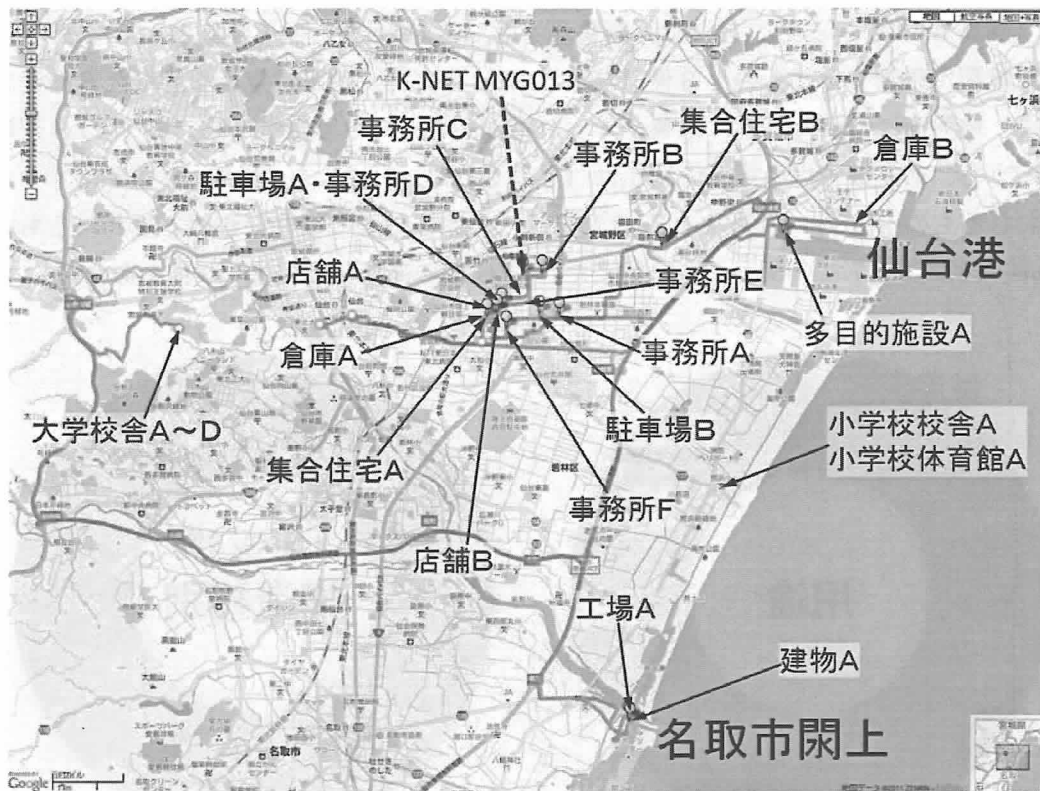


図 2.2 調査地域：仙台市近辺の拡大地図
(Google マップ <<http://maps.google.co.jp>> を利用して作成)

3. 地震動による被害

3-1 悉皆調査の担当分

建築学会東北支部災害調査委員会が主導する悉皆調査の一環として、仙台市宮城野区卸町の西側 304 件の建築物を調査した。304 棟の内訳を図 3.3.1 に示す。ここは古くからの住宅地であり、戸建住宅・共同住宅・併用住宅を合わせて住宅が 60%を占め、事務所が 25%、工場と倉庫が 10%を占めた。住宅のうち築年代の古いものは木造、築年代の新しいものにはハウスメーカーの軽量鉄骨造と木造が見られた。事務所と倉庫、あるいは事務所と工場を一体とした建築物が多数みられ、その多くは築 30 年以上と見られる、鋼構造（以下 S 造と称す）であった。事務所のうち、規模の大きい建築物には鉄筋コンクリート造（以下 RC 造と略記）もしくは S 造、規模が小さく築年代が新しいものには軽量鉄骨造が多かった。のちに詳述するが、大規模集合住宅で、鉄骨鉄筋コンクリート造（以下 SRC 造と略記）の物件が一つあった。築年代は、築 10 年以下、10 年から 30 年、30 年以上の分類にほぼ三等分された。

5 月 14 日と 15 日の時点で応急危険度判定結果の貼紙が 39 枚確認でき、その内訳は調査済（緑）が 19 枚、要注意（黄色）が 10 枚、危険（赤）が 10 枚であった。判定の実施日付は、4 月 7 日の余震が起きる前の 3 月 19 日か 3 月 26 日であった。大幅補修を終了して営業を再開した倉庫もあり、大半の建築物が使用されているように推察した。

58 件の RC 造建築物のうちに、柱のせん断破壊など重大な構造被害を受けたものを 2 件（写真 3.1.1a から c）、柱にせん断亀裂を生じたものを 1 件（写真 3.1.1d）、外壁にせん断亀裂が確認できたものを 8 件（写真 3.1.2）数えた。地下駐車場を設けた 6 階建て店舗で、地盤面に沿って外壁に亀裂が入った物件があった（写真 3.1.3）。58 件の S 造建築物のうち、構造被害は小規模店舗 1 件（写真 3.1.4）にとどまったが、外壁が落下したと思われるものを 7 件（写真 3.1.5、3.1.6）、その他に外壁の補修が必要と思われるものを 19 件（写真 3.1.7 に一例を示す）数えた。SRC 造の高層集合住宅（3 棟をあわせて 1 件

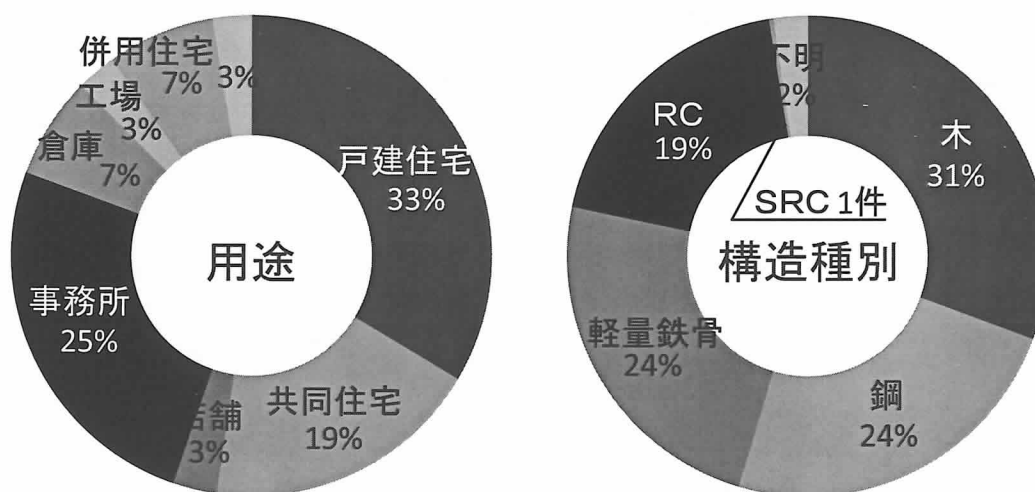


図 3.1.1 調査した建築物の内訳

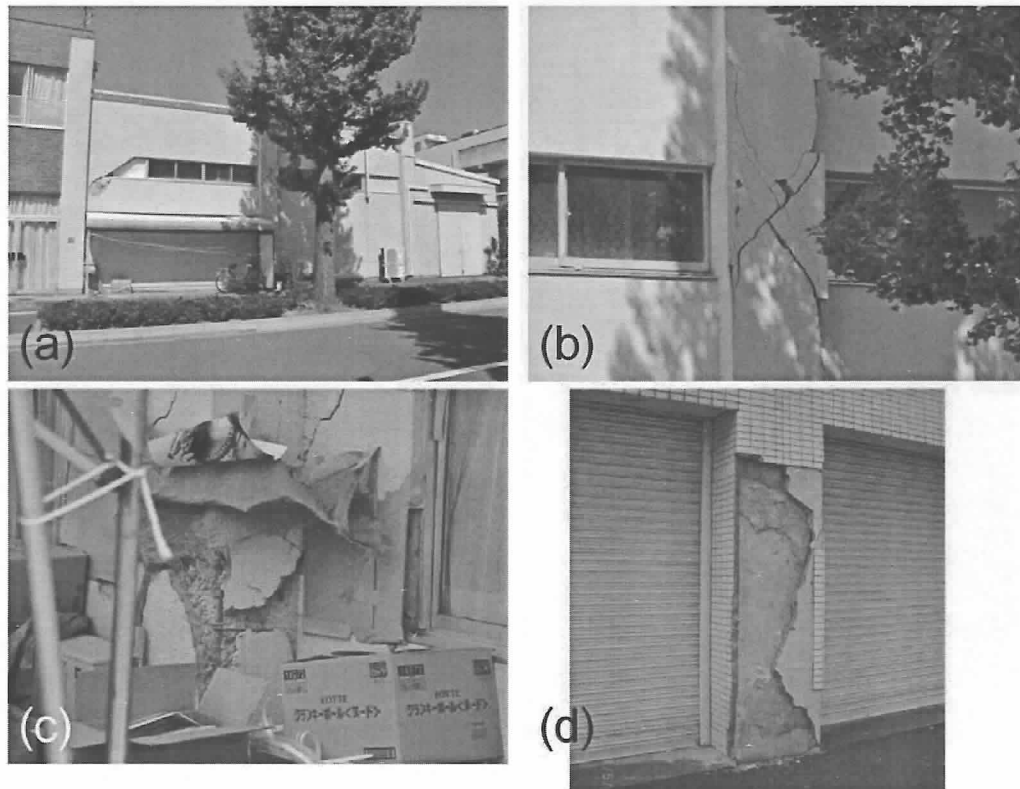


写真 3.1.1 RC 造建築物の損傷：(a) 二階建て店舗の外観、(b) 同店舗の二階柱のせん断破壊、(c) 二階建て店舗の柱のせん断破壊、(d) 五階建て共同住宅の一階柱の損傷。

と数える)は非構造部材に広範な被害を受け、3棟が相互に衝突した痕跡を残した(写真 3.1.8)。木造住宅のうち築年代の古いものには屋根瓦が崩れ落ちたもの、土壁が若干崩れたものがあった(写真 3.1.9)が、構造被害を受けたものは少なかった。築年代が新しい建築物には、木造(写真 3.1.10a)、軽量鉄骨造(写真 3.1.10b と c)、RC 造(写真 3.1.10d)と構造種別に関わらず無損傷のものが多かった。

以下、S 造の被害例 2 つと SRC 造の例を詳述する。

(a) 店舗 A

写真 3.1.4 の 2 階建て店舗は街区の角に位置し、桁行梁間とも 2 スパンの S 造筋違付架構で、裏側の外構面に両筋違を集中的に配した。部材断面は柱が十字形、梁が H 形で、筋違が丸鋼であった。間口側の外壁が損傷を受け(写真 3.1.4b)、柱に 0.02 ラジアンが残留変形を計測したが、その状態で店舗営業を再開していた。偏心が大きい構造なので、大きく振れたことで損傷を被ったものと推察される。間口側の筋違は間柱に接合され、端部接合部が降伏し(写真 3.1.4c)、座屈した形跡も見られたので多少は機能したようだが、間柱の柱脚アンカーボルトが破断した。

(b) 倉庫 A

写真 3.1.6 の 2 階建て倉庫は S 造ラーメン架構で、応急危険度判定で危険(赤)とされ



写真 3.1.2 RC 造建築物の外壁損傷：(a) 二階建て研究施設、(b) 三階建て店舗、(c) 二階建て店舗、(d) 二階建て事務所。

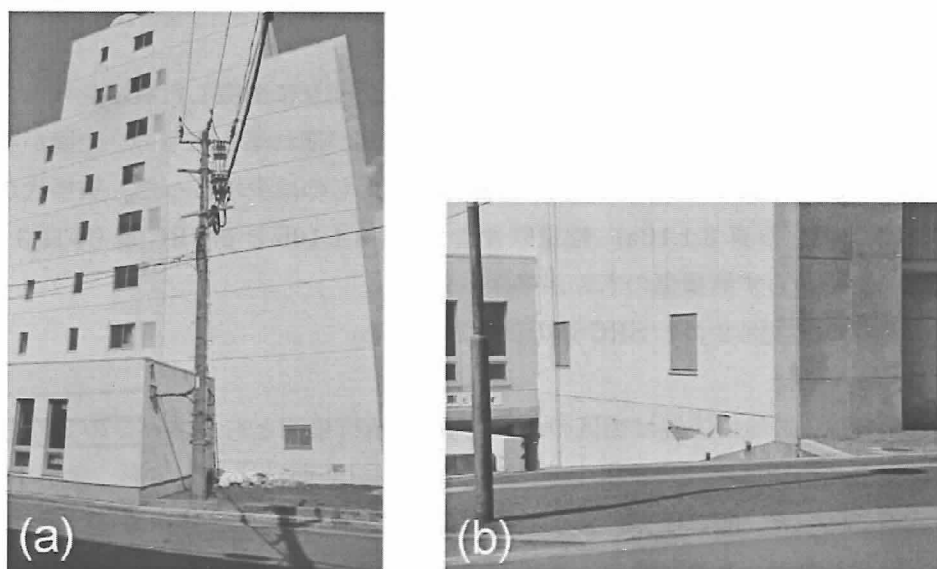


写真 3.1.3 外壁に損傷を被った 6 階建て店舗：(a) 補修中の外壁、(b) 地盤面に沿った亀裂。

た。露出した躯体を見る限り（写真 3.1.5b）構造被害はなかったようだが、ALC パネル外壁に甚大な損傷を受けた。相当な長さにあたって 2 階部分の ALC パネルが落下し（写真 3.1.5a）、隣接する倉庫の屋根を破壊した。残存する ALC パネルにも、パネル継目に

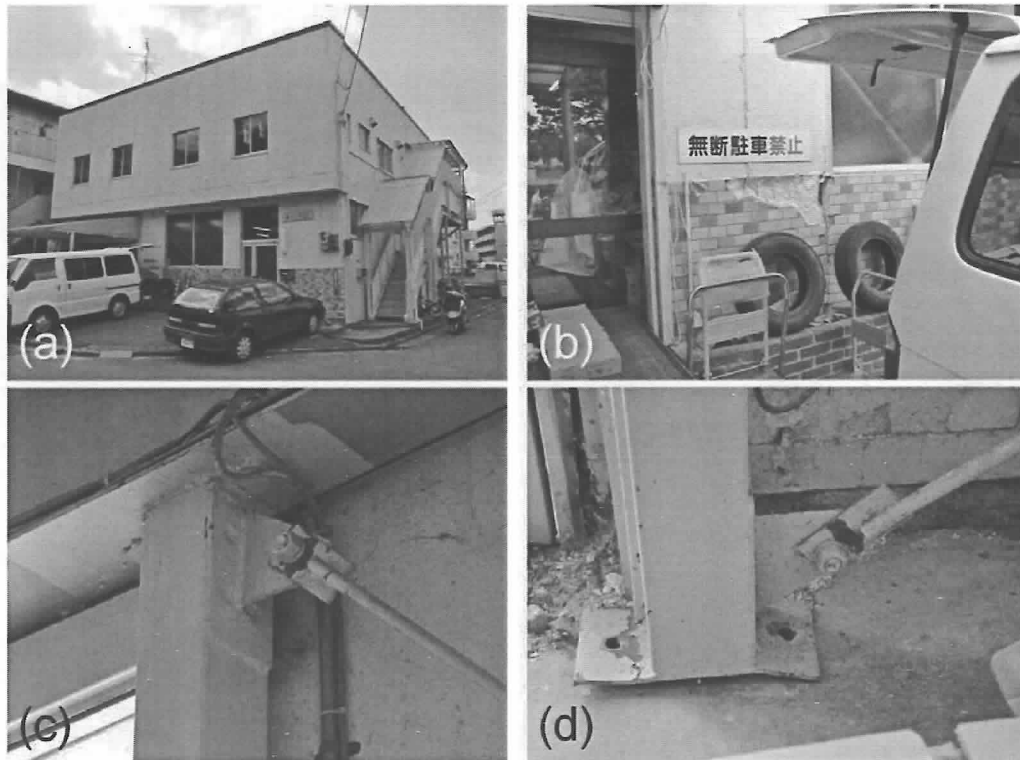


写真 3.1.4 店舗 A : (a) 外観、(b) 外壁の損傷、(c) 丸鋼筋違が接合する一階間柱の頂部、
(d) 丸鋼筋違が接合する一階間柱の柱脚。

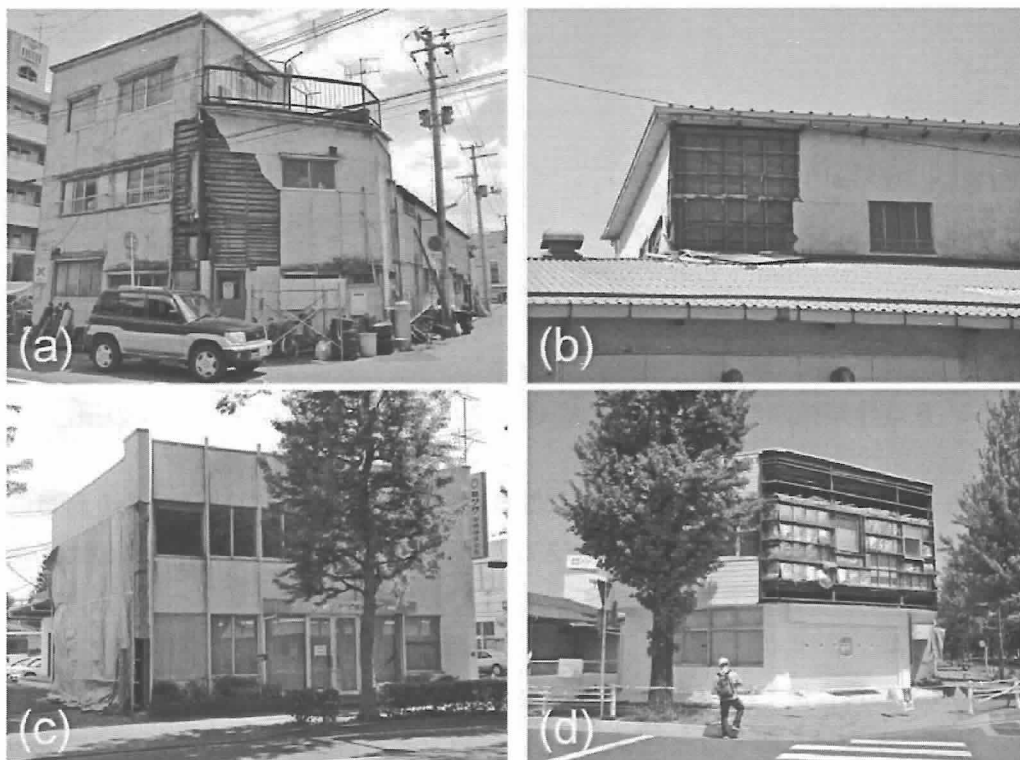


写真 3.1.5 S 造建築物の外壁落下 : (a) 併用住宅のモルタル外壁剥落、(b) 倉庫のモルタル外
壁剥落、(c) 店舗のモルタル外壁落下、(d) 店舗のパネル外壁落下。

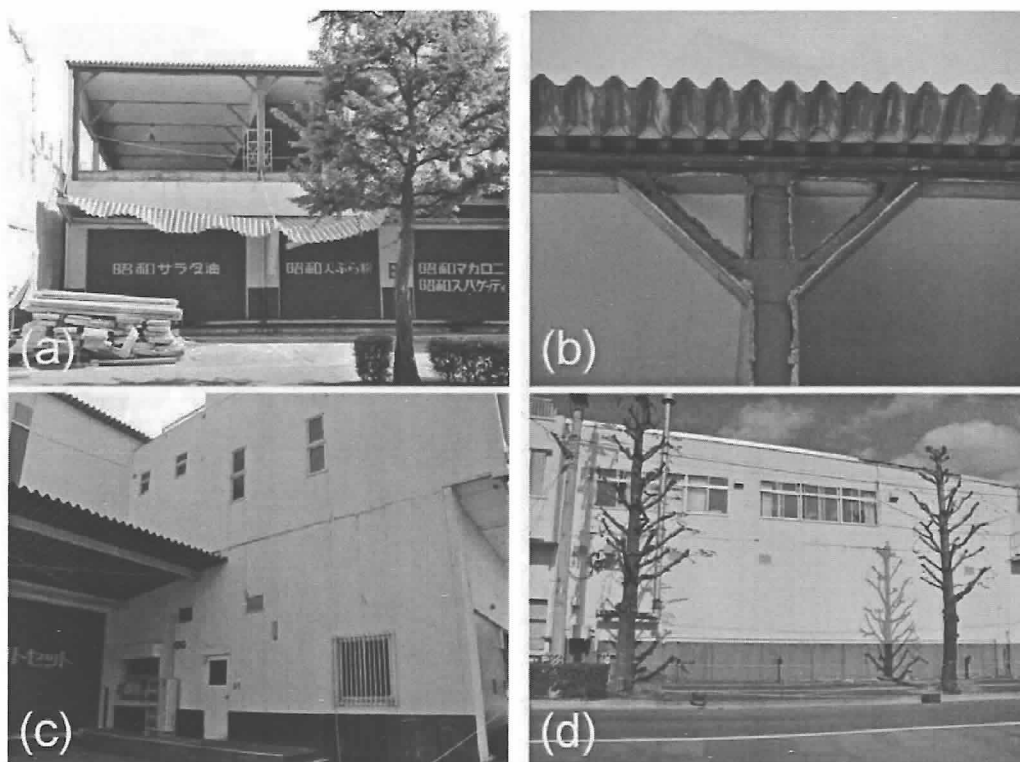


写真 3.1.6 倉庫 A : (a) 表側外観、(b) 二階柱の頂部、(c), (d) 残存する ALC パネルに見られる損傷。

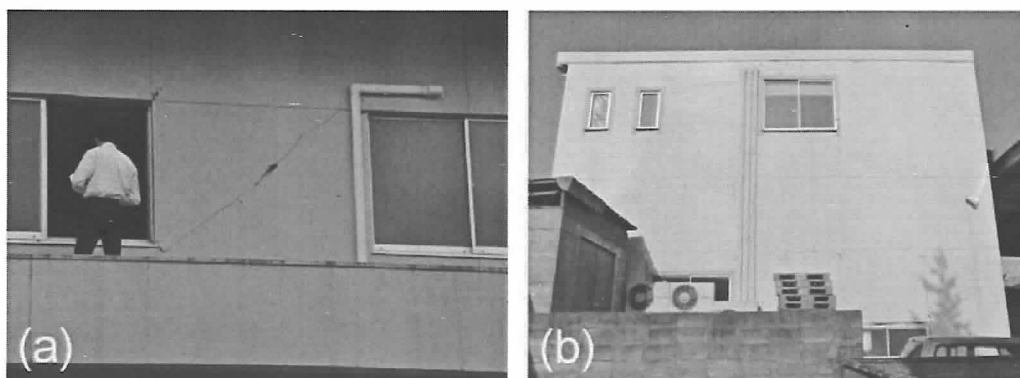


写真 3.1.7 S 造建築物の外壁損傷 : (a) ALC パネルの亀裂、(b) ALC パネルの損傷。

亀裂が入るなど著しい損傷が見られた（写真 3.1.5c, d）。挿入筋構法で取り付けられた ALC パネルが構造躯体の変形に追従できなかったものと思われるが、これまでの被害地震でも多く見られた損傷である。

(c) 共同住宅 A

写真 3.1.8 の集合住宅は 1975 年に建設され、3 棟の 11 階建て SRC 造建築物で構成された。基礎杭がないと聞き取ったが、真否は確認できていない。居住者は戻っており、通常通りに生活していた。どの棟にも残留変形はなかったが、全階にわたって一様に非構造

壁のせん断亀裂が見られた（写真 3.1.8b, c）。各棟のエクspansionジョイント部が損傷しており（写真 3.1.8d, e）、これは棟が互いに直角に設置されるため、振動特性の違いから互いに衝突した（写真 3.1.8f）ものだと考えられる。

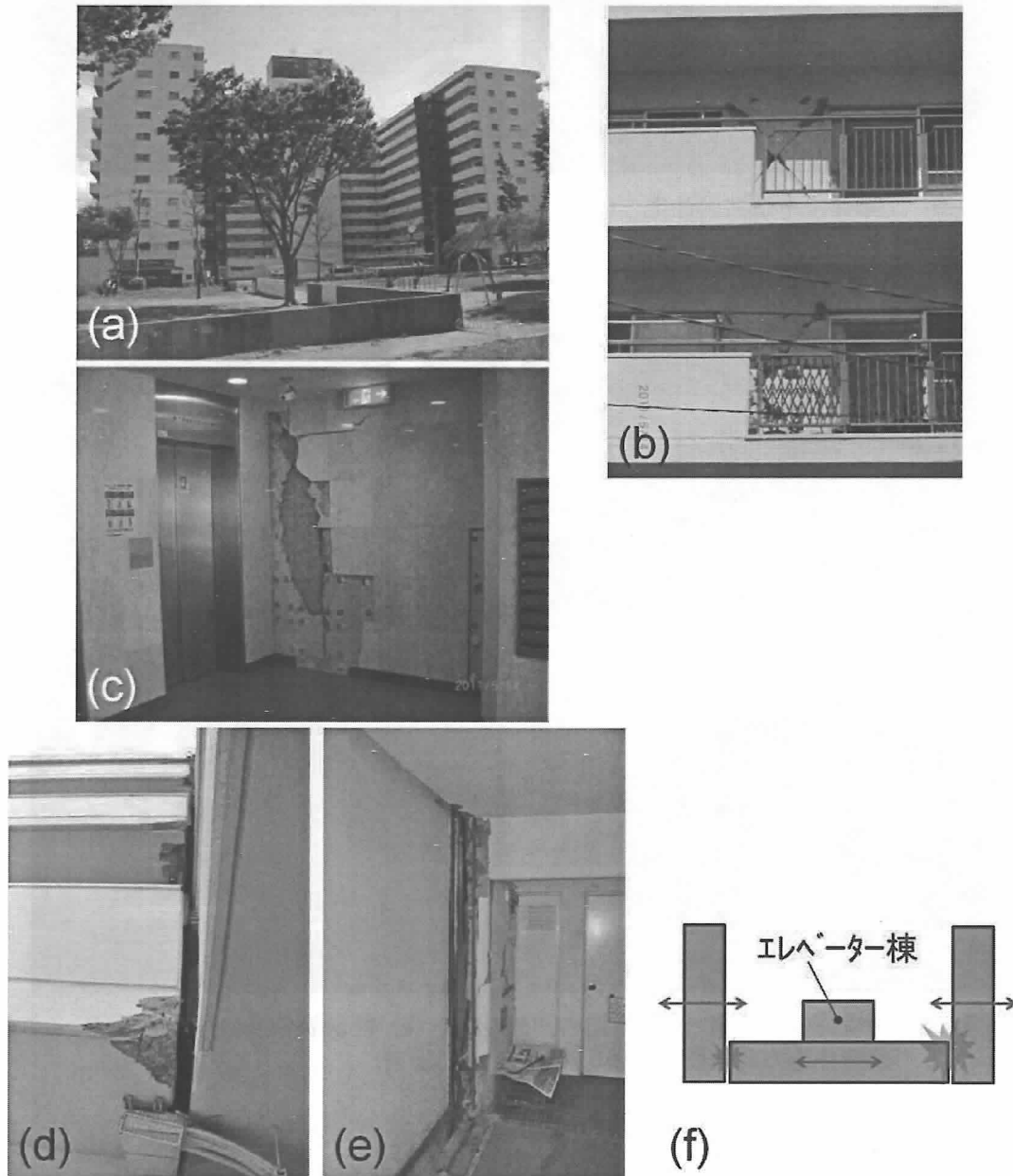


写真 3.1.8 集合住宅 A : (a) 外観、(b) 非構造外壁の損傷、(c) 1 階内壁の損傷、(d) 下から見上げたエクspansionジョイント部の損傷、(e) エクspansionジョイント部の損傷、(f) 棟間衝突の模式図。



写真 3.1.9 二階建て木造共同住宅：(a) 外観、(b) 漆喰のひび割れと残留変形。

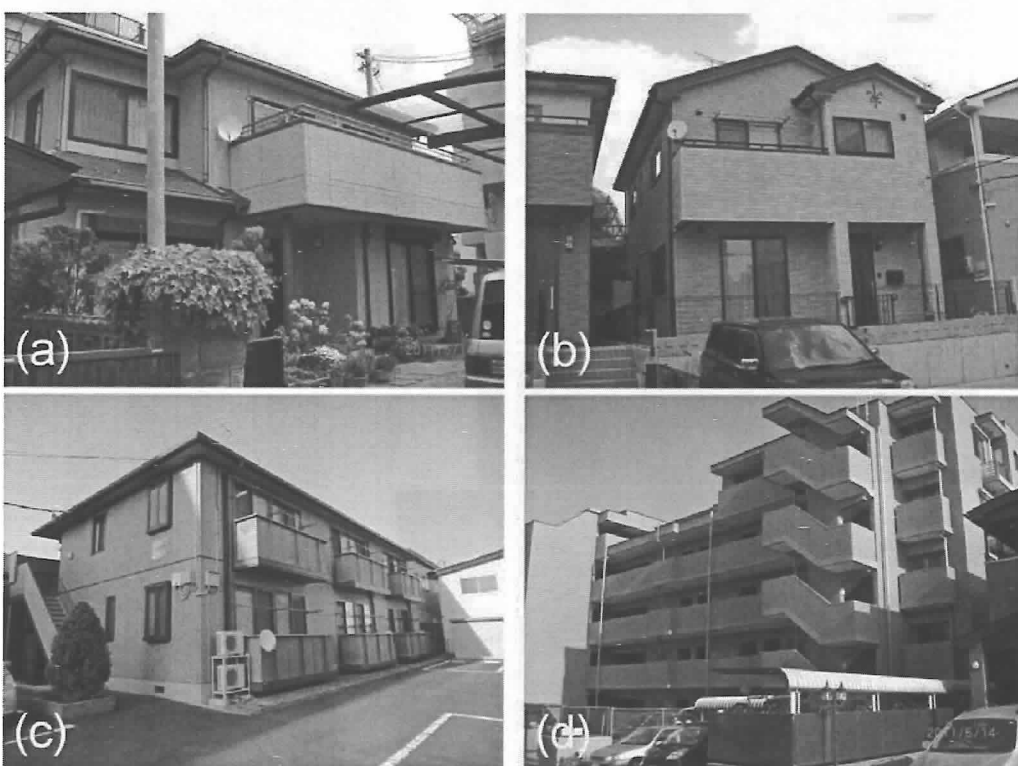


写真 3.1.10 無損傷の建築物：(a) 木造の戸建住宅、(b) 軽量鉄骨造の戸建て住宅、(c) 軽量鉄骨造の共同住宅、(d) RC 造の共同住宅。

3-2 仙台市のその他の地域

本節では、仙台市で調査したその他の被害について述べる。

(a) 大学校舎 A

写真 3.2.1 は 9 階建て SRC 造の大学校舎で、1969 年に建設された。梁間方向は 2 スパン耐震壁が設けられ、桁行方向は 10 スパンのラーメン架構である。3 階のセットバックが特徴的で、この 3 階部分を補強するため 2001 年に桁行構面に内付 S 造筋違が加えられた。1978 年宮城県沖地震も経験しており、東北大学が 40 年以上にわたってモニタリン

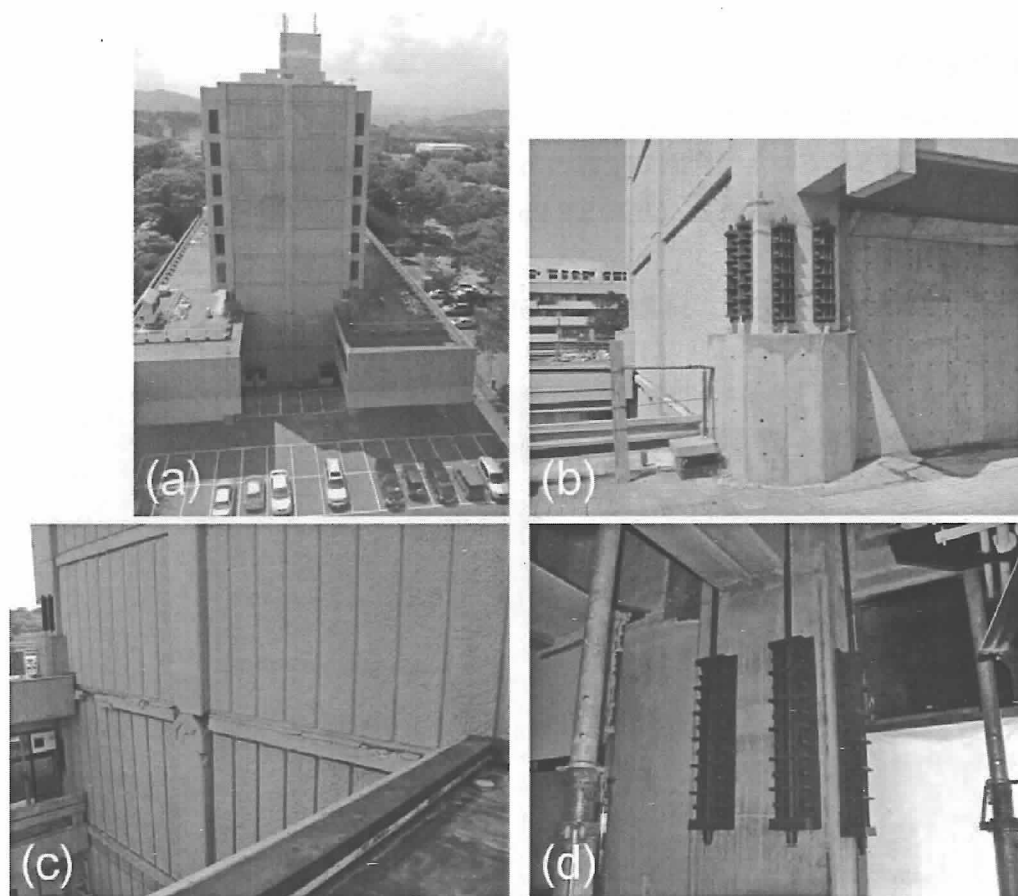


写真 3.2.1 大学校舎 A : (a) 外観、(b) 応急補修された隅柱、(c) 外壁の亀裂、(d) 3 階床を介した Dywidag 鋼棒の下端締結。

グを続けてきた。今回の地震で、3 階の隅柱が転倒モーメントを支持しきれず圧壊し、外壁にセットバック面に沿った亀裂が入った（写真 3.2.1c）。応急危険度判定で危険（赤）の判定を受けている。調査時点までには、安全に出入りするための応急補修が施されていた（写真 3.2.1b, d）。破壊した隅柱を覆うように打設した鉄筋コンクリートで圧縮力を、新設した Dywidag 鋼棒（橋梁用 PC 鋼棒の一種）で引張力を伝達して転倒モーメントに抵抗する機構である。

(b) 大学校舎 B

写真 3.2.2 は 8 階建て SRC 造の大学校舎で、1966 年に建設された。梁間方向は 3 スパンで連層耐震壁が設けられ（写真 3.2.2a）、桁行方向は 7 スパンのラーメン架構である（写真 3.2.2b）。今回の地震で連層耐震壁を境界梁にせん断破壊を生じ（写真 3.2.2a, c）、2 階建てペントハウスの一層部分が損傷を受けた（写真 3.2.2b）。調査時点でこの建築物は使用されていなかった。

(c) 大学校舎 C

写真 3.2.3 は 1966 年に建設された 2 階建て RC 造校舎で、1 階柱にせん断破壊を生じ

た。

(d) 大学校舎 D

写真 3.2.4 の 2 階建て RC 造校舎には、柱のせん断破壊を防ぐため柱に FRP シートを巻く補強が施されていた。今回の地震のあと、柱のせん断長さが短い部分で FRP シートが剥離した形跡が認められた (写真 3.2.2b)。

(e) 集合住宅 B

写真 3.2.5 は集合住宅で、14 階建ての SRC 造建築物 2 棟で構成された。1976 年に建



写真 3.2.2 大学校舎 B: (a) 連層壁構造と境界梁、(b) ペントハウスの損傷を含めた外観、(c) 破壊した境界梁。



写真 3.2.3 大学校舎 C: (a) 外観、(b) せん断破壊した 1 階柱。

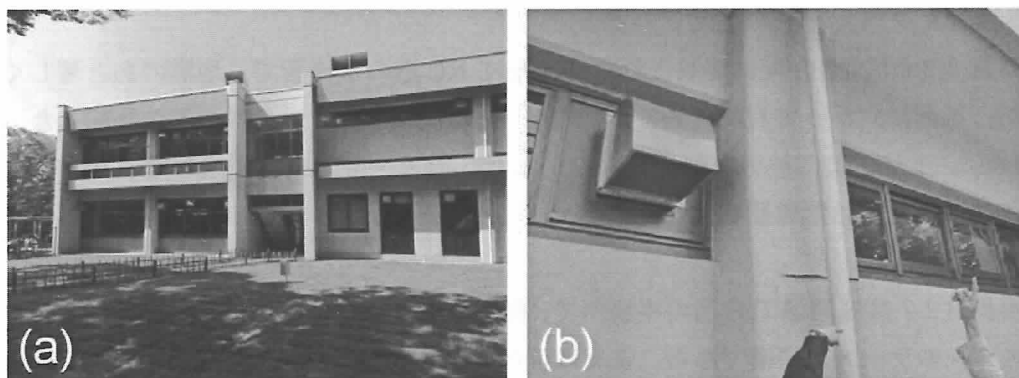


写真 3.2.4 大学校舎 D : (a) 外観、(b) 剥離した FRP と塗装.

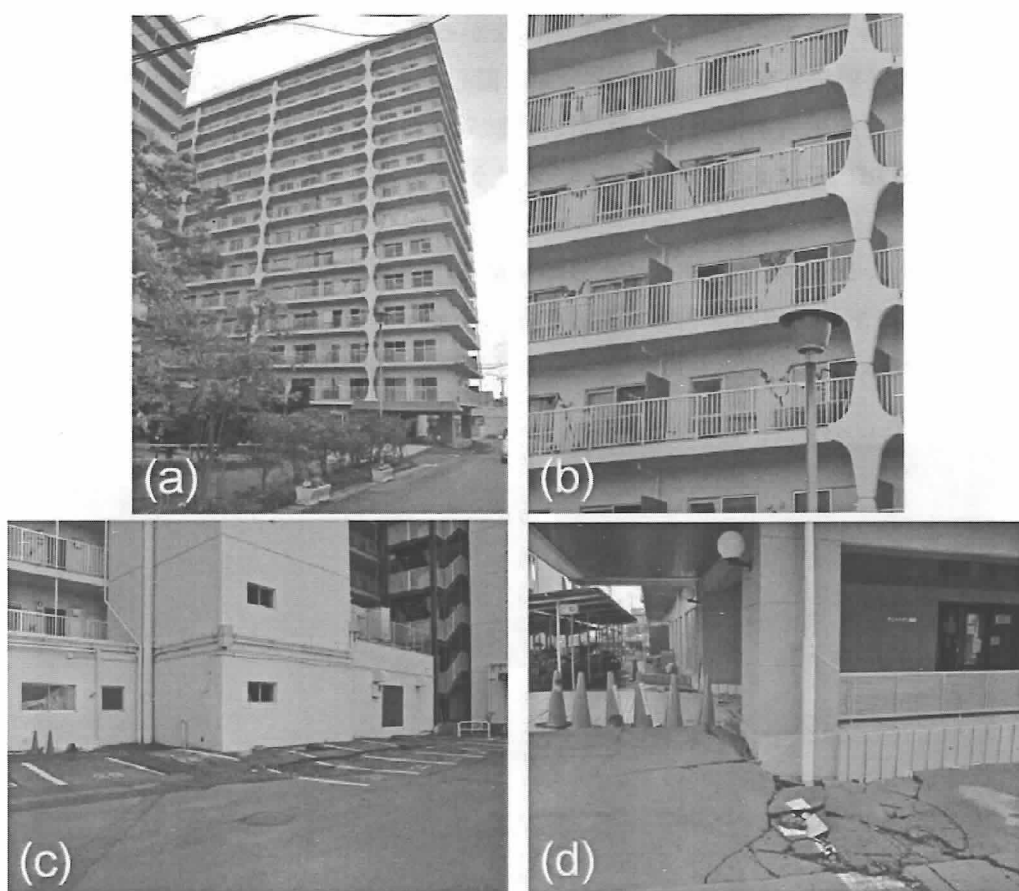


写真 3.2.5 集合住宅 B : (a) 外観、(b) 非構造壁のせん断亀裂、(c) 建物裏側の地盤変状、(d) 建物表側の地盤変状.

設された後、1978 年宮城県沖地震で被害を受け、その折に基礎杭が補修された。今回の地震のあと、 $1/45$ の傾斜角度を残し、全階にわたって非構造壁にせん断亀裂が入った（写真 3.2.5b）。各棟の周囲のアスファルトが隆起あるいは陥没しており、地盤変状が著しいことを示唆した（写真 3.2.5c, d）。応急危険度判定で危険（赤）の判定を受けており、第二次調査の時点で取り壊す準備が進められていた。

(f) 事務所 A

写真 3.2.6 は 1983 年に建設された 4 階建て RC 造の事務所で、地震のあと著しく傾斜した。正面に向かって右側の角部が沈下し（写真 3.2.6b）、対角の角部が隆起した（写真 3.2.6c）。上部構造に被害は認められなかった。周辺一帯に地盤変状の跡が見られたが、同様の被害を受けた建築物はなかった。

(g) 事務所 B

写真 3.2.7 は 3 階建て S 造の事務所で、梁間方向は 8 スパンの筋違付架構、桁行方向は 1 スパンのラーメン架構である。部材断面は柱と梁が H 形、筋違が等辺山形の背中合わせである。北側構面（写真 3.2.7a）と西側構面（写真 3.2.7b）の外壁が失われており、露出した西側構面の 1 階で筋違が著しく損傷していた。構面による損傷の隔たりは、建築物の西側にあった地盤変状の跡が東側になかったことと関係すると思われる。この X 形筋違は、断面形状と交差部、端部接合部に偏心を有するため、圧縮耐力を期待できない形式であった。圧縮力が作用した途端に筋違が捩れ（写真 3.2.7c）、端部接合部が破断した（写真 3.2.7d）のは必然の結果だといえよう。

(h) 事務所 C

写真 3.2.8 は 1969 年に建設された 3 階建て RC 造の事務所で、梁間方向 3 スパン、桁行方向 1 スパンの二方向ラーメン架構である。東側の隅柱が両方ともせん断破壊しており（写真 3.2.7b, d）、応急危険度判定で危険（赤）の判定を受けている。露出した主筋（写

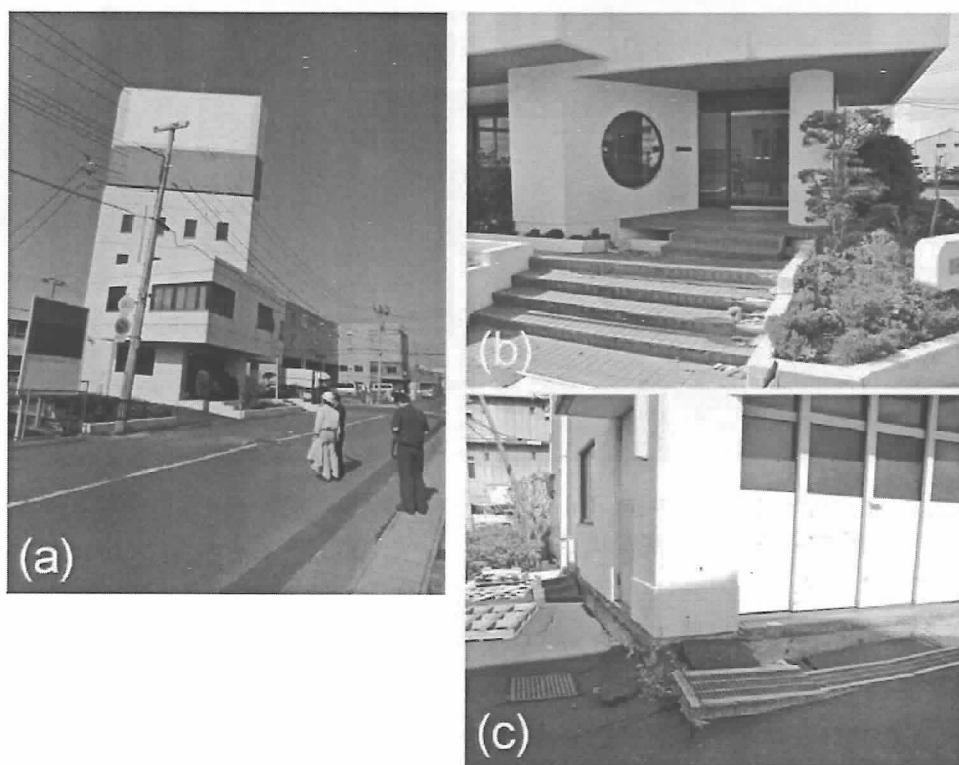


写真 3.2.6 事務所 A : (a) 外観、(b) 沈下した角部、(c) 隆起した角部。

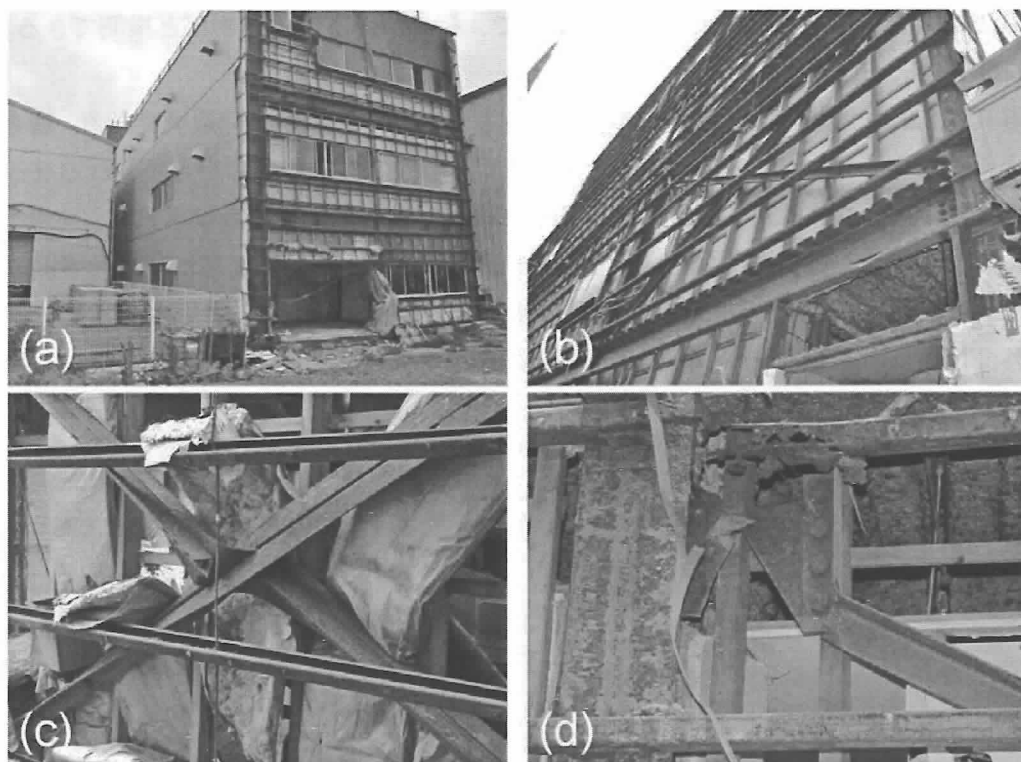


写真 3.2.7 事務所 B : (a) 建物裏側の外観、(b) 2 階と 3 階の X 形筋違、(c) 筋違交差部の
振じれ、(d) 筋違端部接合部の破断。

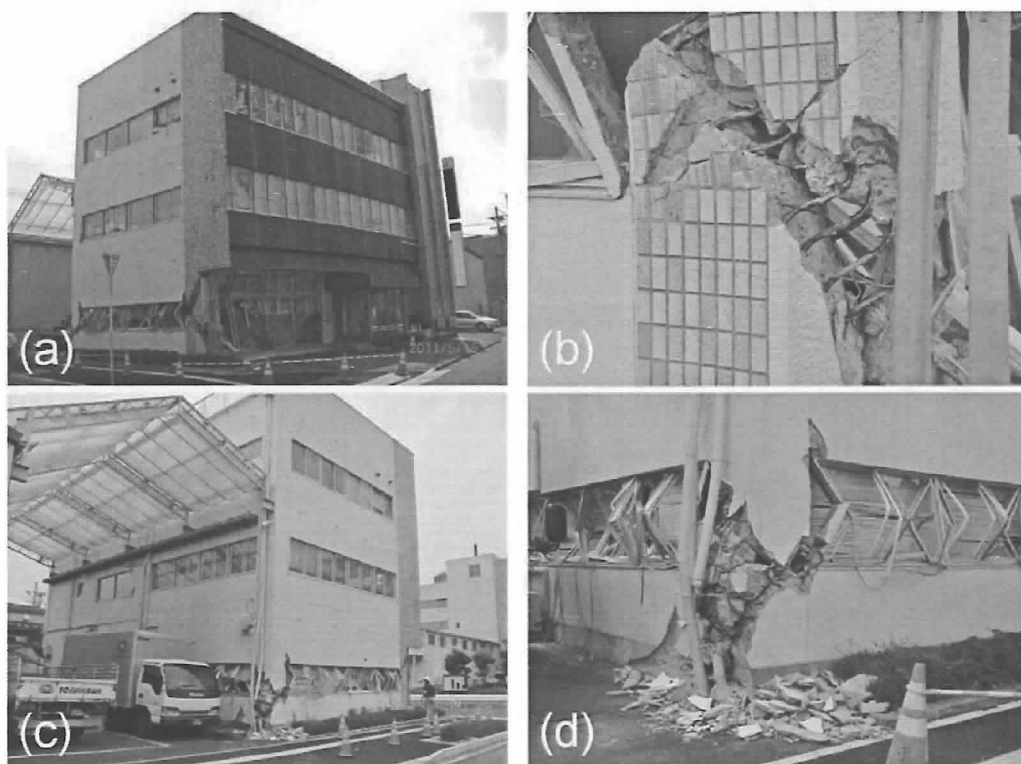


写真 3.2.8 事務所 C : (a) 外観、(b) 圧壊した隅柱、(c) 裏側から見た外観、(d) 圧壊した
隅柱。

真 3.2.7b) をみると丸鋼が使われているので、築年代が古い構造物だと推測できる。

(i) 駐車場 A

写真 3.2.9 は 2 階建て S 造の駐車場で、各方向 6 スパンの筋違付架構である。調査時点で通常に営業していた。残留変形はなかったが、今回の地震で生じたと思われる筋違接合部の変形から、この構造が設計の想定通りに機能しない可能性が危惧される。すなわち 1 階において K 形筋違（写真 3.2.9b）の上下端でガセット板が構面外に変形しており（写真 3.2.9c, d）、ガセット板に折れ曲がり降伏線を生じた箇所もあった。これは接合部の構面外曲げ剛性が不足し、かつ接合部が軸力の作用軸に対して偏心しているために、接合部

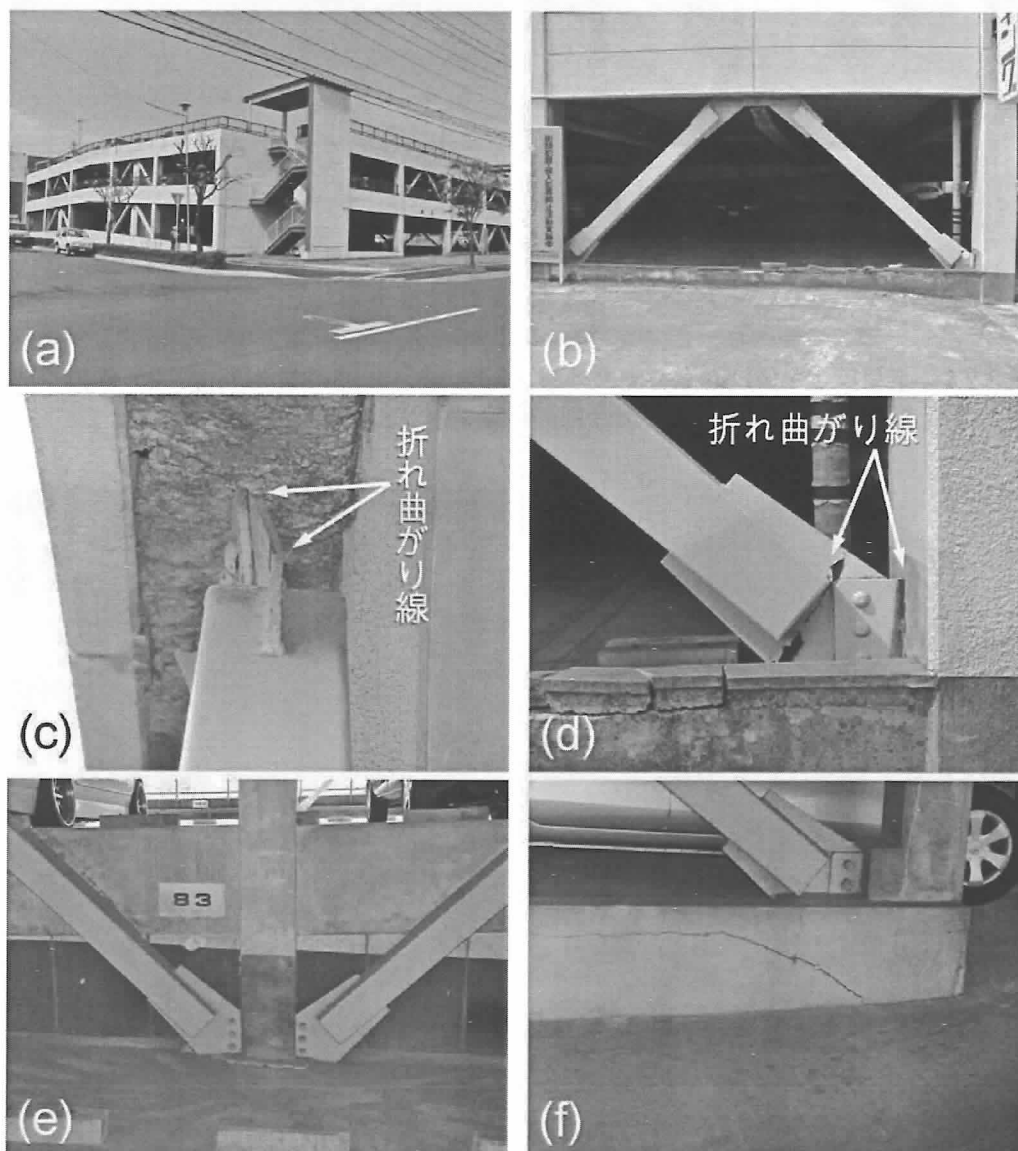


写真 3.2.9 駐車場 A : (a) 外観、(b) K 型筋違、(c) 筋違上端接合部の面外変形、(d) 筋違下端接合部に見る折れ曲がり線、(e) 柱脚の被りコンクリートの亀裂、(f) コンクリートの亀裂。

の圧縮耐力が極めて低いことを示唆している。また、筋違が軸組に接合する部位で被りコンクリートの亀裂が見られた（写真 3.2.9e, f）。

(j) 事務所 D

写真 3.2.10 は 3 階建て S 造の事務所で、桁行方向 3 スパン、梁間方向 2 スパンの二方向ラーメン架構、柱が円形鋼管、梁が H 形鋼である。表側を除いて外壁仕上げに ALC パネルを用いており、ほぼすべてのパネルが損傷を受け、架構が一部露出していた。残留変形はなく、露出した架構に損傷は認められなかった（写真 3.2.10d）。ALC パネルは挿入筋構法で取り付けられており、ALC パネルが架構の変形に追従できずに損傷し、場所によっては落下したものと推察される。

(k) 事務所 E

写真 3.2.11 は、街区の角に位置する 3 階建て RC 造の事務所で、桁行方向 4 スパン梁間方向 2 スパンの二方向ラーメン架構である。ただ玄関を設置した角に柱がなく、この表側構面の柱 4 本のうち 3 本までがせん断破壊した。露出した主筋に丸棒が使用され、せん断補強筋の間隔が広いことから、建設年代の古い構造だと推察される。

(l) 店舗 B

写真 3.2.12 は、街区の角に位置する 2 階建て S 造の店舗である。事務所 E と同じく玄関を角に置く。外壁の多くが失われ、玄関の窓ガラスも一部割れていた。応急危険度判定

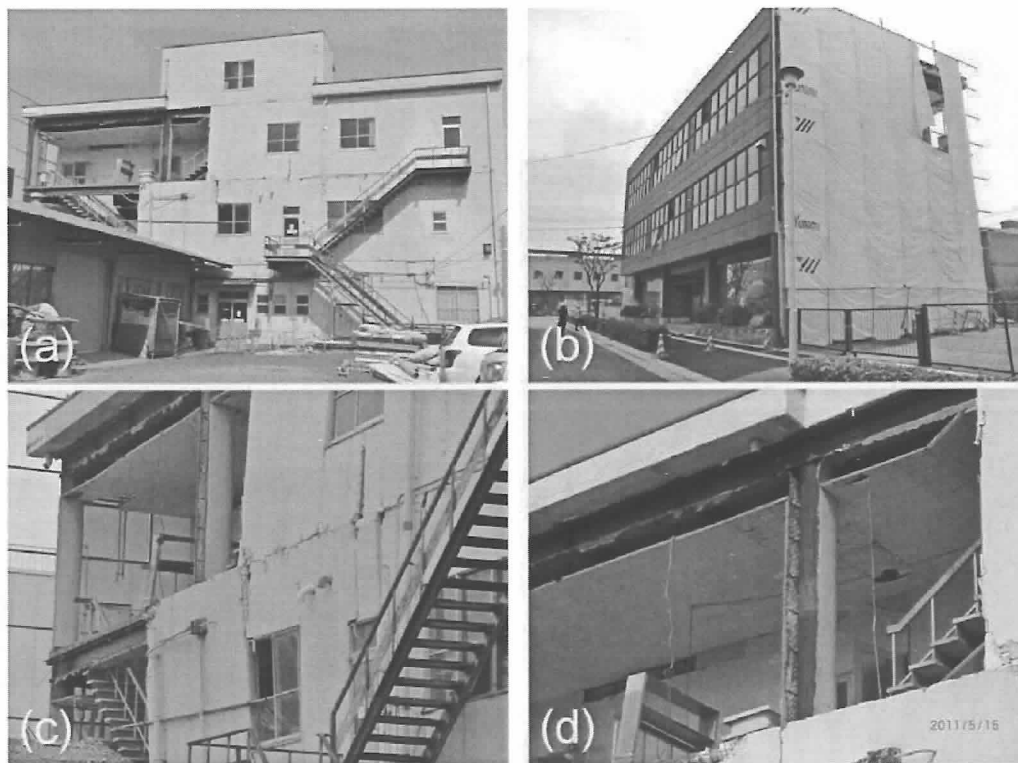


写真 3.2.10 事務所 D : (a) 建築物裏側の外観、(b) 建築物表側の外観、(c) 損傷した ALC パネル、(d) 露出した構造躯体。

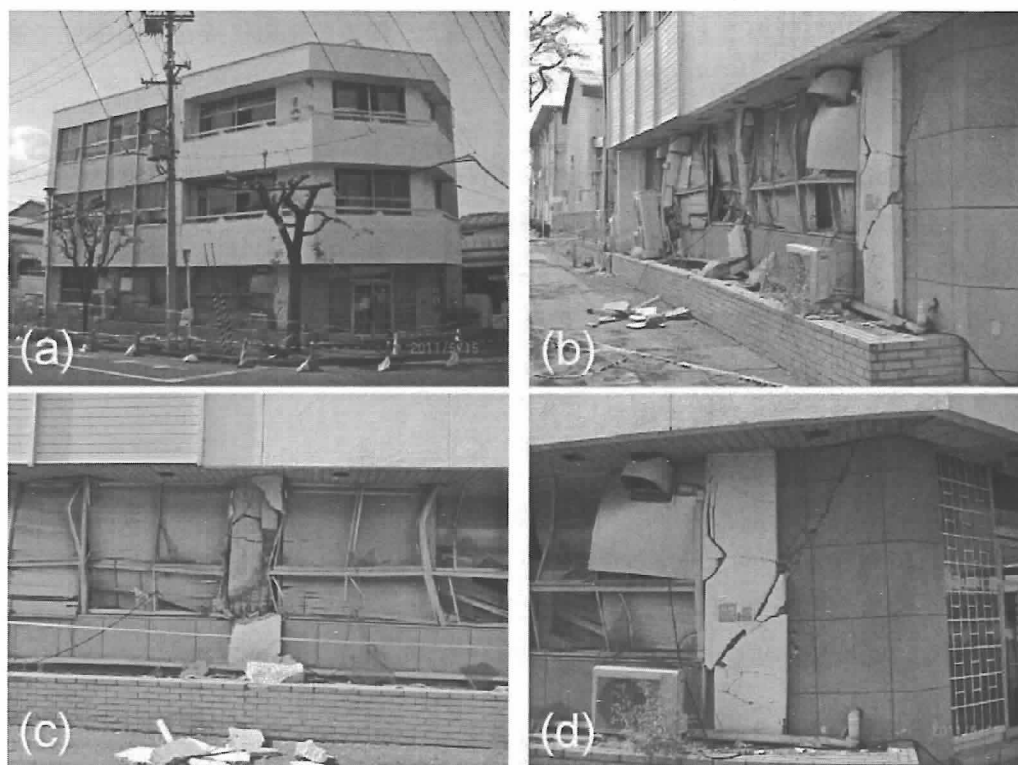


写真 3.2.11 事務所 E : (a) 外観、(b) 損傷が集中した 1 階、(c) 圧壊した中柱、(d) 圧壊した玄関横の柱.

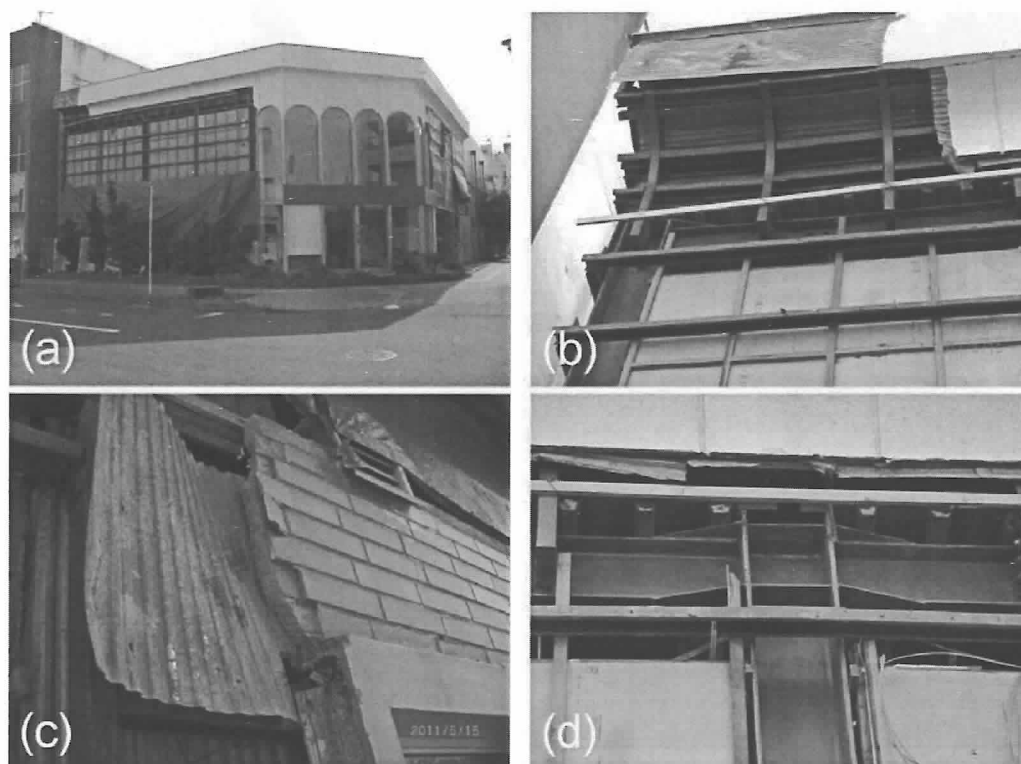


写真 3.2.12 店舗 B : (a) 外観、(b) 屋根近くの外壁下地、(c) 1 階部分の外壁下地、(d) 露出した構造躯体.

で危険（赤）の判定を受けている。外装は、鉄板の下地の上にセメントモルタルを塗り、タイルを貼り付ける形式であった（写真 3.2.12b, c）。露出した構造躯体に損傷は認められなかった（写真 3.2.12d）。

(m) 事務所 F

写真 3.2.13 は 1969 年に建設された 2 階建て RC 造の事務所で、桁行方向 1 スパン梁間方向 2 スパンの二方向ラーメン架構であった。3 月 11 日の本震で倒壊したが、不幸中の幸いで被害者は出なかったと聞く。1 階の柱 6 本が全て破壊し（写真 3.2.13a, d）、2 階の柱も 1 本破壊していた（写真 3.2.13c）。主筋に異形棒を使用したのが、せん断補強筋の間隔は広がった。

(n) 駐車場 B

写真 3.2.14 は、2 階建て S 造駐車場で、桁行方向 9 スパン梁間方向 7 スパンの二方向筋違付架構であった。柱は角形鋼管、梁は H 形鋼、筋違は円形鋼管で、主要部材に亜鉛メッキが施されている。桁行方向に 0.01 ラジアン残留変形があり、1 階の筋違の大半が上端接合部で破断した（写真 3.2.14b, c）。K 形筋違の梁に残留たわみが見られた（写真 3.2.14b）が、これは筋違が破断する過程で鉛直方向に不釣合力を生じた結果だと推察される。両構面の筋違が接合する柱脚のまわりのアスファルト被りに大きな亀裂が見られた（写真 3.2.14d）。1 階の筋違 62 本の上端接合部うち、27 箇所が破断し、23 箇所著

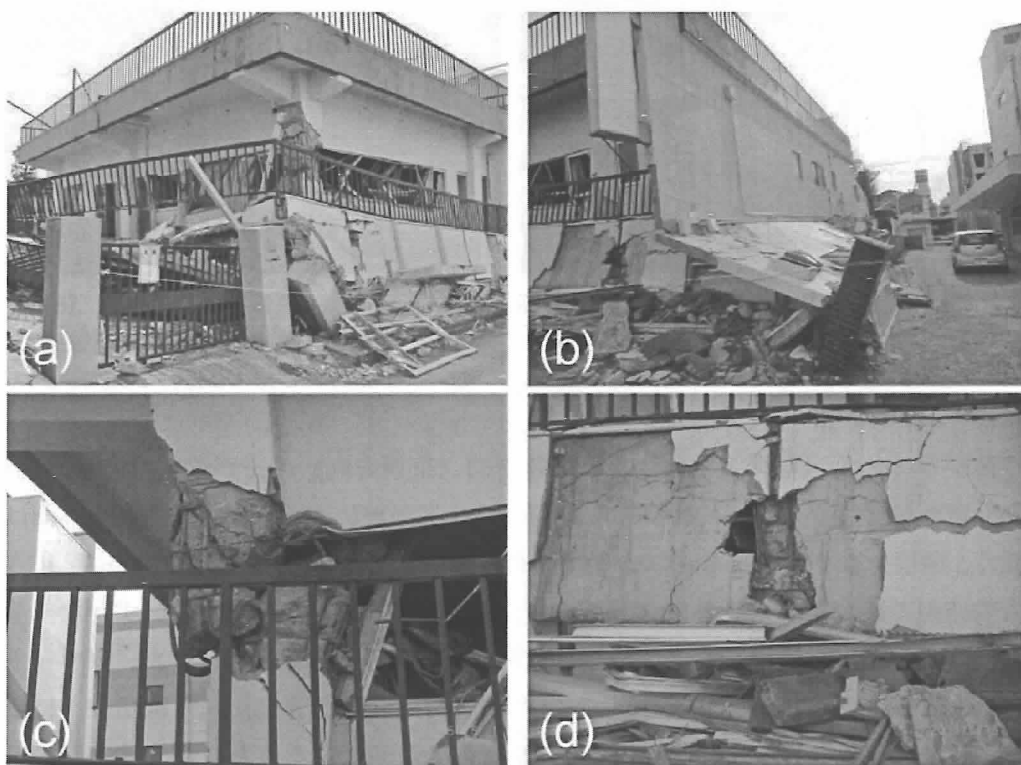


写真 3.2.13 事務所 F: (a) 外観、(b) 外観、(c) 圧壊した 2 階の隅柱、(d) 圧壊した 1 階の中柱。

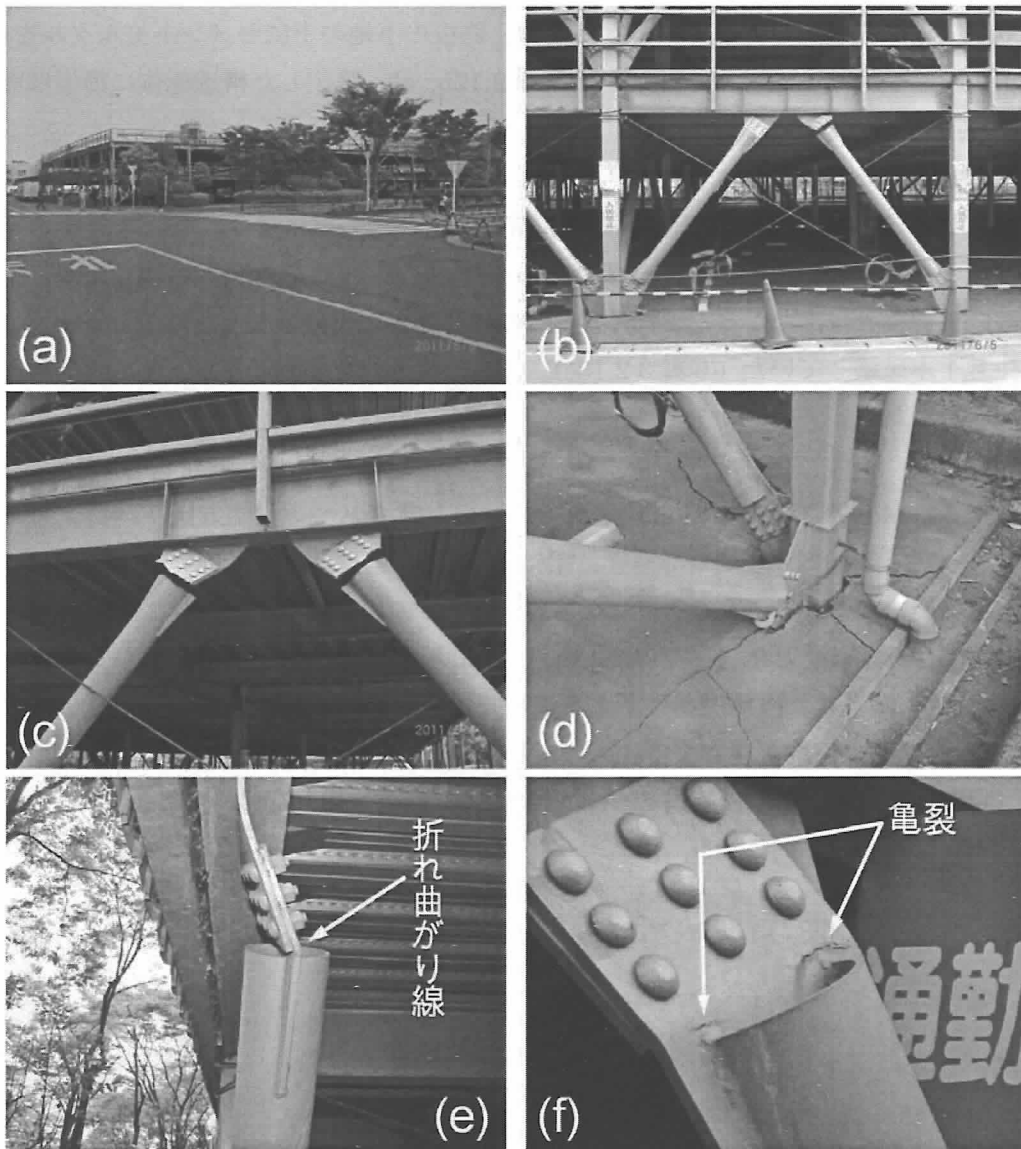


写真 3.2.14 駐車場 B : (a) 外観、(b) K 形筋違、(c) 破断した筋違上端接合部、(d) アスファルト被りの亀裂、(e) 構面外に曲がった筋違上端接合部、(f) 亀裂を生じた筋違接合部。

しく曲がっていた（写真 3.2.14e, f）。桁行方向（東西方向）の方が梁間方向（南北方向）よりも破断の頻度が高かった。損傷の原因は接合部詳細にあり、接合部の構面外曲げ剛性が低く、鋼板を継ぐ接合部の形状が軸力の作用軸に対して偏心しているために、小さな圧縮力の作用で接合部は構面外に曲がる。曲げ変形は筋違端と継板の間のわずかな部分に集中し、この折れ曲がり線に大きな塑性変形を生じる（写真 3.2.14e）。また、ガセット板がせん断応力の流れに準じていないために、引張応力は筋違鋼管壁から外縁ボルトに伝達される。したがって、小さな引張・圧縮交番载荷を少数回受けるうちに筋違鋼管壁の近傍で亀裂が発生し（写真 3.2.14e）、接合部の破断に至るのである。

4. 津波による被害

今回の地震により、岩手県、宮城県、福島県、茨城県の太平洋沿岸各市町村は甚大な津波被害を受けた。三陸海岸の港湾では、湾口の奥に位置する地勢条件もあって津波遡上高さが 20 メートルを超えた場所もあり^{2, 3)}、津波の破壊力は想像を絶した。本章では、仙台市若林区と宮城野区の海岸、名取市、石巻市、女川町で調査した津波被害を述べる。

4-1 仙台市

仙台市若林区の小学校、仙台港の多目的施設と港湾施設を調査した。仙台港の津波浸水高さは 8 メートルと報告されている⁵⁾。

(a) 小学校校舎 A

写真 4.1.1 の小学校校舎 A は太平洋岸から 1 キロと離れておらず、津波で壊滅した住宅地区にある。RC 造の 4 階建てで、内付 S 造筋違により耐震補強されている。今回の地震では津波避難ビルとして利用され、大勢の児童と市民の命を救った。1 階教室内（写真 4.1.1d）はもちろん、2 階ベランダにまで津波が運んだ浮遊物が堆積しており、津波被害の恐ろしさを目の当たりにした。外壁が損傷したものの、構造被害は認められなかった。

(b) 小学校体育館 A

写真 4.1.2 の小学校体育館 A は、小学校校舎 A と同じ学校に属する。S 造で、桁行方向は円弧型のむくりをつけた 2 段筋違付架構、梁間方向はラーメン架構である。全周囲にわ

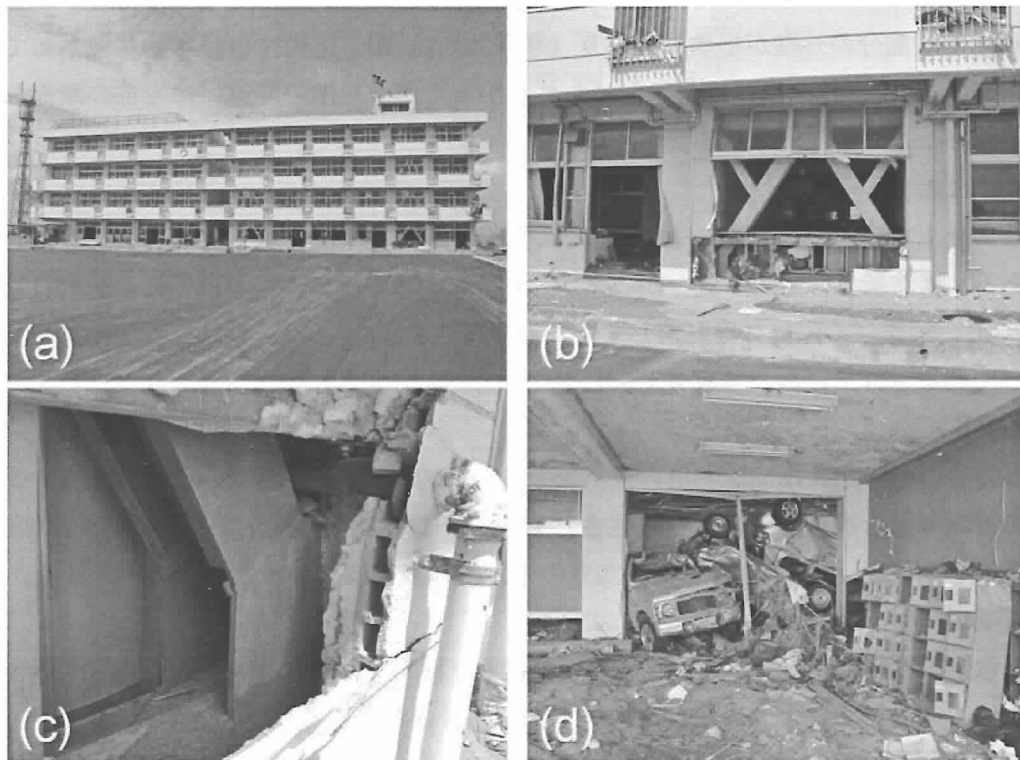


写真 4.1.1 小学校校舎 A : (a) 外観、(b) 津波に洗われた 1 階、(c) 無被害の補強 S 造架構、(d) 土砂と流出物が堆積した 1 階の教室内。



写真 4.1.2 小学校体育館 A : (a) 外観、(b) 外壁の損傷、(c) 堆積物が散乱する室内、(d) 端部の欠損断面で破断した筋違。

たって 1 階部分の外壁が損傷しており（写真 4.1.1a, b）、室内には堆積物が散乱していた（写真 4.1.1c）。柱と梁に損傷は認められなかったが、1 階の筋違には端部の断面欠損部で破断したものがあった（写真 4.1.2d）。

(c) 多目的施設 A

写真 4.1.3 の多目的施設 A は S 造の大空間構造で、津波で甚大な被害を受けた仙台港にある。構造被害は認められなかったが、1 階部分のガラス外壁がほとんど失われ（写真 4.1.3b）、鋼管柱の化粧材が剥落していた（写真 4.1.3c）。この施設は、支援物資の集積場として利用されていた（写真 4.1.3d）。

(d) 倉庫 B

写真 4.1.4 の倉庫 B は仙台港の港湾施設の一つで、大屋根が黒ずみ崩れ落ちていた。津波と火災の複合被害を受けたと推察される。2 階建ての事務所棟は S 造ラーメン架構で、1 階部分の ALC パネル外壁を失ったものの、構造被害はなかった。

4-2 名取市

名取市閑上町は、仙台市若林区の海岸線沿いと同じく津波で壊滅した住宅街である。近くの仙台空港で津波浸水高さが 8 メートルと報告されている⁵⁾。

(a) 建物 A

写真 4.2.1 の建物 A は水際の施設で 2 階建て S 造、3×3 スパンの二方向ラーメン架構である。部材断面は柱が角形鋼管、梁が H 形鋼で、埋込柱脚を用いる。柱と梁に亜鉛メ

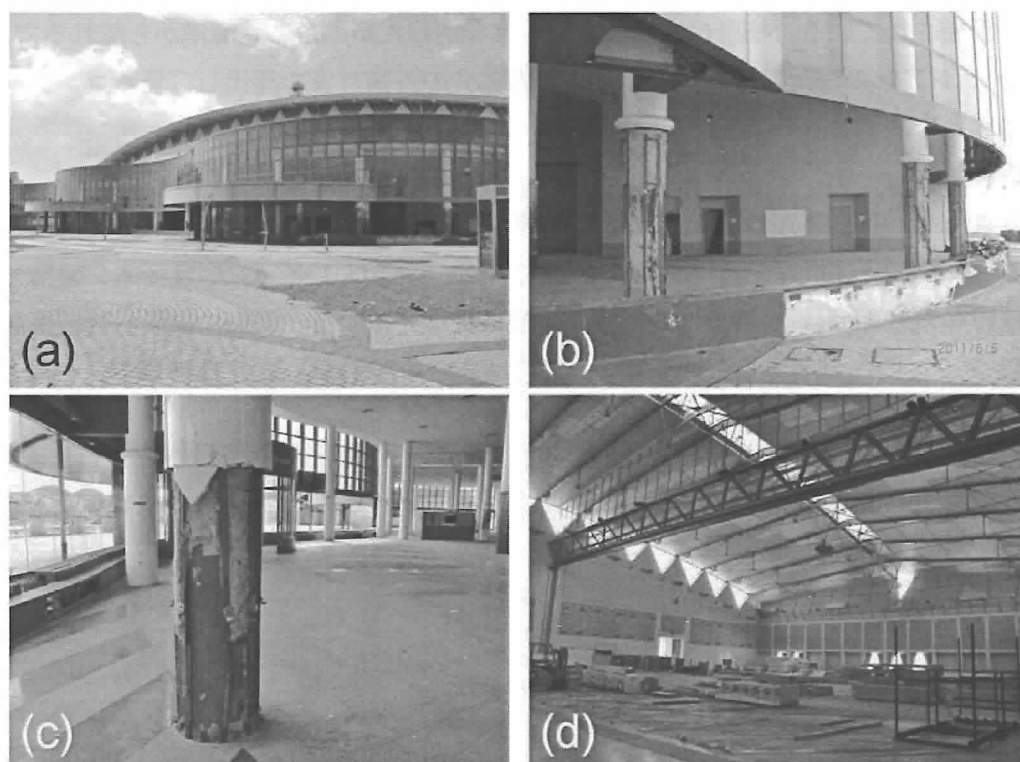


写真 4.1.3 多目的施設 A : (a) 外観、(b) 海岸に面した外壁の損傷、(c) 鋼管柱の化粧材の損傷、(d) 支援物資の集積場として利用される多目的会場。

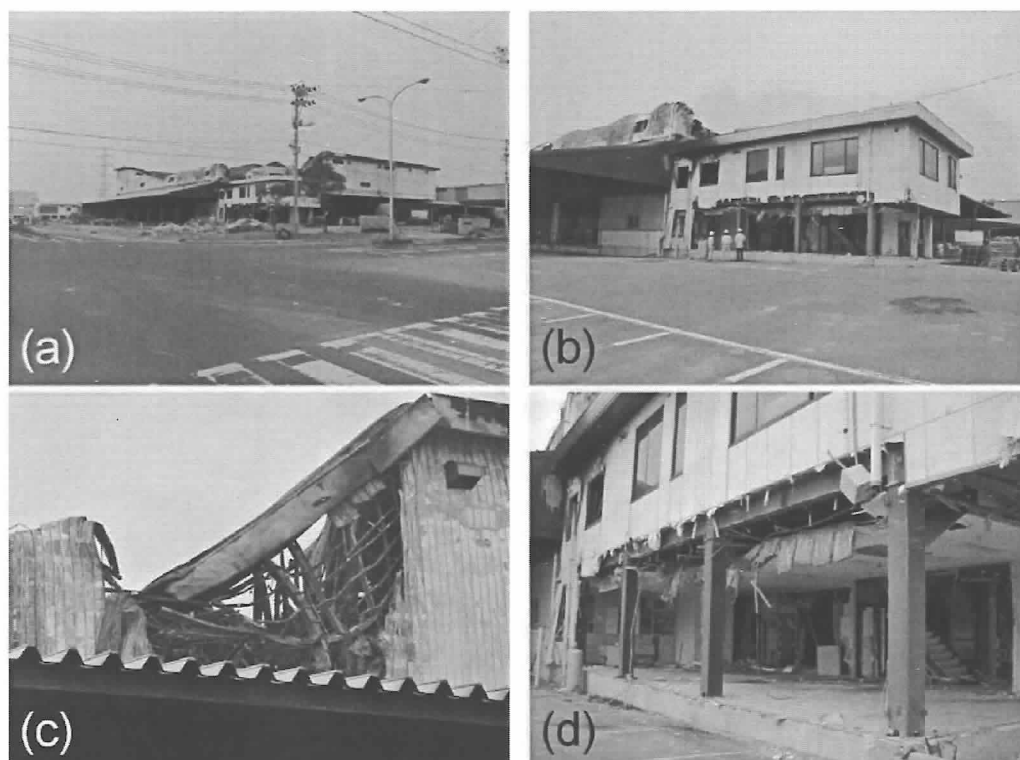


写真 4.1.4 倉庫 B : (a) 外観、(b) 1 階部分の外壁を失った事務所棟、(c) 火災によって崩れたと思われる屋根、(d) 事務所棟の ALC パネル外壁の損傷。

ッキが施されている。柱梁の損傷は認められなかったが、西に（海岸から離れる方向に）
0.01 ラジアン²の残留変形を計測した。2 階部分の外装材まで流出し、軽量コンクリート
パネルの床スラブも破壊されていた。

(b) 工場 A

写真 4.2.2 の工場 A は、いずれも 2 階建て S 造の、既存部分と増築部分で構成されて
いる。既存部分は桁行が 4 スパンの筋違付架構、梁間が 1 スパンのラーメン架構で、部
材は柱も梁も H 形鋼、筋違は山形鋼で、根巻柱脚を用いる。海側に位置した増築部分
は 4×1 スパンの二方向ラーメン架構で、部材は柱が角形鋼管、梁が H 形鋼で、やはり根

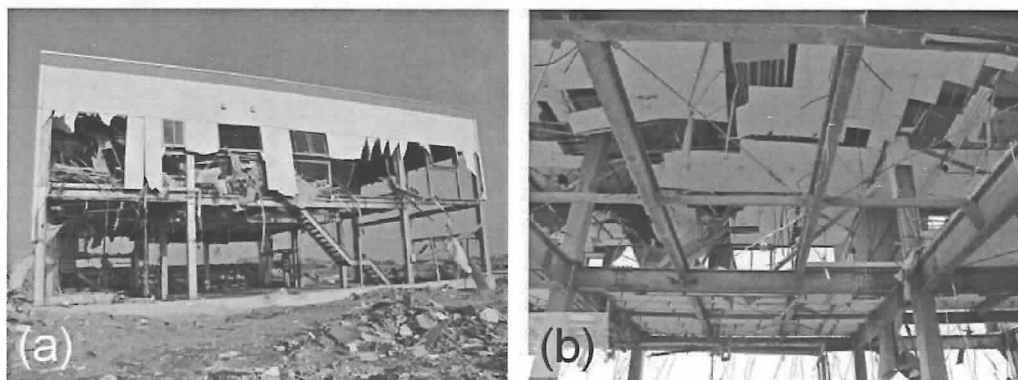


写真 4.2.1 建築物 A : (a) 外観、(b) 床パネルの損傷。



写真 4.2.2 工場 A : (a) 外観、(b) 破壊された X 形筋違、(c) 柱パネルの降伏、(d) 増設部分の梁の曲げ降伏。

巻柱脚を用いる。既存部分は筋違が破断して大きく変形し（写真 4.2.2b）、H 形鋼柱のパネルが降伏していた（写真 4.2.2c）。西に（海岸から離れる方向に）0.03 から 0.04 ラジアン、北に 0.01 ラジアンの残留変形を計測した。増築部分は梁が端部で塑性化していた（写真 4.2.2d）。1 階の内外壁はほぼ流出しており、増築部分は屋根も大幅に損傷していた（写真 4.2.2a）。

4-3 石巻漁港

今回の地震が起きるまで、石巻はわが国有数の漁港として栄えていた。石巻漁港には、水揚げ場、水産加工工場、冷蔵設備、物流倉庫、事務所など多くの漁港施設が整えられ、その多くが S 造であった。ここでは石巻漁港の調査結果を、石巻市および石巻港と分けて述べる。石巻港の津波浸水高さは 8 メートルと報告されている⁵⁾。

(a) 倉庫 C

写真 4.3.1 の倉庫 C は平屋 S 造で、桁行方向は 7 スパンの 2 段筋違付架構、梁間方向は 1 スパンの山形ラーメン架構である。部材は柱も梁も H 形鋼、筋違は山形鋼で、根巻柱脚を用いる。金属外装材がかなり流出し（写真 4.3.1b）、室内に堆積物がうず高く散乱していた。柱梁の損傷は認められなかったが、外構の筋違が破断し（写真 4.3.1c）、軽量鉄骨の階段が柱脚から切断していた（写真 4.3.1d）。

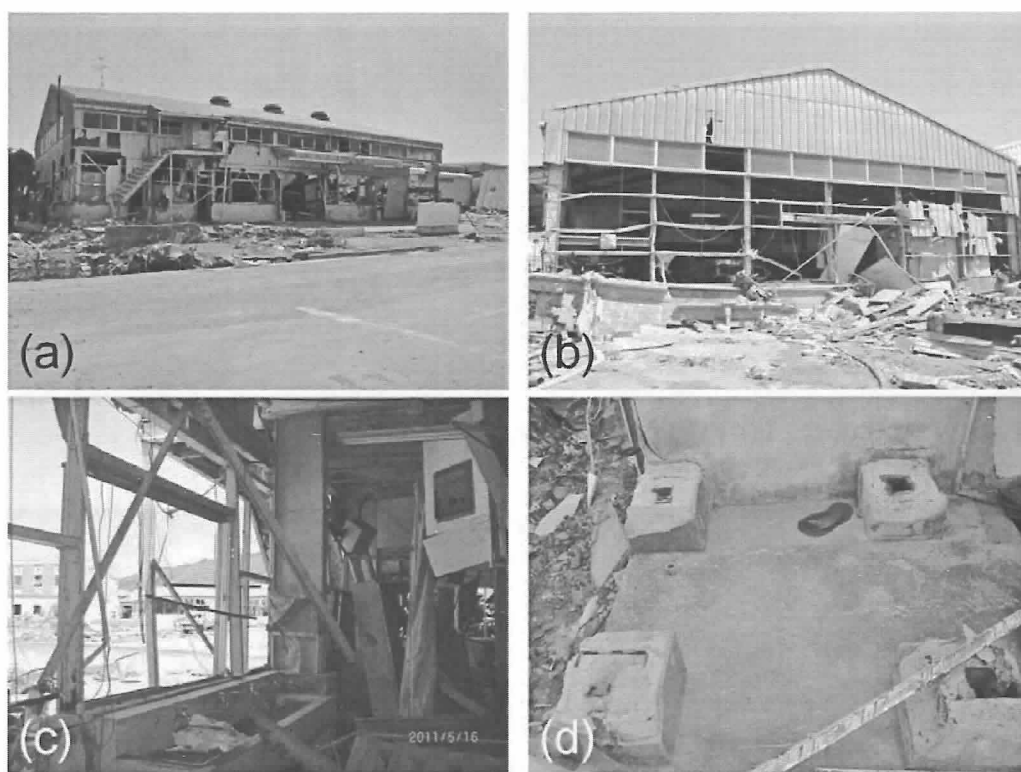


写真 4.3.1 倉庫 C : (a) 外観、(b) 海側の外壁の損傷、(c) 破断した筋違、(d) 破断した階段柱脚部。

(b) 事務所 G

写真 4.3.2 の事務所 G は 2 階建て S 造で、 5×1 スパンの二方向ラーメン架構である。部材は柱が角形鋼管、梁が H 形鋼で、柱脚形式は不明である。構造被害はなかったが、一階の内外装材が甚大な損傷を受けた。

(c) 事務所 H

写真 4.3.3 の事務所 H は 3 階建て S 造で、 3×2 スパンの二方向ラーメン架構である。部材は柱が角形鋼管、梁が H 形鋼で、根巻柱脚を用いる。構造被害はなかったが、外構の間柱が破断しており、一階の内外装材が甚大な損傷を受けた。

(d) 工場 B

写真 4.3.4 の工場 B は 2 階建て S 造で、 8×1 スパンの二方向ラーメン架構である。部材は柱が角形鋼管、梁が H 形鋼で、根巻柱脚を用いる。構造被害はなかったが、周辺地盤の一部に洗堀の跡がある（写真 4.3.4d）。1 階の内・外装材が甚大な損傷を受けた。調査時点で建築物内を清掃中で、営業再開に向けた作業が進められていた。

(e) 工場 C

写真 4.3.5 の工場 C は S 造で、主体部分が 2 階建て 5×4 スパンの二方向ラーメン架構、工場部分が平屋の二方向ラーメン架構である。部材は柱が角形鋼管、梁が H 形鋼で、根

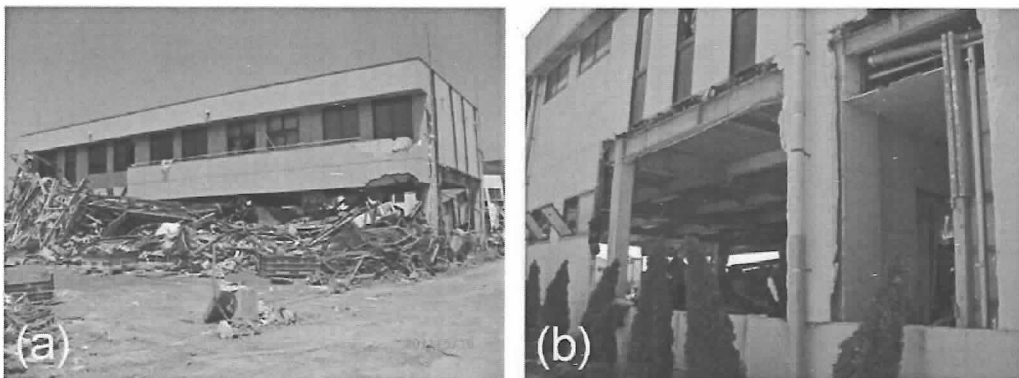


写真 4.3.2 事務所 G : (a) 海側の外観、(b) ALC パネルを失った外壁。

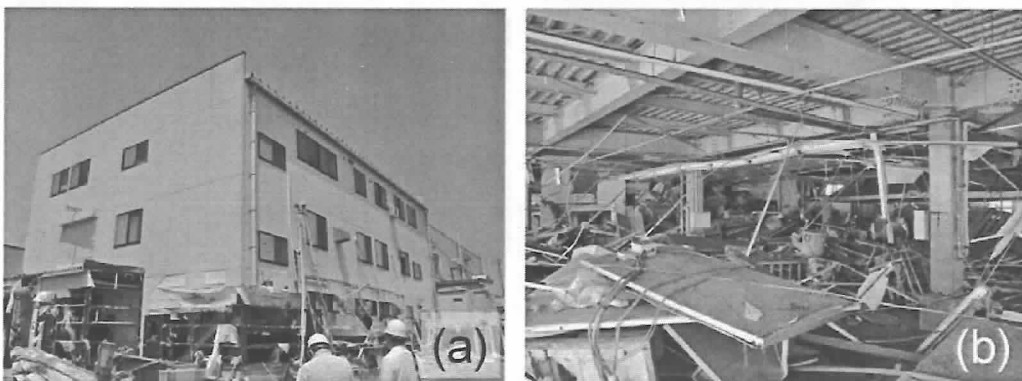


写真 4.3.3 事務所 H : (a) 外観、(b) 堆積物が散乱する室内。

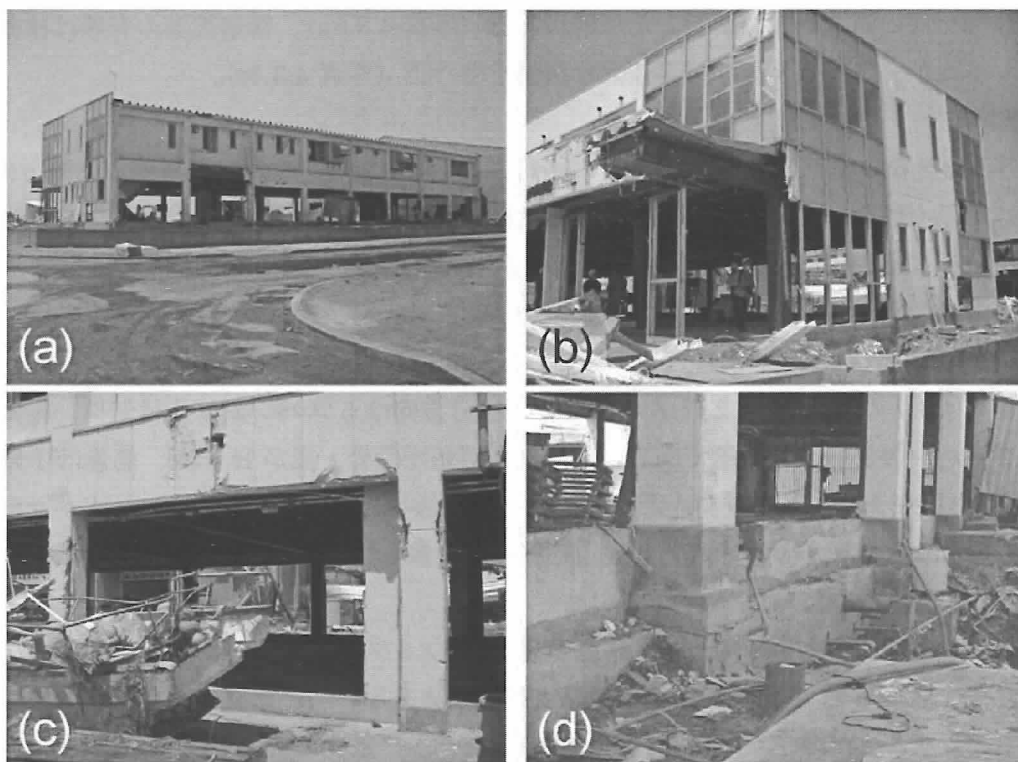


写真 4.3.4 工場 B : (a) 山側の外観、(b) 海側の外観、(c) 流された船舶と外壁の損傷、(d) 周辺地盤の洗堀.



写真 4.3.5 工場 C : (a) 海側の外観、(b) 山側の外観、(c) 内装材や天井材の損傷、(d) 損傷がみられない根巻柱脚.

巻柱脚を用いる。船舶が衝突した形跡がある（写真 4.3.5a）。構造被害の有無は確確できなかったが、内外装と天井材が甚大な損傷を受けた（写真 4.3.5c）。

(f) 倉庫 D

写真 4.3.6 の倉庫 D は平屋 S 造で、桁行方向は 12 スパンの筋違付架構、梁間方向は 1 スパンの山形ラーメン架構である。部材は柱も梁も H 形鋼、筋違は山形鋼で、根巻柱脚を用いる。屋根の水平筋違と桁行方向の筋違に被害はなかったが、海側でブロック塀が倒壊し間柱が破断していた（写真 4.3.6b）。

(g) 工場 D

写真 4.3.7 の工場 D は 2 階建て S 造で、桁行方向は 5 スパンの筋違付架構、梁間方向は 2 スパンのラーメン架構である。部材は柱が角型鋼管、梁が H 形鋼、筋違は 1 階で山形鋼、2 階で丸鋼、根巻柱脚を用いる。柱と梁に被害はなく、1 階筋違にわずかながらボルトの滑りと座屈が確認された。周辺建築物と比較して内外装材の被害は小さかった。

(h) 大規模冷蔵庫 A

写真 4.3.8 の大規模冷蔵庫 A は平屋 S 造で、6×3 スパンの二方向筋違付架構である。部材は柱も梁も H 形鋼、筋違は山形鋼、露出柱脚を用いる。津波で流された隣接建築物が衝突したことが、航空写真から推定できる。柱 2 本に衝突の痕跡があり（写真 4.3.8a, c）、柱脚のアンカーボルトが破断していた（写真 4.3.6d）。海側の外構面の X 形筋違は座屈しており、西側側面で地盤の洗堀の跡が確認された（写真 4.3.8b）。外壁の ALC パネルと、外壁の内側と天井に設置された断熱材が甚大な被害を受けた。

(i) 倉庫 E

写真 4.3.9 の倉庫 E は平屋 S 造で、桁行方向は 6 スパンの筋違付架構、梁間方向は 1 スパンの山形ラーメン架構である。部材は柱も梁も H 形鋼、筋違は山形鋼で、露出柱脚を用いる。大規模冷蔵庫 A と同じく、津波で流された隣接建築物が衝突したことが航空写真から推定できる。室内に発泡スチロールが散乱していた（写真 4.3.9a, b）。海側の外構面の柱に衝突痕があり（写真 4.3.9b）、山形ラーメンの柱梁パネルが降伏し、二次部材の損傷も著しかった。屋根筋違に被害は見られなかった。山側の外構面では柱脚のアンカ

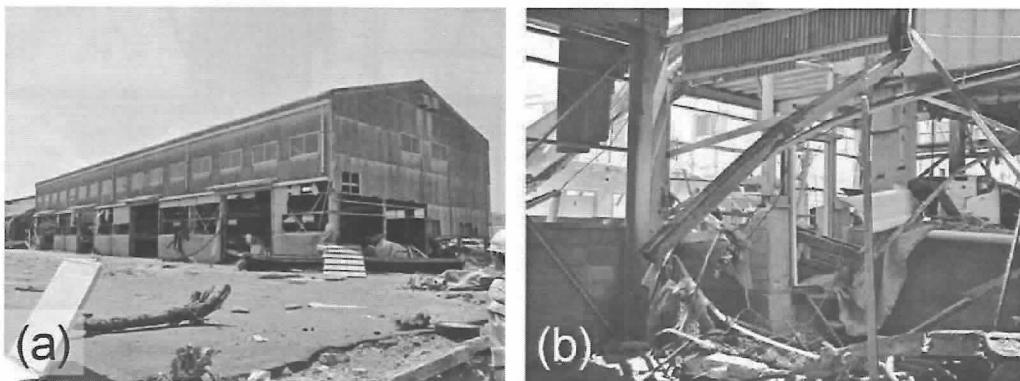


写真 4.3.6 倉庫 D : (a) 外観、(b) 倒壊したブロック塀と破断した間柱。

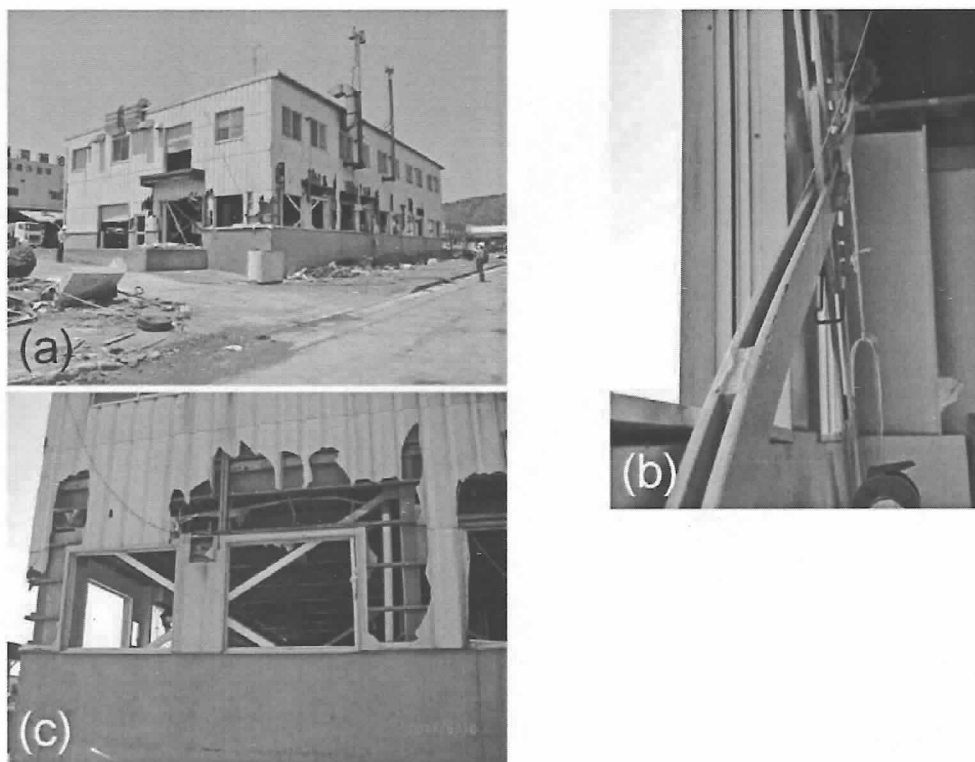


写真 4.3.7 工場 D : (a) 外観、(b) 損傷した外壁、(c) 座屈した X 形筋違.

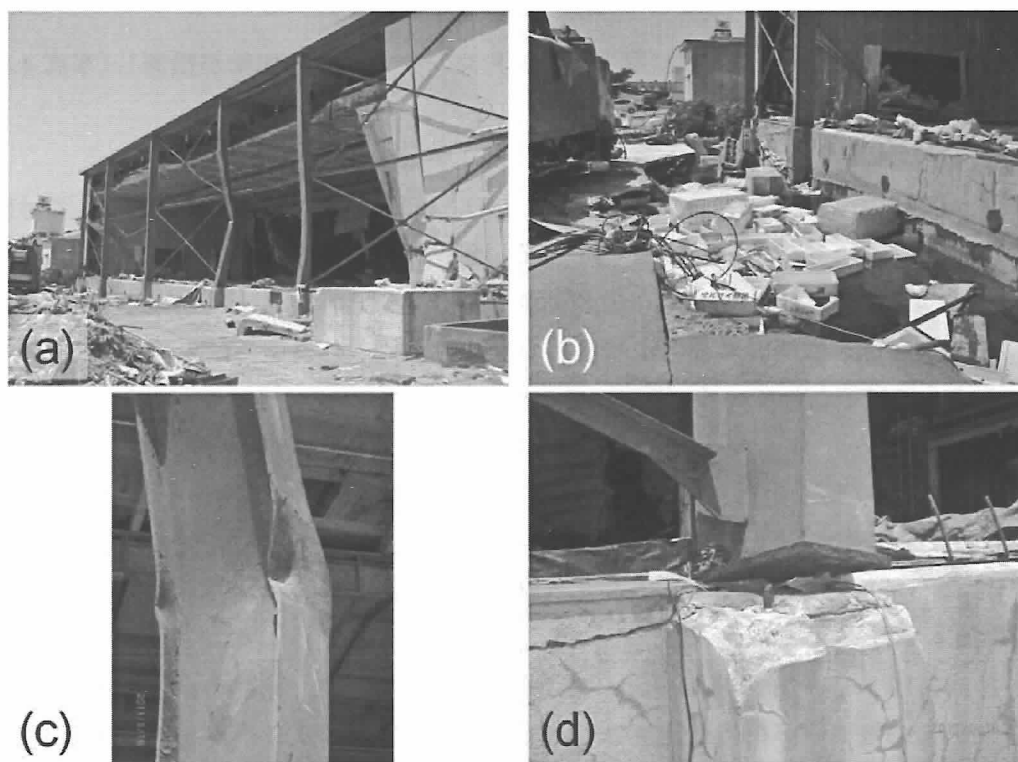


写真 4.3.8 大規模冷蔵庫 A : (a) 海側の外観、(b) 周辺地盤の洗堀、(c) 流出物との衝突痕、(d) アンカーボルトが破断した柱脚.

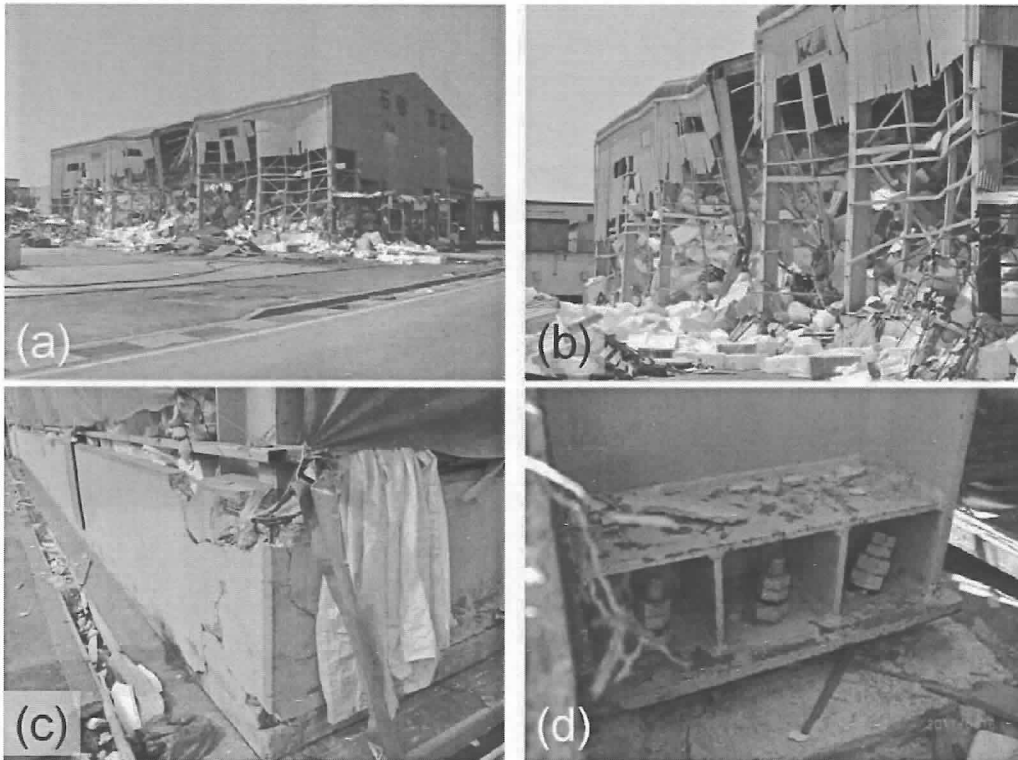


写真 4.3.9 倉庫 E : (a) 外観、(b) 流出物との衝突で生じた変形、(c) 柱脚の被りコンクリートの剥落、(d) 破断したアンカーボルト。

ーボルトがせん断破断していた(写真 4.3.9d)。コンクリートの側壁が損傷し(写真 4.3.9c)、外装材の被害は甚大であった。

(j) 大規模冷蔵庫 B

写真 4.3.10 の大規模冷蔵庫 B は平屋 S 造で、桁行方向はスパン数不明の筋違付架構、梁間方向は 1 スパンのラーメン架構である。筋違に山形鋼を用い、柱脚は露出形式である。海側で地盤沈下し(写真 4.3.10b)、海水が床下から噴き出した形跡が残る(写真 4.3.10c, d)。不思議なほど海側の外構面に損傷が少なく、山側の外構面では大扉が内から押し出されるように破壊されている(写真 4.3.10a)。

(k) 事務所 I

写真 4.3.11 の事務所 I は 2 階建て S 造で、 3×2 スパンの二方向ラーメン架構である。部材は柱が角型鋼管、梁が H 形鋼、柱脚は埋込形式を用いる。柱と梁に被害はないものの、ALC パネル外壁が流出し、天井と ALC パネルの二階床材も著しく損傷していた。

(l) その他

写真 4.3.12 に、石巻漁港で撮影した小規模建築物を示す。家屋や小売店舗と思われる木造や S 造の建築物が相当数倒壊していた。倒壊した小規模 S 造建築物の多くは露出柱脚を採用しており、柱脚アンカーボルトの損傷が初層の大変形につながったように推察された。

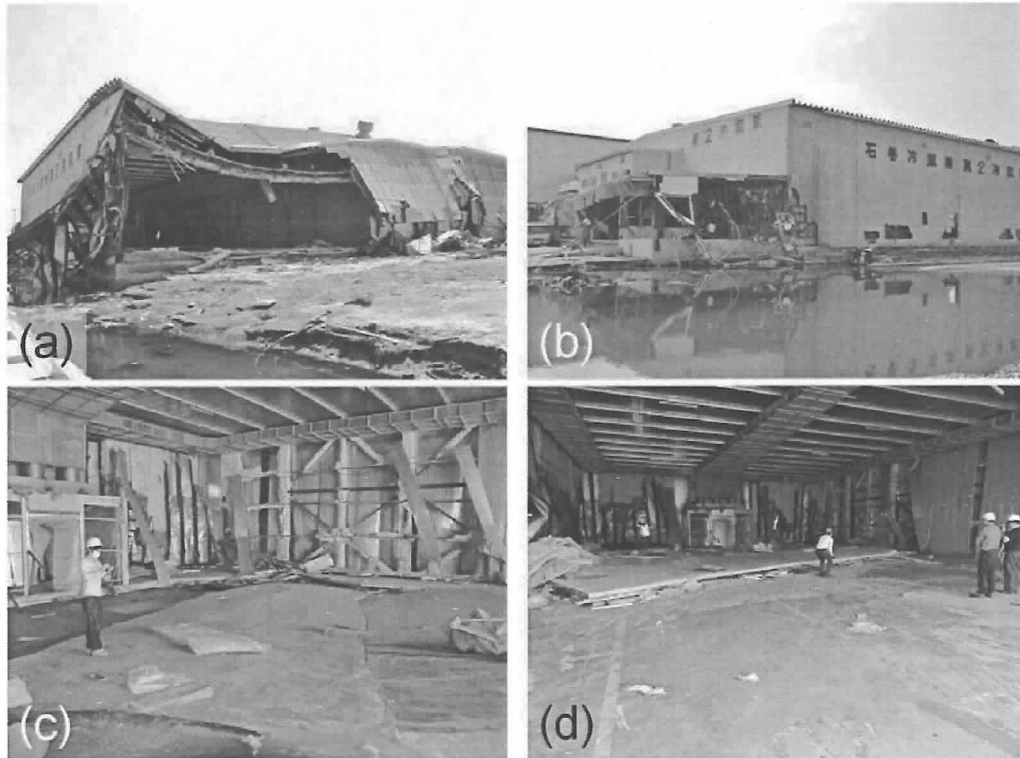


写真 4.3.10 大規模冷蔵庫 B : (a) 山側で大扉が外に押し出されるように破壊、(b) 地盤沈下を生じた海側、(c) (d) 海水が床下から噴き出した形跡。

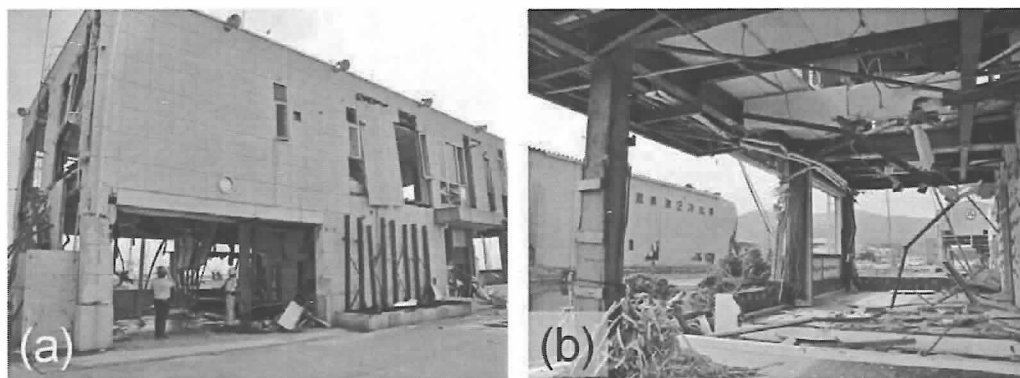


写真 4.3.11 事務所 I : (a) 外装材の損傷、(b) 内外装材が流出した 1 階。

4-4 石巻港とその近辺

ここでは、石巻漁港を除いた石巻市内の津波被害を、石巻港の港湾設備を中心に述べる。高校体育館 A は石巻漁港のすぐ東にあり、病院 A は石巻湾に注ぎこむ北上川に面している。その他の建築物は石巻港の港湾設備群の一部である。

(a) 高校体育館 A

写真 4.4.1 の高校体育館 A は石巻湾とは松林で隔てられたものの、海岸線から 200 メートルと離れておらず、甚大な津波被害を被った。この建築物は平屋 S 造で、桁行方向



写真 4.3.12 小規模建築物の被害：(a) 倒壊した家屋群、(b) 倒壊した S 造建築物、(c) 大きく変形した S 造建築物、(d) 初層に大変形を生じた S 造建築物。

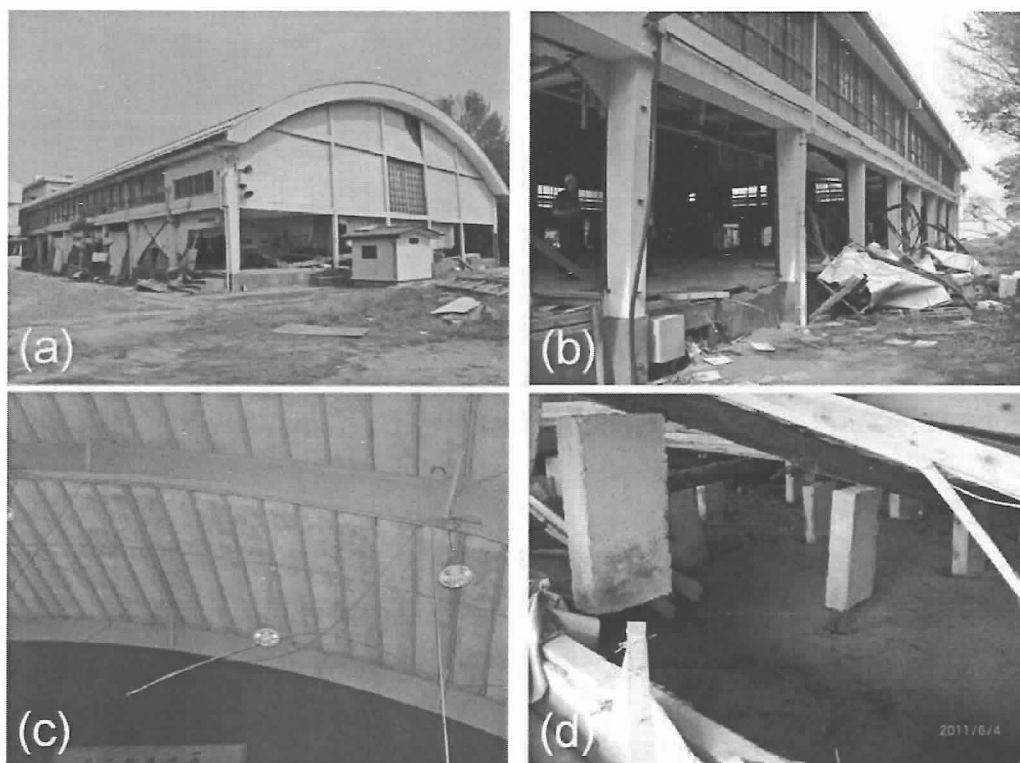


写真 4.4.1 高校体育館 A：(a) 外観、(b) 海側の外構面、(c) 端部ボルトが破断した天井筋違、(d) 床がせりあがった部分の基礎では、束石が接地していない。

は 9 スパンの筋違付架構、梁間方向は円弧ラーメン架構である。柱と梁に H 形鋼を、筋違に山形鋼を用い、柱脚は根巻形式を用いる。柱と梁、筋違に損傷はなかった。天井筋違のうち断面が小さい丸鋼筋違の多くで端部ボルトが破断し（写真 4.4.1c）、断面が大きい山形鋼筋違に損傷はなかった。海側の外構面では、1 階部分の外装材が全て流出していた（写真 4.4.1b）。床がせりあがった部分の基礎では、束石が接地していなかった（写真 4.4.1d）。

(b) 病院 A

写真 4.4.2 の病院 A は、津波で壊滅した住宅街の中にある。4 階建てで、構造形式は RC 造もしくは SRC 造と思われる。1 階部分の外装材と室内に甚大な被害を受け（写真 4.4.2b, c）、室内には土砂と堆積物があり、診察を行える状況でなかった（写真 4.4.2d）。

(c) 倉庫 F

写真 4.4.3 の倉庫 F は、平屋 S 造で、桁行方向に 6 スパンの筋違付架構、梁間方向に 1 スパンの山形ラーメン架構である。柱と梁に H 形鋼とラチス鋼材、筋違に山形鋼を用い、柱脚は露出形式である。外装材が流出し二次部材が被害を受けたものの、構造躯体は健全な状態であった。

(d) 倉庫 G

写真 4.4.4 の倉庫 G は倉庫 F に隣接する平屋 S 造で、桁行方向に 4 スパンの筋違付架

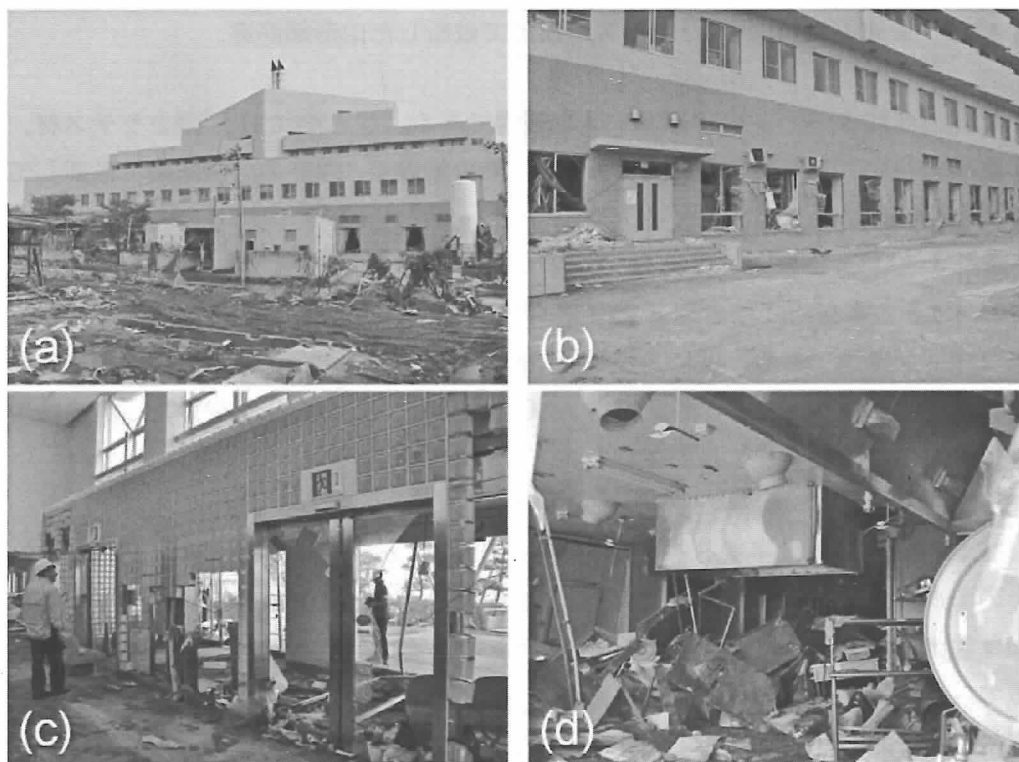


写真 4.4.2 病院 A : (a) 外観、(b) 1 階部分の外装材の被害、(c) 室内玄関、(d) 診察室と思われる室内。

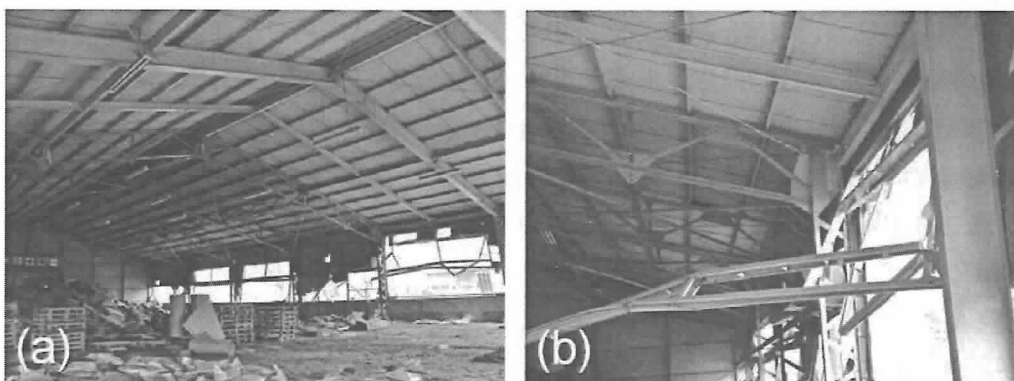


写真 4.4.3 倉庫 F : (a) 土砂が堆積した室内、(b) 非構造部材の被害。

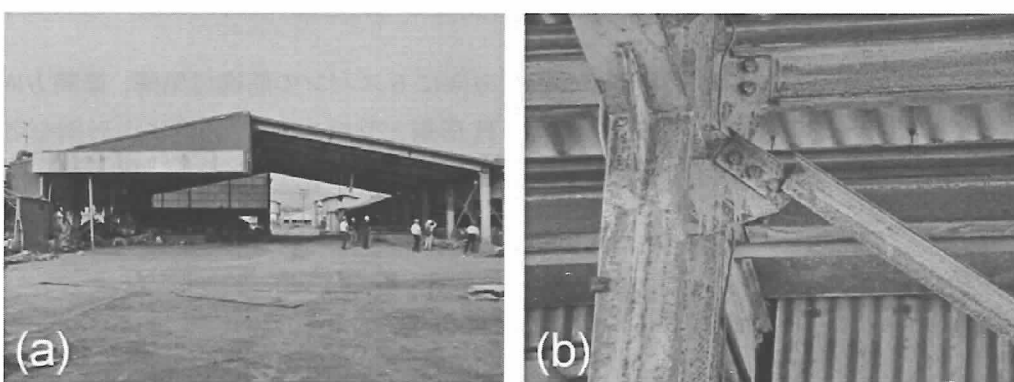


写真 4.4.4 倉庫 G : (a) 外観、(b) 欠損断面で破断した山形鋼筋違。

構、梁間方向に 1 スパンの山形ラーメン架構である。柱と梁に H 形鋼とラチス材、筋違に山形鋼を用い、柱脚は露出形式である。一部の筋違が、端部の欠損断面で破断していた（写真 4.4.4b）。

(e) 事務所 J

写真 4.4.5 の事務所 J は倉庫 F と倉庫 G に隣接する 3 階建て S 造で、 3×2 スパンの二方向ラーメン架構である。柱に角型鋼管、梁に H 形鋼を用い、柱脚は埋込形式である。柱と梁に損傷はなかったが、外装材の ALC パネルに大きな被害を受けた。津波は 1 階の天井に達しなかったように推察された。

(f) 倉庫 H

写真 4.4.6 の倉庫 H は平屋 S 造で、桁行方向に 9 スパンの筋違付架構、梁間方向に 1 スパンの山形ラーメン架構である。柱と梁に H 形鋼、筋違に丸鋼のターンバックルを用い、柱脚は露出形式である。海に面した 1, 2 スパンが倒壊しており（写真 4.4.6a）、北に向かって（海から離れる方向に）西外構面で 0.02 ラジアン、東外構面で 0.09 ラジアンの残留変形を計測した（写真 4.4.6b）。全スパンの筋違において、端部ボルトが破断していた。屋根筋違には端部ボルトが破断したもの、大きくたわんだものが多数あった（写真 4.4.6c）。山形ラーメンの頂部付近が降伏しており（写真 4.4.6d）、山形ラーメン梁のうち

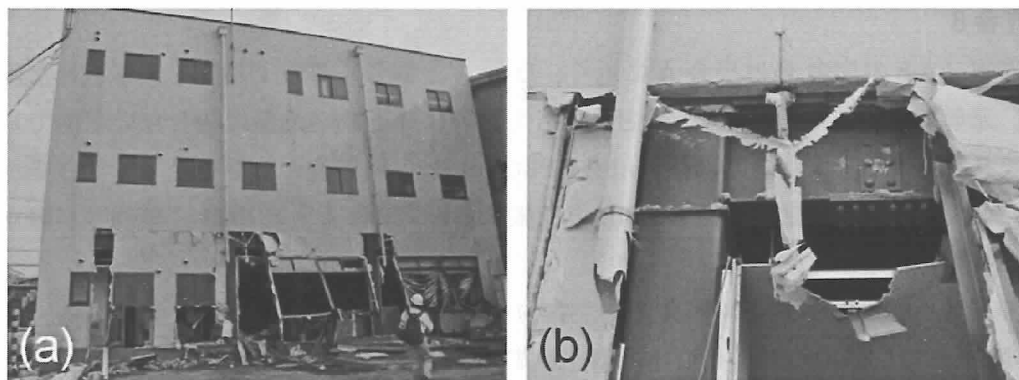


写真 4.4.5 事務所 J : (a) 外観、(b) 露出した構造躯体.

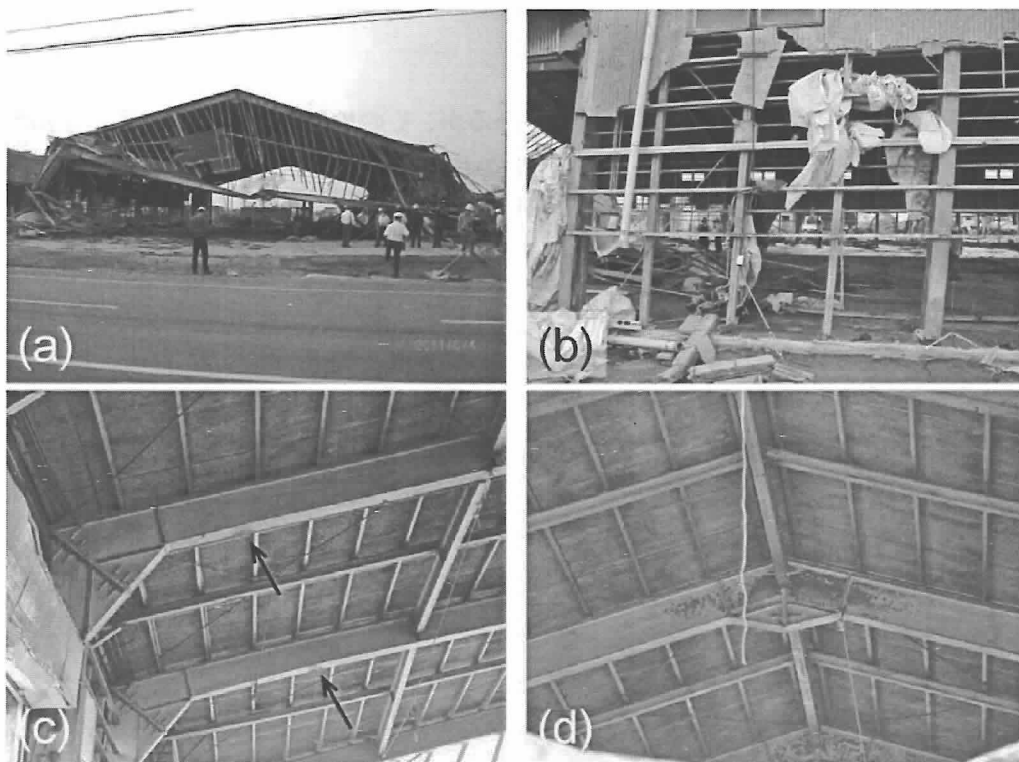


写真 4.4.6 倉庫 H : (a) 外観、(b) 梁間方向に生じた残留変形、(c) 山形ラーメン梁に残る打痕、屋根筋違の変形、(d) 山形ラーメン頂部パネルの塑性変形.

数か所に打痕が認められた (写真 4.4.6c の矢印)。

(g) 庁舎 A

写真 4.4.7 の庁舎 A は 1973 年に建設された建築物で、津波で基礎を洗掘された例である。基礎杭の多くが高さ 1 メートルほども露出しており、基礎底面の半分が地盤に接していない状態であった。構造種別は RC 造で、露出した基礎杭群の位置から察して、 7×2 スパンの二方向ラーメン架構だと推定できる。基礎梁に損傷はなく、上部構造に目立った構造被害はなかった。

(h) 庁舎 B

写真 4.4.8 の庁舎 B は庁舎 A に近く、庁舎 A と同じく津波で基礎を洗堀された例である。基礎杭が高さ 1 メートルほど露出しており、建築物が地盤に接しない状態で基礎杭に支持されていた。基礎梁に損傷は見られなかった。同程度の洗堀を受けて基礎梁が大きくたわんだ隣接建築物 (写真 4.4.8b) と比較すると、庁舎 A と庁舎 B の剛強さが際立つ。

(i) 倉庫 I

写真 4.4.9 の倉庫 I は平屋 S 造で、7×1 スパンの二方向ラーメン架構である。柱も梁も H 形鋼で、露出柱脚を用いる。露出柱脚の下でコンクリートが若干損傷し、アンカーボルトが伸びていた。火災と流出物の衝突によるものか、一部の柱が変形していた (写真 4.4.9b)。東西の外構面にはシャッターが取りつくので、もともと筋違が無かったようである。

4-5 女川町

女川湾は典型的なリアス式海岸の良港であるが、その地勢条件が仇となり、女川町は漁港もろとも壊滅的な被害を受けた。女川漁港の津波浸水高さは 15 メートルと報告されている⁵⁾。女川町の建築物の多くは、もとの用途が判別できないほど損傷していた。

(a) 建物 B

写真 4.5.1 の建物 B は 3 階建て S 造で、1×3 の二方向ラーメン架構である。柱も梁も H 形鋼で、根巻柱脚を用いる。洗堀、あるいは液状化と洗堀の両方により、基礎が極端

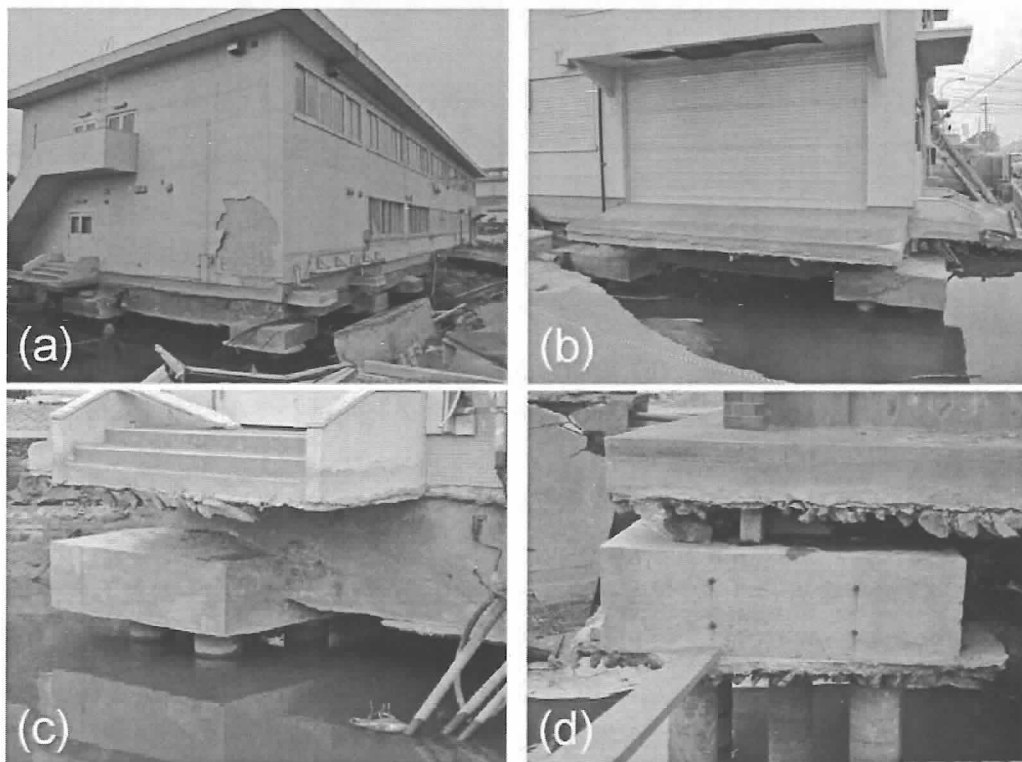


写真 4.4.7 庁舎 A : (a) 外観、(b) (c) 南西角の基礎杭、(d) 北東角の基礎杭。

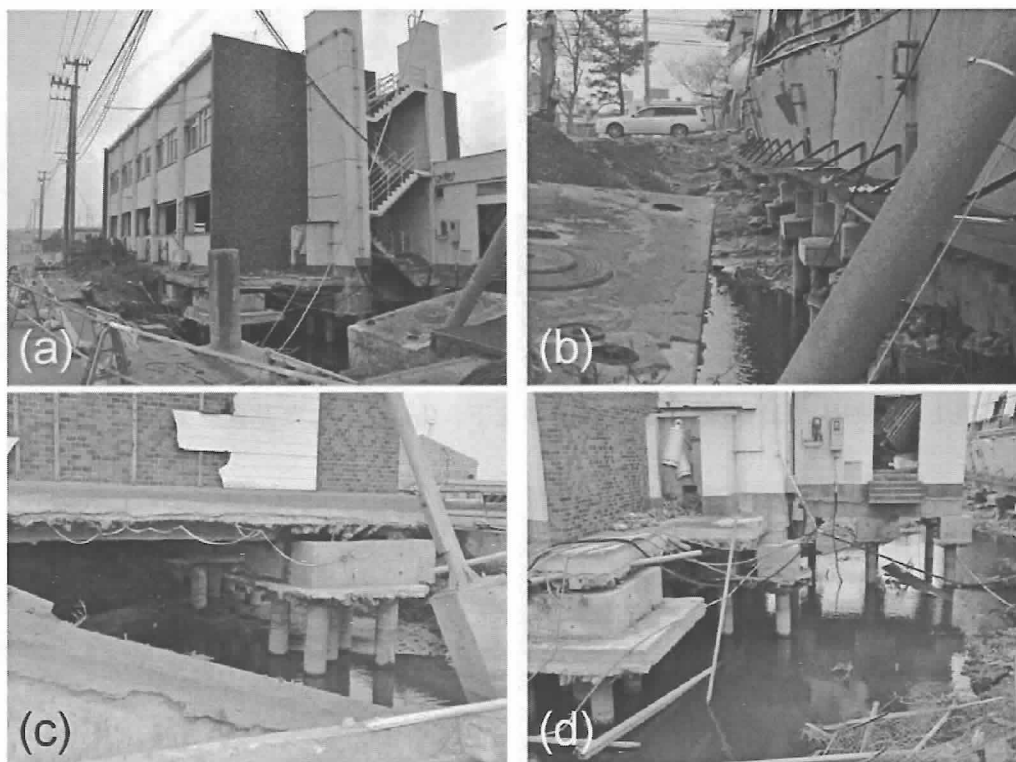


写真 4.4.8 庁舎 B: (a) 外観、(b) 隣接建築物の基礎梁の変形、(c) 露出した基礎杭、(d) 基礎杭群と基礎梁。

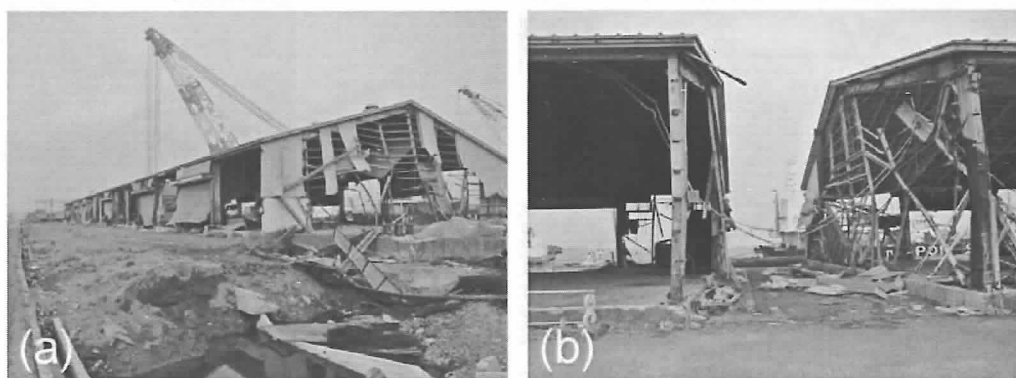


写真 4.4.9 倉庫 I: (a) 外観、(b) 変形した隅柱と間柱。

な不同沈下を起こしたと推察される。柱梁に目立った損傷はないが、内外装材や内容物がほぼ全て流出し、屋根も原型をとどめなかった。

(b) 建物 C

写真 4.5.2 の建物 C は、2 階建て S 造で、桁行方向は 3 スパンの筋違付架構、梁間方向は 1 スパンのラーメン架構である。柱と梁に H 形鋼、筋違に山形鋼を用い、柱脚は根巻形式である。内外装材と屋根材はすべて失われている。二階が極端に桁行方向に傾斜しているが、筋違が破断した結果、水平抵抗力を失って倒壊したと推察される (写真 4.5.2c)。



写真 4.5.1 建物 B : (a) 洗堀による基礎の沈下、(b) 沈下した基礎、基礎杭の跡.

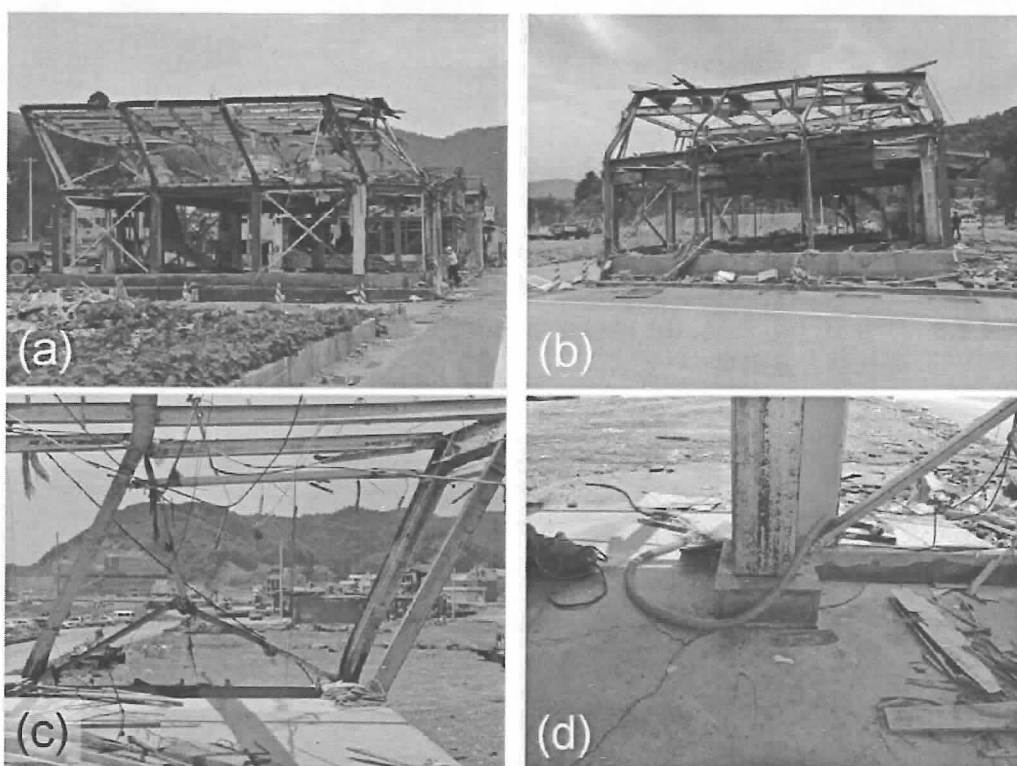


写真 4.5.2 建物 C : (a) 海岸線から離れる方向に 2 階が倒壊、(b) 海に面した正面、(c) 破断した筋違と桁行構面の変形、(d) 根巻柱脚のまわりの損傷.

一階床スラブが根巻柱脚のまわりで損傷していた (写真 4.5.2d)。

(c) 建物 D

写真 4.5.3 の建物 D のうち海側の建築物は 2 階建て S 造で、二方向ラーメン架構だったと思われる。柱に角型鋼管、梁に H 形鋼、柱脚は埋込形式を用いた。内外装材と非構造部材はおろか屋根と軸組に甚大な被害を受けており、元の構造形態を判別できなかった。

(d) 建物 E

写真 4.5.4 の建物 E はペントハウスのついた 3 階建て S 造の事務所で、1×3 スパンの二方向ラーメン架構である。柱に角型鋼管、梁に H 形鋼を用いるが、柱脚形式は確認で

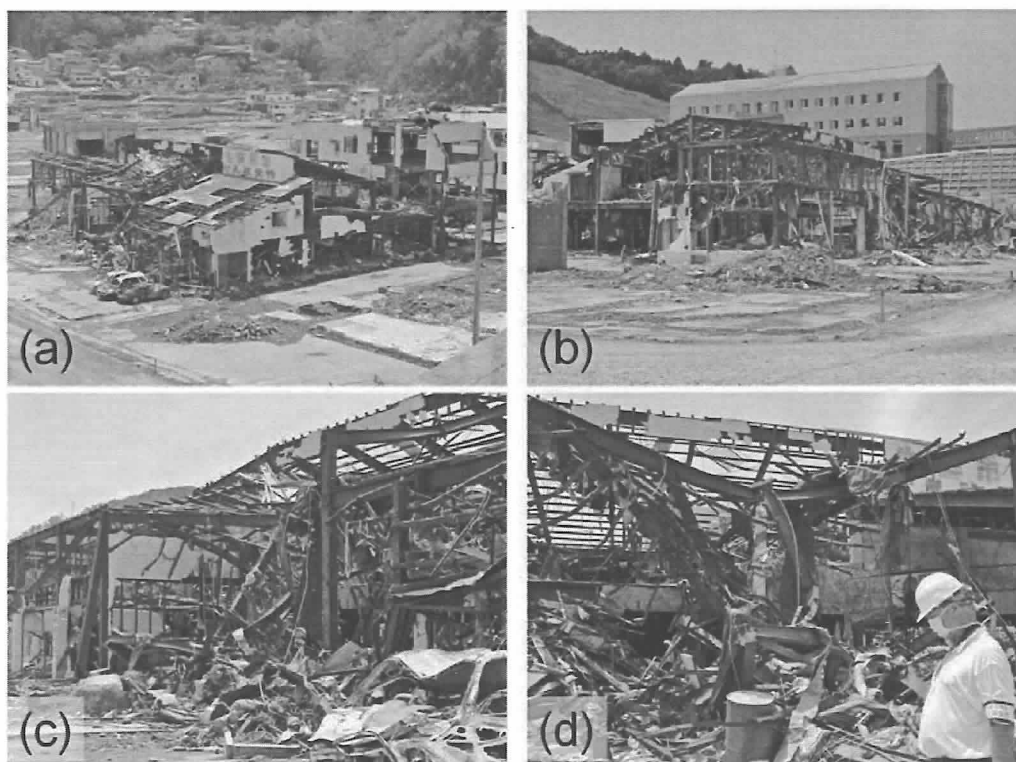


写真 4.5.3 建物 D : (a) (b) 外観、(c) (d) 原形をとどめない構造.

きなかった。鉄筋コンクリートの基礎ごと上部構造が転倒しており、もともとの建設位置から 20 メートルほど流された。基礎との接合部分で全ての杭が破断した(写真 4.5.2d , e, f) が、引き抜かれ破断した状態で残された杭も確認できた。柱と梁に損傷は認められなかった。

(e) 建物 F

写真 4.5.5 の建物 F は 3 階建て S 造で、1×2 スパンの二方向ラーメン架構である。柱に日字形断面鋼材、梁に H 形鋼、柱脚は露出形式を用いる。基礎コンクリートが損傷しており、北に（海側に向かって）0.07 ラジアン の残留変形が計測された。アンカーボルトが伸びて柱脚が回転しており、柱梁接合部で日字形断面柱のカバープレートの隅肉溶接、梁下ハンチの隅肉溶接、上フランジの突合せ溶接などに亀裂が確認された(写真 4.5.5b)。

(f) 建物 G

写真 4.5.6 の建物 G は、間口が小さく奥行きが大きい 2 階建て S 造で、桁行方向は 1 スパンのラーメン架構、梁間方向は筋違付架構である。柱と梁に H 形鋼、筋違に丸鋼のターンバックルを用い、柱脚は露出形式である。流出物の衝突が原因であろうか、隅柱が大きく曲がった(写真 4.5.6b)。

(g) 建物 H

写真 4.5.7 の建物 H は 3 階建て S 造で、2×3 スパンの二方向ラーメン架構である。柱に角型鋼管、梁に H 形鋼を用い、柱脚は埋込形式である。柱と梁に損傷は認められなか

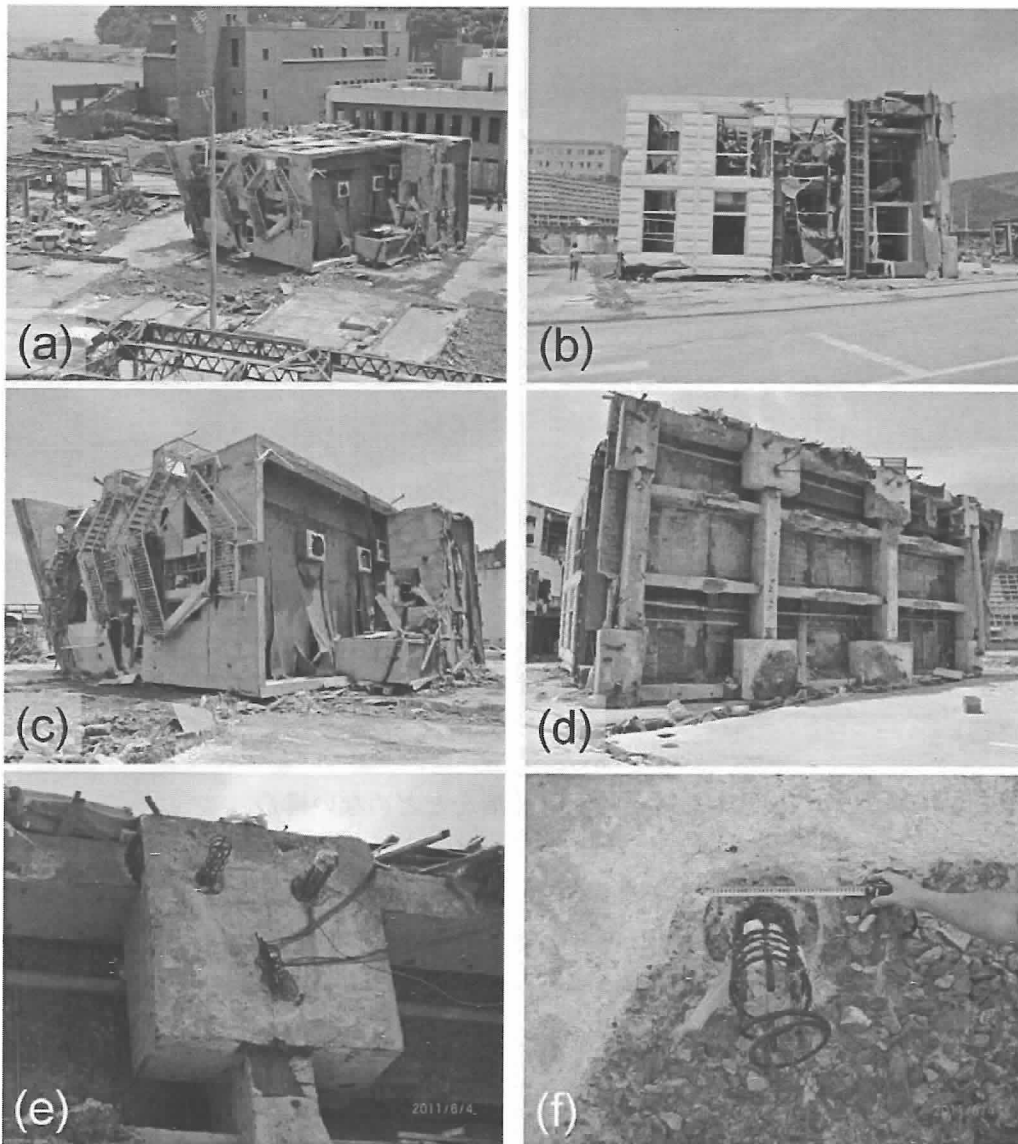


写真 4.5.4 建物 E : (a) 外観、(b) 側面、(c) 屋根裏、(d) 基礎と破壊された杭、(e) 付根で破断した杭、(f) 杭の直径は 30 cm.

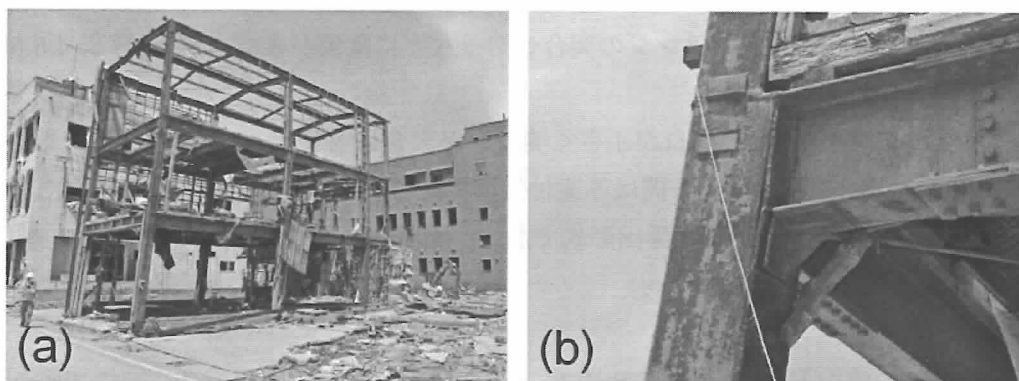


写真 4.5.5 建物 F : (a) 外観、(b) 亀裂を生じた柱梁接合部.

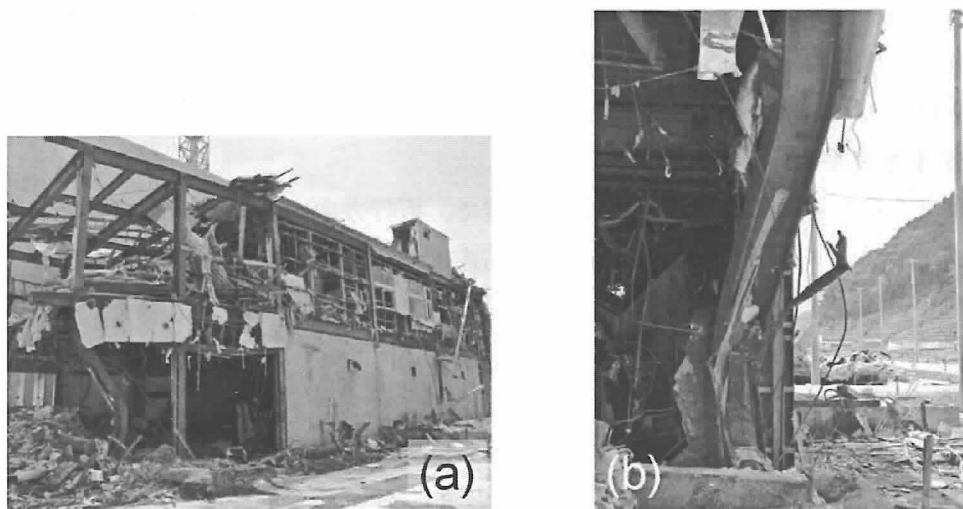


写真 4.5.6 建物 G : (a) 外観、(b) 大きく曲がった隅柱.

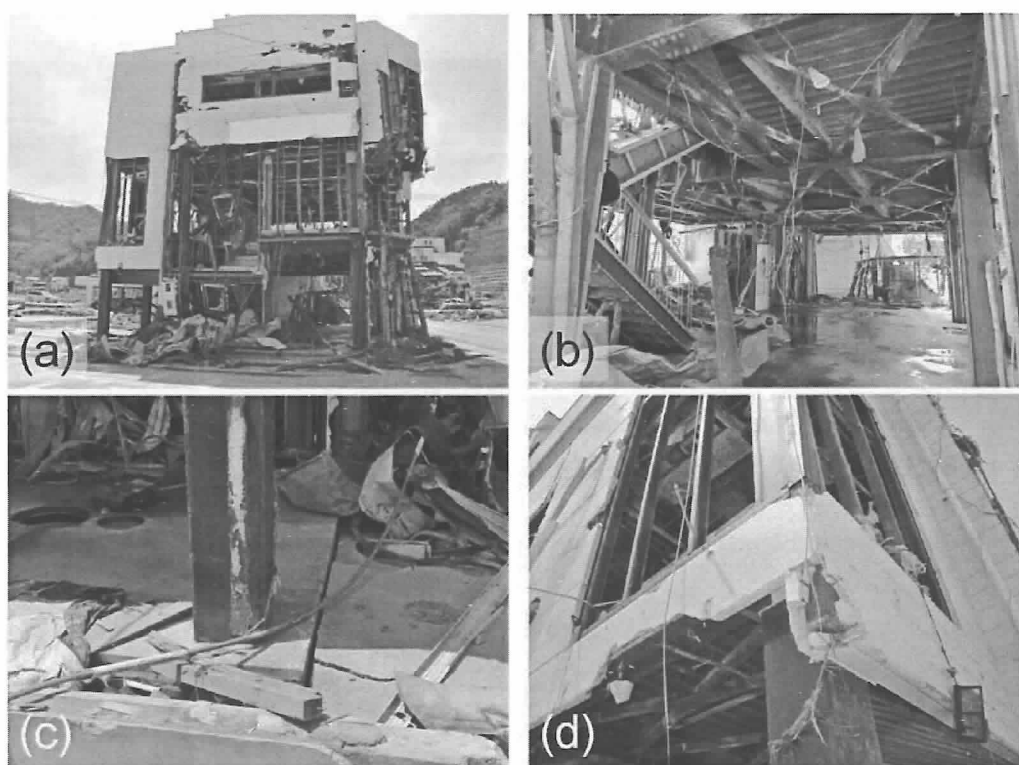


写真 4.5.7 建物 H : (a) 外観、(b) 内装と天井材が流失した室内、(c) 地盤の相対変位、(d) 外装材の破損.

った。内外装材と天井が流出しており（写真 4.5.7a, d）、3 階の天井も大きく損傷した模様である。柱脚と周囲地盤の間に、上下の変動を生じていた（写真 4.5.7c）。

(h) 建物 I

写真 4.5.8 の建物 I は、ペントハウスがついた 2 階建て S 造で、1×3 スパンの二方向

ラーメン架構である。柱に日字形断面材、梁に H 形鋼を用い、柱脚は露出形式である。柱と梁の損傷は認められなかったが、柱脚と基礎の間に間隙を生じていた(写真 4.5.8b)。内外装材と天井はほぼ全て流出していた。

(i) 大規模冷蔵庫 C

写真 4.5.9 の大規模冷蔵庫 C は平屋 S 造で、桁行方向は 8 スパンの筋違付架構、梁間方向は山形ラーメン架構である。柱、梁、筋違に H 形鋼を用い、柱脚は根巻形式である。北に向かって（海から離れる方向に）傾斜しており（写真 4.5.9b）、内壁全面に貼られた断熱材がかなり損傷していた。

(j) 倉庫 J

写真 4.5.10 の倉庫 J は平屋 S 造で、桁行方向に 3 スパンの 2 段筋違付架構、梁間方向に 1 スパンの山形ラーメン架構である。柱と梁に H 形鋼、筋違に山形鋼を用い、柱脚は根巻形式である。山側以外の外構面で外壁が流出していた。筋違は変形したが破断しなかった（写真 4.5.10b）。

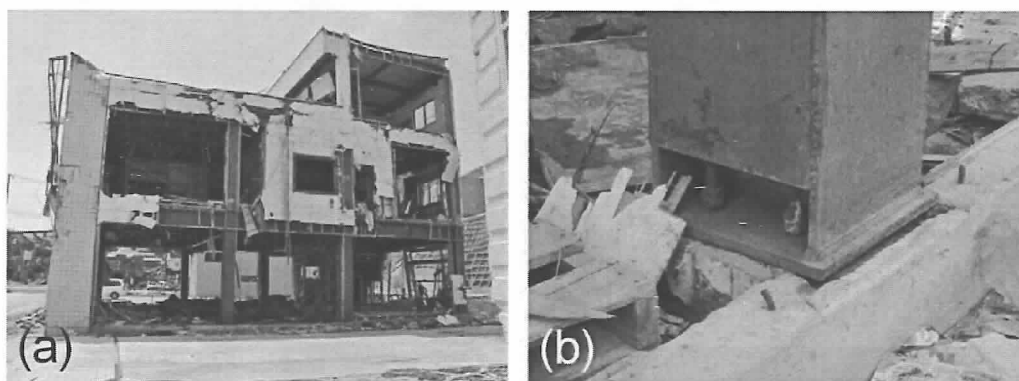


写真 4.5.8 建物 I : (a) 外観、(b) 柱脚と基礎の間の隙間。

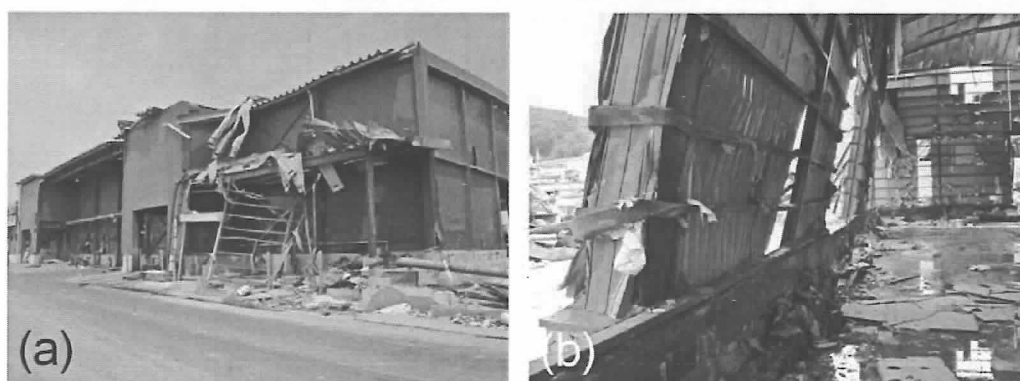


写真 4.5.9 大規模冷蔵庫 C : (a) 外観、(b) 外構面の傾斜と柱脚被りコンクリートの損傷。

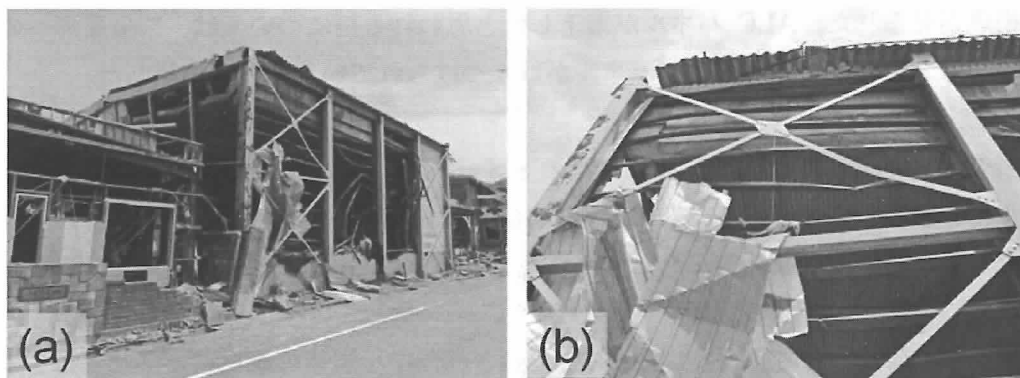


写真 4.5.10 倉庫 J : (a) 外観、(b) 変形した筋違.

5. まとめ

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震のあと、筆者らは 5 月中旬と 6 月初旬の二回に分けて、建築物の被害調査を実施した。今回の地震被害の特徴は、地震動と津波の二様の災害がもたらされたことである。地震動被害については仙台市を調査し、津波被害については仙台市若林区と宮城野区、名取市、石巻市、女川町を調査した。いずれも震度 6 弱を記録した地域である。津波被害を調査した地域では、港湾施設や街区が壊滅していた。最後に、考察を交えて、調査で得た知見をまとめる。

5-1 地震動被害の特徴

各調査地域において、新耐震基準が施行された 1981 年以前に建設された建築物が被害を受けた。築年代が新しい建築物には、木造、軽量鉄骨造、RC 造などの構造種別に関わらず無損傷のものが多かった。

鉄筋コンクリート造には、柱のせん断破壊や壁のせん断破壊が見られ、ごく稀には倒壊あるいは大破した建築物があった。鋼構造ではラーメン架構に被害は見られなかったが、筋違付架構に筋違や筋違接合部が見られた。筋違接合部が損傷した建築物には、1981 年以後に建設されたと思われるものもあり、設計法で改善すべき点が示唆された。鉄骨鉄筋コンクリート造の集合住宅で、全階にわたって非構造壁が損傷したものがあった。木造住宅には、築年代が古いもので、屋根瓦が崩れ落ちたもの、土壁が若干崩れたものがあったが、大きく傾斜したものや倒壊したものはなかった。なお、地盤の不同沈下が原因で著しく傾斜し、利用不可能となった建築物が 2 棟確認された。

1960 年代に建設された同じ大学内の鉄骨鉄筋コンクリート造校舎で、深刻な構造被害を受けたものが 2 棟あった。大学内でこの 2 棟の被害が隣立っていること、2 棟の階数が 9 階と 8 階と似通っていることから、2 棟の固有周期において地震動が卓越した可能性が疑われる。

構造被害を受けなかった建築物のなかにも、内外装材などの非構造部材が損傷したものが多かった。非構造部材の被害は鋼構造建築物に目立ち、ラスモルタル（金属板や木板に金網下地のモルタルを塗布した外装材）、亜鉛めっき鋼板、ALC パネルとあらゆる外装材

に損傷が見られた。ALC パネルが落下したと思われる例については、架構変形への追従性が劣るとされる挿入筋構法でパネルが取り付けられていたことを確認した。

5-2 津波被害の特徴

調査地域の津波浸水高さ⁵⁾は仙台港の8メートル、名取市（仙台空港周辺）の12メートル、石巻港の5メートル、女川漁港の15メートル、とさまざまだったが、いずれの地域でも建築物に甚大な被害がもたらされた。木造住宅や軽量鉄骨造の小規模建築物には、倒壊して跡形もないものが極めて多かった。

事務所や店舗、宿泊施設、工場として建設された中小規模の鋼構造建築物には、津波浸水高さまで非構造部材を全て流出しながら、構造被害をほとんど受けなかったものが多い。2階か3階まで内外装材や床材を流出しながら、残留変形が見られない建築物もある。こうした建築物の場合、壁面を失ったことで津波水圧が減じ、構造被害に至らなかったと推察される。一方で、屋根材まで流出した建築物には倒壊したものがあり、倒壊を免れたものでも残留変形が極めて大きかった。女川町の鋼構造建築物で、倒壊して原形が分からない鋼構造建築物があるが、倒壊機構が推察しがたい。なお、基礎の洗堀や地盤液状化の跡が多くみられ、基礎の洗堀が原因で倒壊したと推察される建築物もある。

一棟だけ調査した石巻市の学校体育館では、外装材を流出しながらも構造躯体に被害はなく、ただ屋根筋違の端部ボルトが多数破断した。この損傷が地震動で生じたものか津波による水平力で生じたものか、判別しがたい。

港湾には工場、水揚げ場、冷蔵設備、物流倉庫など、大空間を有する施設が建設され、その多くは鋼構造建築物である。こうした建築物には、外装材を流出し内容物が破壊され、外構面の筋違を損傷しながら、基礎と柱、梁、屋根構造に被害を受けなかったものが多い。しかし、流出物の衝突が原因で外壁が大破したと思われる建築物が相当数ある。外壁が大破し、あるいは桁行方向のスパンを一部失い、傾斜しながらも、完全倒壊していない大空間施設がある。

6. 謝辞

二回実施した災害調査のうち、第一次調査には村木泰輔君、大友啓徳君（以上、北海道大学大学院生）、第二次調査にはジェイムズ・リクルス教授（リーハイ大学土木工学科）、ディミトリオス・リグノス助教授（マクギル大学土木工学科）、ジェイ・ラブ氏（デゲンコルブ事務所首席）の諸氏が参加した。罹災地でご多忙な中、労を惜しまず協力くださった源栄正人教授（東北大学工学部）に深甚の謝意を表す。

7. 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所(2011)『平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）』<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/pdf/quickreport/0311quickreport_00.pdf> 平成24年2月

23 日採取.

- 2) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011)『東北地方太平洋沖地震津波情報』
<<http://www.coastal.jp/ttjt/index.php>> 平成 24 年 2 月 23 日採取.
- 3) 警察庁緊急災害警備本部 (2012)『平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置』平成 24 年 2 月 23 日付広報資料、<<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>> 平成 24 年 2 月 23 日採取.
- 4) 日本建築学会 (2011)『2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報』丸善株式会社.
- 5) 港湾空港技術研究所 (2011)『東北地方の港湾における被災状況について (現地調査速報)、別紙 2 各港の調査状況について』<<http://www.pari.go.jp/files/items/3463/File/p20110323-3.pdf>> 平成 24 年 2 月 23 日採取.