

軟弱地盤における建築物に関する調査研究

大崎 順彦

建設省建築研究所

The Niigata Earthquake Damage to Reinforced Concrete Buildings on Weak Ground in Niigata City and the Ground Conditions

By Y. Ohsaki

Building Research Institute, Ministry of Construction, Tokyo

Abstract

By the Niigata Earthquake on June 16, 1964, many reinforced concrete buildings were damaged in and around the city of Niigata, while damage to wooden buildings was not so noticeable.

Among about 1,530 reinforced concrete buildings located in Niigata City, approximately 340 suffered damage. Most of these damaged buildings were settled and/or tilted en masse without any appreciable damage to their superstructure, but two reinforced concrete buildings were overturned completely.

Such peculiar features of damage are attributed to the specific behavior of sandy ground during the earthquake; that is, the sandy ground was liquefied by the earthquake vibration and the complete loss of bearing capacity resulted.

From the viewpoints of soil mechanics and foundation engineering, the mechanism of the liquefaction of sandy soil and the critical condition of the occurrence of liquefaction are briefly discussed.

1. 新潟市の地盤

新潟市内において、既設各種構造物の基礎設計資料と
するため実施されたいわゆる地盤調査ボーリングの結果
は、地震の直後からできるだけ漏れなく集めるよう努力
した結果、111ヵ所、210本のボーリング資料を集め
た。これら既往のボーリング調査地点は、図1に示す
とおりである。

これらの諸資料を相互に比較検討すれば、表1に示
したように、新潟市周辺の地盤区分をまとめること
ができる。

これらの地盤構成を新潟市内の図1：ボーリング地点
図に示してあるように、ほぼ東西方向に沿う断面と、
それに垂直な南北を通る2方向の断面に沿って示すと
図2および図3のようになる。

また新潟市内における既往ボーリング資料には、各層
に対して標準貫入試験約4,000ヵ所、および土質試験約
400個が行なわれている。

2. 鉄筋コンクリート造建物の被害

新潟市内における鉄筋コンクリート造建物の調査は、
調査団の各班がそれぞれ担当区域を巡回して、被害の有

無にかかわらず、できるだけもれなく個別調査した。調
査に先だってあらかじめ用意した調査表は、表2に示
たとおりのものである。

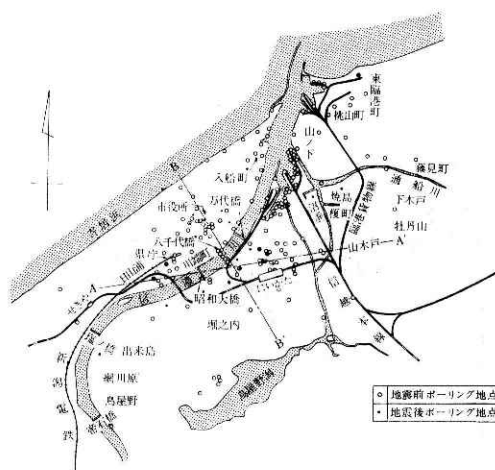


図-1 新潟市内ボーリング地点図
Location of borings in Niigata City.

表-1 新潟市周辺の地層区分
Subsoil formation around Niigata City.

層名	土質	N値	時代
最上部層 Um	砂, シルト, まれに砂レキ, 腐植物多く, 時に泥炭状	20以下	新 期
上部砂層	上部 USu	5~20	中 古 期
	下部 USl	砂質: 10~20 粘土質: 10以下	
下部砂層	上部 USu	砂質: 20~50 粘土質: 5~15	最 新 期
	下部 LS1	シルトまじり細砂, 時にシルトないし粘土, 貝破片が多い	
下部粘土層 LC	シルトないし粘土, 貝破片を含む	5~20	新 期
最下部層 Lm	シルトないし粘土, 細砂, 貝破片を含むことが多い	20~50以上	中 期
基盤土層 BS	砂レキ, 砂, シルトの互層	50以上	前 期
基盤岩層 BR	砂岩, シルト岩, 時にレキ岩	50以上	第 3 紀

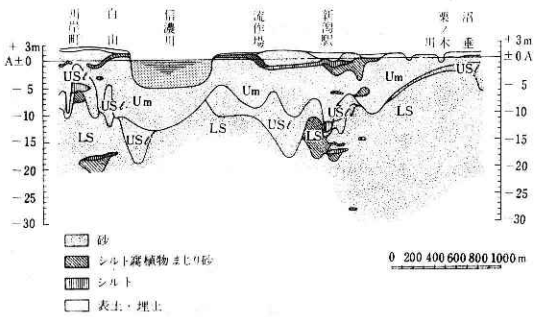


図-2 地盤断面図(その1)
Subsoil profile-1.

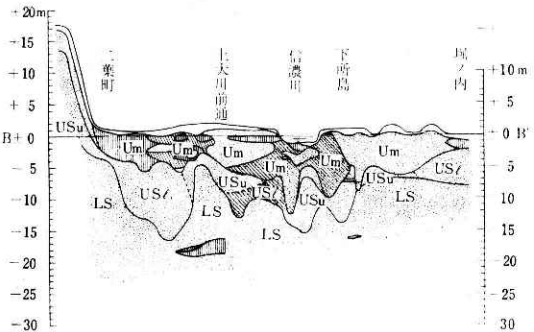


図-3 地盤断面図(その2)
Subsoil profile-2.

これら調査表の各項目のうち、用途、構造、階数、亀裂、破損、剝落等は、調査員の現場における観察に基づいて記録し、亀裂および破損、剝落等の原因は調査員の判断によった。また床面積、延面積、高さ、設計者、施工者、竣工年月日、基礎スラブ、地業、設計耐力等の各項目は、あらかじめ県庁当局から確認申請時の設計図書を借り出しておいて、調査実施前に記入しておいたものもあり、各建物内に設計図書が保存されていて、その閲覧と関係者からの聞き込みによって記入したものもある。このような資料のない建物については、現地における調査終了後、建物の設計者あるいは施工者を逐一つきとめて、これと連絡し、設計図書を借り出すか筆写して、できるだけもれなく全項目について記入するよう努めた。

柱傾斜角はすべて現場でスケール付き下げ振りによって実測した。

新潟市内では、鉄筋コンクリート造の建物は、昭和30年10月1日の大火以前には、その棟数が74棟であったことが、戸別構造別調査の結果によってわかっている。しかし大火後における鉄筋コンクリート造建物の増加はきわめていちじるしく、確認申請書提出件数その他の調査を総合すれば、新潟地震当時における総棟数は、だいたい1,530棟程度と推定される。これら1,530棟のうち、今回の新潟地震によって、なんらかの被害を受けたものの数は340棟であり、したがって新潟市内における鉄筋コンクリート造建物の被害率は

$$340/1,350=22.2\%$$

となる。

軟弱地盤における建築物に関する調査研究——大崎

表-2 新潟地震鉄筋コンクリート造建物被害調査表
Inquiry form of the damage to reinforced concrete buildings due to Niigata Earthquake.

		分 類			
		調 査 者			
建 物 名 称					
所 在 地		新 潟 市			
用 途		住宅・アパート・事務所・工場・商店・デパート・ホテル・病院・学校・劇場・その他 ()			
構 造		鉄筋コンクリート 鉄骨鉄筋コンクリート 複合 ()			
		ラーメン式 壁式 コア式 その他 ()			
階 数		地上 階 地下 階			
		全地下 半地下 一部地下			
床 面 積		m ²		延面積 m ² 高さ m	
設 計 者		施工者		竣 功 年 月	
基 礎 ス ラ ブ		独立 複合 連続 ベタ		基礎スラブ底面 GL より m	
地 盤		直接基礎 クイ基礎 (木・既製 RC・現場打ちRC・鋼) ピヤ基礎			
		ク イ 長 m		ク イ 径 cm	
設 計 耐 力		直接基礎の場合 t/m ²		クイ基礎の場合 t/本	
危 害		位 置		原 因	
		ハリ曲ゲ・柱曲ゲ・ハリセン断・柱セン断・耐力壁・換気・床		基礎移動・不均沈下・衝突・耐力不足・施工不良・その他 ()	
破 損		ガラス 内装 外装 塵具		変形 振動 その他 ()	
剥 落		内装 外装			
沈 下		最大 cm		位置 最少 cm 位置 原因	
柱 傾 斜 角		短辺方向 °		長辺方向 ° 最大傾斜方位	
床 傾 斜 角		短辺方向 °		長辺方向 ° 最大傾斜方位	
接 続 棟		開口亀裂		衝突	
所 見		被 害 原 因 修 復			
そ の 他					

表-3 筋鉄コンクリート造建物の被害
Damage to reinforced concrete buildings.

傾斜角	被害建物(棟)			百分率(%)		被害建物延面積(m ²)
	上部構造も被害を受けたもの	基礎のみ被害を受けたもの	計	全建物に対し	被害建物中	
0~1°	92	107	199	13.0	58.5	310,600
1°~2.5°	37	49	86	5.6	25.3	87,800
2.5°以上	22	33	55	3.6	16.2	46,800
計	151	189	340	22.2	100.0	445,200

つぎにこれら340棟の被害建物の内訳を示せば、表3のとおりである。また最大傾斜角(長辺・短辺両方向の傾斜角のベクトル和)の大小をもって、被害の等級を表すことにし、

傾斜角	0°~1°	小被害
"	1°~2.5°	中被害
"	2.5°以上	大被害

とすれば、これら各等級に属する建物の数と百分率も、表3に示したとおりである。またこれらを地図上にプロットして、被害分布を示せば、図4のようになる。

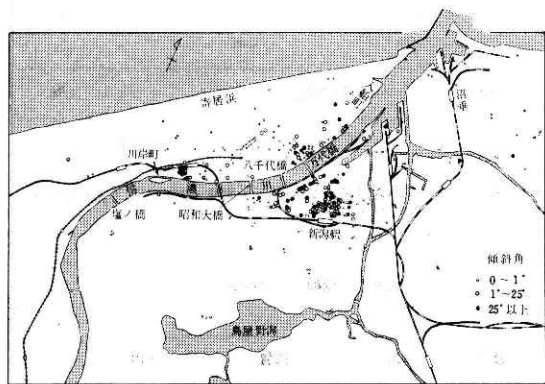


図-4 被害分布図
Distribution of damaged buildings.

図4の被害分布図をみるに、小被害のものまで全部含めれば、被害建物はほぼ全市にわたって分布していることがわかる。しかし、中被害以上のものだけについてみれば、砂丘地帯上にはまったくみあたらず、市内の低地域だけにあり、さらに大被害のものは、同じ低地域でもきわめて局部的に限られた範囲内に集中している。

このように被害分布の面からみて、被害の大小を分けるキーラインが市内の各所にある。したがって、図5は建築物以外の被害も参照しながら、新潟市内を

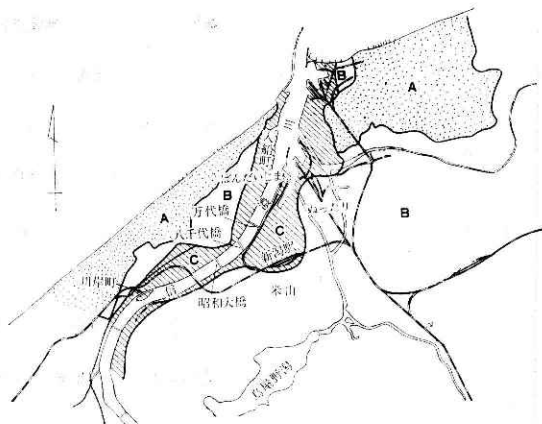


図-5 被害区分図
Map of damaged zones.

- A地域：被害がないか軽微な地域
- B地域：被害が顕著でなかった地域
- C地域：被害がはげしかった地域

に区分したものであるが、このような区分図の境界線は、比較的容易に描くことが可能であった。

次に上部構造が被害を受けたものの構造被害型式を分類し、これらをまとめて表示すれば、図6のようになる。

今回の地震により新潟市内の建物のうけた被害の特色としては次の事項があげられる。

1) 被害は表層砂地盤の性質と関連しており、とくにはなほだしい被害をうけた地域は信濃川の埋立地または河川流路の変化によって近年陸地となったところであり、これに対して昔からの砂丘地帯ではほとんど被害がなく、その差が顕著に認められた。

2) 市内の約340棟の鉄筋コンクリート造建物が被害をうけたが、その実態は全部が傾斜、沈下またはその組合せという変動をうけており、それらの約2/3は上部構造になんらの被害がなかった。

主要因	被害型式	推定作用力	構造被害の特色	被害建物例	
				建 物 名	主な被害状態
A 地割れ等 地盤の水平移動	1 両端移動型		a 柱せん断型 	1-8 帝石ビル	耐力壁(せん断亀裂)
				2-38 県立高校体育館	柱(せん断亀裂)地中梁(引張り亀裂)
				4-40 済生会病院旧館	柱(せん断亀裂)
			b 水平材破断 	1-100 通信病院(1層部分)	床スラブ梁(引張り亀裂)
				3-7 丸肥運輸倉庫	梁、壁(引張り亀裂)
				4-55 豊照小学校体育館	屋根はトラス梁、壁(引張り亀裂)(同上)
B 噴砂、地入り 不同沈下等 地盤(杭)支持力の局部的減少	2 中央沈下型		a 柱せん断型 	4-66 礎小学校B棟	柱、梁(せん断および曲げ亀裂)
				b 下部水平材破断 	4-70 大洋漁業新潟支店
	3 端部沈下型		a 柱せん断型 	1-43 宮浦中学校 A棟	柱(せん断亀裂)
				4-41 新潟漁業協組倉庫	柱梁(1部崩壊残余せん断亀裂)
				2-45 新潟鉄工小針アパート	壁(せん断亀裂)
			b 下部水平材破断 	3-25 明治乳業新潟工場	梁壁、スラブ(破断)
4 掘れ型	PLAN 	イ面とロ面で亀裂の方向が異なる 	1-43 宮浦学中C棟	柱(せん断亀裂)	
			2-20 家庭裁判所	柱、梁(せん断亀裂)	
			4-55 豊照小学校	柱梁、床スラブ(せん断亀裂)	
			4-7 白山小学校	柱、梁(せん断亀裂)	

図-6 構造被害型式
Types of structural damage.

また上部構造に被害を受けた建物は、その原因が局部的な地表変動(地面の割れ、陥没、水平ずれ)やクイ支持力の低下にあるため、それぞれこれに応じた損傷状況を示している。なお、締まった砂層まで深くクイ打ちした基礎をもつ建物は、ほぼ無被害であり、また地下室をもつ建物の被害は一般に少なかった。

これらの点が従来の地震で多くみられた構造物の振動的被害の様相と異なっている。

3) 鉄筋コンクリート造以外の木造、鉄骨造などの建物も地表変動によって被害を受けたが、屋根瓦の落下はほとんどみられなかった。

4) 砂丘傾斜地に造成した宅地の軟弱な盛砂のため、その上の木造建物が被害を受けた。

5) 石油工場から火災が発生し、このため工場ならびに周辺の相当多数の建物が被災した。

以上に記したように、今回の建物の被害形態はきわめて特殊なものであり、わが国および世界の震災史上注目すべきものといえよう。

3. 地盤の特性と被害

このように、今回の新潟地震では軽い木造建物の被害が少なく、重い鉄筋コンクリート造がむしろ大被害を受け、しかもその被害が建物全体の沈下・傾斜あるいははなはだしい場合には転倒という形をとっていて、上部構造の構造的被害はまったくないか、あるいは二次的なものにはほぼ限られているという、従来の地震の経験ではあまり例をみない特徴を示している。

大規模な構造物が転倒した例は、いままでにもあるが、いずれの場合も、粘土質地盤がスベリを示し、傾斜と反対方向の地面が盛り上がる形の破壊機構を示している。

これに対して新潟の場合は、建物下部の地盤にスベリを生じた形跡は、まったく見あたらず、単に建物の片側が砂中へ沈没した形となっている。

また逆に、地中に埋設した軽い構造物が、浮かび上がった現象は、市中のいたるところに見受けられた。

以上のことから、今回の新潟地震では、地表面からある程度の深さまでの砂層が、地震動によってまったく液体のような性状を呈する、いわゆる液化現象を起こしたものと考えることができる。

液化現象(Liquefaction)は、土質力学理論では次のように説明されている。すなわち、いま粒子間の間ゲキ水が水で飽和されている砂層を考え、この砂層中における全応力を σ 、有効応力を $\bar{\sigma}$ 、過剰間ゲキ水圧を u で表わすと、

$$\sigma = \bar{\sigma} + u$$

が成り立つ。

また砂のせん断強さは、有効応力によって支配され、せん断強さを S 、砂の内部摩擦角を ϕ とすれば、

$$S = \bar{\sigma} \tan \phi$$

あるいは

$$S = (\sigma - u) \tan \phi$$

で表わされる。

そこでいま砂中の間ゲキ水圧 u が、なんらかの原因によって増大し、

$$u \rightarrow \sigma$$

程度にまで高まったとすれば、上式より

$$\bar{\sigma} = \sigma - u = 0$$

となり、したがって

$$S = 0$$

すなわち砂はまったくせん断抵抗を失なって、液体のような性質となる。

すなわち、砂が液化現象を起こす原因は過剰地下水圧 u の発生にある。事実、今回の地震でも噴砂、あるいは砂火山といわれる地下水が砂とともに地表に吹き出した跡が、いたるところにみられ、地下水圧が上昇したことの動かせぬ証拠となっている。

このような鉄筋コンクリート造に対する被害の主要原因となった液化現象については、各種の観点から、その生起の要因あるいはそれに影響を与えたものと思われる諸事項を列挙すれば、次のとおりである。

地質学的事項

砂層の滞積年代・滞積地形

土質工学的事項

砂層の間ゲキ比・飽和度・地表面からの深さ

砂粒の粒子の大きさ

間ゲキ水圧

間ゲキ水中における水溶性物質の溶解度

地震学的事項

地震動の加速度・振幅とその継続時間

地震波の砂層中における伝播速度

地盤の卓越周期

構造学的事項

建築物の形状・剛性・固有周期

基礎スラブの種類

地業の種類

これらの諸事項のうち、砂層の滞積年代としては約300年より新しく、地表面からの深さに応ずるある限界値よりゆるい間ゲキを有して、水で飽和しており、また粒子の大きさもある範囲内にそろっているものが、地震動によってその体積を収縮し、その過程において、間ゲキ水圧を異常に高めたことが液化の原因となったものと考えられる。またこのような液化を起こした地盤の性状と、常時微動の頻度曲線の型の間には密接な関係があり、さらに構造的にみれば、基礎スラブがベタ基礎で、とくに地下室のあるものおよび地業としてタイを有するものが、被害の程度が他に比べて軽い。

4. 問題点と今後の課題

1) 今回の建物被害の原因となった砂層地盤における地表変動(地割れ、陥没、水平ずれ等)と液化現象(これに伴う噴砂、噴水)は関東、福井、東南海、南海道等の過去の大地震においても局部的にみられており、とくに東南海地震における名古屋市南部地区の被害はこれに関連するものと考えられる。

また砂層の液化現象については、これに関する実験もあり、また理論的にも考えられてきたことであるが、今回の新潟市における場合のように広い地域にわたってこの種の異常現象が生じるとは、従来の経験からみて予期していなかったところである。これは現行の地震に対する基礎構造設計法が不十分であることを示すものであり、今後の調査、研究によって整備されなければならない。

2) この際まず行なうべきことは、砂層地盤に今回起こった異常な現象の原因を十分究明して、その生起条件を明らかにすることである。このためには大規模の実験的研究と理論解析のほか、過去の地震時における同種の事例についても十分しらべる必要がある。

3) 次に、全国主要都市とくにその臨海、臨川、低地城部の地盤状況を調査し、前記の生起条件と同一である

場合は、地域指定を行なってこの地域内の基礎設計に特別の注意を払う必要がある。

4) 一方、上記のような特殊な地域における各種の構

造物に対して、いかなる基礎構造を用いればよいかという問題を、今回の被害結果を基にし十分研究検討して解決しておく必要がある。