

地盤条件変化点における建物の地震被害への 地盤の影響の考察

那須誠¹・水出有紀²・大場恒彦³

¹フェロー会員 前橋工科大学教授 工学部建設工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

E-mail:nasu@maebashi-it.ac.jp

²前橋工科大学 大学院工学研究科建設工学専攻 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

E-mail:k_yuki_c@hotmail.com

³正会員 日本物理炭株式会社 技術本部長 (〒143-0027 東京都大田区中馬込2-2-12)

E-mail:toba@n-buturi.co.jp

地震時における建物の被害には様々な要因が複合的に作用することが推定される．今回はその中でも建物と地盤条件の関係に着目する．被害事例として1968年十勝沖地震 ($M=7.9$) で被害を受けた高校建物と1995年兵庫県南部地震 ($M=7.3$) で被害を受けた市役所建物を挙げる．これらの建物は地盤条件変化点にあるということで共通しているが，地盤条件変化点の境界部と建物の位置関係が異なり，その被害傾向も異なっている．このことから，これら2つの建物事例の被害状態と地盤状態と常時微動測定結果等をもとに，被害発生の原因の考察を行った．その結果，地震時に不同変位や偏土圧が発生するなどしてその建物の被害が生じたことが推定された．

Key Words : Earthquake-damaged building, changing site of ground conditions, differential ground displacement, eccentric earth pressure

1. はじめに

建物の地震被害には，様々な要因が複合的に作用していると推定される．その中でも今回は建物と地盤条件の関係という観点から考察を行う．考察にあたって被害事例として2種類の地震における被害建物を挙げる．1つは1968年十勝沖地震において被害を受けた高校建物，もう1つは1995年兵庫県南部地震において被害を受けた市役所建物である．両建物は共に地盤条件変化点にあって，地震被害を受けたが，その被害傾向は異なっている．被害傾向が異なったことについて，2つの建物の被害状態と地盤状態および地盤の常時微動測定結果などから考察を行う．

2. 高校建物 (1968年十勝沖地震)

(1) 建物の概要

本建物は青森県八戸市にあり，1968年十勝沖地震 ($M=7.9$) において地震被害を受けた^{1)~3)}．1960 (昭和35) 年に鉄筋コンクリート造に改築された本建物であるが，図-1のように教室棟であるA棟 (地上3階)，B棟 (地上3階) と，体育館棟であるC棟が配置されており，それぞれが渡り廊下で連結されてい

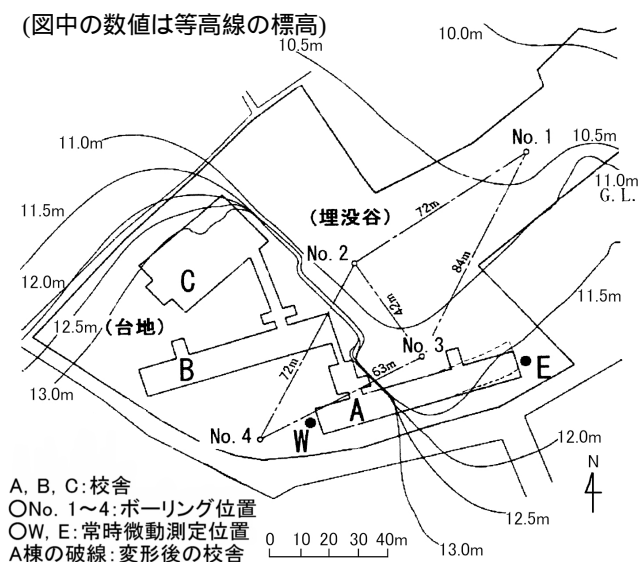


図-1 高校建物配置図(1968年十勝沖地震発生前)
(文献 3)に追加²⁾

る．また構造形式はA棟およびB棟がバランスドローメン構造，C棟がトラス構造となっている．さらに構造種別は3棟ともRC造であるが，C棟の屋根の

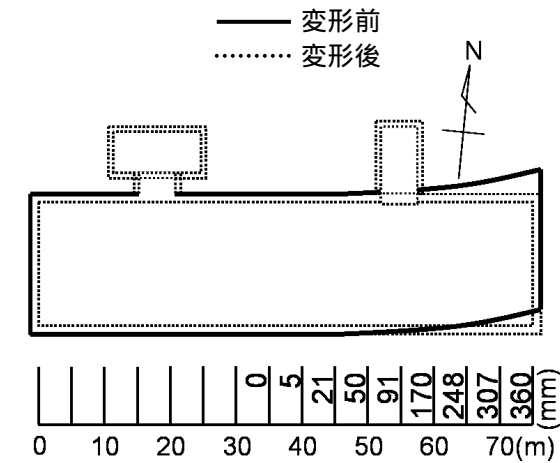


図-2 高校建物 A 棟屋根面における水平移動³⁾

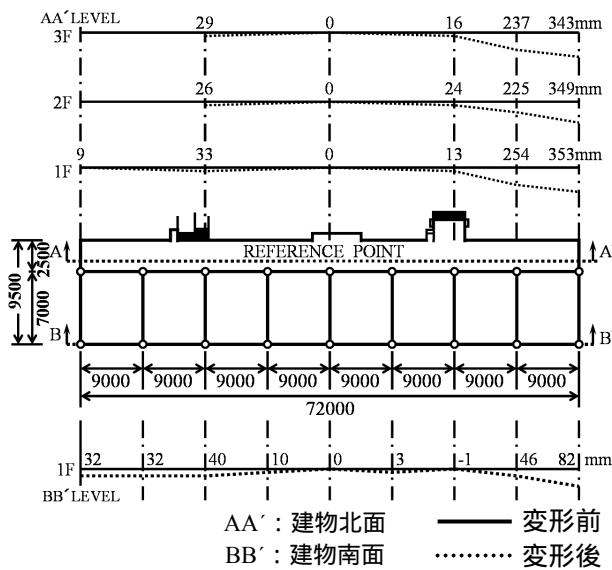


図-3 高校建物 A 棟沈下図³⁾

みがS造である．基礎はローム層を支持層とした独立フーチング基礎である³⁾．

(2) 被害状態

この地震では3棟のうち図-1のように南側に配置されているA棟建物が最も大きな被害を受けた¹⁾⁻³⁾．このA棟建物は図-1の地表面の等高線を見るとわかるように，台地と埋没谷にまたがってつくられている．また，ここの両地盤の境界部では地表面の等高線11.5m～13.0mの線が重なっており，ここでは約1.5mの高低差がある．さらに建物の長軸方向および短軸方向と地表面の等高線が斜めに交わっている．地震時にこのA棟建物はこの埋没谷部分で大きな被害を受けた．被害の特徴としては図-2のように建物の一部が北側にくの字に変形し，その水平変位は埋没谷側で最大360mmに及んだほか，図-3のように1階部分の埋没谷側で最大353mmもの沈下も発生した．この他，B棟建物に大きな被害はなかったものの，せん断ひび割れが発生した部分があった．しかし，

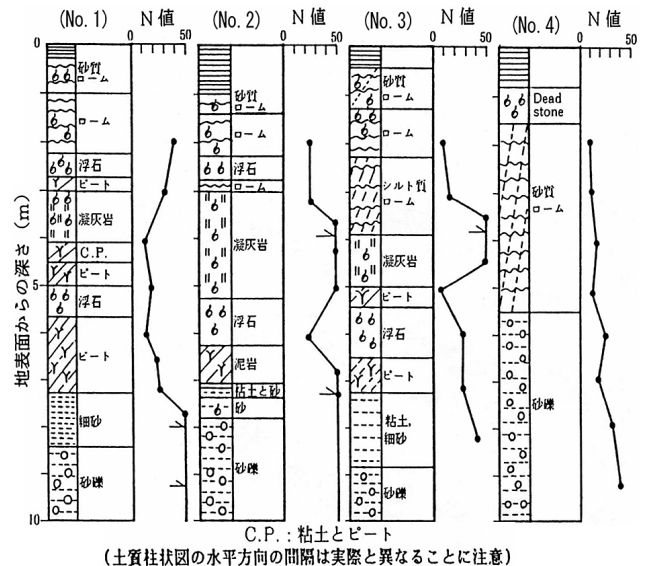


図-4 土質柱状図(測定位置 No.1, 2, 3, 4 は図-1 参照)³⁾

C棟建物に被害はみられなかった³⁾．

(3) 地盤状態

図-4に図-1のボーリング位置No.1～4で調べられた地盤の土質柱状図を示す³⁾．A棟建物北部および北東部の埋没谷上のNo.1～3地点をみると下方にある砂礫層の深度が，No.4地点に比べると約4～6mほど深い位置になっている．さらにこのNo.1～3地点にはN値の比較的大きいローム層や凝灰質土層の下に，沼沢性堆積物である腐植土層や粘土混じり土層などの軟弱土層が堆積している．このような軟弱土層は地震時にすべり面等となってその上の土層（以後軟弱土層を含む地盤を軟弱地盤と称する）は大きく動くことが考えられる⁴⁾．しかしA棟建物西部の台地上のNo.4地点の土質柱状図をみると，N値に極小値もなく，腐植土層などの軟弱土層も含まれていないことから他の3点と比べると比較的良好な地盤である．これらのことから，地震時に軟弱地盤(埋没谷)と良好な地盤(台地)との間に不同変位が発生したことが推定される¹⁾．

(4) 被害状態と地盤状態をもとにした被害原因の推定

A棟建物は段丘堆積物からなる台地と沼沢性堆積物のある埋没谷にまたがった状態に作られており，地震時に台地と埋没谷の間で不同変位が発生したため，その際に図-1の高校建物配置図からも推定されるように，台地と埋没谷の境界部分に沿って建物基礎が地盤から強い力を受けて，建物の埋没谷上の部分が北側にくの字に変形したことが推定される¹⁾²⁾．

(5) 常時微動による地盤の動きの考察

A棟建物の地盤がどのような動きをしているかをみるために，建物西端(W点)と東端(E点)付近の地盤面で常時微動の測定を行った²⁾．図-1と図-5

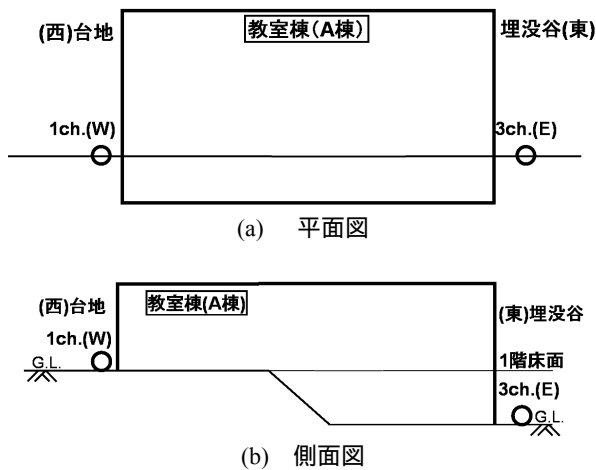


図-5 常時微動測定位置図²⁾

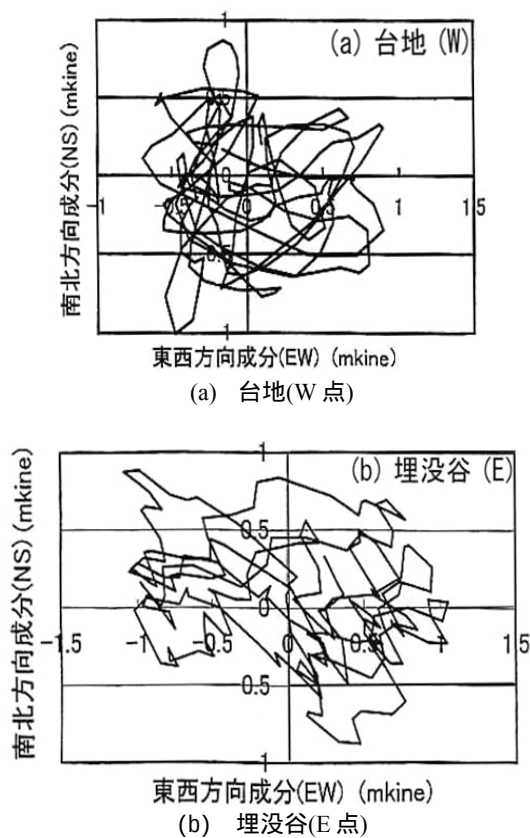


図-6 土粒子の軌跡図(測定位置 W, E 点は図-1 参照)²⁾

に常時微動および土粒子軌跡図の測定位置を、図-6に土粒子軌跡図を、図-7および図-8に常時微動の測定結果として、それぞれフーリエスペクトルとフーリエスペクトル比を示す。はじめに図-6(a)のW点(台地側)の軌跡をみると、ほぼ円を描くような丸みを帯びた軌跡を描いているが、同図(b)のE点(埋没谷側)の軌跡をみると、北西-南東方向に長円に近い軌跡を描いていることがわかる。この方向は図-1の谷軸方向ともほぼ一致している。

図-7をみると、水平成分のNS成分は約0~4Hz付

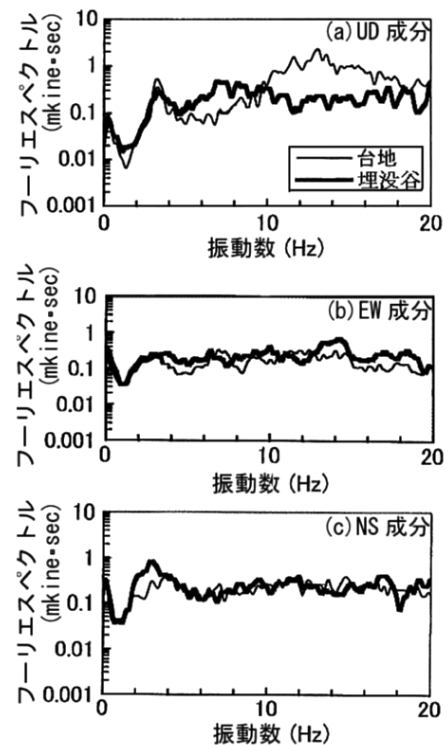


図-7 フーリエスペクトル(台地 W と埋没谷 E)
(測定位置 W, E 点は図-1 参照)²⁾

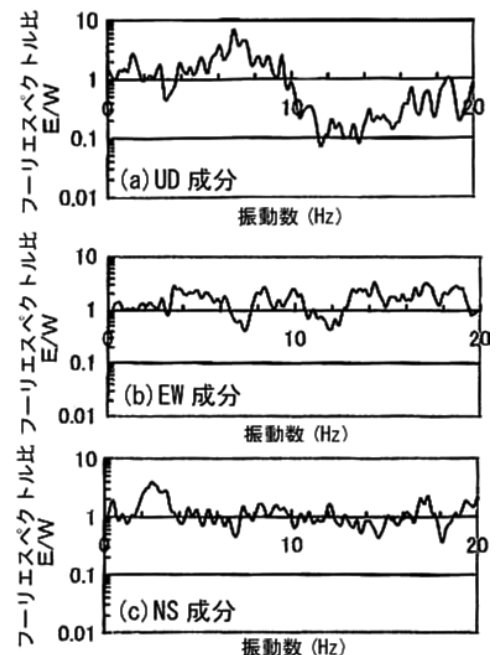
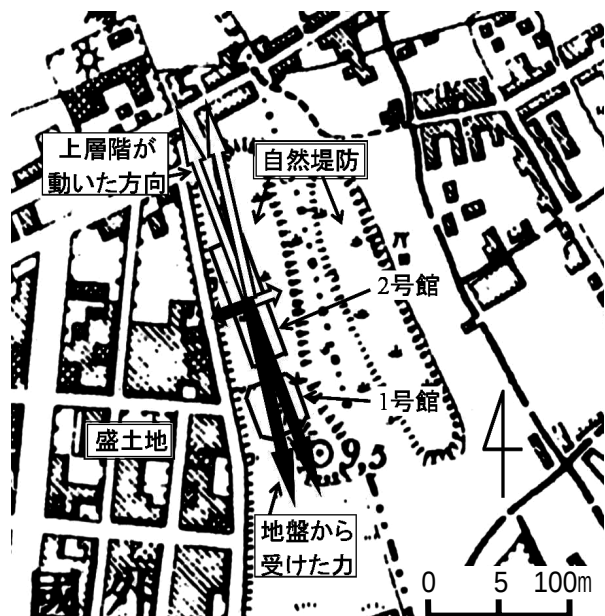
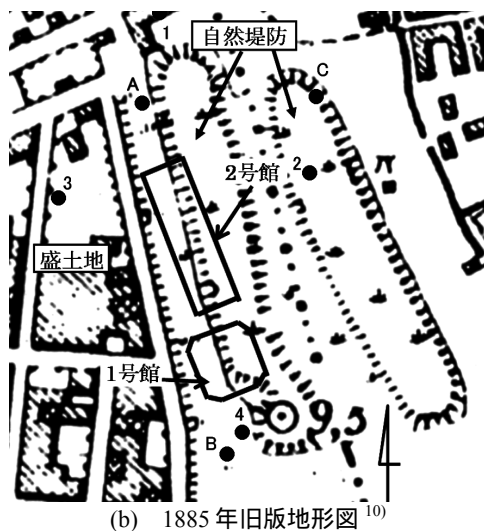
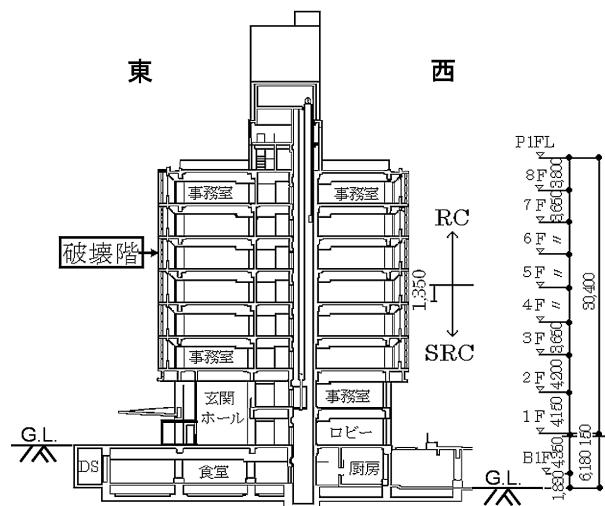
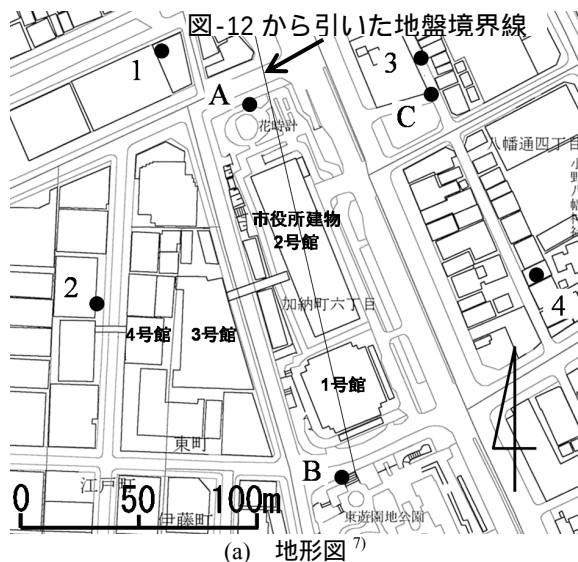


図-8 フーリエスペクトル比(埋没谷 E/台地 W)
(測定位置 W, E 点は図-1 参照)²⁾

近でEW成分よりも大きい振幅を示している。

図-8をみると各成分ともそれぞれ1より大きいピークや1より小さい谷を示していて、両地盤(台地と埋没谷)は性質の異なる地盤であることが分かる。特に10Hz以下の振動数範囲でみると、各成分とも台地(W点)より埋没谷(E点)の方が大きく動いて



いることが分かる.

以上の常時微動測定結果から、地震時にも台地に

3. 市役所建物2号館（1995年兵庫県南部地震）

(1) 建物の概要

本建物は神戸市中央区にあり、1995年兵庫県南部地震（ $M=7.3$ ）において被害を受けた⁵⁾⁶⁾。市役所建

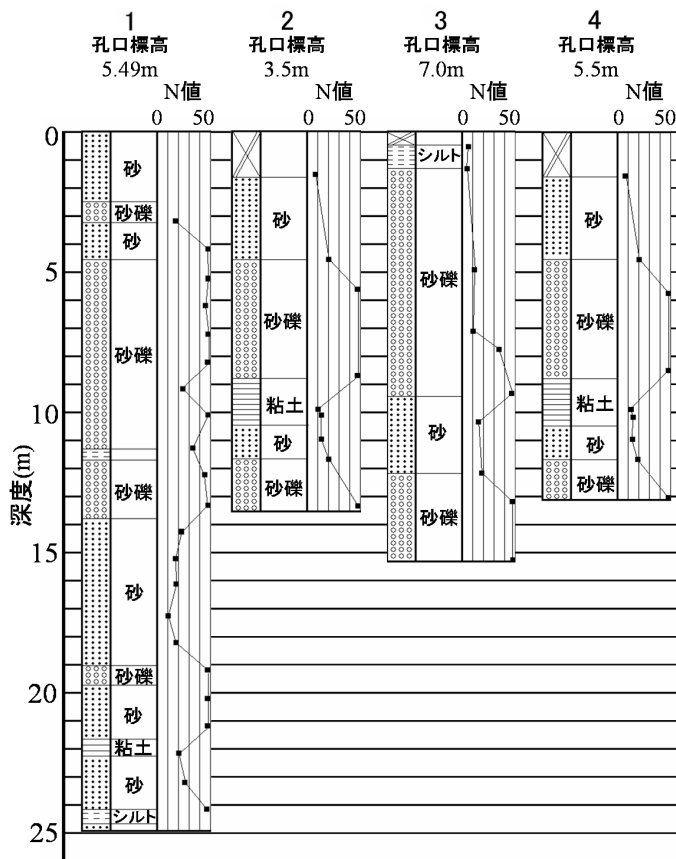


図-13 土質柱状図⁷⁾(調査位置 No.1 ~ 4 は図-9 参照)

物は図-9のように配置されており，南側にある高層ビルの1号館と2，4，8階を渡り廊下で連結されている．基礎形式は直接地業べた基礎，構造形式は耐震壁付ラーメン構造となっている．1957（昭和32）年に地階から5階床柱脚部までSRCで，5階柱頭部以上をRCで作られている．さらに5階から6階にかけて柱断面が5階の850mm×850mmから6階の650mm×650mmへ減少し，RC壁厚（コア部）が5階以下の20～50cmが6階以上で12～18cmと減少している⁵⁾⁶⁾．このように本建物は5階から6階の間に大きい剛性変化点を持っている⁸⁾．

(2) 被害状態

この地震で1～4号館のうち，図-10のように大きな被害を受けた2号館の断面図は図-11のようになっている．地震により本建物は図-11に示したように6階部分で層崩壊を起こし，6階の上層階部分が北側および東側に変位した．特に北側方向には約1.5mの変位を生じた．またこの層崩壊によって，8階部分の渡り廊下が落下した⁵⁾⁶⁾．

(3) 地盤状態

図-12のように1885年旧版地形図¹⁰⁾に現在の市役所建物1号館および2号館の位置を示すと，両建物は自然堤防と盛土地の境界部に建てられている⁸⁾⁹⁾．その地盤境界線は建物の長軸方向と斜めに交わってお

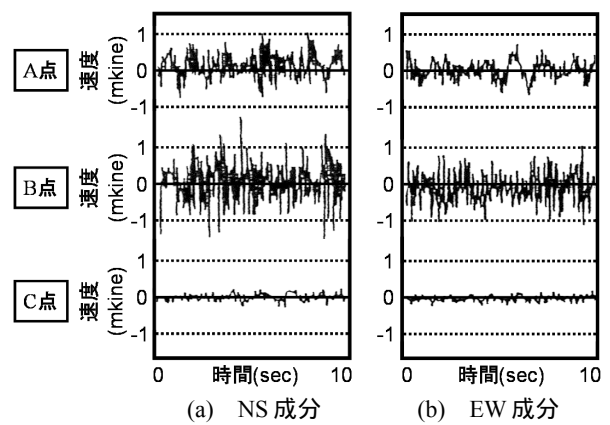


図-14 常時微動測定結果(観測波形)¹¹⁾
(測定位置 A, B, C は図-9 参照)

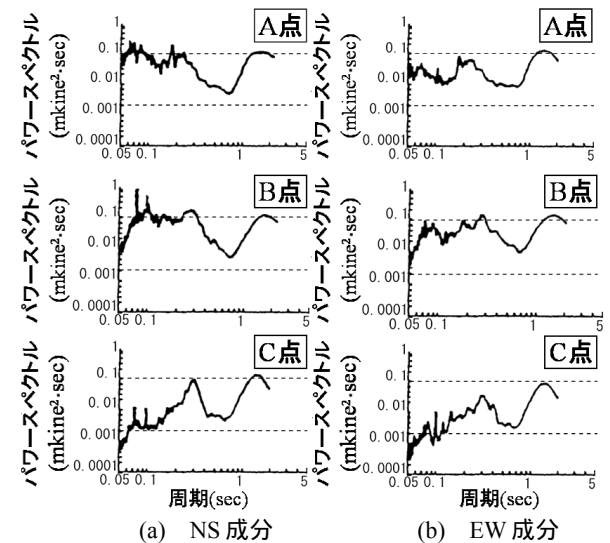


図-15 常時微動測定結果(パワースペクトル)¹⁰⁾
(測定位置 A, B, C は図-9 参照)

り，しかも自然堤防と盛土地の間に約2mの段差があり，これらは2．に述べた高校建物と同様である．次に，図-13に市役所付近の地盤の土質柱状図⁷⁾を示す．調査位置No.1～4は図-9(a)，(b)に示されている．図-9，12，13から分かるように，自然堤防上のNo.3，4地点の地盤強度は盛土地上のNo.1，2地点と比べて大きい．さらに，盛土地上のNo.1，2地点には自然堤防上のNo.3，4地点に比べて軟弱粘性土層が多く含まれている．これらの軟弱粘性土層は地震時にすべり面となってその上の土層が地震時に大きく動くことが考えられることから⁴⁾，盛土地と自然堤防との間に不同変位が発生したことが考えられる⁸⁾⁹⁾．

(4) 被害原因の推定

以上より，地震時に自然堤防と盛土地の間に不同変位が発生してそれに伴う偏土圧が市役所建物2号館の地階部分または基礎に急激に作用したために，

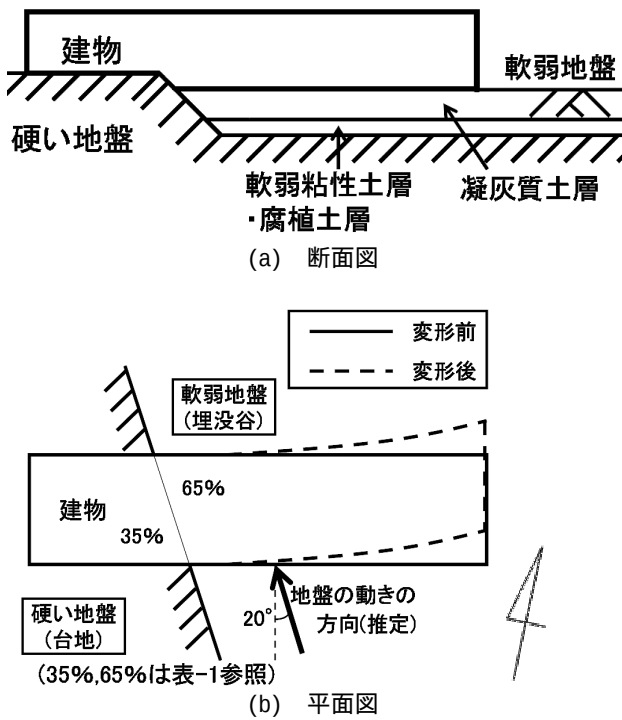


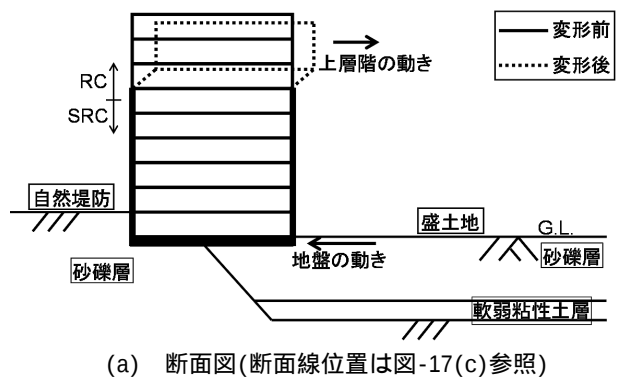
図-16 高校建物の被害機構の推定図(模式図)²⁾

層崩壊等の被害が発生したことが推定される⁸⁾⁹⁾。即ち、図-12に示すように、自然堤防と盛土地の境界部分に沿って北側から南側に動いた盛土地の地盤から建物の地階部分または基礎が強い力（偏土圧）を受け、その反作用で層崩壊階の上層階が北側および東側に移動したことが推定される。その際に、5階から6階部分にかけて建物剛性が急変していて、相対的に剛性の小さい方の6階部分が層崩壊（せん断破壊）したことが考えられる。

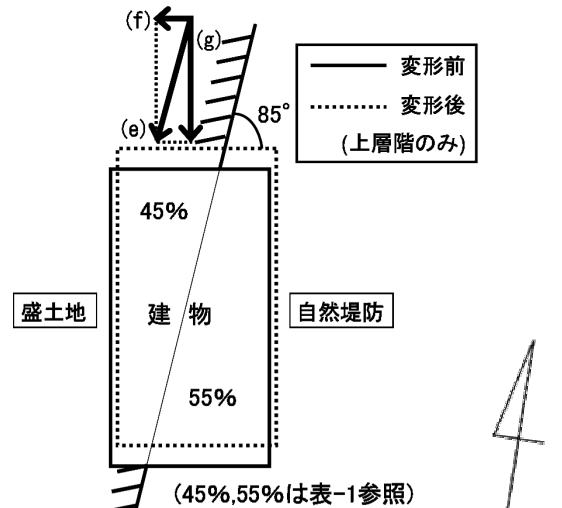
(5) 常時微動による地盤の動きの考察

兵庫県南部地震後に市内の地盤で常時微動の測定が多数行われている¹¹⁾。その常時微動のうち、市役所建物付近の常時微動観測波形を図-14に、パワースペクトルを図-15に示す。測定位置A, B, C地点は図-9に示されており、同図と図-12から分かるようにA, B地点は盛土地上、C地点は自然堤防上にある。

図-14をみると、(a)のNS成分および(b)のEW成分はどちらも盛土地上にあるA, B地点の方が自然堤防上にあるC地点よりもその振幅が大きい、特に盛土地上にあるA, B地点では、NS成分の方がEW成分よりも振幅が大きいことが分かる。次に図-15をみると、(a)のNS成分および(b)のEW成分はどちらも盛土地上にあるA, B地点の方が自然堤防上にあるC地点よりも短周期側（周期約1sec以下）での振幅が大きい。さらに盛土地上にあるA, B地点では、EW成分よりもNS成分の方が短周期側（周期約1sec以下）での振幅がやや大きいことが分かる。このことから常時微動と同様に地震時にも自然堤防よりも盛土地の方が地盤の動きが大きく、しかも盛



(a) 断面図(断面線位置は図-17(c)参照)



図中の(e): 地盤から受けた力(推定)の合力
(f), (g): 地盤から受けた力(推定)の分力
(b) 平面図

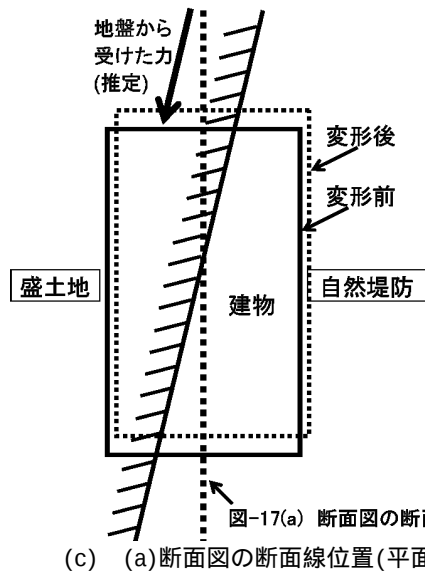


図-17 市役所建物の被害機構の推定図(模式図)⁸⁾

土地ではEW方向よりもNS方向に地盤が動きやすいことが考えられる。よって、図-10の旧版地形図に示した自然堤防と盛土地の境界部分に沿って、地震時に盛土地の地盤が北側から南側へ自然堤防よりも

表-1 建物直下の硬い地盤と軟弱地盤の占める割合とその方向(力の作用方向角度は、図-16(b)、図-17(b)に示す、建物短軸方向から反時計回りに測った角度)

		高校建物 A 棟	市役所建物 2 号館
平面積割合 (%)	硬い地盤	約 35	約 55
	軟弱地盤	約 65	約 45
力の作用方向角度 $\theta(^{\circ})$		約 20	約 85

大きく動いて不同変位が発生して、それに伴って偏土圧が建物の地階部分または基礎に、図-12の⇒印方向に作用し、その反作用で層崩壊した6階の上層階が図-12の⇨印方向に移動したことが推定される⁸⁾。

4. まとめと考察

(1) 高校建物A棟の被害と地盤の関係のまとめ

1968年十勝沖地震で被害を受けた高校建物A棟は図-16のように建物の下を台地と埋没谷地盤の境界線が通っており、さらにこの境界線は建物の長軸方向と斜めに通っている。図-1の建物平面図と等高線からみると、表-1と図-16に示すようにこの建物は長軸方向に平面積の約35%程度が台地上にあり、約65%程度が埋没谷上にある。さらに地盤状態と常時微動測定結果からもわかるように台地に比べて、埋没谷地盤の方が揺れやすい(動きやすい)性質を持っていること、さらに埋没谷地盤においてもEW成分に比べてNS成分の方がその振幅も大きいこと、また埋没谷地盤には軟弱粘性土層や腐植土層が含まれており、これが地震時に埋没谷地盤の動きを大きくすることなどが考えられることから⁴⁾、台地と埋没谷では地盤の動きが違い、さらに埋没谷では台地との境界部に沿った方向(図-16の矢印⇒参照)の地盤の動きの方が大きく生じて不同変位が起き、それに伴って建物基礎に偏土圧が作用したために、くの字に曲がるような被害を受けたことが考えられる。

(2) 市役所建物2号館の被害と地盤の関係のまとめ

1995年兵庫県南部地震において被害を受けた市役所建物2号館は、図-17(b)のように自然堤防と盛土地の境界線が建物の下を通っていて、その境界線は建物の長軸方向と斜めに交わっている。建物平面図および1885年旧版地形図から考えると、表-1に示すように建物平面積の約55%が自然堤防の上に、約45%が盛土地の上にある。地盤状態と被害状態から、本建物は地震時に盛土地から図-17(b)の(e)の矢印⇒のように自然堤防との境界線に沿って盛土地の地盤から力を受け、その反作用で層崩壊した階の上層階が破線のように移動したと考えられる。また常時微動から埋没谷地盤よりも盛土地の方が大きく動くとともにEW成分よりNS成分の方が大きく動くこと

が分かる。さらに、土質柱状図からも盛土地には軟弱粘性土層が含まれているため、地震時には自然堤防地盤よりも盛土地の方が大きく動いて、両地盤間で地盤の動きが違い、さらに盛土地側では自然堤防と盛土地の境界部分に沿った方向の地盤の動きの方が大きいため不同変位が発生し、それに伴って図-17(a)のように偏土圧が建物地階部分または基礎に作用して、上層階が反作用で北側および東側に移動したことが推定される。

(3) 高校建物と市役所建物の被害形態の違いと地盤の関係の考察

高校建物と市役所建物の被害形態が異なることについて考察するために、表-1をみると、建物直下の地盤は市役所建物では硬い地盤が約55%と全平面積の50%以上を占めているのに対して、高校建物A棟では約35%と全平面積の3分の1程度になっている。さらに地盤から受けたと推定される力の作用方向についても、表-1に示すように高校建物A棟は約20°と、長軸方向と垂直に近い状態であると考えられるのに対して、市役所建物2号館は約85°と、短軸方向とほぼ垂直である。つまり、高校建物A棟は建物と交わっている地盤条件境界部分が短軸方向の長さに近くて短いのに比べ、市役所建物2号館は建物と交わっている地盤条件境界部が長軸方向の長さに近くて長い。これらのことが被害形態の違いに影響をもたらしたことが考えられる。

即ち、平面形状が矩形断面建物の剛性は短軸方向と比べて長軸方向の方が大きいので、短軸方向には曲げ変形が発生しやすく、くの字型に曲がる被害が発生し(高校建物)、長軸方向にはせん断力が大きく生じてせん断破壊が生じやすく、中間階の層崩壊が発生した(市役所建物)ことが考えられる。

5. 結論

地震で被害を受けた2つの建物、即ち高校建物と市役所建物の被害原因を被害状態と地盤状態と常時微動より調べた。その結果、両建物は地盤条件の変化点(硬軟地盤境界部)にあって、しかも軟らかい方の地盤には軟弱粘性土層が含まれているために生じた両地盤間の不同変位で被害が発生したことが推定された。さらに、両建物の被害状態が異なるのは、前者の建物は短軸方向にたわみやすく曲げ変形を受けてくの字形に曲がり、校舎の建物は長軸方向に剛性が大きいため、せん断変形が発生して層崩壊が生じたためと推定される。

謝辞：以上の調査を進めるに当たって、お世話になった瀬尾和大東工大大学院教授と青森県教育委員会並びに八戸東高校の関係者他の方々と、引用させていただいた文献の著者に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 那須誠:建物の地震時と常時の変形と地盤構造の関係,第21回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集,pp.356-357,1994.
- 2) 植田淑人,那須誠:高校建物の地震被害と地盤と常時微動の関係,第38回地盤工学研究発表会講演集,pp.2087-2088,2003.
- 3) 日本建築学会編:1968年十勝沖地震災害調査報告,pp.460-481,1968.
- 4) 那須誠:阪神・淡路大震災による構造物被害と地盤の関係,第4回耐震補強・補修,耐震診断に関するシンポジウム講演論文集,pp.123-130,2000.
- 5) 日本建築学会編:阪神・淡路大震災調査報告書,建築編-1,pp.165-170,1997.
- 6) 日本建築学会編:阪神・淡路大震災調査報告書,建築編-2,pp.219-230,1998.
- 7) 神戸の地盤研究会編:神戸JIBANKUN,1999.
- 8) 水出有紀,那須誠:神戸市役所建物の地震被害における地盤の影響の研究,第38回地盤工学研究発表会講演集,pp.2099-2100,2003.
- 9) 那須誠:兵庫県南部地震による建物被害と地盤の関係-三宮付近-,第16回日本自然災害学会学術講演会要旨集,pp.5-6,1997.
- 10) 柏書房編:明治前期・昭和前期 神戸都市地図,p.45,1995.
- 11) 藤原悌三他:平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証,資料編,兵庫県における合同微動観測,pp.66-82,1996.

(2003.7.1 受付)

INFLUENCE OF GROUND CONDITION CHANGING SITE UPON EARTHQUAKE DAMAGE TO BUILDING

Makoto Nasu, Yuki Mizuide, and Tsunehiko Oba

Various causes act on the earthquake damage to building complexly. In this time, we have investigated the relation between the ground condition and the damage to two buildings of the senior high school building damaged by the 1968 Tokachi-off Earthquake and the city hall by the 1995 Hyogo-ken nambu Earthquake. Both buildings are in the changing site of ground condition, but there is difference between the location of building axes to changing line of ground condition. We have considered the damaging mechanism from damaging states of buildings, ground states and the microtremors. It has been presumed that differential ground displacement and/or eccentric earth pressure were generated in ground by earthquake and two buildings were damaged.