

十勝沖地震における建築物の被害

—主として八戸市の鉄筋コンクリート造建物について—

Damage to Buildings by '68 Tokachi-Oki Earthquake
—Report on Damage to Reinforced Concrete Buildings in Hachinohe City—

田 中 尚*・岡 田 恒 男**

Hisashi TANAKA and Tsuneo OKADA

5月16日午前9時49分に青森・北海道地方を襲った十勝沖地震により建築物に多くの被害を生じた。筆者達は地震発生直後に現地におもむき約1週間の調査を行ない、その後も引続き八戸市における鉄筋コンクリート造建物を特にとりあげ、被害原因の調査研究を行なっているのでその概要を紹介する。

1. まえがき

今年5月16日午前9時49分に、東北・北海道地方を襲った十勝沖地震により建築物に多くの被害が発生した。

特に耐震的であるとされている鉄筋コンクリート造建築のいくつかがかなりの被害をうけたことは、われわれ建築構造を専攻しているものにとっては非常にショッキングな出来事であった。と同時にこのような機会に現地におもむき実状を調査することは、今後の建築物の耐震性を確立させるためにも必要なことであると考え、本所に組織された震害調査団のメンバーとして特に建築関係の被害を中心に調査を行なったので、その概要を記したい。

なお、今回の被災地域は、青森県・岩手県および北海道の広範囲にわたっているため、一調査団で全域にわたり詳細調査を行なうことは不可能であることが予想された。このため、建築学会では、東北地方は東北大、北海道地方は北大が連絡の中心となり各関係機関の調査団が分担協力する体制をとった。

われわれ調査団もこの趣旨にそい、鉄筋コンクリート造建築の被害が比較的多かった青森県八戸市を中心として調査を行ない、その後、八戸市立図書館および八戸市庁舎を特にとりあげ被害の原因などについて解析検討を進めているので、ここでは主として八戸市内の被害およびその後の検討結果の一部をとりあげた。

2. 調査活動日程

5月16日	午前9時49分地震発生
17日	本所にて岡本教授を中心として調査活動の方針を検討。建築班は田中・岡田以下田中研・川股研の技官・大学院生計7名の派遣を決定。
18日	22時上野発急行“北星”にて現地に向き出発(車中泊)。
19日	盛岡、三戸を経て八戸着。八戸市内の被害の概況を調査(八戸泊)。
20日	八戸市立図書館および八戸市庁舎の詳細調査ならびに三沢・七戸地区概況調査(八戸泊)。

21日	八戸市立図書館および八戸市庁舎の詳細調査ならびに八戸市内鉄筋コンクリート被害建物の概況調査(八戸泊)。	
22日	八戸市立図書館、市庁舎まわりの聞きこみ調査ならびに市内の概況調査(八戸泊)。	
23日	調査団を八戸市内の追加調査班と、青森県下、北海道の概況調査班の2班にわけ調査を続行。 八戸班	青森県下、北海道班
	八戸市庁舎詳細調査(八戸泊)。	三沢・むつ市概況調査(下風呂泊)。
24日	八戸市内鉄筋コンクリート造建物聞きこみ調査(八戸泊)。	函館市概況調査(東大沼泊)。
25日	八戸市庁舎再調査夜行列車にて帰京(車中泊)。	函館市・青森市概況調査(青森泊)。
26日		帰京

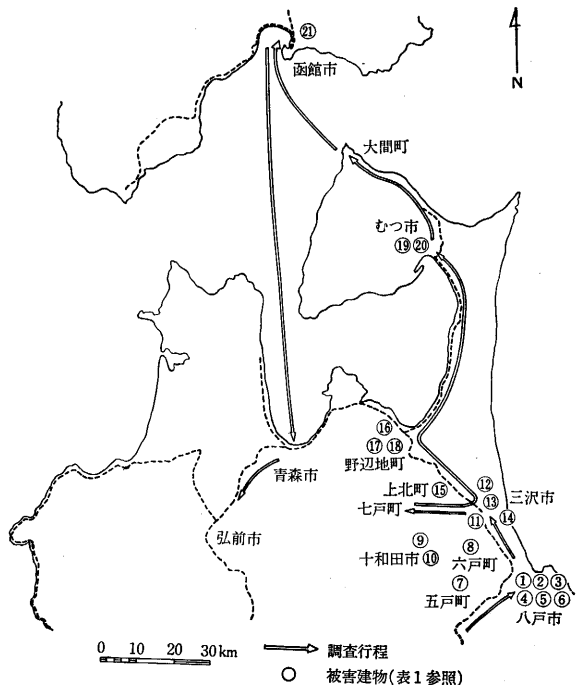


図1 調査行程および主たる被害建物

* 東京大学生産技術研究所 第5部 ** 同 第1部

表 1 おもなる被害建物名

地図 番号	建物名	所在地	構造
1	八戸市庁舎	八戸市	RC 造, 地上3階 地下1階, 塔屋5階
2	八戸市立図書館	"	RC 造, 平家建
3	八戸工業高専	"	RC 造, 3階建
4	八戸東高校	"	" "
5	来迎寺	"	SRC 造, 平家建
6	高村商店	"	RC 造, 3階建
7	五戸小学校	五戸町	" "
8	昭陽小学校	六戸町	RC 造, 2階建
9	十和田市農協倉庫	十和田市	RC 造, 3階建
10	北里大	"	" "
11	三沢商高	三沢市	" "
12	岡三沢小学校	"	" "
13	上久保小学校	"	" "
14	三沢市民会館	"	鉄骨造屋根を持つ RC 造
15	上北町農協事務所	上北町	RC 造, 3階建
16	野辺地消防署	野辺地町	RC 造2階建, 望楼 RC 造
17	野辺地中学校	"	RC 造, 3階建
18	野辺地高校	"	" "
19	むつ市庁舎	むつ市	" "
20	むつ市合同庁舎	"	RC 造, 地上3階, 地下1階
21	函館大学	函館市	RC 造, 4階建

なお、建築学会では、各調査団の調査が一段落した時点で震害報告書作成のための打ち合わせを開き、各項目の担当者を決定した。そのなかでも鉄筋コンクリート造被害建物20棟余については、詳細な被害報告を収めることとなり、われわれの調査団も地震研大沢教授のグループと共同で、八戸市立図書館および八戸市庁舎を担当した。被害報告書はすでに7月末に提出し、その後引続いて解析検討を行なっている。

3. 地震および建築物の被害概要

(1) 地震概要

震央、規模などに関しては、すでに土木班報告で述べられているのでここでは、後の解析・検討の際参考としている八戸市での地震記録について記す。

1) 八戸港湾で記録された地震動

八戸市の中心部からほぼ北方 5 km の八戸港に、運輸省鉄道技術研究所にて設置された強震計 SMAC では、最大加速度南北 225 gal, 東西 183 gal, 上下 114 gal の地動が記録された。この記録より東工大小林研究室で計算されたレスポンススペクトルを、図2に示したが、南北方向では 0.2 sec~0.5 sec, 東西方向では 0.3~1.0 sec の間の応答が大きい特性をもっている。

2) 八戸市における余震観測結果

八戸市における地盤の振動性状を調べる目的で、本学地震研、田中講師により行なわれた余震観測によれば、八戸港と、市庁舎付近での余震の同時観測の結果で、市庁舎付近では八戸港より数十%大きい振幅の余震が観測されている。市内の被害建物周辺の地動の性質を知るために参考になる結果であるので、ここに引用させていた。

(2) 建築物の被害の概要

今回の地震による被害が大きかった地域は、青森県の太平洋側である。建築種別により、その概要を記すと次のとおりである。

1) 木造住宅

青森県では、八戸、十和田、三沢、むつ各市および上北郡六戸、上北、東北の各町、三戸郡の五戸町での被害が大きく、全壊・全焼または、地すべり流出家屋は約 1,000戸 (5月22日県土木部建築課調べ) であった。これらの被害は、主として地すべり、流出によるものがほとんどであったのが今回の被害の特徴であり、いわゆる振動被害が少なかったのは、この地方の木造住宅のほとんどがトタンぶき屋根の軽い構造であるのが、一因と考

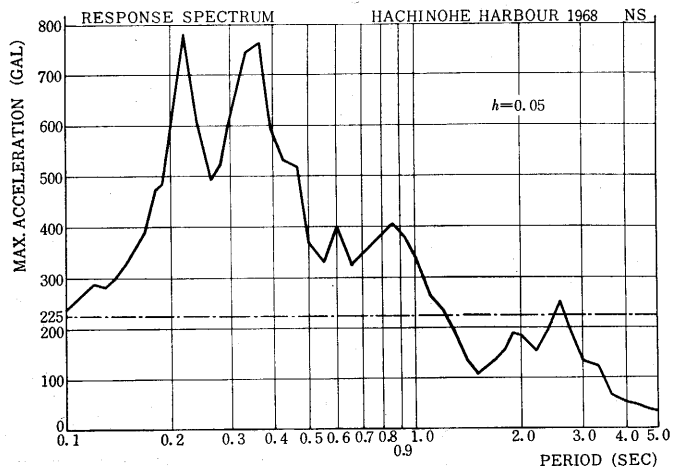


図 2-a

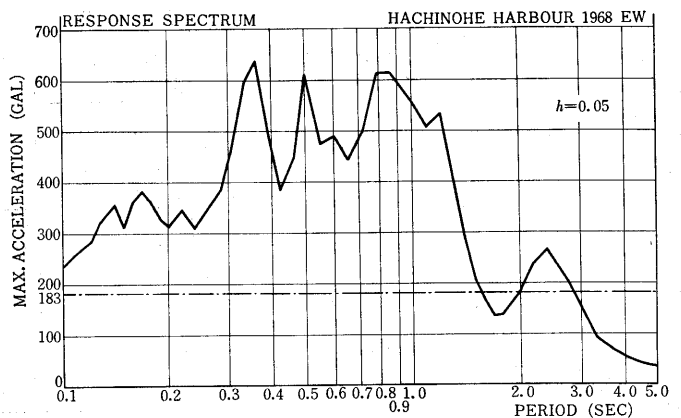


図 2-b

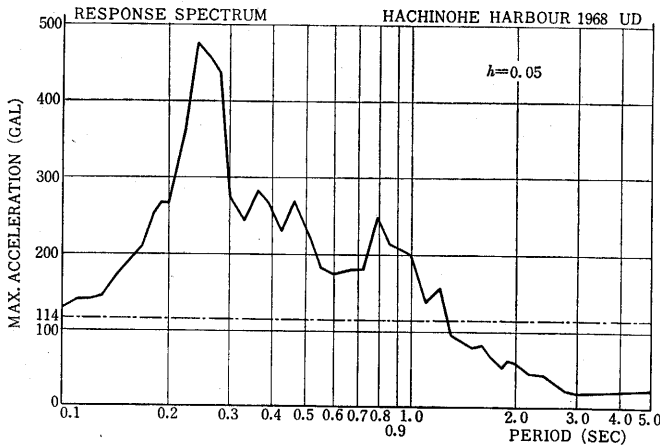


図 2-c

えられている。

このほか、壁のひびわれ、土台の移動などの小被害も含むと、被害家屋は5万戸以上とされている(口絵④)。

2) 鉄骨造

鉄骨造の建物のうち、工場関係の被害は実状があまり判明していないが、一般の建築物では鉄骨造は少ない。

この地方の鉄骨造は、主として学校の体育館であり、それらのなかでは、ブレースが破断したものが多く見られたが、建物全体でみるとほとんどが小被害であった。ブレースの耐力より逆算された震力は0.5~0.7G程度であるとされている¹⁾。

3) 鉄筋コンクリート造

今回の地震の被害で目立ったのは、鉄筋コンクリート公共建築物の被害が多かったことである。とり壊し、または、大規模な補強を要すると思われる建物は20をこえ、これは主として青森県の太平洋岸の地域にあり、先に述べた木造住宅の被害が多かった地域と同じである。

被害形式のうち、目立ったものは、柱のせん断破壊、ペントハウス、望楼など屋上突出物の破壊などであった(口絵④~⑭)。

4. 八戸市内の被害概要

(1) 鉄筋コンクリート造建物の被害

八戸市は今回の地震による被害が多かった場所である。特に鉄筋コンクリート建築の被害が多く、表1に示したように大きな被害を受けた建物は6件で、これは、市内の鉄筋コンクリート造建物の約10%にあたる。

これらのうち、八戸市立図書館に関しては後に詳述するので、その他の建物については被害の概要を記す。

1) 八戸市庁舎(掘端町)

この建物は八戸市掘端町に昭和35年に建設

された地上3階地下1階に一部平家建および5階建のペントハウスが附属している鉄筋コンクリート造市庁舎である(図3)。

被害のおもなものは、2階正面部分の柱がせん断破壊したこと、および5階建ペントハウスの最上階が南側に倒壊し屋上に落下したことであった(口絵⑭、⑮)。

この建物について現在われわれのグループで解析を行なっているが、略算の結果では、2階正面部分には建物全体からみると応力が集中すること、また、ペントハウスの下4層には耐震壁があるが、倒壊した最上層には壁がないため、この層が地震時に過大な変形をうけた可能性があることなどが判明している。

2) 八戸東高校(類家)

鉄筋コンクリート造3階建校舎の一部が基礎の不同沈下および柱のせん断破壊のため大きく傾斜した。また、屋上に付属していた煙突が倒壊した(口絵⑯)。

3) 八戸工業高専(田面木)

3階建校舎の1階の柱の大部分および2階柱の一部が桁行方向に大きくせん断破壊した。しかし、同じ敷地内に同時期に建設された寄宿舎にほとんど被害がなかったことが注目されている(口絵⑰)。

4) 来迎寺(朔日町)

地上1階地下1階、鉄骨鉄筋コンクリート造の本堂の丸柱の柱頭および柱脚に曲げ亀裂が生じ、鉄筋コンクリート造下屋の柱および壁と、それに隣接する本堂の柱が大きくせん断破壊した(口絵⑱)。

5) 高村商店(長横町)

地上3階の小規模な商店であるが1階の柱および壁が

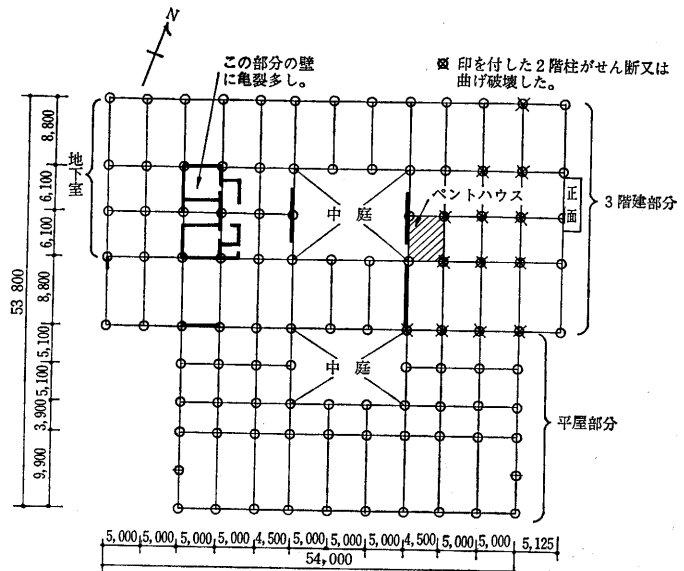


図 3 八戸市庁舎平面図

南北方向に大きくせん断破壊した。

(2) 八戸市立図書館・市庁舎まわりの地形および被害状況

八戸市庁舎および図書館の被害調査と平行して、両建物周辺の被害の状況と地形の調査（5月21日から24日まで4日間）を行なった。その調査状況を以下に記述する。

1) 被害状況と地形

木造 64 棟、鉄骨造 4 棟に関して、建物名、規模、完成時期、構造、被害状況などを調査し、被害の程度を図 4 に示すように、6 段階に分け分類した。なお、この分類は、文献 5 によるもので次のように分けられる。

全壊：建物全体が、ほぼ原形をとどめない程度に破壊されたもの。

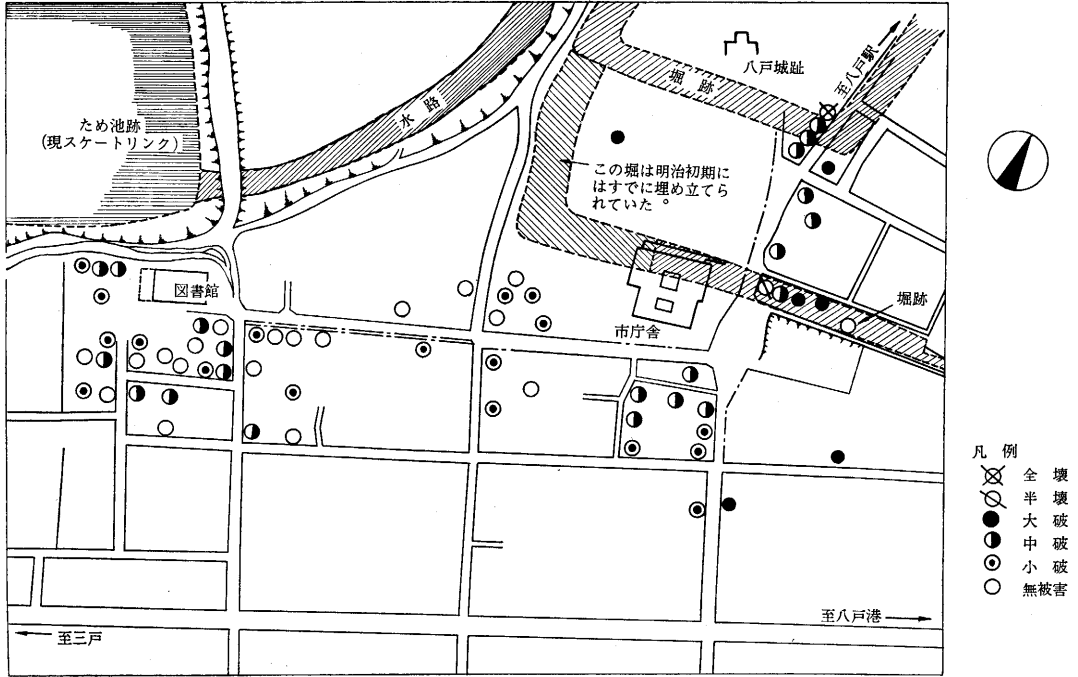


図 4 八戸市庁舎、図書館周辺の木造、鉄骨造の被害状況と地形

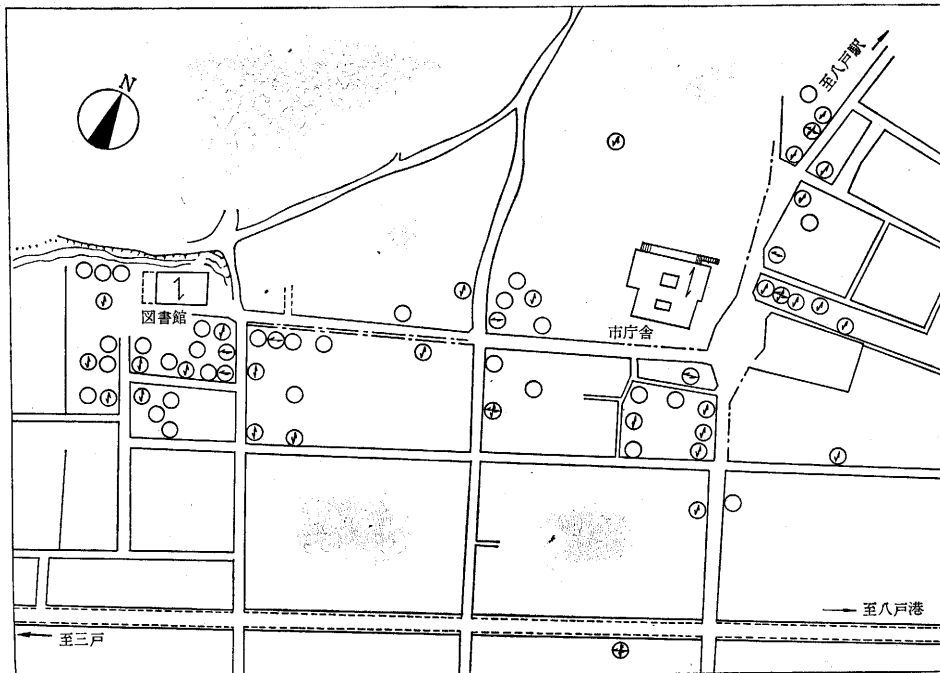


図 5 八戸市庁舎、図書館まわり聞きこみ調査——地震動または被害の大きい方向

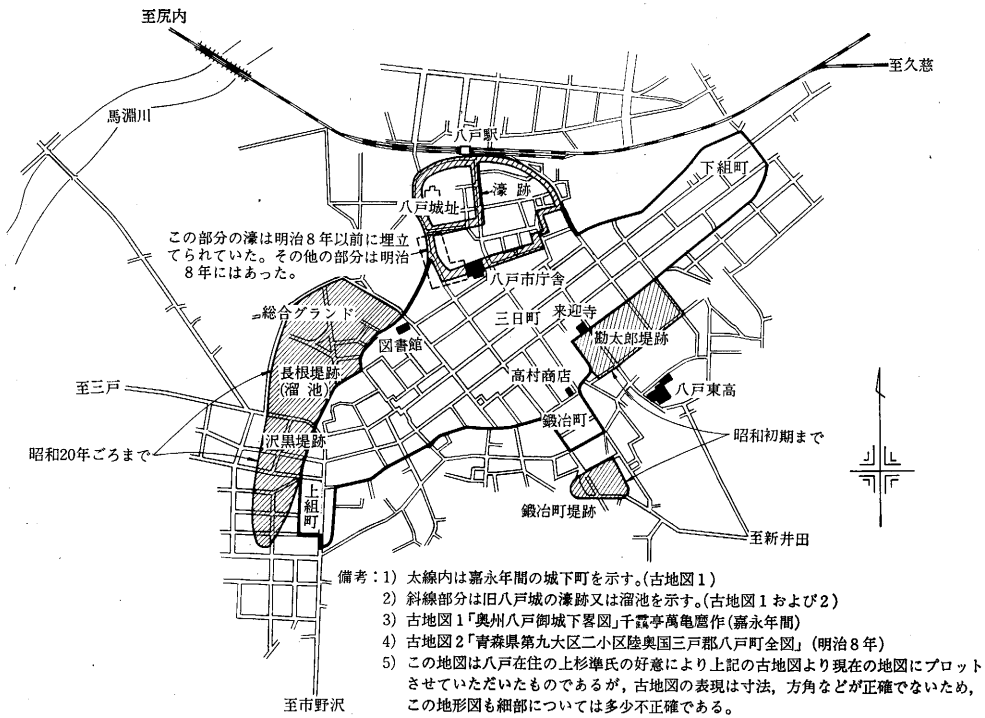


図6 八戸市旧市街地図

半壊：建物の相当部分が、ほぼ原形をとどめない程度に破壊されたもの。

大破：はり、柱など軸部が部分的に破壊し、あるいは大亀裂を生じたもの。

中破：軸部に小亀裂を生じたもの、および帳壁などの2次部材が破壊あるいは、大亀裂を生じたもの。

小破：軸部には、損傷なく、2次部材に小亀裂を生じたもの。

無被害：いずれの部分にも損傷の認められなかったもの。

この分類法によると全68棟中、中破以上のもの約40%無被害のもの約30%であった。また、市庁舎、図書館周辺に被害が多く、その中間には被害が少ないことがわかる。同図には、旧八戸城の堀跡、および当時の水路、ため池などの地形を記入したが、特に堀跡上の建物の被害が目立った。

図6は参考のため、嘉永年間および明治初期の旧市街の地形図を示したものである。

2) 地震動の方向

図5は、地震時のゆれの方向の聞きこみ結果、または被害の大きかった方向をプロットしたものである。これは、構造、間取り、壁の位置などによっても影響を受け、必ずしも地動の大きい方向を示すとはかぎらないが、南北方向の地震動が大きかったという聞き込み、またはこの方向の被害が大きかった場合が多く、市庁舎および図書館の被害の大きい方向と一致しているのは、注

目すべきである。

5. 八戸市立図書館

先に述べたように、われわれ調査団は、八戸市立図書館と八戸市庁舎の被害の詳細調査に重点をおき、調査を行ない、その後も引続き被害の原因などを究明すべく解析を行なっている。元来、この種の問題には、非常に複雑な要素が多く含まれており、現象を十分説明することは、なかなか困難なことである。このため現段階では、必ずしも満足すべき結果を得るには至っていないが、ここでは八戸市立図書館の被害の状況と解析結果について述べ、参考に供したいと思う。

(1) 建物概要

1) 一般事項

この建物は、青森県八戸市堤町に昭和36年に建設された鉄筋コンクリート造1階建の図書館で、建築面積は約1,060m²である(図7)。

屋根は、防水モルタル仕上で、はり・柱はコンクリート打放し仕上である。

周辺の地形は、図4に示したように東、西、南側は平坦であるが、北側はがけであり、がけ下は現在はスケート・リンクであるが、以前はため池であった。

2) 構造概要

スパン7.2m、張間3スパン、桁行5スパンの鉄筋コンクリート構造で、建物の東寄りの便所、機械室のまわりには厚さ12cmの鉄筋コンクリート壁が配置されて

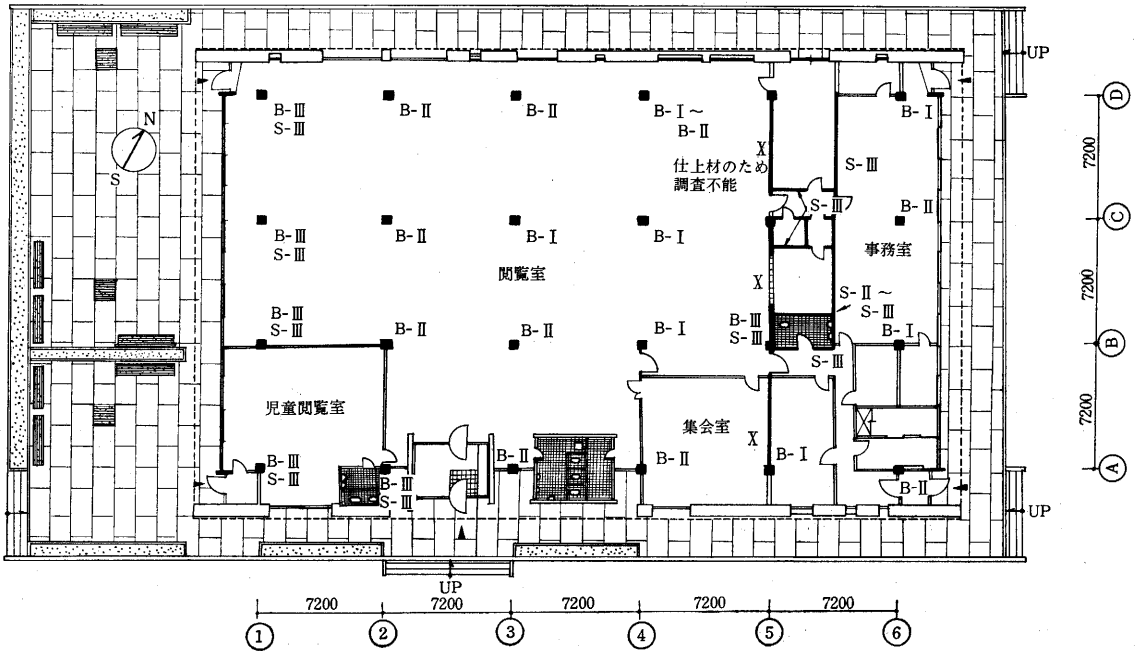


図 7 八戸市立図書館平面図 (記号は柱および壁の被害程度を表わし表 2 による)

いる。なお、南北面の外壁は建物本体と構造的には連結されていない。

柱断面は $45 \times 45 \text{ cm}$ 、梁断面は $30 \text{ cm} \times (72 \sim 80) \text{ cm}$ で、スラブには、スラブハンチがあり、厚さは中央部 12 cm 、端部 15 cm である。基礎は独立基礎で基礎梁の寸法は $35 \times 80 \text{ cm}$ である。

(2) 設計条件

設計条件のうち、耐震設計に直接関係のある事項を資料 1 より転載すると次のとおりである。

- 1) 設計震度 0.2
- 2) 使用材料 コンクリート：普通コンクリート
 $F_c = 180 \text{ kg/cm}^2$
 鉄筋：SR 24
- 3) 基礎 地耐力 10 t/m^2 (長期) として独立基礎で設計
- 4) その他 (a) 耐震壁は計算上無視している。
 (b) 積雪荷重：耐震計算用として 60 kg/m^2 を採用。

(3) 被害状況および調査結果

図 7 に示したように大部分の柱が曲げせん断破壊し、

表 2 部材の被害程度のカテゴリ基準

種類	キレツの程度	説明	記号
(a) 曲げキレツ	0) 無被害	よく探すと見つかるかも知れないが、あったとしても非常に小さい。	0
	i) 小さい	すぐ見つかる程度 (鉄筋は降伏していないと判断出来る)。	B-I
	ii) 大きい	鉄筋が降伏していると判断出来る。圧縮側には圧壊が生じている。	B-II
	iii) 非常に大きい	圧縮鉄筋が露出し Buckling している。鉛直力を支持出来ない。	B-III
(b) せん断キレツ	0) 無被害	よく探すと見つかるかも知れないが、あったとしても非常に小さい。	0
	i) 小さい	すぐ見つかる程度。	S-I
	ii) 大きい	キレツ幅 1 mm 程度以上	S-II
	iii) 非常に大きい	目で見える程のせん断ずれを生じている。	S-III
(c) 曲げ・せん断キレツ		上記 (a), (b) の記号を併用する。	

壁はせん断破壊した。

図中の記号は、表 2 に示した被害分類法による被害程度である。以下各部材の被害を詳述する。

1) 柱の被害

この建物の被害の特徴は、柱が柱頭または柱脚で大きく破壊したことであった (口絵 ㉑, ㉒)。図 8 にラーメン

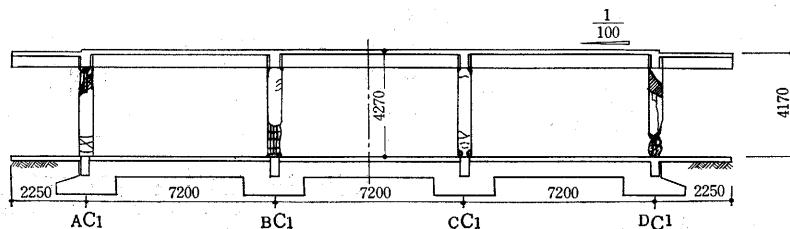


図 8 八戸市立図書館 1 ラーメン東面亀裂図

の亀裂図を、図 9-a~図 9-d には被害の特に著しい柱の 4 方向の亀裂図を示した。

これらの図より明らかなように、建物全体でみると、外側のラーメンの被害が大きく、その中でも西側ラーメンの被害が著しかった。

柱の被害で特徴的であったのは、柱頭または柱脚における破壊の範囲が広いことで、柱頭または柱脚から材軸にそって柱丈の 2~3 倍の範囲に曲げまたは、せん断亀裂が生じ、被害の激しい柱 (たとえば C1A, C1B, C1D, C2A など) ではこの範囲のコンクリートが完全に圧壊し、はく落した。

2) 壁の被害

東西方向の壁は、いずれも大きなせん断亀裂を生じた。南北方向の壁 2 列のうち西側の壁には大きなせん断亀裂が発見された。5 ラーメンの壁は仕上材がクロス貼りのため被害の程度は不明であったが、仕上材を貫通するほどの大亀裂は生じていなかった。

3) 梁およびスラブの被害: 特に発見されなかった。

4) 残留変形測定結果

柱頭の水平残留変形を測定した結果を図 10 に示した。

測定は、さげふりとスケールにより柱頭と柱脚との相対変位を測った。この結果東側の壁付近を中心として南北方向に回転した形跡が認められ、西端ラーメン (1 ラーメン) では北側に約 2.5 cm, 東端ラーメン (6 ラーメン) では西端ラーメンとは逆方向に、南側に約 1 cm の残留変形があった。また、東西方向では東側に約 1 cm の残留変形が認められた。

5) 微動の測定結果

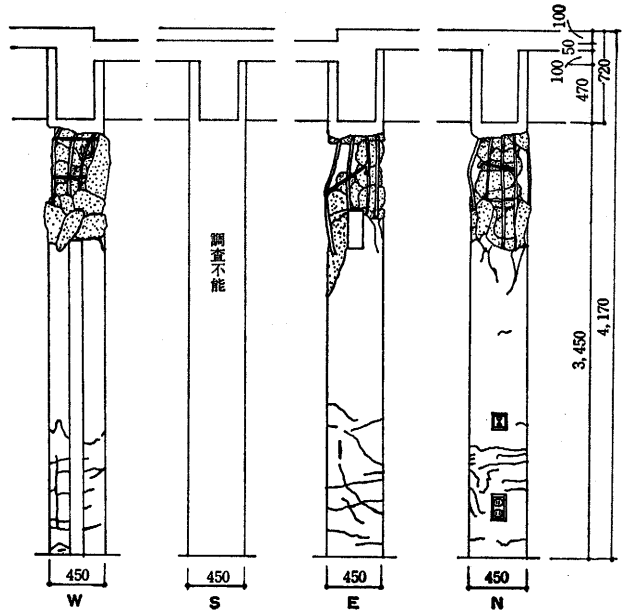
被害後の振動特性を調べるために屋上での微動測定を行なった。南北方向の平面的な測定によれば 0.55 sec に卓越する周期があり、この時の振動形は、壁位置を中心として東側と西側の位相が逆になっていた。東西方向では、0.42 sec の卓越する周期が認められ、この時の振動形は、ほぼ並進的であった。

6) コンクリート強度

(i) シュミットハンマによる柱のコンクリート強度の測定結果:

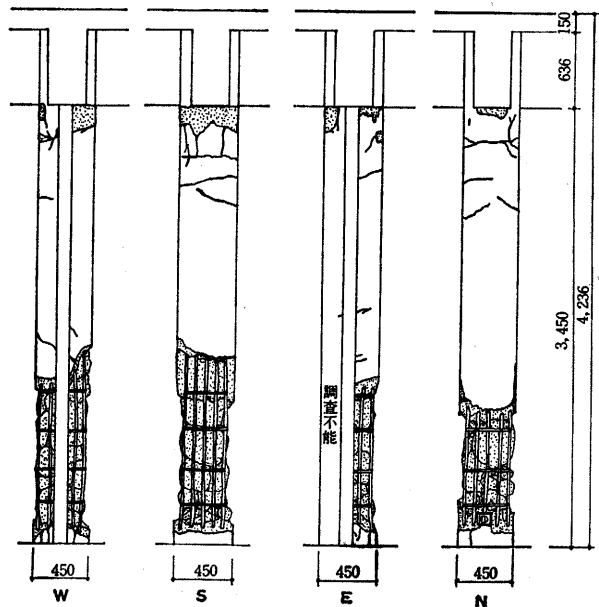
全 24 本の柱のうち、11 本の柱のほぼ中央部のコンクリート強度をシュミットハンマで測定した結果、圧縮強度は 340~577 kg/cm² で平均 480 kg/cm² と推定された (本学工学部梅村研究室の測定による。なお、同研究室でキャリブレーションを行なった結果によると、上記の値の 0.8 倍が、シリンダー強度と一致するとされている。)

(ii) 柱のかぶり部分のコンクリートの強度試験結果:
大きくはく離したかぶり部分のコンクリートを採取し本所に持ち帰り亀裂がないと思われる部分より径 5 cm, 長さ 7~10 cm のコンクリートコアを 4 本抜き取り、圧縮試験を行なった結果、圧縮強度は 150~199kg/cm² で、



柱頭部分: コンクリートが、ほぼ 100 cm の範囲にわたって完全に圧壊した。
柱脚部分: 曲げキレツが多く発生した。

図 9-a 八戸市立図書館 柱亀裂詳細図 (C1A)



柱頭部分: 曲げキレツが多数発生し、剥離が生じた。
柱脚部分: ほぼ 120cm にわたってコンクリートが完全に圧壊した。かぶりコンクリートは完全に剥離した。

図 9-b 八戸市立図書館 柱亀裂詳細図 (C1B)

平均 179 kg/cm² であった。

破断面のこう配は、いわゆる、せん断圧縮破壊時の 45° よりは急であり、破断面には砂利が切断されているのが目立った。この結果は、シュミットハンマによる測定結果よりは低いが、試験したコンクリートは、柱の曲

げによる応力をうけた後のものであることを考えると、圧縮強度が設計強度を極端に下回っていたとは思えない。しかし、試験の際、弱い骨材が多かったことは、この建物の柱の圧壊が材軸にそって広い範囲にわたっていたことの原因の一つとしてあげられる可能性はある。

(4) 解析

この建物の設計は震度法に基づき静的に行なわれた。この程度の小規模な建物ではこの種の設計法が採用されるのが通常であり、特に振動学的取扱い、すなわちいわゆる動的設計を行なわなくとも、大地震時にも十分耐えうるものとされてきた。ただし、大地震時にまったく無キズであることを期待していたわけではなく、多少の亀裂の発生あるいは部分的破壊は生じる可能性もありうるとされていた。しかし、ここでとりあげた八戸市立図書館の被害は、これらの予想以上に激しいものであった。

これらの原因を明らかにし、今後の設計法の発展に資するために、振動性状、終局強度などに関する検討結果について述べる。

1) 弾性解析

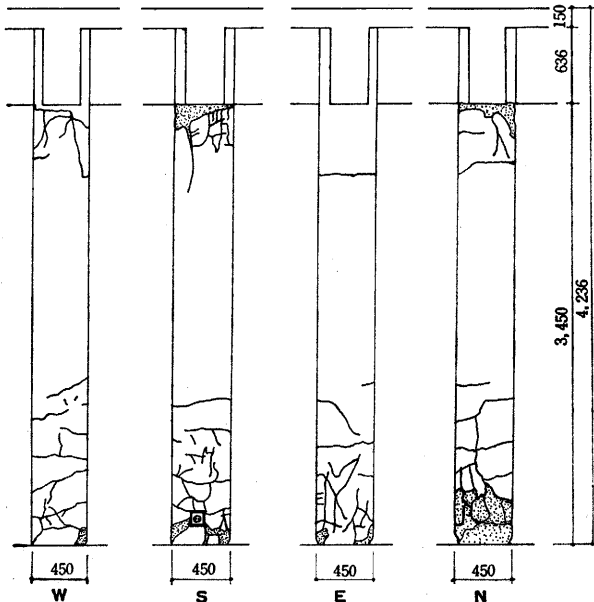
骨組の剛性を撓角法で求め、壁の剛性を曲げ、およびせん断変形を考慮した弾性理論より求め、それらの結果を用いて建物の弾性固有周期を計算すると表 3 のとおりである。計算は、ねじれを考慮しない

表 3 八戸市立図書館固有周期

	ラーメンだけの並進周期	壁を考慮した周期	
		1 次	2 次
南北方向	0.29~0.37 sec	0.26~0.31	0.053
東西方向	0.29~0.36	0.13~0.14	—

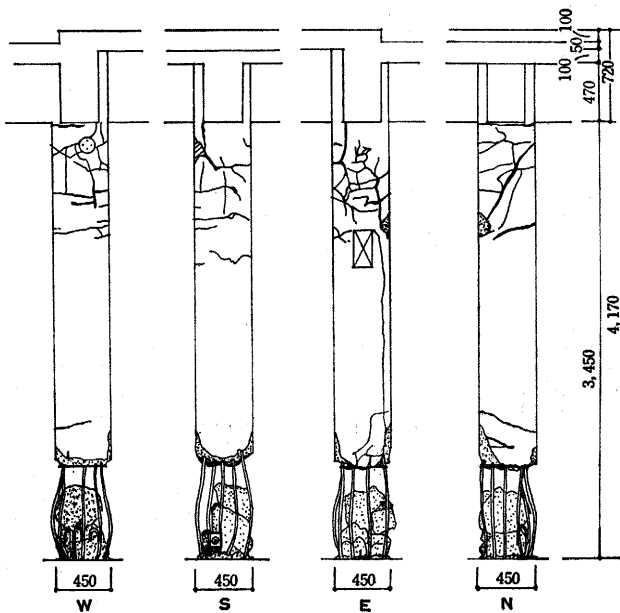
備考：周期に幅があるのはラーメン解法の際に剛域を考慮した場合と無視した場合の値であり、その剛域としては接合部全域をとった。

場合には 1 自由度の質点系として、ねじれを考慮した場合には、2 自由度の質点系として行なわれた。この結果によれば、壁を無視したラーメンだけの並進周期は、東西方向、南北方向ともに、ほぼ 0.29~0.37 sec であり、1 層の建物としては、かなり柔らかいと言える。これらの値のうち前者は、骨組の解法の際に剛域を考慮した場合であり、後者は、これを無視した場合である。壁を考慮して周期を求めると、南北方向はねじれの影響のために、壁を無視した場合の周期とほとんど同じである。なお東西方向の壁も多少偏在して配置されているがその影響はわずかであるので、これを無視すると、壁を考慮した場合の周期はラーメン周期の 1/2 以下となった。また、図 11 にこの時の振動形を示したが、これによると、壁付近を中心とした回転成分が支配的である(剛心は重心より 11.4m 東側である)。



柱頭部分：曲げキレツが生じ、コンクリートの剝離がみられる。
柱脚部分：広い範囲にキレツが発生し、大きく圧壊する寸前の状態である。

図 9-c 八戸市立図書館 柱亀裂詳細図 (C1c)



柱頭部分：曲げとせん断の入りまじった複雑なキレツが生じ、コンクリートの剝離がみられる。
柱脚部分：コンクリートが 80cm にわたって完全に圧壊し、鉄筋はすべて座屈している。

図 9-d 八戸市立図書館 柱亀裂詳細図 (C1d)

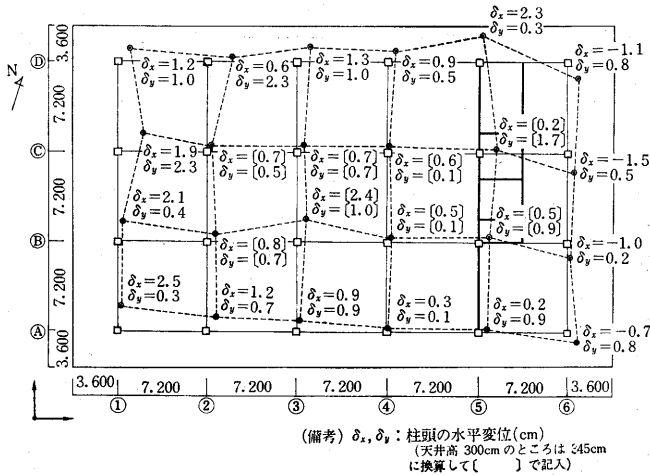


図 10 八戸市立図書館 柱残留変形図

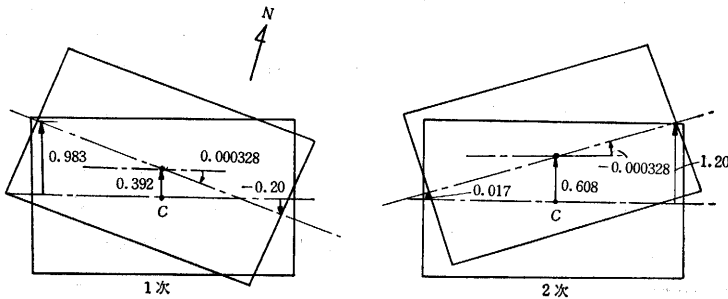


図 11 弾性振動形 (記入数字は刺激関数)

すなわち、モーダルアナリシスの考えを適用すると 0.3 sec 前後の周期特性をもつ地動の影響を大きくうけることがわかる。

今回の地震の際の、図書館付近の地動の性質に関する確実な資料は得られていないが、試みに八戸港湾で得られた強震計の記録の応答スペクトラムより判断すると、弾性的には、最西端のラーメンは地動加速度の 2~3 倍 (震度 0.4~0.6) 程度の加速度をうける可能性があるといえよう。

2) 塑性解析

前項の検討により、この建物には弾性的に考えると地動加速度の 2~3 倍の地震力がかかり得ることが判明した。現在、八戸市内での地震動の大きさは加速度 200 gal を上まわっていたものと予想されていることとあわせ考えると、この建物は、地震時に設計震度 0.2 を上まわる地震力をうけ降伏したことが予想される。しかし、構造物は一般に、設計震度以上の終局強度を有しており、また、鉄筋コンクリート造建物は、一般に、降伏後も粘りのある構造物であるから骨組の降伏は、必ずしも建物の崩壊、あるいは、これに近い状態を意味するわけではない。この節では鉄筋コンクリート塑性理論により降伏条件を求め、塑性振動性状の検討を行ない被害状況との比較を行なった。

(i) 降伏条件および復元力特性の決定
この建物は弾性応力計算および梁・柱の断面耐力計算結果からみると柱降伏形の降伏現象を示すことが判明し、この結果は被害の状況とも一致している。そこで柱降伏形の仮定のもとに解析を進める。

④ 柱の復元力特性

図 12 に示す bi-linear 型の復元力特性を使用した。この際の定数は次の方法により定めた。

- 1° 断面の主軸まわりのモーメント曲率関係を弾性および降伏点について求め²⁾、降伏点での曲げ剛性の低下率 (降伏点剛性/弾性剛性) および降伏強度を求める。骨組の弾性解析の結果より各柱の弾性時のバネ定数 $K_e(t/cm)$ を求め、先に求めた曲げ剛性低下率を乗じて原点と降伏点を結ぶ剛性 K_y (以下降伏点剛性と呼ぶ) を定める。
- 2° 降伏点以降の剛性は、降伏点剛性の 10% と仮定する。
- 3° 減力時剛性は降伏点剛性と同一と仮定する。
- 4° 柱が 2 軸曲げをうけた時の降伏関数は、円弧であると仮定した。この建物の柱はすべて主軸に対して対称断面であるから任意の方向の復元力特性をすべて同一と仮定した結果となる。

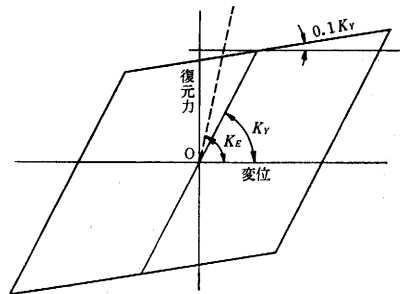


図 12 復元力特性

⑤ 壁の復元力特性³⁾

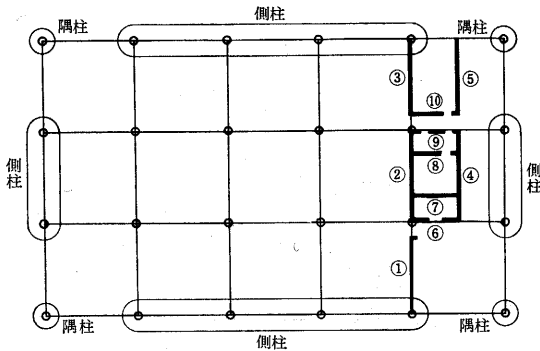
- 降伏点以降の剛性を 0 とした完全弾塑性の復元力特性を仮定した。すなわち、
- 1° 壁部分は、ラーメン部分と独立に取扱う。
 - 2° 壁の正味断面積のせん断変形のみを考慮し剛性を求める。この際、開口の影響は開口周比による低減率により考慮する。
 - 3° 南北方向の壁は、大きな応力をうけないことが予想されるので、弾性として取扱う。東西方向の壁は、弾性応答での結果および被害状況からみても、かなりの剛性低下が予想されるので、塑性係数を 0.2 と定め

塑性剛性=弾性剛性×0.2 とした.

4° 降伏変位は, 降伏時のせん断歪を 3×10^{-3} として求めた. 以上の方針により計算された各柱および壁の降伏点の強度および剛性の一覧を表 4 に示した. なお, これは, 鉄筋の降伏強度を $2,400 \text{ kg/cm}^2$, コンクリート圧縮強度を 200 kg/cm^2 , ヤング率を $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ として計算されたものである. この結果ラーメンの降伏点剛性は弾性剛性の約 1/2 で, ラーメンだけの降伏震度は約 0.3 である.

表 4 柱および壁の降伏点

	降伏点剛性	降伏変位	降伏剪断力
	$K_y \text{ t/cm}$	$\delta y \text{ cm}$	$Q_y \text{ t}$
隅柱	3.65	2.31	8.43
側柱	4.56	2.15	9.65
中柱	5.06	1.91	9.65
壁 1	789	1.28	1010
” 2	681	”	873
” 3	789	”	1010
” 4	1220	”	1561
” 5	789	”	1010
” 6	74	”	94.7
” 7	156	”	199.8
” 8	80	”	102
” 9	57	”	73
” 10	80	”	102



(ii) 降伏点剛性による周期および振動形

(i) で求めた降伏点剛性を用いた固有周期は $T_1=0.44 \text{ sec}$, $T_2=0.23 \text{ sec}$, $T_3=0.063 \text{ sec}$ である. この計算の際には東西方向の壁の偏心をも考慮したので, 3自由度の質点系として計算した. (剛性は重心より東側 12.2m, 北側 4.0m となる.) この時の振動形を図13に示したが, 弾性解析の結果と同様に南北方向の回転成分(1次)が卓越していることが明らかである.

(iii) 塑性応答解析

この項では, 前項で得られた復元力特性を用いて行った塑性応答解析の一例を示す.

床板を剛と仮定すると, 図 14 の重心に関する釣合より次式が導かれる⁴⁾.

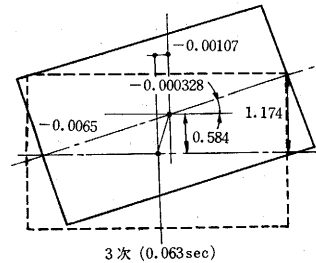
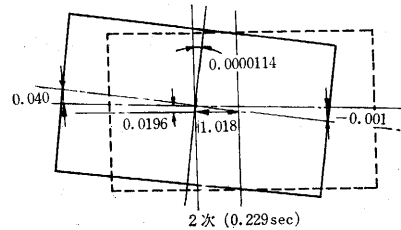
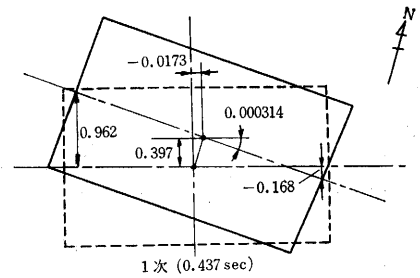


図 13 降伏点剛性による振動形*

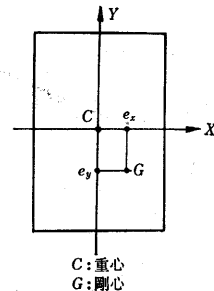


図 14

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \frac{2h}{\omega_1} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m\dot{x}_0 \\ m\dot{y}_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで X, Y はおのおの X 軸, Y 軸方向の相対変位
 θ = 重心の回転角, m = 質量
 I = 重心軸まわりの慣性モーメント
 h = 1次周期に対する減衰定数

* 記入数字は, X, Y 方向に同じ地震力をうけた時の刺激関数

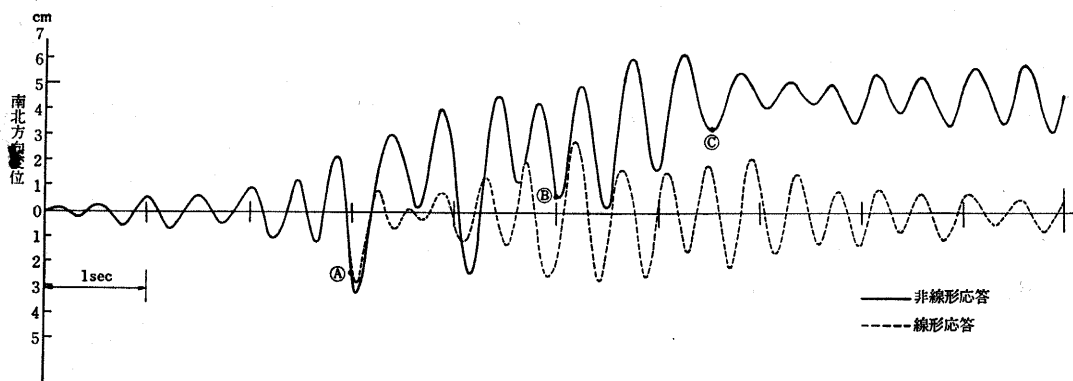


図 15 北西隅柱南北方向変位 ($h=0.03$ の場合)

$\omega_1 = 1$ 次元振動数

$K_{11} = \sum K_{xi}$ ここで K_{xi} は柱の X 方向剛性

$K_{12} = K_{21} = 0$

$K_{22} = \sum K_{yi}$ ここで K_{yi} は柱の Y 方向剛性

$K_{31} = K_{13} = -e_y K_{11}$ ここで e_y は Y 方向の
偏心距離

$K_{32} = K_{23} = -e_x K_{22}$ ここで e_x は X 方向の
偏心距離

$K_{33} = e_x^2 K_{22} + e_y^2 K_{11} + w$ ここで w は剛心
まわりのねじれ剛性

\ddot{x}_0, \ddot{y}_0 はおのおの X 軸, Y 軸方向の地動加速度

以下示す解析例は, 地動加速度として, 八戸港で得ら

れた強震記録のうち, 最大加速度近傍 10 sec 間の地動
を用い, 減衰定数を 3% と仮定した場合のものである。

数値計算は時間きざみ 1/200 sec で線形加速度法により
行なった。すなわち, 前記の仮定のもとに, 各時刻での
建物全体の剛性の変化を各柱の剛性の変化に応じて求め
計算を行なった。

図 15 は, 最大加速度が記録された時刻を中心とした
約 10 sec 間 (記録開始後約 20 sec から 30 sec 間) の北
西隅柱の南北方向の変位を示したものである。5 cm を
こえる大振幅の振動がかなりの回数継続していることが
わかる。

さらに同図で開始より 7 sec 付近から大きな残留変形
(約 4~5 cm) を生じる傾向がみられる。

図 16 は同じ柱の変位ベクトルを 2 次元
的に描いたものである。

図中の A, B, C は図 15 の A, B,
C 点に対応する。

同図より振動の方向がほぼ一定であると
同時に建物がねじれ振動を生じている傾
向, すなわち, 変位ベクトルが円弧状で
ある傾向も現われている。

図 17 は各柱の変位ベクトルの最大値を
示したものである。西側のラーメン, その
中でも特に隅柱の変位が大きく東側になる
ほど最大変位は小さく, また, 側柱の変位
が中柱の変位より大きい傾向があり, これ
は, 残留変形測定の結果および柱被害の程
度とも一致する。

以上の解析結果は, 地震波, 復元力, 減
衰などに関し, 幾多の仮定に基づいたもの
であり, なお検討の余地はあるが, この程
度の塑性振動学的方法により, 破壊性状が
あるていど把握できたと考えている。

(5) まとめ

この建物の被害の特徴は, 柱頭または,
柱脚で非常に激しい破壊を生じ, 壁付近を

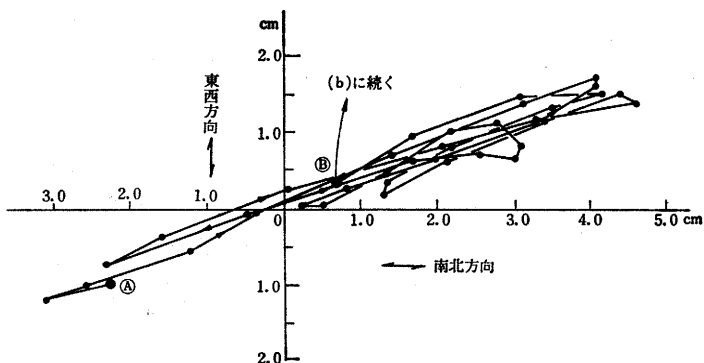


図 16-a 北西隅柱の変位ベクトル
(1) (非線形応答 A B 間 2 sec)

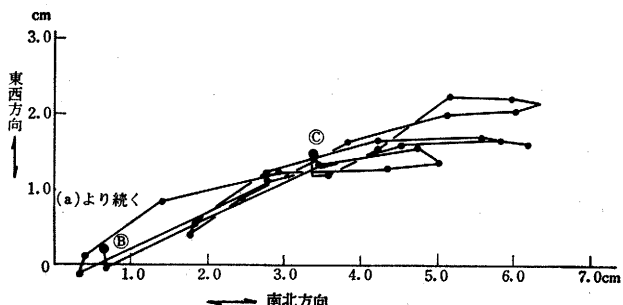


図 16-b 北西隅柱の変位ベクトル
(2) (非線形応答 B C 間 1.5 sec)

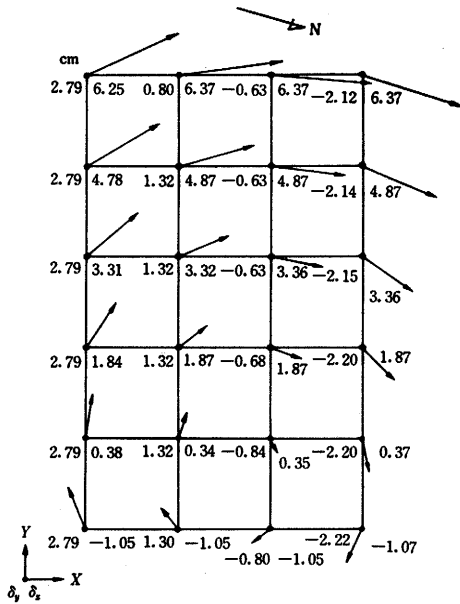


図 17 各柱の最大変位ベクトル (非線形応答)

中心とした、ねじれ振動をうけた形跡を残したことであった。

この破壊状況と前項で述べた解析結果とをあわせて考えると、破壊の原因としては

- 1) この建物は、耐震壁が偏在しているため、非常にねじれやすい振動特性を有していたこと。
 - 2) 今回の地震の特性からみると、弾性的には、フレームの設計強度はもちろん終局強度より大きい力をうける可能性があること、および、一層の建物としては剛性が低い大きな変形を生じる可能性があったこと。
 - 3) 耐震壁の効果が少ないので、フレームは、塑性状態での大振幅の繰返し応力を多数回受けたことが予想されるが、コンクリートの性質、柱のせん断補強法からみると、これに耐えうるだけの十分な粘りを有してはいなかったこと。
- などの点があげられる。

現在、低層の鉄筋コンクリート造建物の耐震設計は、基準震度 0.2 に相当する静的横力を考慮することにより行なわれるのが通常であるが、耐震壁が有効に多く配置されている建物の場合には、一般に余力が多いので、設計震度を上まわる地震力をうけても十分耐えうる場合が多いが、耐震壁の少ない場合、または、この建物のようにその効果が期待できない場合には、今回ていどの地震により骨組が設計震度以上の力をうけ、塑性状態に入る可能性がある。このような場合には、振動性状を考慮して設計震度を大きくするか、あるいは、塑性状態に入っても、十分粘りのある構造形式を採用するなどの配慮が必要である。

6. あとがき

今回の十勝沖地震による建築物の被害のうち、主として八戸市内の鉄筋コンクリート造建物についての調査結果および検討結果の概要を紹介した。

今回の被害で特に目立ったのは、鉄筋コンクリート造建物が、いわゆる振動的に破壊した例が多かったことで、地盤被害が主要であった新潟地震、焼けビルの崩壊がクローズアップされた福井地震などとは異なったものであった。破壊の原因は個々の建物で異なっていることが予想され、コンクリート強度の不足、耐震設計の不備などが指摘されており、おのおの関係機関で調査を行なっているので、いずれ明らかにされるであろうが、現地を調査して強く感じたことは、あまりにも安易に鉄筋コンクリート建物が設計、施工されすぎではないかということであった。すなわち、先にあげた過去の震害例などでは、被害の一面のみが強くとりあげられ過ぎたため、振動による被害が看過され、その結果現在の設計法の習慣のみ守ってれば、鉄筋コンクリート造建物が振動被害などうけないような錯覚に落ち入っていたのではあるまいか。

今回の被害は、正にこの辺の盲点をつかれた感じが深く、この機会に、今日のわれわれの設計・施工法について、再検討する必要があることを痛感している。

なお、この報文は、筆者達のほか下記に示す現地調査員および解析グループの成果によったものである。

現地調査員 半谷 裕彦, 宇田川邦明

最相 元雄, 遠藤 彰

島脇 与助 (以上 5 名東大生研)

中田 慎介 (東大工学部)

解析グループ 上記半谷・宇田川・遠藤のほか

大 沢 胖 (東大地震研)

村上 雅也 (千葉大)

西川 孝夫 (都立大)

終わりに当たり、調査にご協力いただいた八戸市庁舎、図書館の関係各位に謝意を表したい。

(1968 年 10 月 2 日 受理)

文 献

- 1) 日本鋼構造協会: JSSC Vol. 4 No. 32, 8, 1968
- 2) 武藤清: 耐震設計シリーズ 2—鉄筋コンクリート構造物の塑性設計— (丸善)
- 3) 日本建築学会: 建築構造物のリミットアナリシス (日本建築学会)
- 4) 武藤清: 耐震設計シリーズ 4—構造物の動的解析— (丸善)
- 5) 大崎順彦他: 鉄筋コンクリート造建物の震害と地盤 日本建築学会論文報告集 148 号 (昭和 43 年 6 月) p. 33.

資料 1) 日本図書館協会: 八戸図書館構造計算書