

# (1) 地震被害と地盤構造、震央の関係

鉄道総合技術研究所 那須 誠

## 1. まえがき

構造物の地震被害例を調べた結果、地震被害の発生に地盤構造が密接に関係していることがわかった。その内、盛土や建物等の地震被害は、(1)特異な地盤、特に傾斜成層地盤や傾斜基盤面を伴うような軟弱地盤（埋立地や盛土を含む）で多く発生し、水平な成層地盤では極めて少ないこと、(2)地盤の傾斜方向に変形が発生している例が多いこと、(3)固い地盤（地山）と柔らかい地盤（埋立地等）に跨がって作られている所でも多いこと、(4)軟らかい地盤でも砂質土や腐植土からなる場合に多く発生し、ある程度以上の粘着力のある粘性土からなる場合発生例が少ないことや、橋梁被害も同様な地盤で多いこと等がわかった<sup>1) - 5)</sup>。今回はその後調べた地震被害と地盤状態の関係、基盤面の傾斜方向と震央方向との関係等について報告する。

## 2. 関東地震の建物の被害例

(1)壁体亀裂は、丸の内建物では東西方向の壁に多く、三越、三井（日本橋駿河町）の建物では南北方向の壁に多く生じ、それらは地震動の壁面に対する分力のうち大きい方の方向と一致していた<sup>6)</sup>。今回地震図<sup>7)</sup>や地形図等も調べてみると、両地点の地震動の方向は一致し震央方向とほぼ直交しており、かつ谷筋（前者は丸の内谷、後者は昭和通り谷の支谷）にほぼ直角な方向であり、亀裂が多く出た壁体方向<sup>6)</sup>も谷の斜面の傾斜方向とほぼ一致している。また、故大森博士は丸の内付近は所謂東西に揺れる習性を有していると述べていた<sup>6)</sup>。即ち、軟弱地盤の厚い方に揺れやすく、地震力方向と基盤面傾斜方向が一致して被害が生じたようだ。なお、丸の内付近で被害が多く、三越、三井で被害が少なかったのは、谷の大きさや方向等が関係したのかも知れない。また、日電三田工場の大きく崩壊した建物は、丸の内と同じく所謂南北方向に走る埋没谷の最深部の直上で、直角に横断する方向（東西方向）に桁行方向を持っていた<sup>8)</sup>。日本光学三田工場の建物では、水平亀裂は沖積層下底等深線に平行な壁面に、剪断亀裂はそれに直角な方向の壁面に生じている<sup>7) 8)</sup>。

(2)無被害の浅草寺の沖積層下底は深い（T.P.-20m）がほぼ水平に近く<sup>7)</sup>、北東方向の崩壊が著しい凌雲閣（浅草十二階）は、独立基礎で支持力不足もあったようだ<sup>9)</sup>、沖積層下底面は北東方向に傾斜している<sup>7)</sup>。殆ど無被害の両国国技館と帝国ホテルは沖積層下底が深く（T.P.-20 ~ 30mとT.P.-15 ~ 20m）、かつ後者は長さ2 ~ 4 mの多数のコンクリート杭と厚い連続基礎を有していた<sup>7) 8)</sup>。横浜正金銀行（東京支店）では回転現象が生じたが<sup>6)</sup>、建物の一部が和田倉門から常盤橋方面に至る濠跡埋立地に掛かっていたため生じたようだ。煙突は、横須賀、横浜、東京と震央距離が大きくなるにつれて、震央方向と直角な方向に倒壊しているものが多い（表2）<sup>8)</sup>。

## 3. 地震被害構造物と震央方向、基盤面傾斜方向等との関係

今回、文献6)~70)と新旧地形図等をもとにして、関東地震から千葉県東方沖地震までの18個の地震で被害を生じた各種構造物の震央距離 $\Delta$ 、震央方向と堤軸（建物の長軸等も含む）方向との交角 $\alpha$ 、震央方向と変形方向との交角 $\beta$ 、並びに地盤状態や変形状態をまとめて表1~2、図1~2を作成した（無被害構造物も一部含む）。但し、実際には構造物に捻じれが生じて長軸、短軸の両方向に変形することもあるが、主として長・短軸方向のうち変形の大きい方向から $\beta$ を求めた。表2をみると、地盤内に傾斜した基盤面（硬い層や原地盤面、地山表面等を含む）が存在しているものが多く、文献に傾斜基盤面が明記されていないものでも、亀裂等から傾斜基盤面の存在が推定できるものが多い。

(1)大崩壊を起こした自然斜面の

表1 地震名と略号一覧表

地震名	地震名	地震名	地震名	地震名
(1)関東大地震(KT) 1923.9.1, M=7.9	(5)福井地震(FI) 1948.6.28, M=7.1	(9)えびの地震(EB) 1968.2.21, M=6.1	(3)1978年伊豆大島近海地 震1978.1.14, M=7.0(10)	(7)長野県西部地震(NN) 1984.9.14, M=6.8
(2)鳥取地震(TT) 1943.9.10, M=7.2	(6)1952年十勝沖地震 1952.3.4, M=6.5(TK1)	(0)1968年十勝沖地震 1968.5.16, M=7.9(TK2)	(4)宮城県沖地震(MG) 1978.6.12, M=7.4	(8)千葉県東方沖地震 1987.12.17, M=6.7(CB)
(3)東南海地震(TN) 1944.12.7, M=7.9	(7)宮城県北部地震 1952.4.30, M=6.5(NH)	(1)1974年伊豆半島沖地 震1974.5.9, M=6.9(IZ)	(5)浦河沖地震(UK) 1982.3.21, M=7.1	
(4)南海地震(NK) 1946.12.21, M=8.0	(8)新潟地震(NG) 1964.6.16, M=7.5	(2)大分県中部地震(OI) 1975.4.21, M=6.4	(6)日本海中部地震(NH) 1963.5.26, M=7.7	



No.	名称	緯度	経度	震央距離 (km)	交角 $\alpha$ (度)	震害状況	
						震害	地盤
NH 62	秋田海岸堤 外渕 -13m	107	10	100	10	背斜地盤は埋立砂層；崖面に乾行、滑動、傾斜、ケーソンは海側に傾斜；変形方向は震央方向とほぼ直角な方向	
63	秋田海岸堤 内渕 1.2.3号、中島 1.2号	107	26	64	10	内渕3号と中島1号の旧地盤は傾斜；背後地盤は埋立砂層；法堤は建物川にほぼ平行；法堤直交方向は震央方向と直角な方向にほぼ一致；内渕1.2.3号の震央距離に湾曲、中島1号のセーラブロック構造崩壊や前傾、はらみ出し	
64	秋田海岸堤 大浜1号	107	46	-	46	在来地盤に建設、無被害	
65	秋田海岸堤 大浜2号	107	67	3	67	旧地盤面は傾斜；被災程度最大（法堤のよらみ出し、鋼矢板折損）；北東端は傾斜する在来地盤面（No.64の大浜1号の地盤）に接続？	
66	秋田海岸堤 大浜3号	107	45	45	45	旧地盤面は傾斜；背後地盤は埋立砂層；鋼矢板湾曲、エプロン沈下	
67	釜ヶ崎発電場	121	0	0	0	基盤面は震央方向を軸とする凸形あるいは凹形斜面状？；床の亀裂被害が特異的、建物周囲地盤の一部沈下	
68	須崎立昇院	145	0.5	0	0.5	卓越力は震央方向（略東西南方向の航行方向と一致）に直角方向にも作用したが、主に震央方向に作用；主として航行方向の柱と壁が剪断破壊、大破（3-5階に集中）、表層に水平亀裂；煙突が東方に傾斜（No.32と類似？）；基盤面は凸状	
69	沢ノ浦小水ヶ丘団地	北緯 121	南緯 19	8	19	南下りの傾斜地、湿地に2m程度盛土；原地盤面の傾斜方向（南西側）に建物傾斜；震央方向と略直交な方向に傾斜	
70	鹿代市青葉マンション 南棟	長軸 84	短軸 82	8	8	砂丘間の沼地の埋立地で、基盤面形状複雑？；建物の傾斜と接続部の開口、亀裂大破；地盤にビートきむ	
71	男鹿臨本住宅	短軸 100	25	兵船65*		*短軸25°；谷底低地の軟弱地盤上のルーズな盛土；基盤面が一様でないようだ；建物の全棟、半壊、傾斜；全壊住宅は西側の沼地に傾斜（付近で丸太を横に敷設して作った浮基礎の上の軟弱コンクリート製ベタ基礎の住居は無被害）	
72	男鹿工業高校 (SIF)	100	7	43	7	*亀裂より推定；沼地の埋立地盤、卓越力は震央方向とほぼ直角な方向に作用	
73	秋田市本金ヶ戸アパート	118	76	76	76	*基礎より推定；その上の応力係数に著しく傾斜（地盤状態もNo.32と似て北傾が良好？）	
74	五能線飯沢川橋梁	92	10	170	10	基盤面の傾斜方向（橋脚方向で震央方向とほぼ一致）に、橋台、橋脚が移動変形；基盤面が傾斜し、軟弱地盤の厚い方の橋台の基礎杭先端崩壊せず	
75	新海地区石油タンク (No.1, 2)	210	円形	7	7	7面の傾斜方向（南北方向）と不同沈下発生方向がほぼ一致	
NN 76	王滝村地区埋戻し	1.25	0	90	0	90 御岳山、形造埋積物の土石流；震央方向と直角な方向に崩壊し始める；崩壊土量29万m <sup>3</sup>	
CB 77	松岡町田地区埋戻し	34	80	10	80	10 台地の縁の凸形斜面；砂礫表層の典型的円弧型？；崩壊土量6千m <sup>3</sup> ；変形発生はNo.39と類似？	
78	長瀬中学校付近盛土すべり崩壊	24	75	165	75	165 谷筋方向が震央方向とほぼ一致する谷の埋積盛土；短軸方向に起こる	
79	長瀬町長瀬ダムの小亀裂と水平変位	38	8	84	8	84 堤体沈下 (20mm)、水平変位 (下流方向、23mm)、縦断方向 (堤脚方向) 亀裂；堤脚方向は震央方向にほぼ一致、卓越力作用方向 (下流方向) は震央方向と直交；基盤面傾斜	
80	三浦海岸付近高田町地わきの地盤亀裂	73	0	90	0	90 谷底平野；建物長軸方向は谷筋方向に略平行で、両方向は震央方向と略一致；卓越力作用方向は震央方向と直交；地盤亀裂	
81	三浦海岸付近近藤互蔵倉	73	0	90	0	90 谷底平野；建物は谷筋方向に略平行で、両方向は震央方向と略一致；卓越力作用方向 (瓦落下方向) は震央方向と直交	
82	三浦海岸付近近藤互蔵倉被害	73	34	124	34	124 谷底平野；高田町は埋没が深い、河を斜めに横断；隣接剪断亀裂（傾斜角方向）、電柱折損（傾斜角方向の北西方向NW 48°の山側に傾斜）；ここではNo.32、73と似て傾斜基盤面の北西側は高い？	

\*震央方向等との比較で述べている基盤面の傾斜方向とは、実際の傾斜方向ベクトルの水平面への投影成分の方向を示し、建物の長軸方向、短軸方向はそれぞれ航行方向、築断方向を示す。

中木、王滝村越と白石寿山の $\alpha$ は小さく(0~13°)、崩壊は震央方向とほぼ直角な方向に発生し( $\beta = 77 \sim 110^\circ$ )、越越鉾山も震央方向とほぼ直角な方向に崩壊している( $\alpha = 28^\circ$ 、 $\beta = 110^\circ$ )。

(2)図1をみると、概してプロット点は $\alpha = 45^\circ$ の線を境にして上下対称の分布を示し、表2もみると $\alpha \leq 45^\circ$ では堤(長)軸方向と直角な短軸方向に基盤面が傾斜し、 $\alpha > 45^\circ$ では堤軸方向に基盤面が傾斜して、それぞれにおいて堤(長)軸方向に変形しているものと短軸方向に変形しているものがある。どの場合も、 $\Delta$ が大きくなると $\alpha$ のばらつきが小さくなっている。

(3)図2をみると、プロット点は概ね8本の直線 $A_1$ 、 $A_1'$ 、 $B_2$ 、 $B_2'$ にまとめられる。しかし、震央方向や地盤構造等から、 $\beta = 90^\circ$ の線の上側と下側ものは等価と考えられるので、表3のように4つに分類できる。 $\beta$ が $90^\circ$ 付近のものは震央方向と直角な方向に変形し、 $\beta$ が $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 付近のものは震央方向と平行な方向に変形している。また、 $\alpha$ が $0^\circ$ 付近のものは基盤面が短軸方向に傾斜し、 $\alpha$ が $90^\circ$ 付近のものは基盤面が堤軸方向に傾斜しているものが多い。但し、直線 $B_1$ 、 $B_1'$ 上の上ものは文献(6)~7)等からは堤軸方向に変形し基盤面も堤軸方向に傾斜していることがわかるが、亀裂の発生状況や地形図等の文献を参照すると、函館大学のように短軸方向に傾斜する基盤面の有ることも推定できる。

また、直線 $A_1$ 、 $A_1'$ 、 $A_2$ 、 $A_2'$ 上の上ものは堤軸直角の短軸方向に変形し、直線 $B_1$ 、 $B_1'$ 、 $B_2$ 、 $B_2'$ 上の上ものは堤軸方向に変形している。但し、直線 $A_2$ 、 $A_2'$ は堤軸方向基盤面傾斜、短軸方向変形の範疇であるが、その線上の盛土はその構造上堤軸方向でなく短軸方向に崩壊流出している。なお、 $A_2'$ 上の3つの建物の地盤は文献にも示されていないが複雑なようだ。以上の基盤状態と変形状態の組合せを表3に示す。

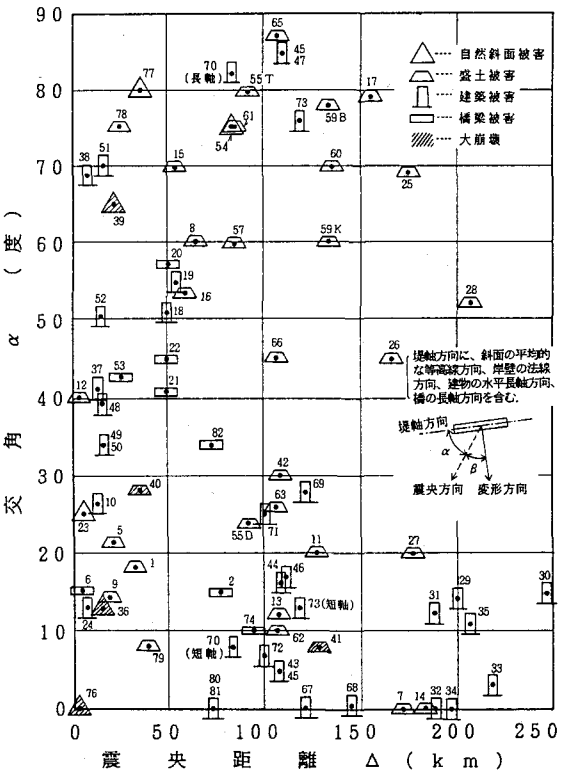


図1 震央距離と交角 $\alpha$ の関係

#### 4. まとめ

(1)盛土、建物等の震害発生は地盤構造と密接に関係し、基盤面が傾斜している所で、その傾斜方向に(その等高線に直角な流線方向、特に最大傾斜方向に)変形している例が多い。傾斜した基盤面の有る所ではその上の軟弱層の厚さが不均等なため不同変位が発生して、盛土や建物に被害を発生させるようだ。また、基盤面が堤軸方向に傾斜している所で短軸方向に崩壊している盛土等もある。自然斜面はその傾斜方向に崩壊するが、そのなかには震央方向とほぼ直角な方向に大崩壊を起こしているものがみられる。橋梁被害も地盤に傾斜構造のある所で多い。なお、被害発生に震央位置、方向も関係しているようだ。

(2)石油タンク中の液体の揺動が、常時からの不同沈下の発生方向に生じている例もみられ、その不同沈下は基盤面が傾斜して軟弱地盤厚さが不均等な所で発生しているのかもしれない。

(3)地震による建物や橋梁の壁、梁、柱の剪断亀裂は、振動が上下左右に生じるためタスキ掛けに生じることもあるが、特に卓越的な亀裂には傾斜基盤面の浅い方(軟弱層の薄い方)が下がる斜め亀裂が多く、平常時の不同沈下によるものと似ている。即ち、軟弱層下の基盤面が傾斜していると軟弱層厚さが不均等であり、地震時の地盤表面変位(水平、鉛直)は軟弱層の厚い方が薄い方と比べて大きいので不同変位が発生し、それによって予想できない大きさの強制力が作用するものと思われる。杭の卓越的な剪断亀裂は、傾斜基盤面の浅い方が下がる斜め亀裂が多く、これは上部工の慣性力によるようだ。また、煙突や剛体的に動いたと思われるような建物には基盤面の浅い方に傾いているものが多い。

#### 5. あとがき

構造物が違っても地震被害の生じ易い地盤構造

に共通性があって被害形態は地盤構造を反映することと、被害発生に震央位置も関係ありそうなのがわかった。以上の調査に当たって御世話になった池田俊雄博士、柳沢栄司博士、佐藤藤志博士、中西章大成建設技研主研、上沢弘前鉄道技研主研、羽矢洋鉄道総研研究員他多数の方々には厚く御礼を申し上げます。

文献 (1)那須他: 地盤・土構造物の地震時の挙動に関する資料集, 土質工学会, 20/26, 181/188, 1989. (2)那須他: 第24回土質工学会研究発表会No. 326, 1989. (3)那須他: 土木学会第16回関東支部技術研究発表会Ⅱ-28, 1983(4)那須他: 土木学会第42回年次講演会Ⅱ-44, 1987(5)那須他: 土木学会第44回年次講演会Ⅲ-F53(6)内藤: 架橋建築前震害報告, 早大出版部, 1927 (7)日本建築学会他編: 東京地盤調査, 1959 (8)那須他: 大正12年関東大地震震害調査報告, 土木学会, 1934 (9)那須他1989年9月鳥取地方震害調査報告, 土木学会誌, 30-2, 1940(10)那須他: 地盤下部構造の耐震設計に関する研究報告(案), 土木学会, 1966 (11)那須他25年6月28日北陸震災調査報告, 建設省土研, 1943 (12)昭和22年福井地震震害調査報告Ⅰ, 土木部, 土木学会, 1951 (13)北陸震災調査報告Ⅱ, 土木学会誌, 33-4, 1948(14)那須他: 土と基礎, 36-11, 1988 (15)北陸震災調査報告, 建築雑誌, Vol. 63, No. 744, 1948 (16)那須他: 鉄道技術, 技術叢刊No. 4-76, 1953 (17)1952年十勝沖地震調査報告, 1954 国土工学学会: 土と基礎, 1965 (18)那須他: 新潟地震調査報告, 鉄研報告, No. 448, 1964 (19)那須他: 地盤の液状化, 土質工学会, p. 132, 1984 (20)土木学会: 昭和三十九年新潟地震震害調査報告, 1966 (21)高橋他: 土と基礎, 14-10, 1966(22)北陸震災調査報告, 鉄道土木, 10-5, 72/73, 1968(24)山内: 土と基礎, 16-5, 79/79, 1968 (25)大沢他: 震害調査, Vol. 46(1968), 1345/1348 (27)地震と鉄道, 鉄道施設協会, 1961 (28)十勝沖地震による鉄道盛土被害, 国鉄盛土, 1971. 2 (29)山田他: 鉄研報告, No. 650, 1968(30)池原: 鉄研報告, No. 791, 1972(31)1963年十勝沖地震調査報告書, 1969 (32)建築学会: 1963年十勝沖地震震害調査報告, 1968 (33)名川教育委員会寄贈資料(34)水野: 基礎工, 6-11, 1978(35)望月他: 土と基礎, 22-12, 1974 (36)松沢: 基礎工, 15-5, 1987(37)1974年伊豆半島沖地震震害調査報告, 建研報告, No. 68, 1974 (38)守屋: 地震災害の防止と対策, 鹿島出版, 1978(39)東京都教委: 地震と安全, p. 12, 1978(40)守屋: 古地図から見た地震危険地帯, 月間工業新聞社, 1978 (41)国立防災科学センター: 1975年4月大分県中部に発生した地震震害調査報告, 1975 (42)建築学会: 1975年大分県中部地震によるRC建物の被害調査報告, 1976 (43)前川: 身近な耐震設計法, 学芸出版社, 1983 (44)久田: 地震と建築, 鹿島出版, 1982 (45)安岡: 基礎工, 6-12, 1978(46)河上他: 土と基礎, 26-12, 1978 (47)建築学会: 1978年宮城県沖地震震害調査報告, 1980 (48)土木学会東北支部: 1978年宮城県沖地震震害調査報告書, 1980 (49)水野: 基礎工, 6-11, 1978(50)志賀: 土と基礎, 26-12, 1978 (51)杉村: 土と基礎, 35-9, 1987(52)建築学会: 1982年浦河沖地震1983年日本海中部地震震害調査報告, 1984 (53)土質工学会東北支部: 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 1986 (54)那須他: 基礎工, 15-5, 1987(55)川崎他: 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 1984 (56)那須他: 基礎工, 22, 1984, 3(56)広沢: 建築技術, No. 384, 1983(57)土木学会: 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 1986 (58)那須他: 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 文部省科研費(No. 58022002), 1984(59)後藤: 土と基礎, 35-9, 1987(60)応用地質: 昭和58年長野県西部地震による岩谷地区地盤調査報告, 1986 (61)佐々木他: 土と基礎, 36-12, 1988 (62)森川: 科学朝日, 21/26, 1988. 9 (63)千葉工大研究報告(理工編)No. 34, 1988 (64)地盤と土構造物の地震時の挙動に関する資料集, 土質工学会, 1989 (65)石原他: 第23回土質工学会研究発表会No. 338, 1988 (66)山内: 土と基礎, 36-12, 1988 (67)千葉県東方沖地震震害調査報告書, 1988. 9 (68)千葉県土木部: 千葉県東方沖地震震害調査報告書, 1988 (69)中田他: 土と基礎, 32-9, 1984(70)宇佐見: 日本地震被害総覧, 東大出版会, 1988

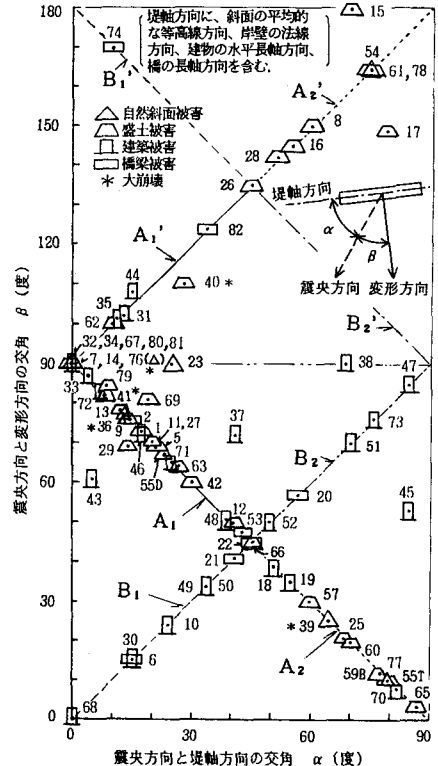


図2 交角αとβの関係

表3 α、βと変形方向、基盤面傾斜方向の関係

	(1)	(2)	(3)	(4)
関係直線	$A_1: \beta = 90 - \alpha$ $A_1': \beta = 90 + \alpha$ ( $0 \leq \alpha \leq 45$ )	$A_2: \beta = 90 - \alpha$ $A_2': \beta = 90 + \alpha$ ( $45 < \alpha \leq 90$ )	$B_1: \beta = \alpha$ $B_1': \beta = 180 - \alpha$ ( $0 \leq \alpha \leq 45$ )	$B_2: \beta = \alpha$ $B_2': \beta = 180 - \alpha$ ( $45 < \alpha \leq 90$ )
変形方向	短軸方向	短軸方向	堤軸方向	堤軸方向
基盤面傾斜方向	短軸方向	堤軸方向	堤軸方向(但し、斜面は短軸方向)	堤軸方向
構造物	斜面、盛土、建物、橋梁		建物、橋梁	

(a)堤軸方向=長軸方向、短軸方向=堤軸直角方向 (b)α、β:度