

地震による地盤破壊の実態と対策

—国土の開発・保全ならびにその利用の高度化のために—

秋田・能代、御岳南麓ほかの
5万分の1土地保全図付属説明書



国土庁土地局



企画構成

国土庁土地局

国土調査課

土地局長

末吉興一

次長

片桐久雄

国土調査課長

森本茂俊

謝

辞：この冊子をまとめるに当たって、現地踏査、資料収集等でご協力をいただいた多くの方がた、とくに秋田県、長野県の国土調査担当の方がたにお礼を申し上げます。

表紙写真の説明：1984年（昭和59）9月14日の長野県西部地震M=6.9によって発生した御岳南斜面の大崩壊。馬蹄形冠頭崖の崖高：100m，崩壊幅500m，奥行1,200m。滑動面は千本松軽石層と呼ばれる風化火山灰。滑動地塊は安山岩質の溶岩と火砕岩からなり，その体積は3,360万m³でわが国では最大級の崩壊となった。地震と同時に滑動をはじめ，土石流または岩なだれとなって伝上川を時速60～100kmで流下し，4人の生命をのむとともに大きな被害をもたらした。

（撮影1984.10.31 榎倉専門官撮影）



地震による地盤破壊の実態と対策

— 国土の開発・保全ならびにその利用の高度化のために —

編集・執筆：国土庁土地局国土調査課専門調査官

榎 倉 克 幹

執筆協力：基礎地盤コンサルタンツ株式会社

安 田 進

森 本 巖

内容骨子：

目 次

1. まえがき	2
2. わが国の地震と震害	4
2.1 わが国の被害地震	5
2.2 地震による直接被害と間接被害	15
3. 地震の発生機構と地盤のゆれ方	16
3.1 地震の発生機構	16
3.2 地震による地盤のゆれ方	22
応答のちがい：地盤種別（礫，砂，泥，泥炭）， 地形（尾根，谷），地質構造：盆状，断層上など 異常震動（なごさ効果） 調査と予測の方法	
4. 地盤の液状化	39
被害分析 予測手法：地形から概略を知る さらに高精度を要求すれば 対策方法：	
5. 斜面崩壊	63
6. その他の地盤崩壊	84
巻末資料	93

1 まえがき

この調査は、日本海中部地震および長野県西部地震によって被害をうけた秋田市・能代市および御岳山南麓の各地域を対象に国土調査法に基づいて実施されている縮尺5万分の1土地分類基本調査の成果、もしくはこれに準じてなされている成果が地震地盤災害に対して、土地が潜在的にもっている脆弱性を予測・評価するにあたって、どこまで貢献できるかを明らかにし、あわせてその予測・評価手法の試案を提示するのを目的としている。

現在、縮尺5万分の1土地分類調査の成果は、(1)地形分類図・表層地質図・土壌図・傾斜区分図などからなる自然環境関係の主題図と、(2)土地利用現況図や防災保全等関係法令指定区域図などの社会環境関係主題図からなる。これらの主題図類は、それぞれ単独にも広く利用されている。ある程度の基礎知識があれば、洪水や地すべりの常襲地は地形分類図から読みとることができるし、建物など建設する場所の支持地盤の深さや骨材・用土の採取適地は表層地質図から、また、泥炭地など水で飽和した軟弱地盤の分布や表層構成物質の土性は、土壌図からそれぞれ読みとることができる。

土地分類基本調査の成果は、このような個別の利用法だけでなく、これらを相互に有機的に組み合わせることによって、例えばダム・道路・水路・発電所といった構造物の位置選定や、農地・宅地の造成などの事業を進めるうえでの基礎資料として利用できる。同様に、これら土地分類調査の成果は、地震国であるわが国にあっては避けることの

できない地震時の基盤振動を、表層構成物質がどのように増幅するかまた、斜面崩壊・土石流、流状化など地盤災害に対してそれぞれの土地が潜在的にもっている脆弱性を知るための基礎資料としても利用できる。

本調査は、(1)既往の土地分類調査成果から、地震による地盤液状化や崩壊に対する土地のもつ脆弱性をどう読みとっていけばよいかという点と、(2)土地分類調査成果をどう加工し、あるいは何を付加することによって読みやすくなるかを、昭和58年5月26日の日本海中部地震と長野県西部地震を例にして明確にしようとしたものである。さらに、このような成果を他地域へ適用する場合の適用限界と問題点を明確にし、地震による地盤災害予測のための望ましい手法書案の作成を試みた。

調査の成果は、地震地盤災害対策土地保全図として別紙のとおり3葉にまとめた。

本書は、これらの成果図の説明をするとともに、この成果を秋田、能代両市、御岳南麓以外の他の地域へ適用しようとする場合の限界と問題点を述べ、地震地盤災害予測のための手法書(案)の作成を試みたものである。

地震は、わが国のどこかを毎年のように襲っている。

しかし、これが災害に結びつかないよう保全策がとられ、適性な土地利用が推進されるよう願ってやまない。本書がその一役を担えれば幸いである。

第 1 章の参考文献

1. 国土庁土地局国土調査課，“縮尺 20 万分の 1 土地分類図”，
秋田県
2. 国土庁土地局国土調査課，“縮尺 20 万分の 1 土地分類図”，
長野県
3. 経済企画庁国土調査課，“縮尺 5 万分の 1 土地分類図”，秋田
4. 秋田県，縮尺 5 万分の 1 土地分類図，“能代”
5. 秋田県，縮尺 5 万分の 1 土地分類図，“羽後浜田”，“森岳”
6. Iar. L. Macharg, “Design with Nature”，1971
7. 大崎順彦，“地震と建物”，岩波新書，1983
8. 財政策科学研究所，“地震から身を守る 100 訓”，講談社，
1986

2. わが国の地震と震害

わが国は世界でも有数の地震多発国であり、昔から幾多の震害を蒙ってきた。この章ではわが国の各地域において過去にどのような地震が発生し、そのためにどのような被害を生じてきたかを概観しよう。

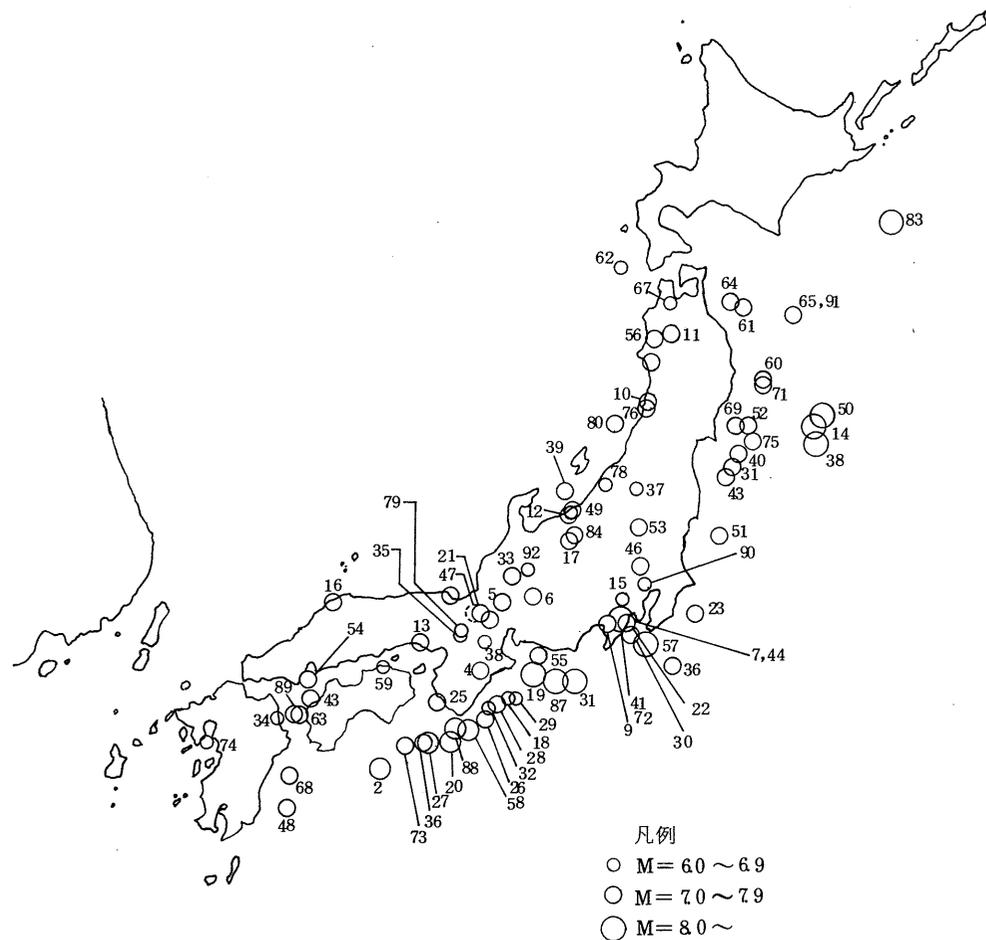


図2-1 江戸時代以前の主な被害地震

表2-1 江戸時代及びそれ以前の被害地震

番号	発生年	M	備 考
①	599	7.0	家屋倒壊
2	684	8.4	家屋社寺破壊, 山くずれ, 津波
3	701	7.0	冠島海に没す
4	734	7.0	民家倒壊, 山くずれ, 地割れ
5	745	7.9	正倉・仏寺・民家倒壊
6	762	7.4	地変あり, 被害不詳
7	818	7.9	山くずれ, 津波
8	830	7.4	城廓・家屋倒壊, 地割れ
9	841	7.0	死傷者あり
10	850	7.0	地裂け, 山くずれ, 城柵倒れる。
11	857	7.0	堂舎揺れ, くずれる。
12	863	7.0	山くずれ, 民家破壊
13	868	7.1	官舎堂塔破壊
14	869	8.6	城廓・門櫓・垣壁倒壊, 津波
15	878	7.4	地陥り, 家屋破壊
16	880	7.4	社寺・家屋倒壊
17	887	7.4	山くずれ
18	922	7.0	津波
19	1096	8.4	津波
20	1099	8.0	土佐で田千余町海底に沈下
21	1185	7.4	社寺・家屋倒壊
22	1241	7.0	津波
23	1257	7.0	山くずれ, 地割れ, 家屋倒壊
⑭	1293	7.1	諸寺倒壊
25	1331	7.0	千里浜隆起
26	1360	7.0	津波
27	1361	8.4	諸堂倒壊, 津波
28	1403	7.0	津波
29	1408	7.0	津波?
30	1433	7.1	社寺倒壊
31	1498	8.6	津波

(注) ①は震央位置不明の地震

⑭は八重山諸島の地震であるため、震源分布図の範囲外である。

番号	発生年	M	備考	番号	発生年	M	備考
32	1520	7.0	寺院破壊, 津波	63	1749	7.0	城楼破壊
33	1586	7.9	山くずれ, 城・民家倒壊	64	1763	7.4	家屋破損, 地割れ, 津波
34	1596	6.9	山くずれ, 崖くずれ, 津波	65	1763	7.8	建物倒壊
35	1596	7.0	諸寺・民家倒壊	⑥	1763	7.1	津波
36	1605	7.9	慶長地震, 津波	67	1766	6.9	地割れ, 寺社・待屋敷・町家倒壊
37	1611	6.9	社寺・民家倒壊, 山くずれ	68	1769	7.4	城・寺社・町屋破損
38	1611	8.1	津波	69	1770	7.4	
39	1614	7.7	津波	70	1771	7.4	八重山地震津波, 津波
40	1616	7.0	津波	71	1772	7.4	山くずれ
41	1633	7.1	矢倉・門塀・民家倒壊, 津波	72	1782	7.3	櫓, 石垣破損, 民家倒壊, 津波
④	1640	—	津波	73	1789	7.4	寺院・町屋・土蔵損壊, 山くずれ
43	1646	7.6	城の石壁・櫓倒壊	74	1792	6.4	津波
44	1648	7.1	城破損, 民家倒壊	75	1793	7.1	民家倒壊, 津波
45	1649	7.1	城壁くずれ, 民家倒壊	76	1804	7.1	象潟地震, 家屋倒壊, 津波
46	1649	7.1	城の石垣破損, 民家倒壊	77	1819	7.4	家屋倒壊
47	1662	7.6	田畑湖中に水没, 民家倒壊	78	1828	6.9	家屋倒壊, 火災
48	1662	7.6	山くずれ, 津波	79	1830	6.4	諸寺破損, 土蔵全壊
49	1666	6.4	城破損, 待屋敷倒壊, 火災	80	1833	7.4	家屋倒壊, 津波
50	1677	8.1	津波	81	1835	7.6	石垣・家屋・土蔵破損
51	1677	7.4	津波	②	1839	7.3	石燈籠・家屋損傷
52	1678	7.4	城破損, 家屋損壊	83	1843	8.4	津波, 家屋破壊
53	1683	7.3	石垣, 燈籠くずれ	84	1847	7.4	善光寺地震, 家屋倒壊, 断層
54	1686	7.0	家屋倒壊	⑤	1847	6.5	家屋倒壊
55	1686	7.0	家屋倒壊, 城・屋敷損壊	86	1854	6.9	家屋倒壊, 断層
56	1694	7.0	家屋倒壊, 火災	87	1854	8.4	安政南海地震, 家屋倒壊, 津波
57	1703	8.2	元禄地震, 家屋倒壊, 火災, 津波	88	1854	8.4	安政東海地震, 家屋倒壊, 津波
58	1707	8.4	宝永地震, 家屋倒壊, 津波	89	1854	7.0	家屋倒壊
59	1711	6.7	民家倒壊, 津波	90	1855	6.9	江戸地震, 家屋倒壊, 火災
60	1717	7.6	家屋破損, 地割れ, 泥噴出	91	1856	7.8	津波
61	1739	7.1	蔵・家屋倒壊	92	1858	6.9	家屋倒壊, 山くずれ
62	1741	6.9	津波				

2.1 わが国の被害地震

(1) 江戸時代およびそれ以前の被害地震

わが国では古くから地震に関する記事が残されており、その最初のもは西暦 416 年に起こった地震で『日本書紀』中に次の文章がみられる。

『允恭天皇五年七月十四日己丑, 河内国地震フ』

西暦 599 年には同じく『日本書紀』に倒壊家屋を生じたことが記録されている。この地震がわが国の被害地震として知られているものの最初であろう。以来古文書の記録が地震の発生を伝える唯一の手段である状態が組織的地震観測（体感による）が開始された 1885 年（明治 18 年）まで続いた。この間に種々の地震が記録に留められたが、そのうち主要被害地震の位置とマグニチュードを示したのが図 2-1 である。これらの地震はマグニチュード 7.0 以上かマグニチュード 7.0 以下でも死者が 100 人以上出たことが明記されているのである。なお、地震による被害の概略は巻末資料 1 を参照されたい。

明治以前の被害地震例

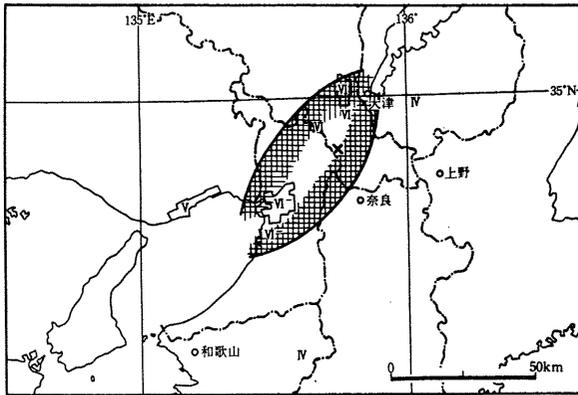


図2-3 慶長伏見地震の震度分布⁽²⁾

〈慶長伏見地震〉 1596年 M=7.0

震源は宇治市南方で近畿地方に局地的な被害をもたらした。この地震で築城してから2年しか経過していない伏見城が大破し、数百人が横死したのを始め、東寺などの寺院も大きな被害を受けた。この地震による被害は家屋の倒壊によるものが多く、また強震域が北東-南西方向に長軸をもつ極めて方向性の強い分布を示している。

〈元禄地震〉 1703年 M=8.2

房総半島沖に震源をもつ海洋型の大地震で、関東南部に大きな被害が生じた。特に小田原で被害が大きく城下の家屋は全滅、八百数十名の死者を出した。津波は伊豆半島東岸から東京湾、房総半島に押しよせ多数の死者を出した(図2-4参照)。この地震による死者は全体で五千数百人、潰家は約2万戸にのぼった。

この地震で房総半島や三浦半島が隆起し、房総半島の先端では約6m上昇した。

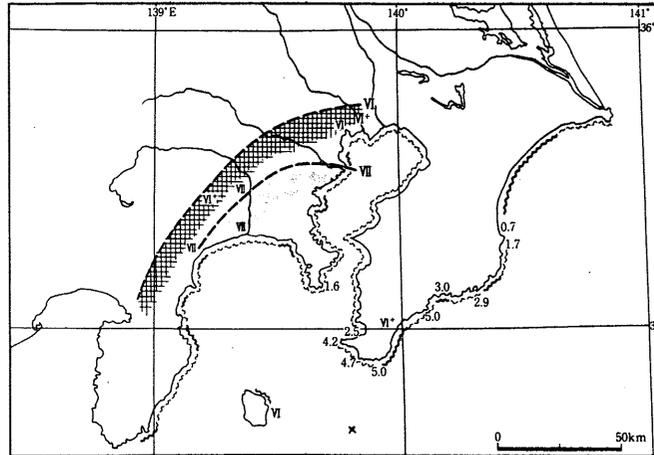


図2-4 元禄地震の震度分布⁽²⁾

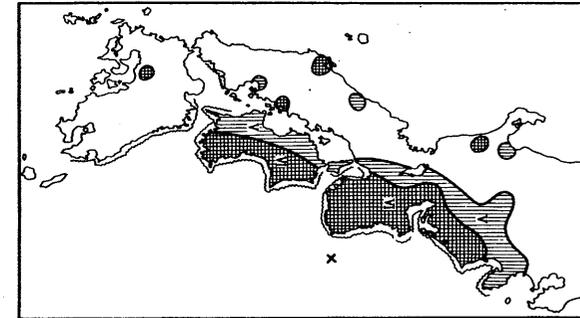


図2-5 宝永地震の震度分布⁽²⁾

〈宝永地震〉 1707年 M=8.4

わが国最大級の地震の一つで家屋倒壊域は関東から四国に至る地域の太平洋側をはじめとして九州、山陰、北陸地方にまで及んでいる。

この地震で静岡県の袋井のように全滅した地区もあったが、津波による被害がはるかに大きかった。特に土佐(高知県)で被害が大きく流出家屋一万一千余戸死者、不明二千数百人におよんだ。

この地震の1ヶ月程後、富士山が大爆発し、宝永火口ができた。

＜善光寺地震＞ 1847年 M=7.4

山間部で発生した地震で、家屋の倒壊、火事に加えて山くずれによる被害が大であった。また山崩れにより犀川がせき止められたため上流の数十カ村が水没した。さらに山崩れでできた土堤が崩れ、水が一時に流出し、下流で100余人が流死した。

全体の死者は少なくとも一万人を下らなかったと推定され、倒壊家屋はそれに数倍するというものであったが、この地震の特徴は大小4万数千ヶ所にのぼる山崩れであろう。

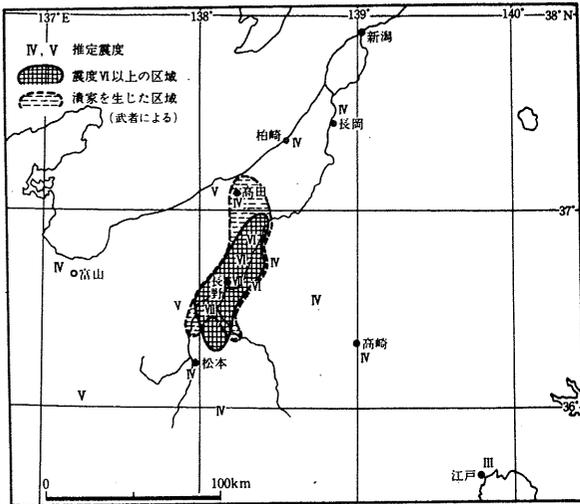


図2-6 善光寺地震の震度分布⁽²⁾

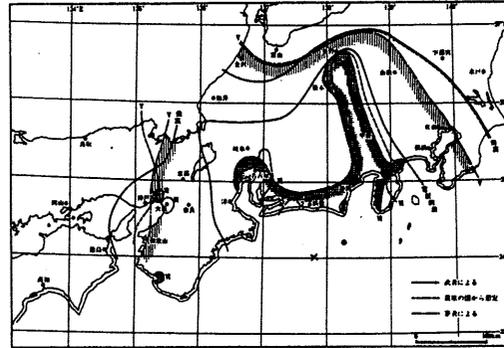


図2-7(a) 安政東海地震の震度分布⁽²⁾

＜安政東海・安政南海地震＞ 1854年 M=8.4

この2つの地震はまず12月23日遠州灘を震源とする安政東海地震が起こり、32時間後に紀伊半島沖を震源とする同規模の安政南海地震が起こったので古文書では両地震の被害を区別できないものも多い。

安政東海地震では沼津から天龍川河口までの海岸部が最も被害が大きく掛川などが全潰、袋井でも9割方潰れた。津波は房総から土佐の沿岸を襲ったが、伊豆下田では震後1時間余で津波が襲来し、流出家屋800戸、死者122人を出した。

安政南海地震は家屋の全半潰4万戸、焼失約6,000、流出1万5,000、死者3,000余名という大被害を生じた地震であった。和歌山から四国へかけての地域の被害が甚大であった。

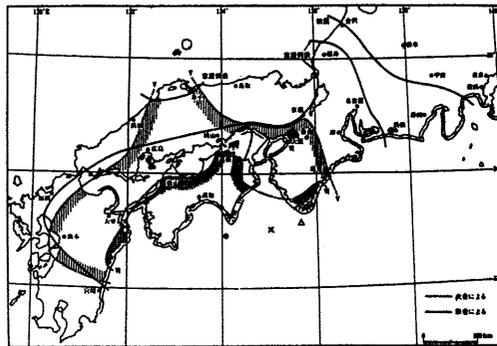


図2-7(b) 安政南海地震の震度分布⁽²⁾

＜江戸地震＞ 1855年 M=6.9

大都市の直下で発生した地震であり、そのため地震規模に比して大きな被害を蒙った。激震地域は江戸の下町で山の手は比較的軽かった。この時代になると地震のゆれ方に関する記述も多く残されており、この地震が上下動が極めて強かったことがわかる。死者の数は明らかではないが町人だけでも4,000人余りであり、町方の全壊家屋数は当時の町屋総数の1割にあたる1万4千余戸であった。全壊戸数は下谷、浅草、本所、深川で多かった。

震源地とみられる荒川河口に近い低地が被害甚大であったが、同じ沖積地でも日本橋、神田方面では建物の損害がわり合い少なかった。これは江戸初期に形成された地盤の方が新しい埋立地より地震に強いことの証明といえよう。

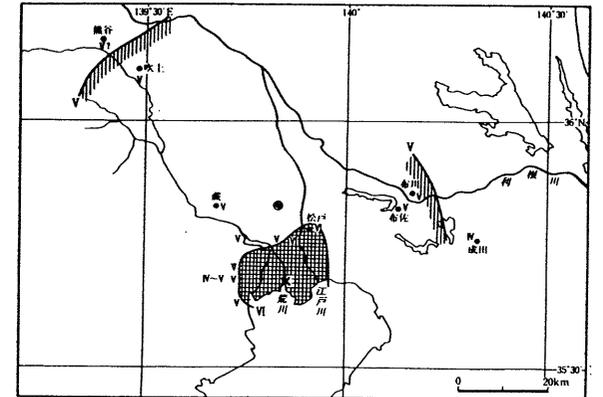


図2-8 江戸地震の震度分布⁽²⁾

(2) 明治以降の被害地震

明治以降の被害地震は図2-9, 表1-2に示すとおりである。

1885年より体感による組織的地震観測が開始された。また1891年の濃尾地震を契機として震災予防調査会が設立され、地震の研究が精力的に始められた。さらに1923年の関東地震などを経て地震計の精度向上や地震の震源位置や規模の決定精度の向上をみながら今日に至っている。このような技術の向上によって被害をもたらすような大きな地震ばかりではなく、体に感じないような小さな地震も観測できるようになり、地震活動の活発な地域の分布などが明らかになってきた。

組織的観測が始って以来約100年が経過したがこの間にも多くの地震が発生し各地で大きな被害を蒙っている。とくに関東地震では一国の首都が壊滅的打撃を蒙り、死者約10万人を出したという点で未曾有の被害地震といえよう。図2-9には明治以降の大地震($M \geq 7.0$)の分布を、表2-2には死者・行方不明者が20人以上出た地震の表を示したが、関東地震がこの中でとびぬけて被害が大きいことがわかる。

表2-2にある地震の数は30個であるが、これは約3年に一回、死者・不明者が20名以上生じる地震がわが国のどこかで起こっていることを示している。表中の地震のうちマグニチュード $M = 5.8$ の熊本地震を除くとすべて $M = 6$ 以上である。

これらのうち約 $\frac{2}{3}$ が内陸で発生する地震(日本海側の地震を含む)であり、残り $\frac{1}{3}$ が太平洋側で発生する地震である。内陸部の地震に被害が多いのは居住地に近いところで発生するからである。

表2-2 過去100年間の主要被害地震(文献4に加筆)

地震	年月日	M	死者 行方不明	負傷者	全壊	半壊	全半焼	備考
浜田	1872. 3.14	7.1	537	574	4,049	5,429	230	
熊本	1889. 7.28	5.8	20	54	239	236		
濃尾	1891.10.28	8.0	7,273	17,175	142,177	80,324	4,860	
東京湾北部	1894. 6.20	6.7	31	197	22	108		
庄内	1894.10.22	6.8	726	987	3,858	2,397	2,184	
三陸沖	1896. 6.15	7.1	26,360	4,398	11,723			津波
陸羽	1896. 8.31	7.0	209	779	5,838	3,657	142	
江濃	1909. 8.14	6.4	41	784	978	2,444		
秋田仙北	1914. 3.15	5.9	94	324	640	575	3	
千々石湾	1922.12. 8	6.0	26	39	195	661		
関東東	1923. 9. 1	7.9	142,807	103,733	128,266	126,233	447,128	火災
北但馬	1925. 5.23	6.5	465	1,016	1,733	915	2,328	
丹後	1927. 3. 7	7.5	2,925	7,806	5,106	4,970	7,523	
北伊豆	1930.11.26	7.0	272	572	2,165	5,516	75	
三陸沖	1933. 3. 3	8.3	3,064	1,092	5,851		216	津波
男鹿半島	1939. 5. 1	7.0	27	52	479	858		
鳥取	1943. 9.10	7.4	1,083	3,259	7,485	6,158	267	
東南海	1944.12. 7	8.0	871	1,859	26,130	46,950		
三河	1945. 1.13	7.1	1,961	896	5,539	11,706		
南海	1946.12.21	8.1	1,443	3,842	10,591	19,283	2,598	
福井	1948. 6.28	7.3	3,769	22,203	36,184	11,816	3,851	震度7
十勝沖	1952. 3. 4	8.1	29	621	1,614	5,449	20	
チリ沖	1960. 5.23	8.5	139	872	2,830	2,183		津波
新潟潟	1964. 6.16	7.5	26	447	1,960	6,640	290	液状化
十勝沖	1968. 5.16	7.9	52	330	673	3,004	18	
伊豆半島沖	1974. 5. 9	6.9	30	102	134	240	5	
伊豆大島近海	1978. 1.14	7.0	25	205	96	616		
宮城県沖	1978. 6.12	7.4	28	10,181	1,273	5,652	11	
日本海中部	1983. 5.26	7.7	104	163	934	2,115		液状化,津波
長野県西部	1984. 9.14	6.8	29	10	14	73		山くずれ

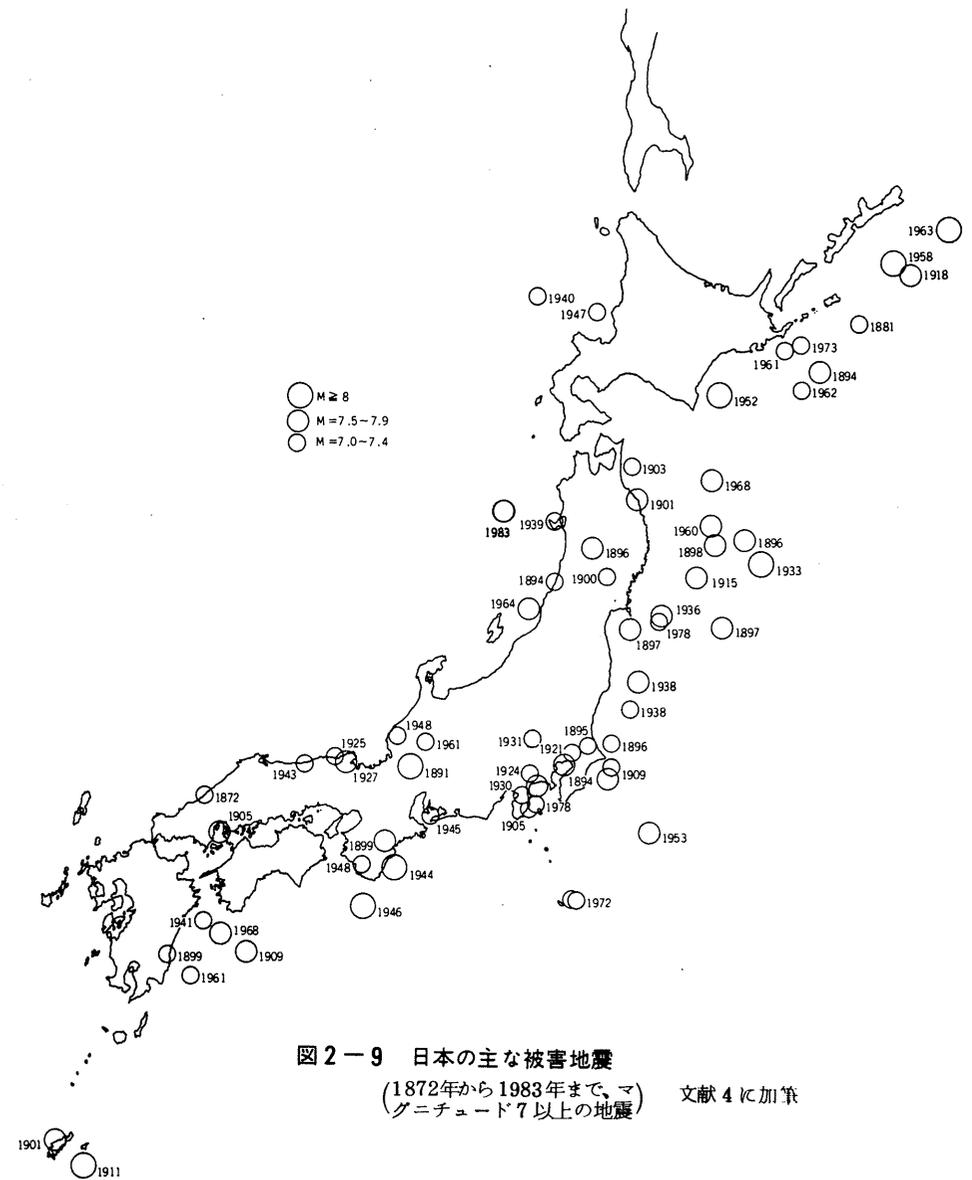


図2-9 日本の主な被害地震
(1872年から1983年まで、マグニチュード7以上の地震) 文献4に加筆

明治以降の主な地震について以下に紹介する。

まず著名な地震から紹介しよう。

＜濃尾地震＞ 1891年 M=8.0

内陸部で発生した地震としては史上最大のもので仙台以南の各地でゆれを感じた。岐阜, 愛知両県を中心に死者7千余人, 住宅の全半壊は14万戸におよんだ。この地震で根尾谷を中心に断層が出現し, 谷沿いの村はこのため大きな被害を受け総戸数715戸のうち675戸が倒壊した。その他山崩れや陥没がいたるところで起こった。また木曾川下流部の沖積地帯でも地割れ, 噴砂などが多数みられ家屋, 道路, 堤防, 橋梁などが大きな被害を受けた。

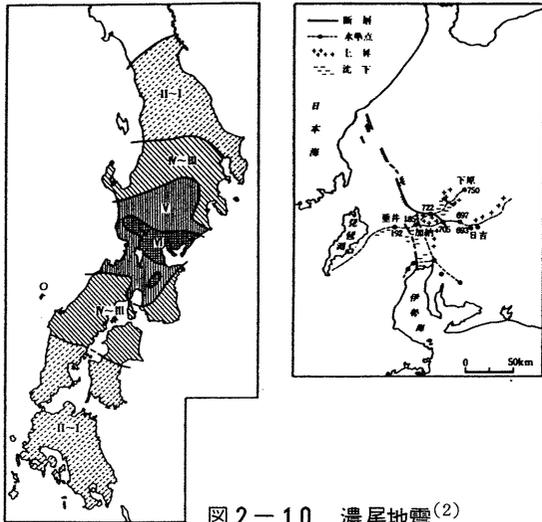


図2-10 濃尾地震(2)



根尾谷断層(小藤文次郎博士撮影)

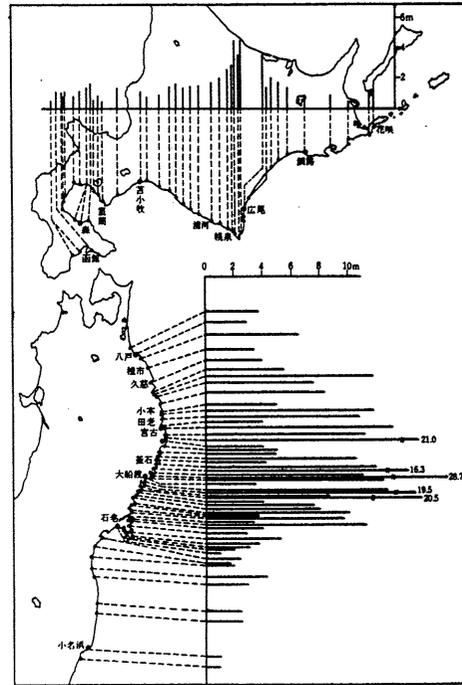


図2-11 三陸地震津波(1933)(2)

＜三陸津波＞ 1896年(M=7.1) 1933年(M=8.3)

三陸沿岸地方は古来津波による被害の多い所で西暦867年以来17回も津波の記録がある。明治以降でも3度(表題の2地震と1960年のチリ地震による)の津波によって多大な損害を蒙っている。これらの地震は沿岸よりかなり遠いためにゆれによる被害は少ない。

＜関東地震＞ 1923年 M=7.9

わが国の地震の中で最も大きな被害を出した。被害を大きくしたのは火災であり, 東京では総戸数の71%にあたる32万戸を焼失した。とくに本所の被服廠跡で4万人余が焼死したのは有名である。

ゆれによる家屋の倒壊は4万戸におよんだが, 水平動が強くやや周期の長い地震であったため煉瓦造り, 石造りの建物の被害が多かった。この他, 山崩れや崖崩れは無数にあったが, 中でも小田原近郊の根府川では大規模な山津波が発生し, 170戸余の家屋が埋没し, 293人の人々が犠牲になった。また震源に近い神奈川県では橋梁の総数1,253の93%に被害があった。

区名	死者1人 当り人口	焼失面積 百分率	焼失戸数
鶴町	606	20.5	5,733
神田	206	77.9	46,709
日本橋	493	95.2	26,020
京橋	535	81.5	28,298
芝	797	23.9	15,658
麻布	2,687	0.1	9
赤坂	916	0.8	2,272
四ツ谷	20,956	2.0	877
牛込	2,564	0.1	4
小石川	807	1.9	956
本郷	2,631	16.4	5,893
下谷	1,027	50.4	33,595
浅草	127	95.2	52,883
本所	6	100.0	55,300
深川	70	82.6	41,880
計			316,087

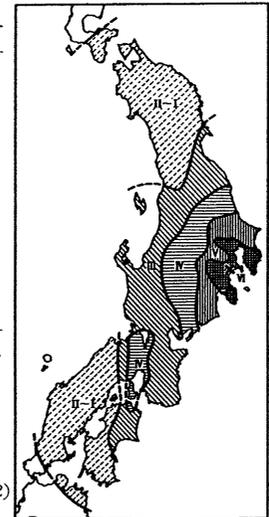


図2-12 関東地震(2)



(4)

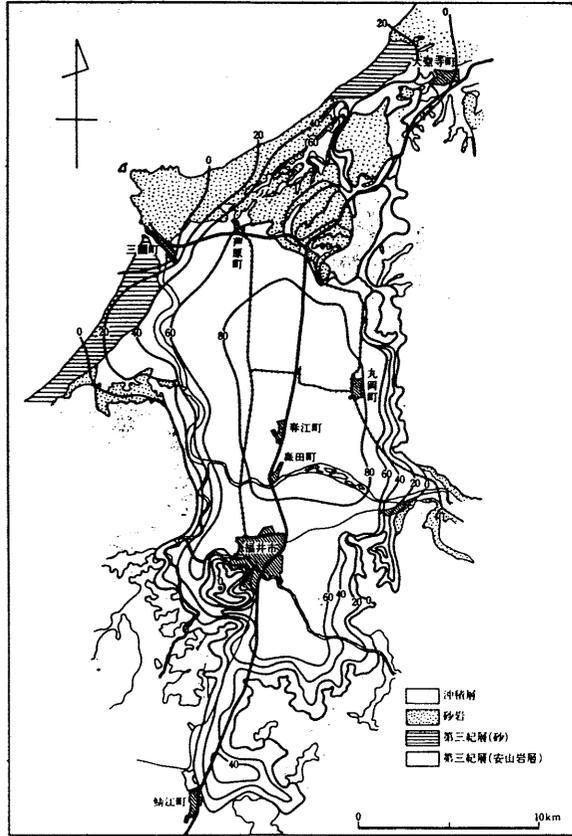


図 2-13 A⁽²⁾

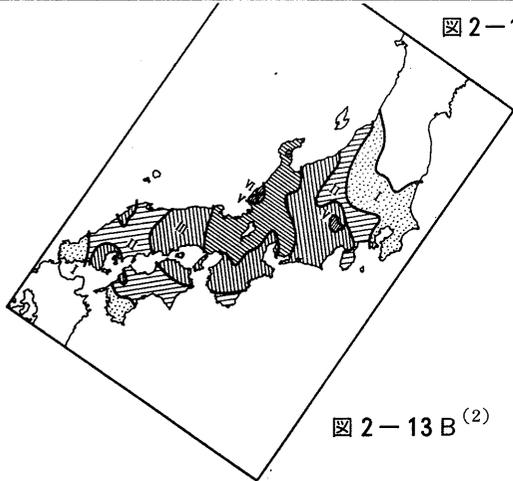


図 2-13 B⁽²⁾

〈福井地震〉 1948年 M=7.3

太平洋戦争末期から1950年頃にかけて大きな地震が頻発した。すなわち鳥取地震(1943年), 東南海地震(1944年), 三河地震(1945年), 南海地震(1946年), 福井地震(1948年)などがほとんど毎年起っているが, この中でも福井地震の被害が最も大きい。

この地震の特徴は震源が内陸部にあり, 浅かったので地震のゆれが史上稀にみるほど大きかったことである。震源地となった福井平野では全壊率が100%に達した部落も多く, この地震を契機として気象庁の震度階に震度7(激震, 家屋の倒壊30%以上)が新たに加えられた。福井市では全建物の九割が被害を受け2407戸が焼失した。被害は沖積平野で多く, 山地では少なかった。



図 2-13 C⁽⁴⁾

〈新潟地震〉 1964年 M=7.5

新潟県沖を震源とする地震で新潟, 山形両県を中心に大きな被害が生じた。被害の特徴は地盤破壊であり, その地域は旧河道や埋立地などに集中している。この地域はゆるい砂が厚く堆積しており, この砂層が地震で液状化を起こしたための被害である。特に埋立地のアパートが沈下したり, 傾斜したのは有名である。人命被害は他の地震に比べて少なかったものの地盤破壊による建物や土木構造物の被害, 石油タンクの火災と付近住家への延焼など大きな被害を蒙った。この地震を契機として日常は安全なはずの砂地盤が地震によって突然その機能を失うという液状化現象の解明に関する研究が始った。なお, 地盤の液状化については第4章において詳述する。

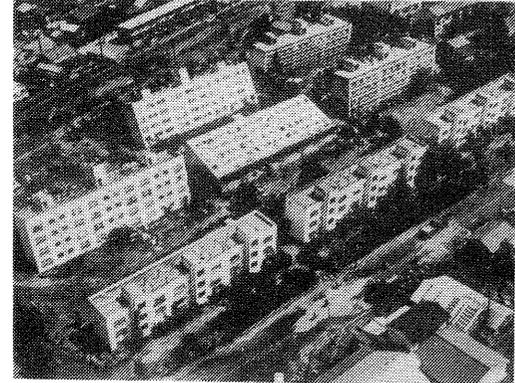
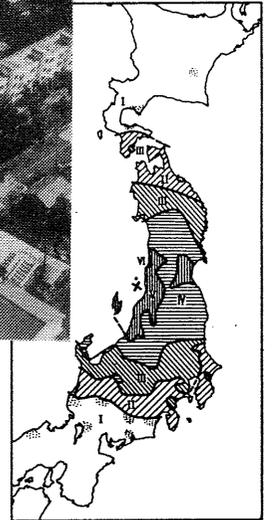


図 2-14 新潟地震⁽⁴⁾



(2)

〈伊豆大島近海地震〉 1978年 M=7.0

伊豆大島と伊豆半島の間を震源とする地震であり、がけ崩れなどによって被害が生じた。伊豆半島は地形が急峻であるため山肌を切盛して建築物や道路がつくられている。地震による崖崩れや落石のためこれらの道路が埋められ死者を出した。また鉱さい堆積場が崩落し、有毒なシアン化合物が狩野川に流出した。



図2-15 伊豆大島近海地震⁽⁷⁾

〈長野県西部地震〉 1984年 M=6.8

この地震で斜面崩壊により29名の死者・不明者を出したのはまだ耳新しい出来事である。特に御岳山の伝上川上流の山腹崩壊はその土量が3,360万 m^3 という大規模なものであった。第5章で詳しく述べる。

地震の数は地域や時代で均一なものではなく地域や時代の事情によってその数は相当異なっている(図2-16参照)。例えば北海道では明治以降の資料しかなく、また他の地方では戦乱などのため資料が散逸したりして空白の時代が多く存在する。このような傾向は時代が古くなるほど顕著になる。このような事情から今まで地震の記録がみあたらない地域といってもその地域に今後も地震が起こらないとは限らないということに留意すべきである。

内 陸

海 洋

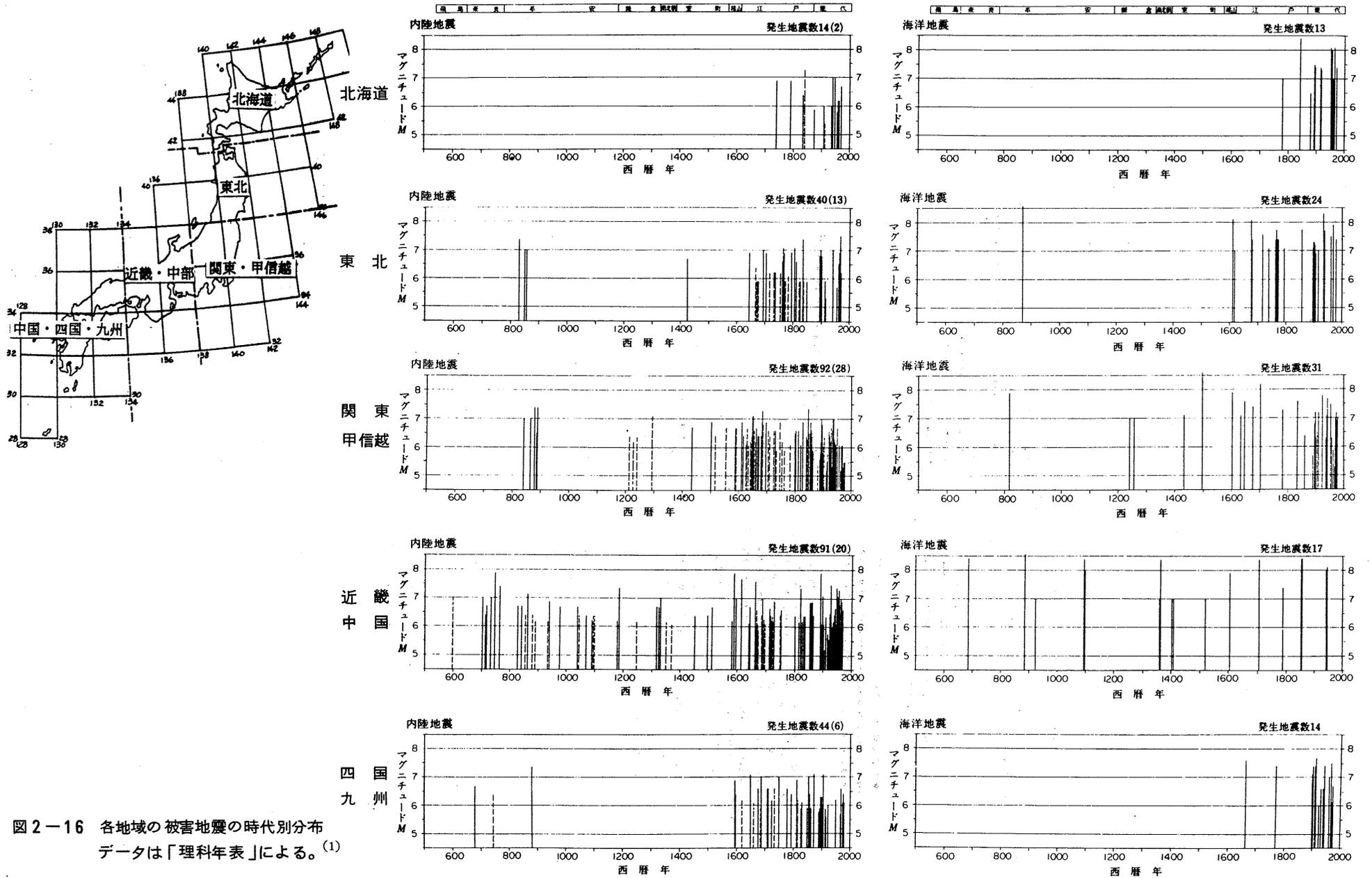


図 2-16 各地域の被害地震の時代別分布
データは「理科年表」による。(1)

2.2 地震による直接的被害と間接的被害

前節でみてきたようにわが国ではこれまでも多くの地震が起こっており、種々の被害を蒙ってきた。本節では地震の際にどのような被害が生じるかについて概説する。なお地盤災害のうち重要な地盤の液状化と斜面崩壊についてはそれぞれ4章と5章で詳しく説明する。

地震の直接の作用によって生じる被害、すなわち地盤が広範囲に隆起、沈降を示す地殻変動、地震断層、地盤震動、液状化などの地盤破壊、津波などによって起こされる被害を一次被害という。一次被害はさらに火災、水害などの二次被害を引起す。

過去の震害事例で最大の損害を出した関東震災(1932)では地震後に発生した火災が被害の大部分を占めている。また津波によっても多くの損害を蒙っている。

建物の被害をみると昔は構造が脆弱であったため全壊家屋がかなりあり、そのために多くの死傷者が出たが、地震研究の発展とともに建物も地震に強くなり、完全に崩壊するようなものは少なくなってきた。しかし建物が強くなった割には足元の地盤は強くなり、地盤破壊の被害に及ぼす比重が高くなってきている。金井ら(1980)は、最近の地震による木造家屋被害の原因調査の結果、地震動による直接作用よりも地割れ、がけ崩れ、地盤の不同沈下などの間接作用により木造家屋が被害を蒙る割合が多いことを指摘している(図2-17参照)。

第2章の引用・参考文献

- 1) 萩原尊禮編, “古地震—歴史資料と活断層からさぐる”, 東大出版会, 1982
- 2) 宇佐美龍夫, “日本被害地震総覧”, 東大出版会, 1975
- 3) 東京天文台編, “理科年表”, 丸善(株), 1985
- 4) 藤井陽一郎編, “写真図説 地震”, 国書刊行会, 1979
- 5) 金井清他, “木造家屋震害の軽減・防止に関する研究”, 川崎市の震災予防に関する調査報告書—昭和54年度版, P 35 ~ 49, 1980
- 6) 新潟県, “新潟地震の記録—地震の発生と応急対策”, 1965
- 7) 持越鉱山たい積場事故調査委員会, “持越鉱山たい積場事故調査報告書—参考資料”, 1979

3. 地震発生機構と地盤のゆれ方

大地は一見なんの動きもないように見えるが、毎日世界のあちこちで大地の急激な破壊現象である地震が起こっている。これらの地震によって毎年多数の人々が死傷したり、家を失ったりしている。

ここでは地震の発生する地域の特徴とその原因について述べる。

3.1 地震の発生機構

(1) 地震は世界のどこで起こるのか？

地震は世界中どこにでも起こるのであろうか？ これに対する答は図3-1に示されている。この図は1961年から1967年の間に比較的浅い場所で発生した地震の位置である。この図では地震は特定のゾーンに集中して発生していることがわかる。地震の発生するゾーンは各々名前がつけられており、わが国が属する太平洋をとりまく地震帯は環太平洋地震帯と呼ばれている。

なぜ地震は特定の地域(ゾーン)に集中するのであろうか？ 地震は大地を構成する岩石の急激な破壊現象によって生じるといわれている。岩石を破壊する力はどのように作り出されるかという疑問に対する一つの答えはプレートテクトニクスという仮説である。この仮説は地球の表面を被う複数の厚さ100~150 kmの岩石の板(プレート)がお互い独自の運動をしており、その運動による力がプレート境界に集中し、岩石の破壊を引き起こすというものである(図3-2参照)。

このプレート境界が地震の発生場所にあたるが、わが国は東側の太平洋プレート、西側のユーラシアプレートと南側のフィリピン海プレートの境界上に位置しており、地震が多いことがわかるであろう。

地球上の地点が年間数cmのオーダーで相対的に移動することは最近の人工衛星による測地でも確かめられており、プレートテクトニクス理論の有力な証拠となっている。

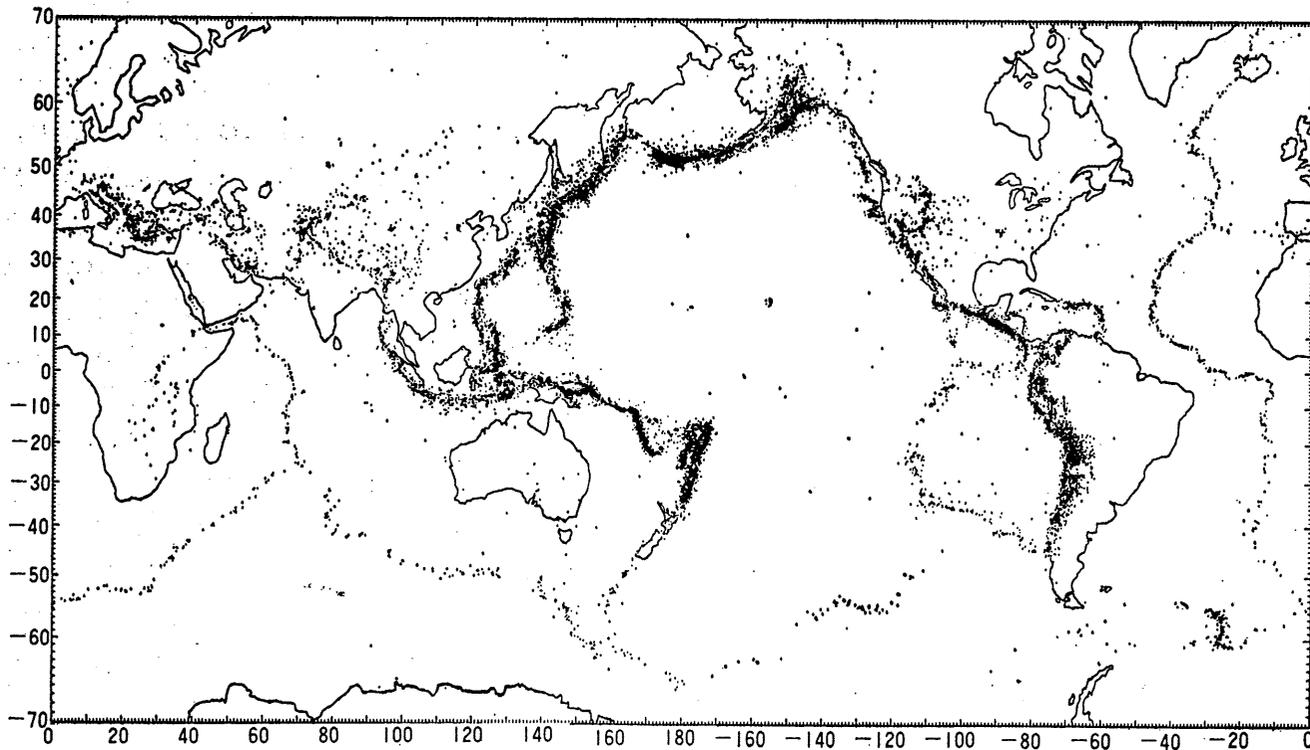


図3-1 世界の地震分布 (1961~1967)⁽¹⁾

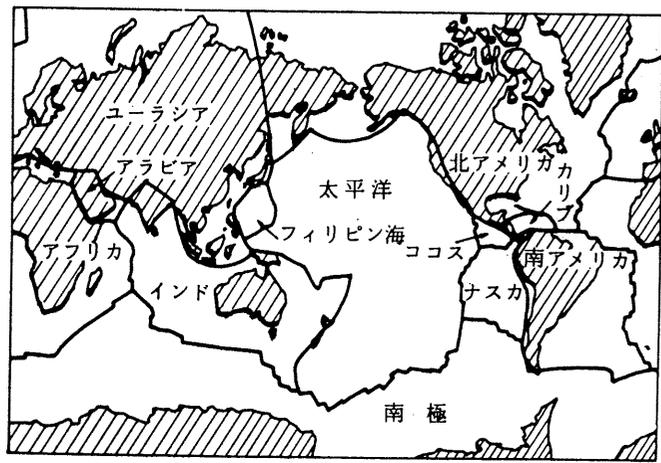


図3-2 大洋底拡大説によるプレート境界とプレート名称⁽¹⁹⁾

(2) わが国の地震の起こり方

わが国は太平洋をとり巻く地震帯の上にあるため、世界でも有数の地震国である。それでは日本中どこでも地震は発生しているのであろうか。図3-3には今までわが国に起こった主な被害地震の位置と規模を示す。この図より大規模な地震の大部分は太平洋側で起こっており、内陸部や日本海側では一部の例外はあるが太平洋側に比べて少ないことがわかる。また東日本に比べて西日本は地震が比較的少ない。このようにわが国の地震の発生の仕方（位置、規模）にも地域的に特徴があるが、大別すると「太平洋側で発生する海洋型地震」と「内陸部で発生する内陸型地震」になる。後者には日本海側で発生する地震（例えば新潟地震、日本海中部地震）も含まれる。

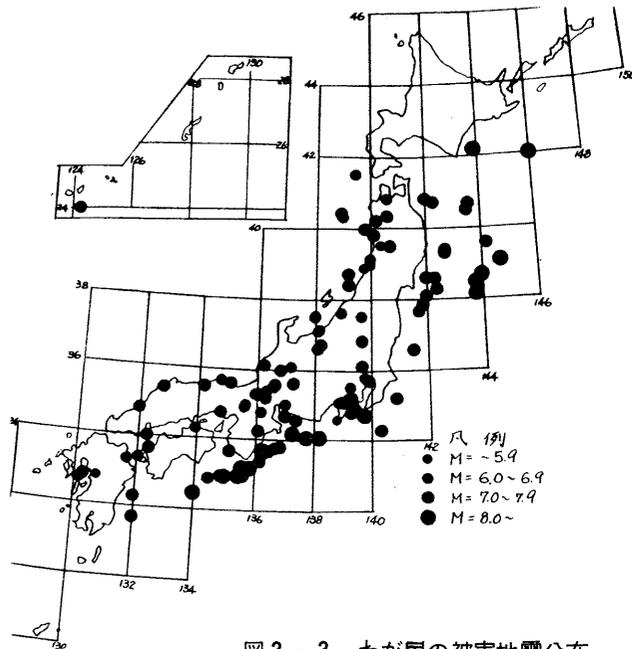


図3-3 わが国の被害地震分布

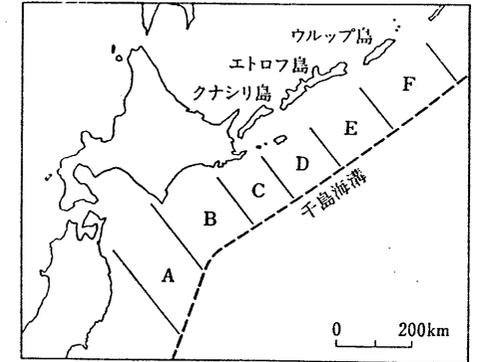
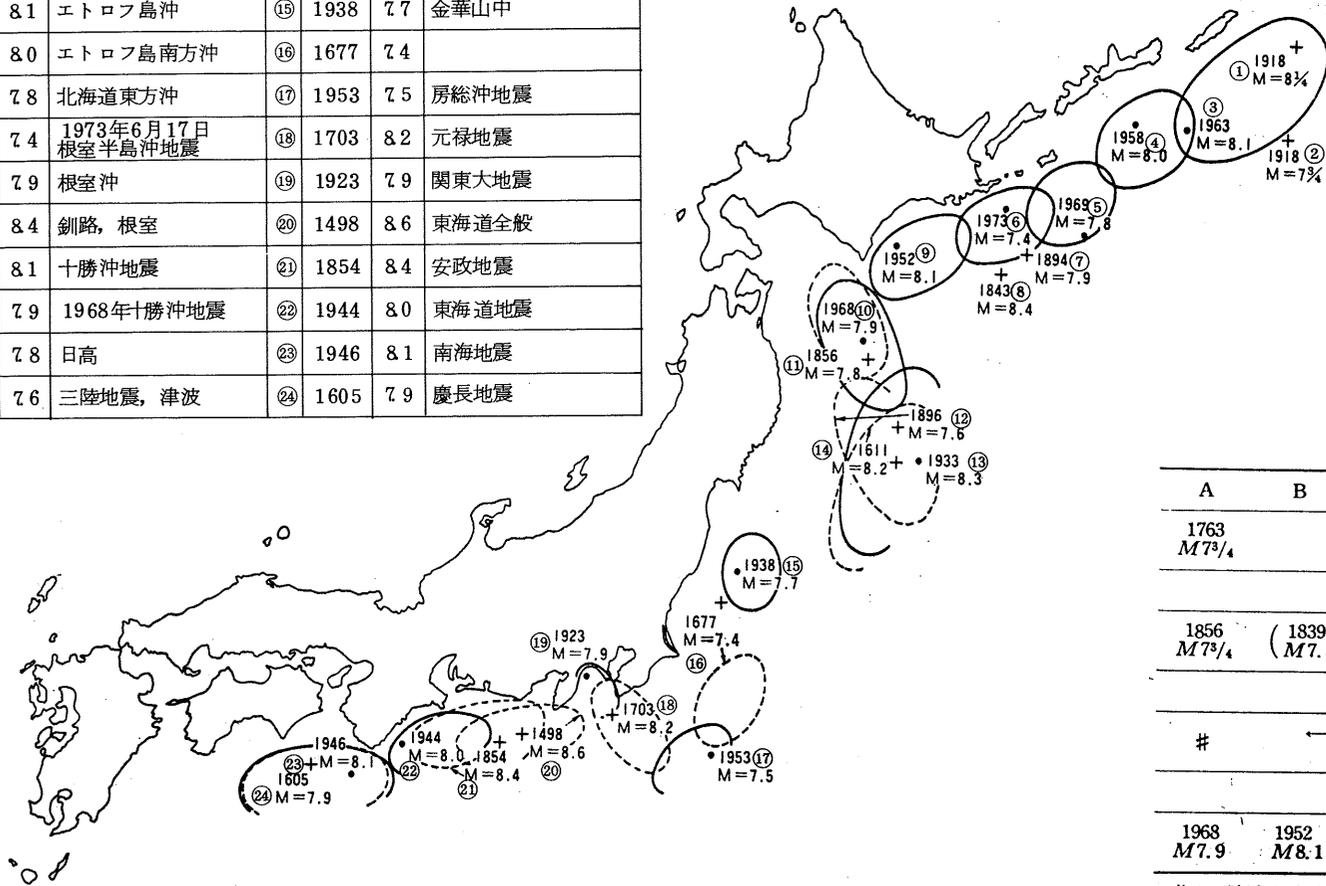
<海洋型地震の特徴>

海洋型地震は図3-4に示すように太平洋沿岸で起こり、マグニチュードも8クラスの巨大なものが多い。図中の丸で囲った範囲は余震域と呼ばれており、岩石が破壊した範囲を表わすものである。各地震の余震域はほとんど重ならずお互いに独自の領域をもっているようにみえる。また、同じ領域に数十年後～数百年後に同じような規模の地震が発生することもこの図から読みとれよう。

太平洋側で発生する地震は他地域に比べて周期的に発生し、その周期は数10年から200年程度である。地震の周期性の例として北海道の太平洋沿岸地域の地震の起こり方を図3-5に示す。これによると東北日本から千島列島にかけての地域は6つのブロックに分けられ、各ブロックでマグニチュード8前後の巨大地震が100～200年に1回ずつ起こっていることがわかる。

太平洋沿岸地域でこのような巨大地震が周期的に起こるのはプレートテクトニクス理論では東側の太平洋プレートが年間数cmずつ日本列島がのっているユーラシアプレートの下にもぐり込み、ユーラシアプレートもいっしょに引きずり込まれるが限界に達すると、プレートの境界付近が破壊し、ユーラシアプレートがはねあがる時に地震が起こると説明されている。したがってプレートがもぐり込む日本海溝より西側で地震が発生するが、日本列島に近づくとプレートのもぐり込みにより深い所でしか地震が発生しないので、被害を及ぼすような地震は日本海溝付近の震源の浅いものに多い。

番号	発生年	M	地震名	番号	発生年	M	地震名
①	1918	7.9	ウルップ島沖	⑬	1933	8.3	三陸地震, 津波
②	1918	7.8	エトロフ島沖	⑭	1611	8.2	三陸
③	1963	8.1	エトロフ島沖	⑮	1938	7.7	金華山中
④	1958	8.0	エトロフ島南方沖	⑯	1677	7.4	
⑤	1969	7.8	北海道東方沖	⑰	1953	7.5	房総沖地震
⑥	1973	7.4	1973年6月17日 根室半島沖地震	⑱	1703	8.2	元禄地震
⑦	1894	7.9	根室沖	⑲	1923	7.9	関東大地震
⑧	1843	8.4	釧路, 根室	⑳	1498	8.6	東海道全般
⑨	1952	8.1	十勝沖地震	㉑	1854	8.4	安政地震
⑩	1968	7.9	1968年十勝沖地震	㉒	1944	8.0	東海道地震
⑪	1856	7.8	日高	㉓	1946	8.1	南海地震
⑫	1896	7.6	三陸地震, 津波	㉔	1605	7.9	慶長地震



A	B	C	D	E	F	期間
1763 M7 ³ / ₄		不		明	1780 M8	17年
						59
1856 M7 ³ / ₄	(1839 M7.3)	←1843→ M8.4		不	明	17
						37
#	←1894 M7.9	1893 M>7.5		(1918)* M7.8	1918 M7.9	25
						34
1968 M7.9	1952 M8.1	(1973) M7.4	1969 M7.8	1958 M8.0	1963 M8.1	21

三陸沖地震(1896)がかかる。* F領域かも知れない。

図3-4 わが国の海洋型地震の分布 (1)に加筆

図3-5 南千島-北日本沖の大地震と震源域 (2)

<内陸型地震>

- 全国どこにでも起り得る。
- 震源の周辺は被害が大きい。
- 活断層が内陸型地震の発生地点の目安：断層の長さ，変位速度により発生する地震のMが推定可能
- 地震発生周期は海洋型に比べ長く1000年のオーダーである。

番号	地震	年月日	M	死者 行方不明
1	熊本	1889. 7.28	5.8	20
2	濃尾	1891.10.28	8.0	7,273
3	東京湾北部	1894. 6.20	6.7	31
4	庄内	1894.10.22	6.8	726
5	陸羽	1896. 8.31	7.0	209
6	江濃	1909. 8.14	6.4	41
7	秋田仙北	1914. 3.15	5.9	94
8	千々石湾	1922.12. 8	6.0	26
9	北但馬	1925. 5.23	6.5	465
10	北丹後	1927. 3. 7	7.5	2,925
11	北伊豆	1930.11.26	7.0	272
12	男鹿半島	1939. 5. 1	7.0	27
13	鳥取	1943. 9.10	7.4	1,083
14	三河	1945. 1.13	7.1	1,961
15	福井	1948. 6.28	7.3	3,769
16	新潟	1964. 6.16	7.5	26

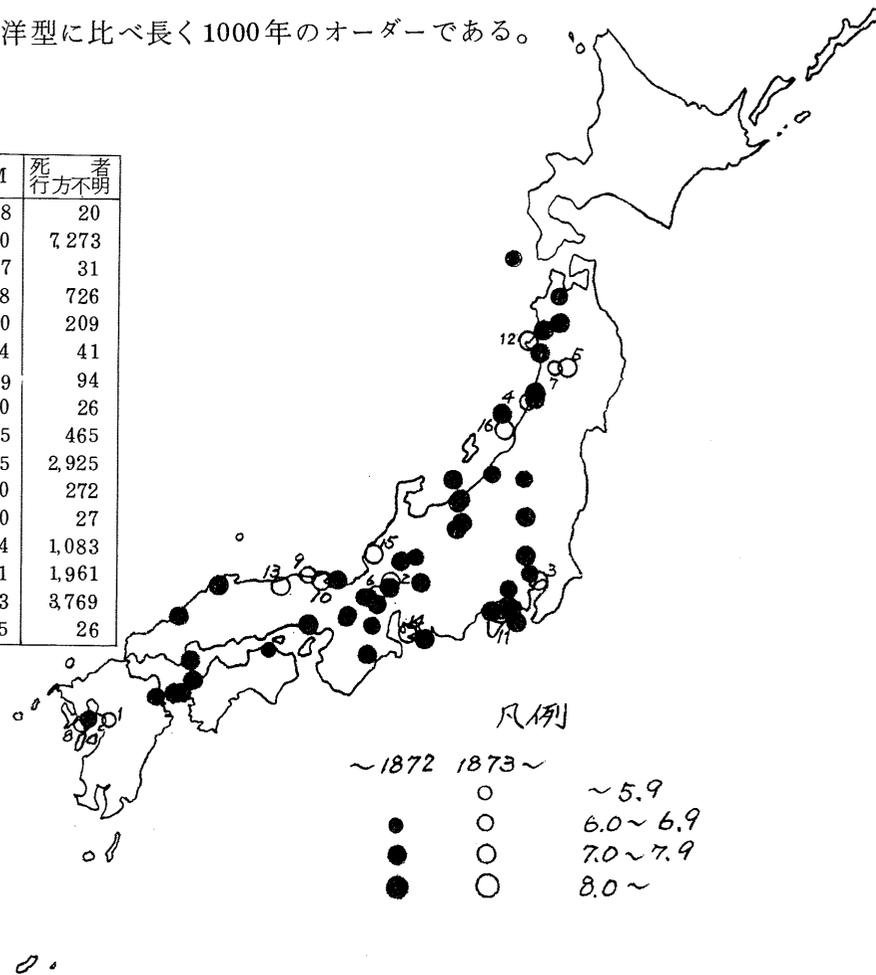


図3-6 内陸型地震の分布と明治以降の主な被害地震⁽⁶⁾に加筆

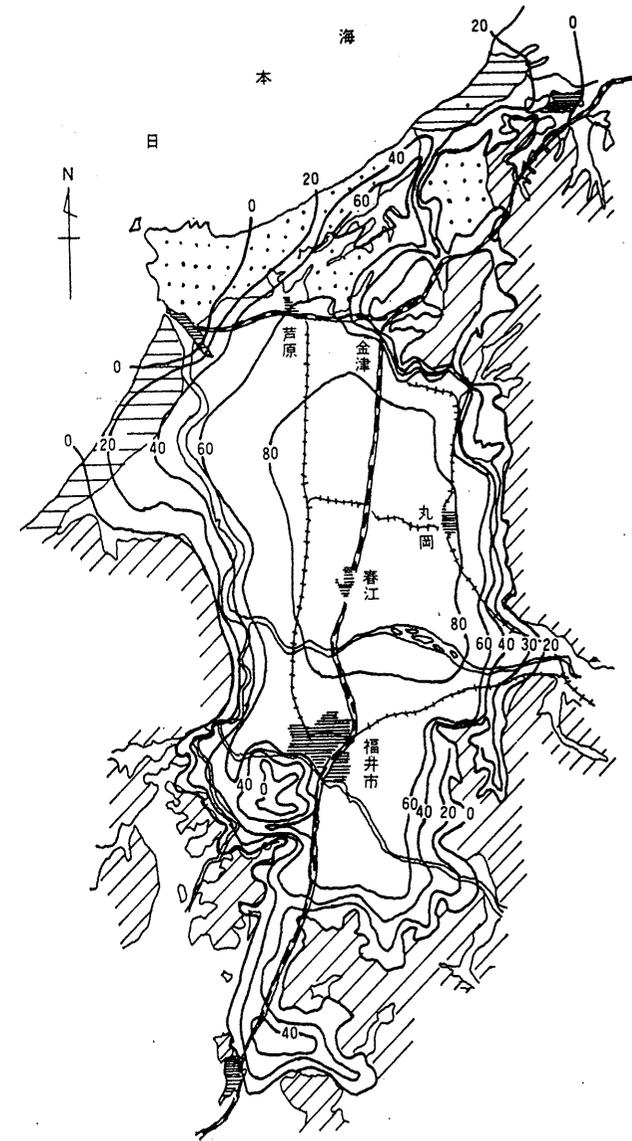


図3-7 昭和23年福井地震(被害率分布図)⁽¹⁾

<内陸型地震>

太平洋沿岸地域で起こる海洋型地震に比べて内陸部で起こる地震は地域的にも時間的にも不規則である。図3-6には内陸部および日本海沿岸地域で起こった主な地震の規模と位置を示したが北海道と四国が静穏である他は全国各地で地震が発生している。北海道、四国地域が他地域に比べて内陸型地震が少ないといってもたかだか千数百年間の記録であり、後述するように数千年オーダーの周期性をもつ地震が今後起こる可能性があることは否定できない。

内陸型地震は海洋型地震に比べて地震の規模(マグニチュード)は小さく6~7程度のもが多いが、発生位置が居住地域に近いところから大きな被害が生じる可能性がある(図3-7参照)。内陸型の地震の中でも1891年に起こった濃尾地震はマグニチュード8.0という巨大なもので大きな被害が生じた。

内陸型の地震はこのように不規則に発生し、一見とらえどころがないように見えるが、この型の地震の場合には規模がある程度以上になると地表にその痕跡を残す。岩石の破壊面すなわち断層面が地上に顔を出すことがある。松田の研究によると断層が地表に現れる地震のマグニチュードの下限値は6.5であるといわれている。⁽⁴⁾ また図3-8に示すように地震の規模は断層の長さ、変位量に比例することも知られており、これらの関係式も多数提案されている。

日本各地の断層を調べてみると過去に何度も運動したことが知られており、地層の年代測定から断層が動く周期もわかるようになった(表3-1参照)。

これらの研究から全国の断層、それも第四紀以降に動いた形跡

のある断層(活断層と呼ばれる)がどこにあるかを調べればその断層の運動による地震の周期や規模がある程度推定できるようになった。

表3-1に示したように著名な活断層の調査から地震の発生周期はわが国では数千年のオーダーであり、海洋型の地震に比べてその間隔は長い。

表3-1 地形・地質学的方法による地震の周期の推定例⁽⁴⁾

断層名・場所	平均変位速度 ¹⁾	歴史地震	地震規模 ²⁾	地震の周期	文献
丹那断層	2m×10 ⁻¹ y	北伊豆地震	M7.0	1,000年	久野, 1962
阿寺断層	5.3	なし	(M8)	1,300年	松田, 1975b
中央構造線(四国)	5~10	なし	(M8)	1,000~3,300年	岡田, 1973 松田, 1975b
石廊崎断層	0.1~1	伊豆半島沖地震	M6.9	1,000年	松田, 1975a
San Andreas断層	13	サンフランシスコ地震	M8½(M8)	700年 100年	Wallace, 1968b Wallace, 1970
Wairau断層(ニュージーランド)	3.5	なし		500~900年	Lensen, 1968
Coyote Creek断層(カリフォルニア)	3	ボレゴ山地震	M6.4	200年	Clark et al, 1972

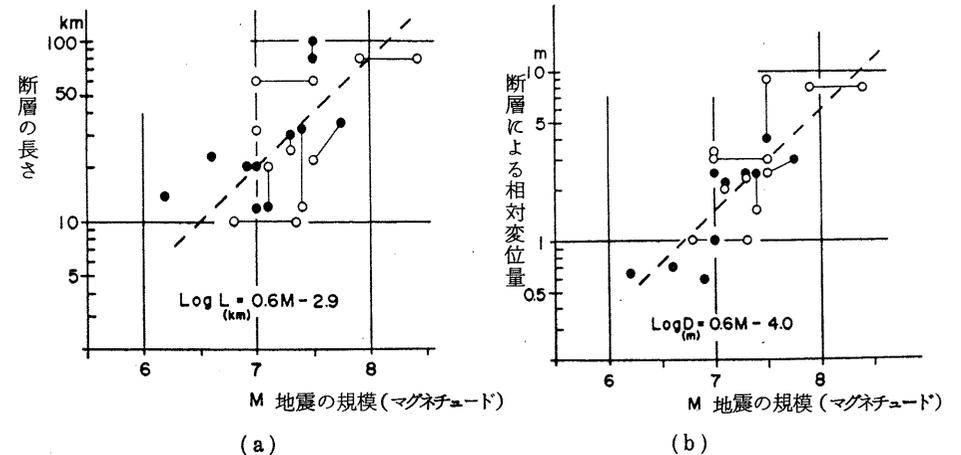


図3-8 日本において発生した地震断層の長さ(断層の長さ)と地震規模との関係⁽⁵⁾
 ○ 地表で確認されたもの ○ 測地的、地震学的に推定されたもの

3.2 地震による地盤のゆれ方

- Mが大きくなる程エネルギーが大きくなり被害も大きくなる。
- 通常被害が生じるのはM = 6以上
- 震源または地震断層からの距離が大きくなると震動が小さくなる。

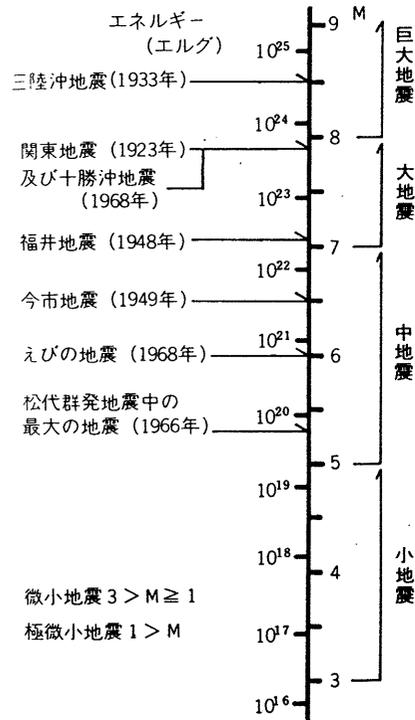


図3-9 地震の規模(エネルギー)と震度

(1) 地震の規模と震度

地震が発生すると気象庁からマグニチュードなどの地震の諸元と各地の震度が発表される。マグニチュードは地震の規模を表わす量であり震央から100km離れた地点の地震波の振幅の対数に比例する量である。被害が発生する地震のマグニチュードは震源^{*1}の位置や深さによって異なるが大体6以上であるといえる(図3-9参照)。図3-10には、一例として秋田、能代地区のマグニチュード別の震源分布を示す。

一方、震度は地震によって生じる各地点のゆれ方を示す量で0(無感)から7(激震)までである。これは地盤のゆれ方を示すものであるので同じ地震でも地点によって異なる。日本海中部地震(1983)における各地の震度分布を一例として図3-11に示す。同じ地震では震央からの距離が遠くなる程一般に震度は小さくなる(図3-12)。しかし図3-11に示したように同心円にはならない。これは地震の起こり方や、伝播経路によって波の減衰特性が異なるためである。

震央距離と震度あるいは加速度(地震計による観測値)の関係は図3-12に示したように地震のマグニチュードによっても異なるし、地震そのものでも減衰特性は異なるが、各種の関係式が提案されている。

*1 震源とは岩石の破壊が始まった点をいい、その位置は緯度、経度、深さで表わされる。

*2 震央とは震源の位置を地表に延長した地点である。

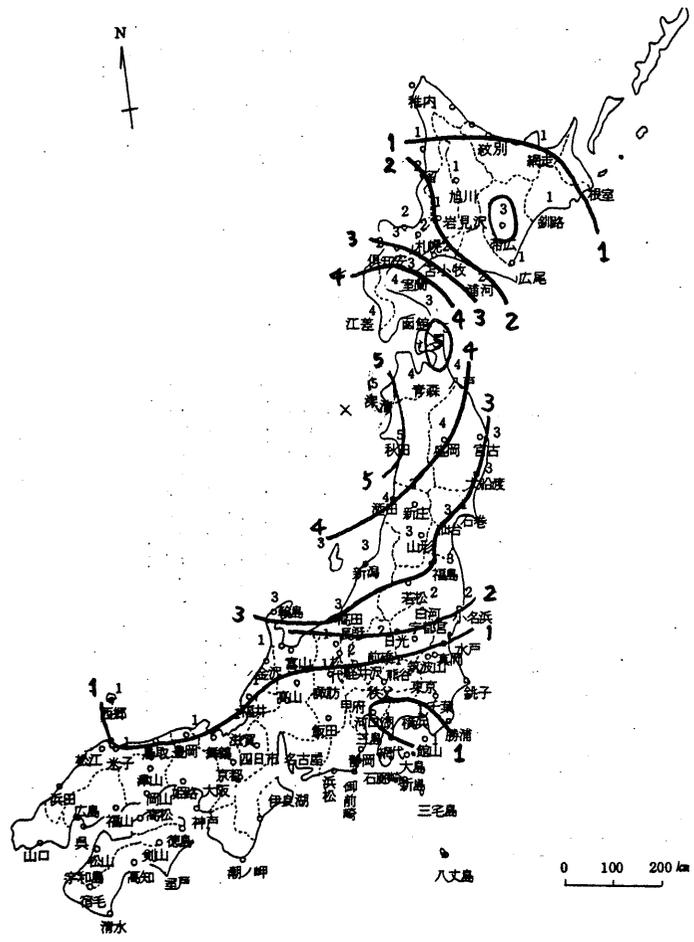


図3-11 日本海中部地震における各地の震度分布と等震度線

表-4 図-3-12に示された番号の地震の表。dは深さ

1	1933年3月 三陸沖地震	M=8.3, d=0~20km
2	1944年12月 東南海地震	M=8.0, d=0~30km
3	1946年12月 南海道地震	M=8.1, d=30km
4	1952年3月 十勝沖地震	M=8.1, d=45km
5	1923年9月 関東地震	M=7.9, d=10km
6	1964年6月 新潟地震	M=7.5, d=45km
7	1948年6月 福井地震	M=7.3, d=20km
8	1943年3月 鳥取地震	M=6.1, d=10km
9	1949年12月 今市地震	M=6.4, d=0~10km
10	1943年9月 鳥取地震	M=7.4, d=10km

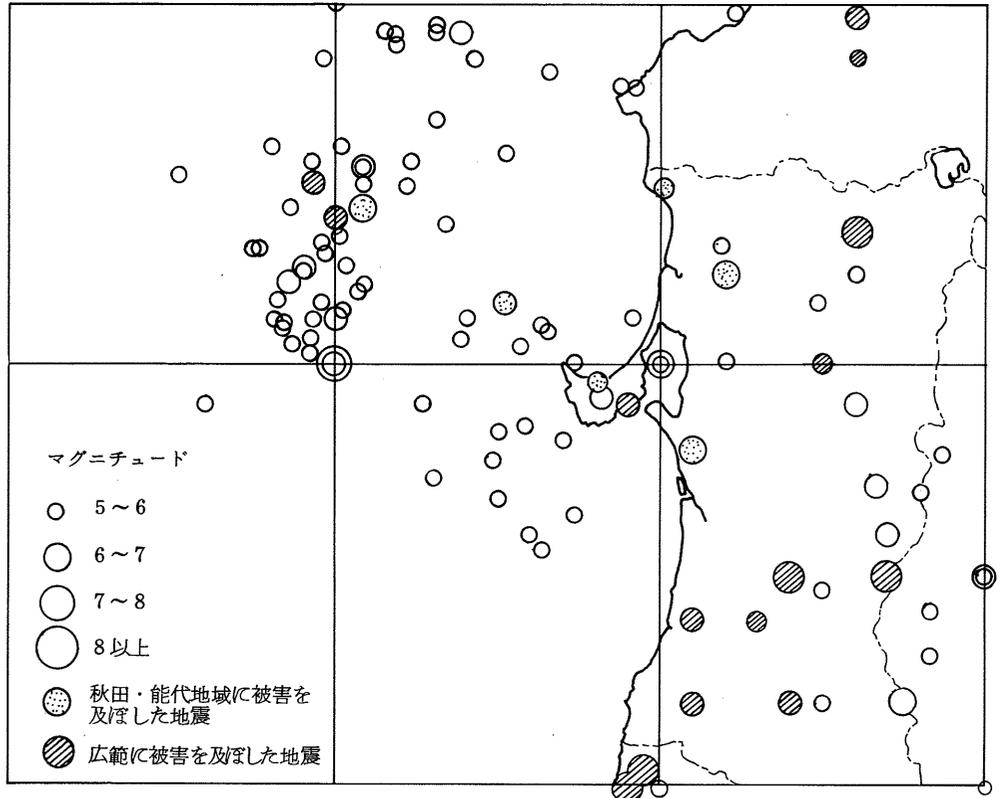


図3-10 秋田・能代地域の震源分布図

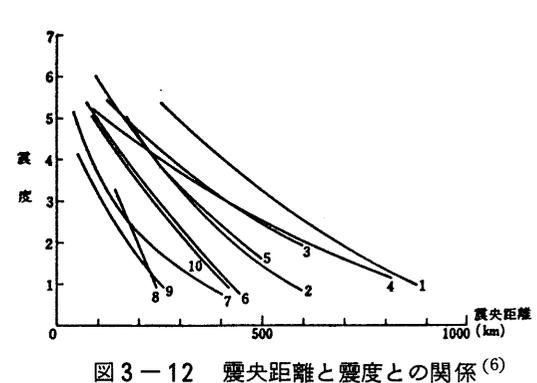


図3-12 震央距離と震度との関係⁽⁶⁾

震度は震央距離とともにこのように減っていく。実際には距離以外にも震度に関係をもついろいろの要素があるから、点はこれらの曲線のまわりはかなり大きくばらつくのだが、それらをならして、全体としての傾向を示したのがこれらの曲線である。

(2) 地形・地質によるゆれ方の差異

近年、各地に地震計が多数設置され、地震のたびに新しく記録が得られているが、地形・地質との関係が明らかになるほどにはなっていない。過去の地震で被害の程度と地形・地質との関係が明らかにされている。図3-13は東南海地震(1944)における遠江地域の地形・地質と被害率分布を示したものである。また図3-14は濃尾地震(1891)における名古屋地域の被害と地形との関係を示したものである。両図とも軟弱な地盤ほど被害が大きくなることを示している。被害が大きいことがそのままゆれが大きいことを意味しないが、軟弱な地盤は強度的にも弱いので被害が生じ易い。

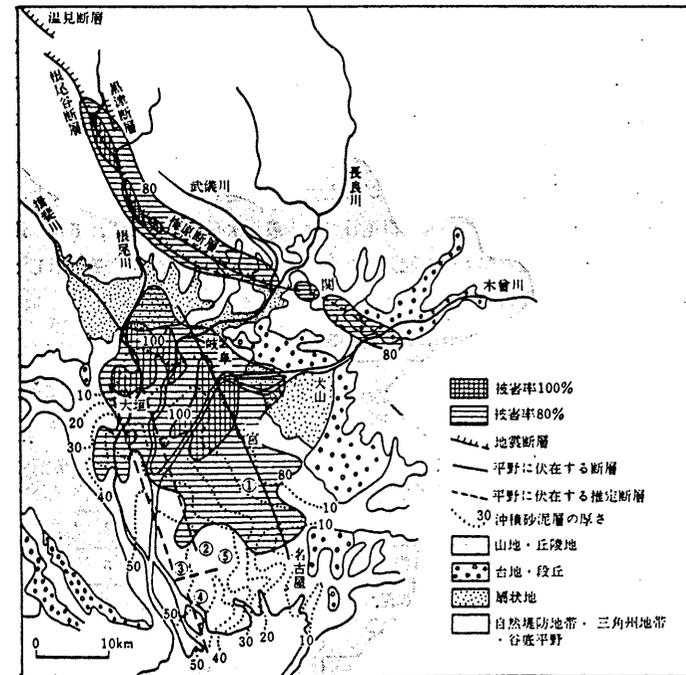
地震の際の地盤のゆれを理論計算によって再現すると上記の被害が多発する軟弱地盤では構造物に作用する慣性力に比例する加速度はむしろ小さく、変位が大きくなるような挙動を示す。

ゆれ方の周期という点においても地盤の違いが顕著にみられる。図3-15は関東地震(1923)での下町と山手の建築物の被害の相違を示したものであるが、下町は周期の長い木造の被害が多く、山手は周期の短い鉄筋コンクリート造や土蔵の被害が多いことがわかる。下町は地盤が軟質で周期の長い波が卓越し、山手はその逆であったため、建物と地盤が同じ周期でゆれる共振現象を起こし、被害が増えたものである。図2-16に示したように地盤は固有の周期をもっており、このような地盤の周期と構造物の固有周期が似たようなものであれば地震の際大きくゆれる可能性がある。地盤のもつ固有周期を測定するには次のような方法がある。

④ 常時微動測定による方法……………日常、気象などの自然条件や工場、交通などの人為条件によって生じる微振動(常時微動)を測定し、その波に含まれる周波数成分を調べる。

⑤ 土質柱状図より簡易的に推定する方法……………地盤の固有周期は地盤の各地層厚と横波(S波)伝播速度Vsによって表わされる。VsはN値より経験的に推定できるのでN値分布がある柱状図があれば地盤の固有周期を推定することができる。

これらの資料は私達に次のようなことを語りかけてくれる。すなわち構造物のゆれる度合というものは地盤の良し悪しよりも、構造物のもつゆれ方の周期と地盤のもつゆれ方の周期のかねあいである。また構造物の被害は前述のゆれの大きさ、すなわち大きな地震力が作用して生じる場合と足元の地盤が破壊したために生じたものがある。後述する地盤の液状化などは後者の代表例といえよう。



①一宮線 ②大坂-津島線 ③大坂-今尾線 ④木曾碑線 ⑤弥富線
 図3-14 濃尾地震による被害激基地と諸断層 (門村, 1974を一部改変)⁽⁹⁾

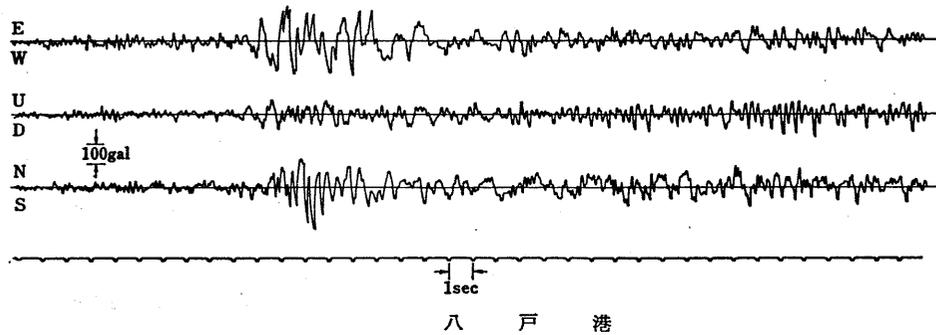
(3) 地震記録からみた地盤によるゆれ方の差異

(2)では主に被害率という面から地盤によるゆれ方の差異をみてきたが、ここでは地震記録が地盤の状況でどのように変わるかをみてる。

図3-17には十勝沖地震(1968)の際に震源からの距離がほぼ同じである八戸港と宮古港で記録された波形を示す。両地点の地盤は八戸港が上部10m程度が比較的ゆるい砂の地盤であるのに対して宮古港は表面から硬い砂、砂礫が堆積し10m以深は岩盤である。

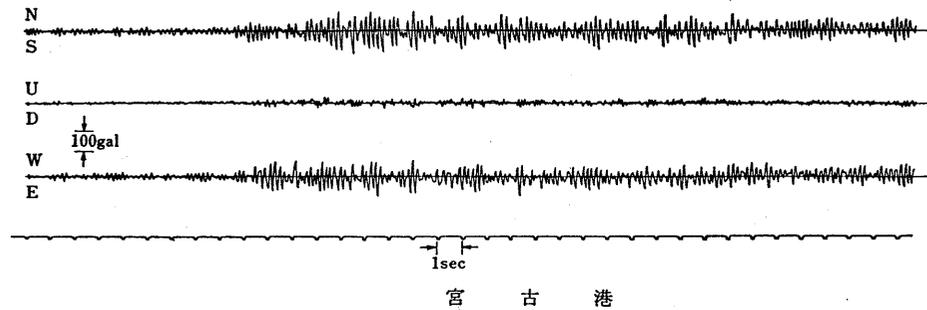
両地点の地震記録を比較するとまず最大値では八戸港が233galであるのに対して宮古港では155galと小さい。また波形では八戸港の記録が比較的周期が長く、ゆっくりしたゆれであるのに対して宮古港の場合には周期が短かく速いゆれが記録されている。

このような波形は数10m～100m内外の比較的軟い地層で形成されるといわれている。硬い地盤(周期の短い地盤)では周期の短い波が卓越し、軟い地盤(周期の長い地盤)では周期の長い波が卓越する。八戸港および宮古港で記録された波形は地盤の硬軟をよく反映したものといえよう。



G. L. - 0 ~ 10 m 中砂および粗砂 N = 6 ~ 20

G. L. - 10 m ~ 硬い砂層 N = 40



G. L. - 0 ~ 10 m かなり硬い砂および礫, 下層2mは礫混り粘土

G. L. - 10 m ~ 岩盤

図3-17 同じ地震を別々の場所で記録した例(十勝沖地震の場合)

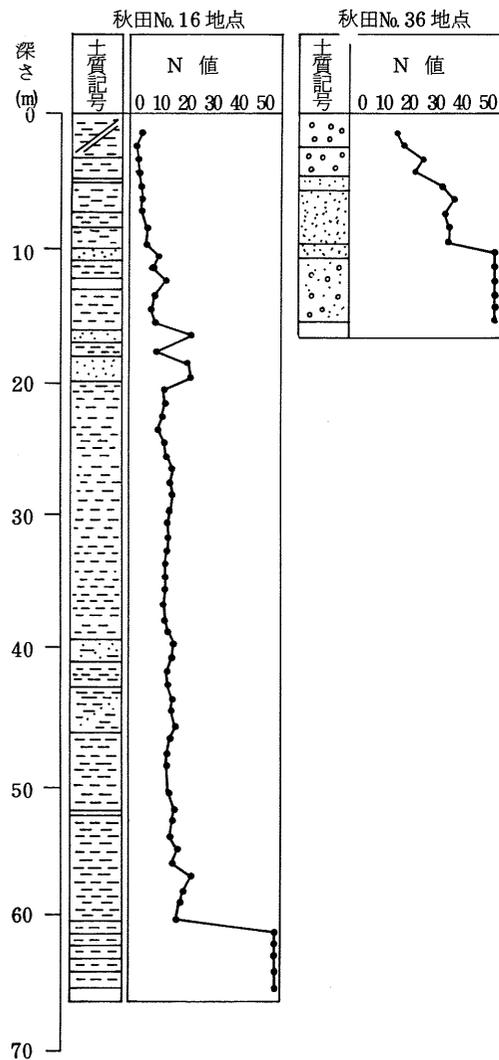


図3-18 計算地点の地点の地盤状況

(4) 地震応答解析からみた地盤によるゆれ方の差異

地盤によってゆれ方がどのように変わるかを調べるには地震の際に種々の地盤で記録された波形を比較するのが最も良い方法であるが、地震の発生を待たなければならず、また観測体制の整っている地域に地震が発生するとは限らない。

地震の際に地盤がどのようにゆれるかを予測する方法として電子計算機を用いて行う地震応答解析がある(詳細は後述)。この方法を用いると地盤が変わるとゆれ方がどのようになるかを予測できる。

地震応答解析からみた地盤によるゆれ方の差異の一例として図3-18に秋田地区の2種類の地盤における地震応答を比較したものを示す。これは日本海中部地震の地震動を推定するために行ったものである。計算地点の地盤状況は図に示すように軟質なものと硬質なものである。これらの地点の基盤(岩盤)より地震動(入力地震動)が入射すると入力地震動と地盤の性質によって種々のゆれ方(応答)が地表に現れる。図3-19には地表面の加速度および変位の波形と加速度波形にどのような周期の成分がどの程度含まれているかを示すフーリエスペクトルを示しているが、最大値では軟質地盤の方が加速度、変位ともに大きく、特に変位が硬質地盤に比べてかなり大きくなる。また波形にはあまり大きな違いがみられないがフーリエスペクトルで見ると硬質地盤の場合3Hz(0.3秒)の成分が卓越し、軟質地盤の場合0.5Hz(2秒)の成分が卓越していることがわかる。

このようにその地盤特有なゆれ方をするとともに下から入射してくる地震動の性質も多分に反映された挙動を示す。

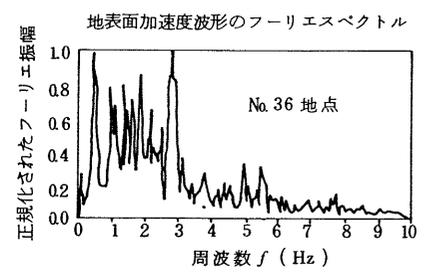
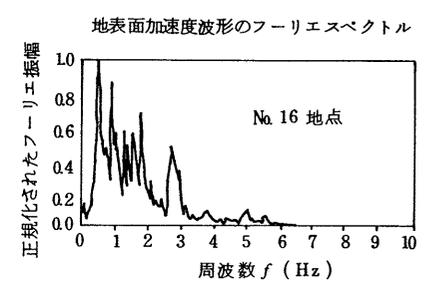
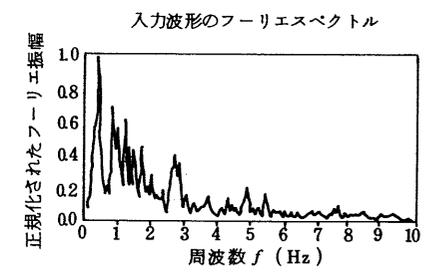
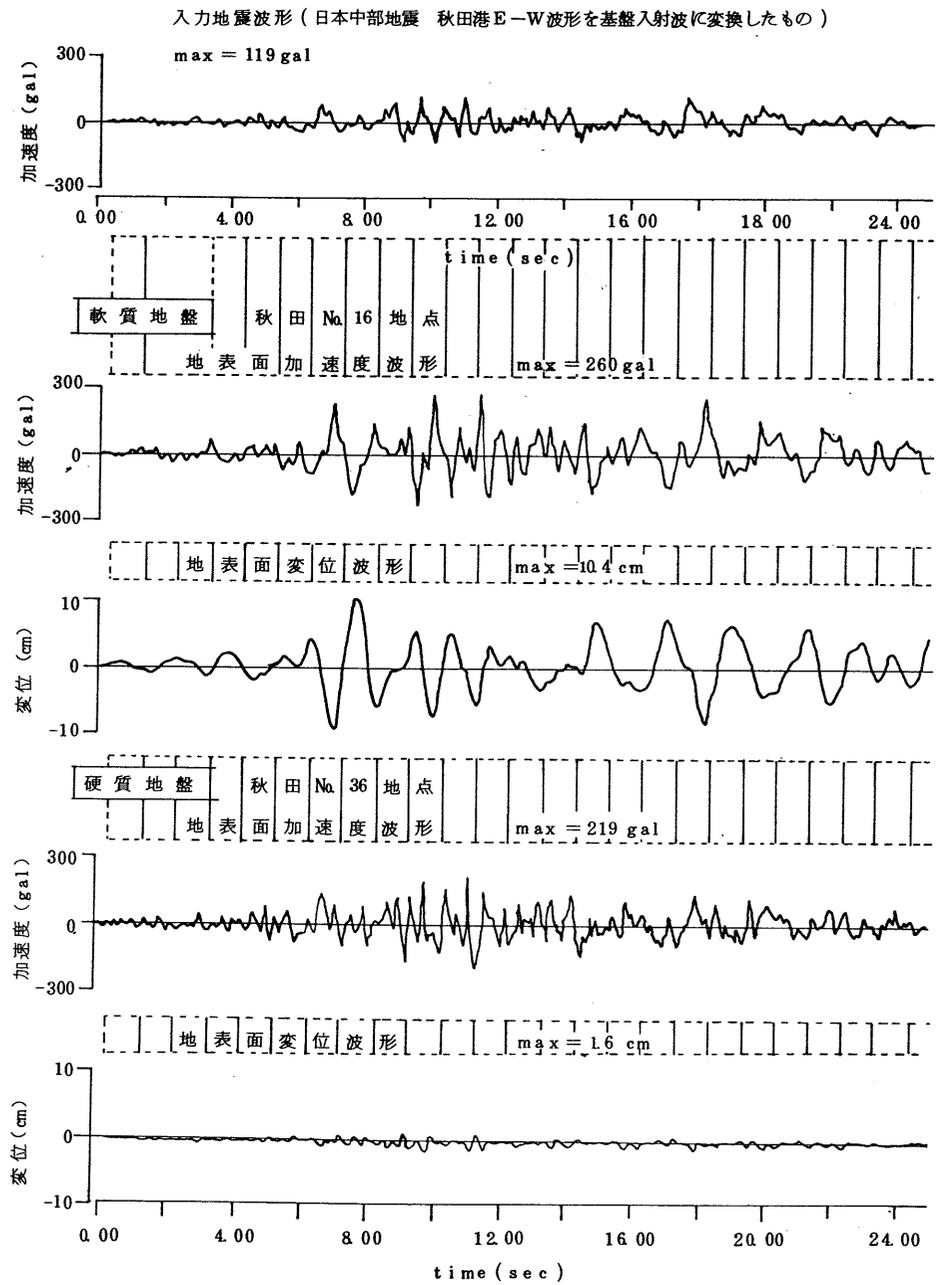


図3-19 地震応答計算による地震のゆれ方の差異

断層の上、下盤による違い

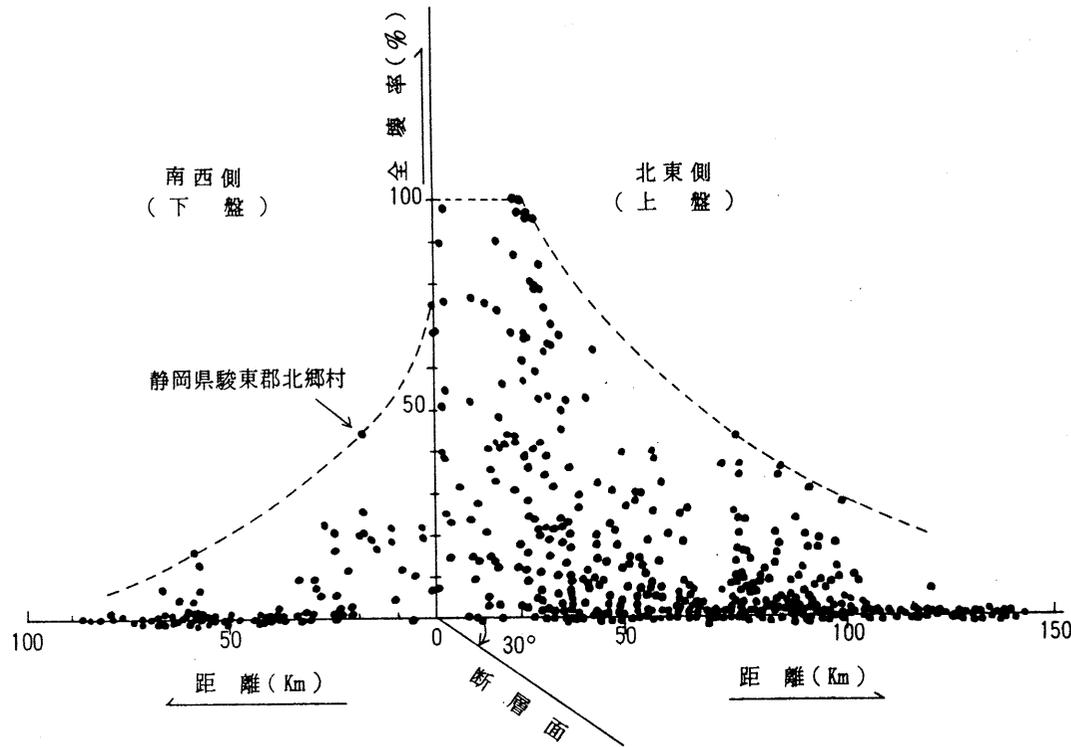


図3-20 震央からの距離と木造家屋全壊率の関係(関東地震)⁽¹⁰⁾

(5) 他の条件による地盤のゆれ方の差異

地震時の地盤のゆれ方はその地点の地盤の硬軟のみではなく他の条件によっても左右される。例えば関東地震(1923)では断層面を境にして木造家屋の被害率が異なることが示されている(図3-18参照)。

図3-21に示す十勝沖地震(1968)の際に被害激甚地区であった東北地方太平洋側の三本木、五戸、名川、福地を連ねる直線上の地域は洪積台地で表層地盤は軟弱ではなかった。ただ重力探査から深層地盤が向斜構造をなしていることがわかり、このことが地震動の強さや波形に影響を与えているのではないかという説がある。

図3-22には静岡県浮島地区の加速度記録を示す。この地区は北から南に行くにしたがって岩盤線がだんだん深くなっていく地層構造をしており、このような構造も地盤の応答に影響を与えているものと考えられる。

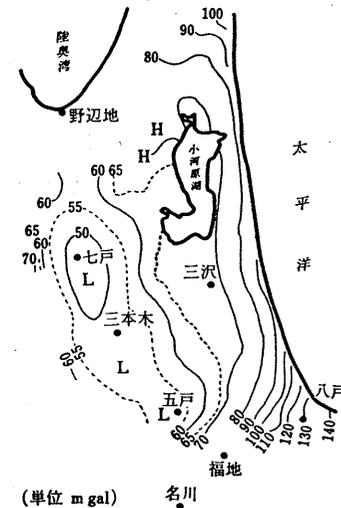


図3-21 十勝沖地震の被災地のブーゲン異常図⁽⁸⁾
(東北大学地質学古生物学教室災害調査グループによる)

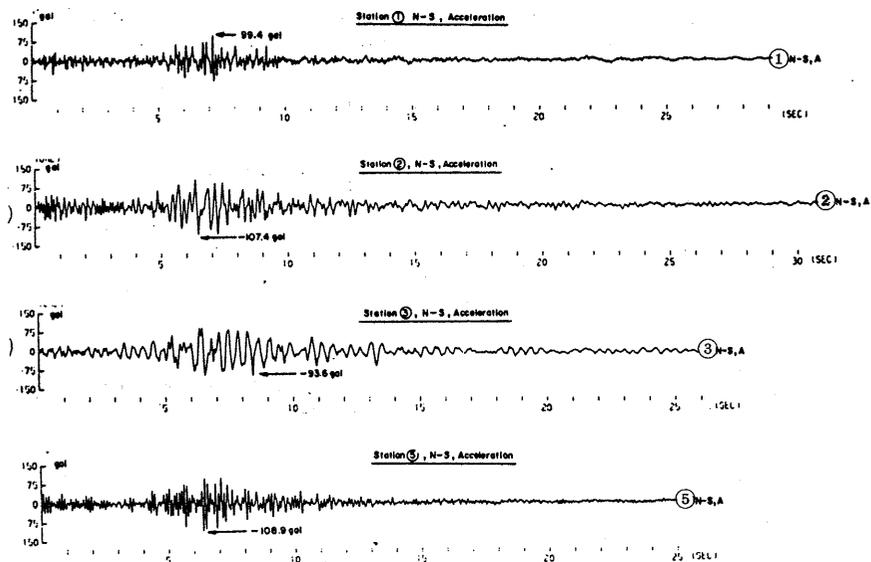


図3-22-b 加速度計の記録 (位置は図3-22-a参照) (15)

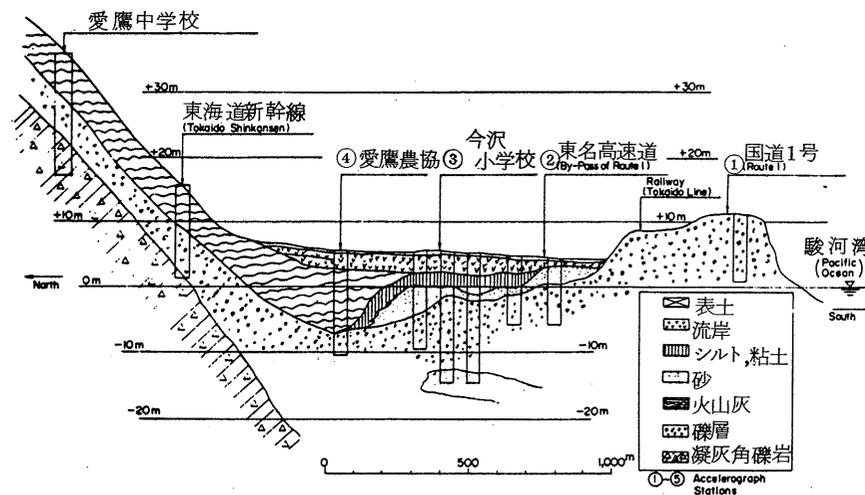


図3-22-a 静岡県沼津市の地震加速度計設置地点の模式地質断面図 (15)

①~⑤ 加速度計設置場所

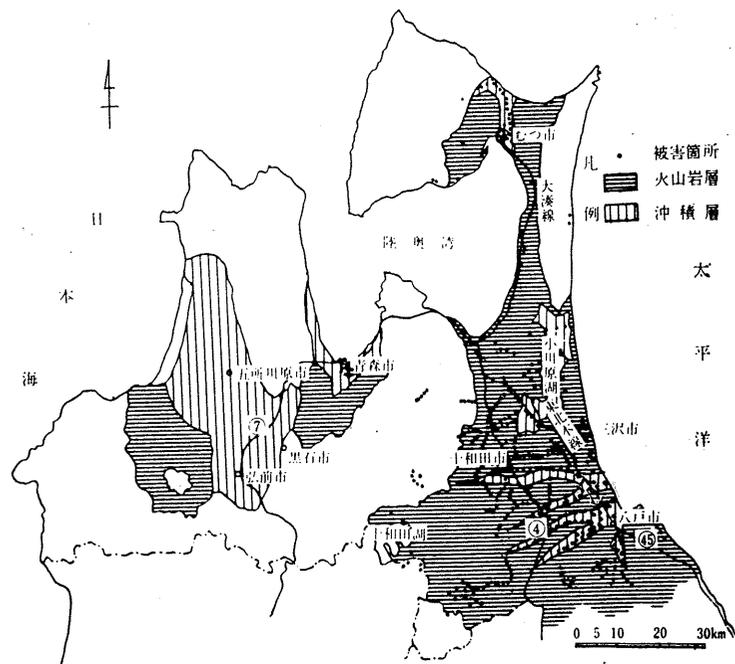


図3-19-a 十勝沖地震の被害分布

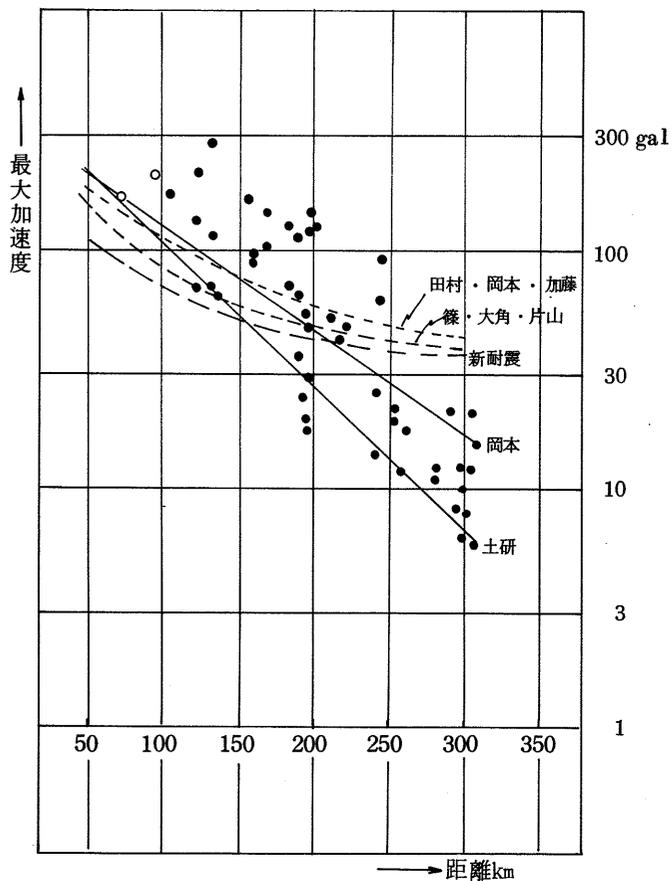


図3-23 日本海中部地震における最大加速度と余震域中心からの距離の関係

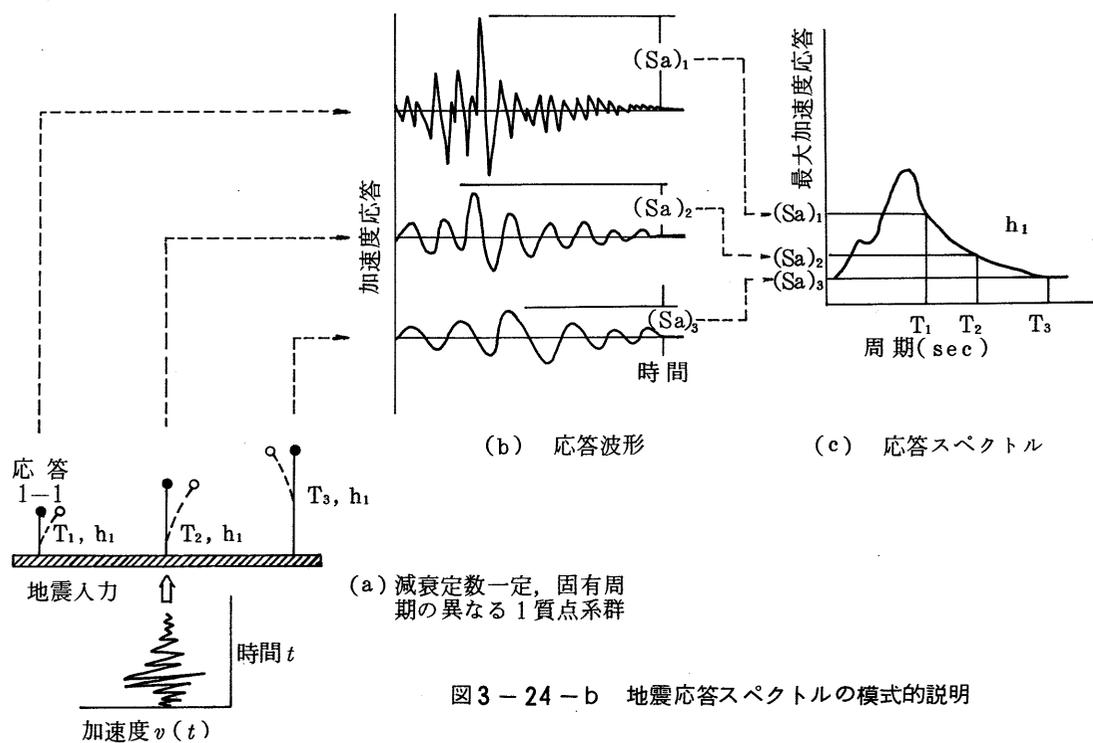
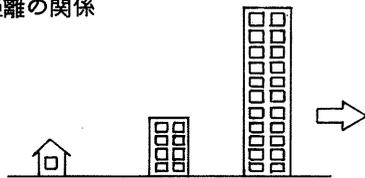


図3-24-b 地震応答スペクトルの模式的説明

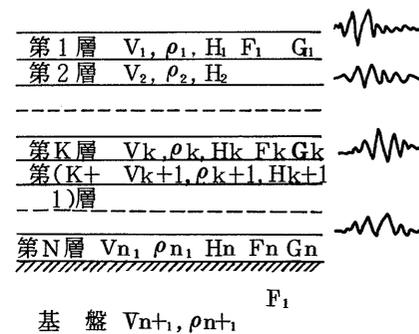


図3-24-a 重複反射法の概念

表 3-3 地震応答解析に必要な情報と得られる結果

	重複反射法	応答スペクトル法				
必要な情報	<ul style="list-style-type: none"> 各地層の層厚 各地層の土の密度 各地層のS波(せん断波)速度 各地層の減衰定数 各地層の土のひずみ依存性 入力地震動 	<ul style="list-style-type: none"> 計算する地盤, 構造物の周期 計算する地盤, 構造物の減衰定数 入力地震動 				
得られる結果	<ul style="list-style-type: none"> 各地層の <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="text-align: center;"> $\left\{ \begin{array}{l} \text{加 速 度} \\ \text{変 位} \\ \text{せん断応力} \\ \text{せん断ひずみ} \end{array} \right\}$ </td> <td style="text-align: center;"> $\left\{ \begin{array}{l} \text{最大値} \\ \text{波形} \end{array} \right\}$ </td> </tr> </table> 各応答波形のフーリエスペクトル 各応答波形の応答スペクトル 地盤の波動伝達特性 	$\left\{ \begin{array}{l} \text{加 速 度} \\ \text{変 位} \\ \text{せん断応力} \\ \text{せん断ひずみ} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{最大値} \\ \text{波形} \end{array} \right\}$	<ul style="list-style-type: none"> <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="text-align: center;"> $\left\{ \begin{array}{l} \text{加速度} \\ \text{速度} \\ \text{変位} \end{array} \right\}$ </td> <td style="text-align: center;"> 応答スペクトル </td> </tr> </table> 	$\left\{ \begin{array}{l} \text{加速度} \\ \text{速度} \\ \text{変位} \end{array} \right\}$	応答スペクトル
$\left\{ \begin{array}{l} \text{加 速 度} \\ \text{変 位} \\ \text{せん断応力} \\ \text{せん断ひずみ} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{最大値} \\ \text{波形} \end{array} \right\}$					
$\left\{ \begin{array}{l} \text{加速度} \\ \text{速度} \\ \text{変位} \end{array} \right\}$	応答スペクトル					

表 3-4 入力情報を得るための調査, 試験

計算に必要な入力情報	入力情報を得る為に必要な調査, 試験			関連調査
	直接的	間接的	経験的	
地層構成 地震基盤	ボーリング	弾性波探査		
密度 ρ	密度試験	密度検層	土質型とN値	ボーリング, サンプリング ボーリング
せん断波速度 V_s	超音波試験 PS検層 弾性波探査		土質型とN値 一軸圧縮強度	ボーリング, サンプリング ボーリング
ポアソン比 ν	PS検層 振動三軸試験 (横歪測定)			ボーリング
G, hのひずみ 依存性 G, h ~ r	動的ねじりせん断試験	共振法試験 振動三軸試験	土質型とN値 拘束圧 間隙比 etc	ボーリング サンプリング

(2) 地震応答解析に必要な情報と結果の利用

(1)では地盤あるいは構造物の地震時挙動を予測する方法には震源からの距離, 地震のマグニチュード, 地盤条件などから簡易的に最大応答だけを求めるものと対象とする地点を詳細にモデル化して地盤や構造物の地震時挙動を計算する地震応答解析法があることを説明した。

前者の方法は過去の被害地震や周辺の地震活動から想定地震(震源, 規模)を決め, 前述の最大値予測式にあてはめることによって容易に地震時挙動の最大値を推定することができる。これに対して地震応答解析では地盤, 構造物を詳細にモデル化するために表 3-3 に示すような情報が必要である。またこのような情報は表 3-4 に示した調査, 試験を行うことによって得られる。

地震応答解析を行うと表 3-3 に示したように地盤各層(点)や構造物の応答波形(加速度, 変位その他)やその最大値分布が得られる。応答波形だけでも定性的傾向を知ることができるが, 波形からフーリエスペクトル, 応答スペクトルなどの各種スペクトルを計算することによって波形に含まれる周波数成分を定量的に分析することができる。

地震応答解析で得られた結果は図 3-25 に示すように各種検討に適用できる。特に次元の地震応答解析は地盤の液状化検討のためによく行われている。

このように地震応答解析は個々の地盤および入力地震動の特徴がとり入れられており, その用途も広いので地盤の地震時挙動を推定するには非常に良い方法である。しかし, この方法はあくまでモデルを仮定した理論計算であり, その結果を実際の予測や設

計に適用する場合には次のようなことに留意する必要がある。

④ 基盤地震動に関する問題点

- ① 震源からの距離が異なれば波形も異なる。さらに震源から観測地点間の地殻構造によって地震動が異なる。
- ② 場所によって発生する地震が異なる（例えば破碎している岩盤地帯か新鮮な岩盤地帯か）。
- ③ 観測地点の表層地盤の特性によって波形、振幅とも大きく異なる。

⑤ 地盤モデルに関する問題点

通常行なわれている地震応答計算に必要な土質パラメーターのうち最も重要なものはS波速度である。この値を推定するにはN値による予測式を使うのが一般的であるが、種々提案されている予測式によってS波が異なる。振動特性を支配する地盤剛性はS波速度の二乗に比例するので影響が大きい。

また、土に生じるひずみによって土の特性が異なる性質（土のひずみ依存性）も地盤の応答に与える影響が大きい。

⑥ 計算手法に関する問題点

通常、地盤の応答計算に用いる計算方法は重複反射理論によるものである。この方法は地盤の基本的な性質を考慮でき、計算費も安価であるという点で一般的に用いられているが、土中に発生する過剰間隙水圧の発生により地盤剛性が低下する性質が考慮されておらず、液状化時の地盤挙動を取扱うには問題がある。

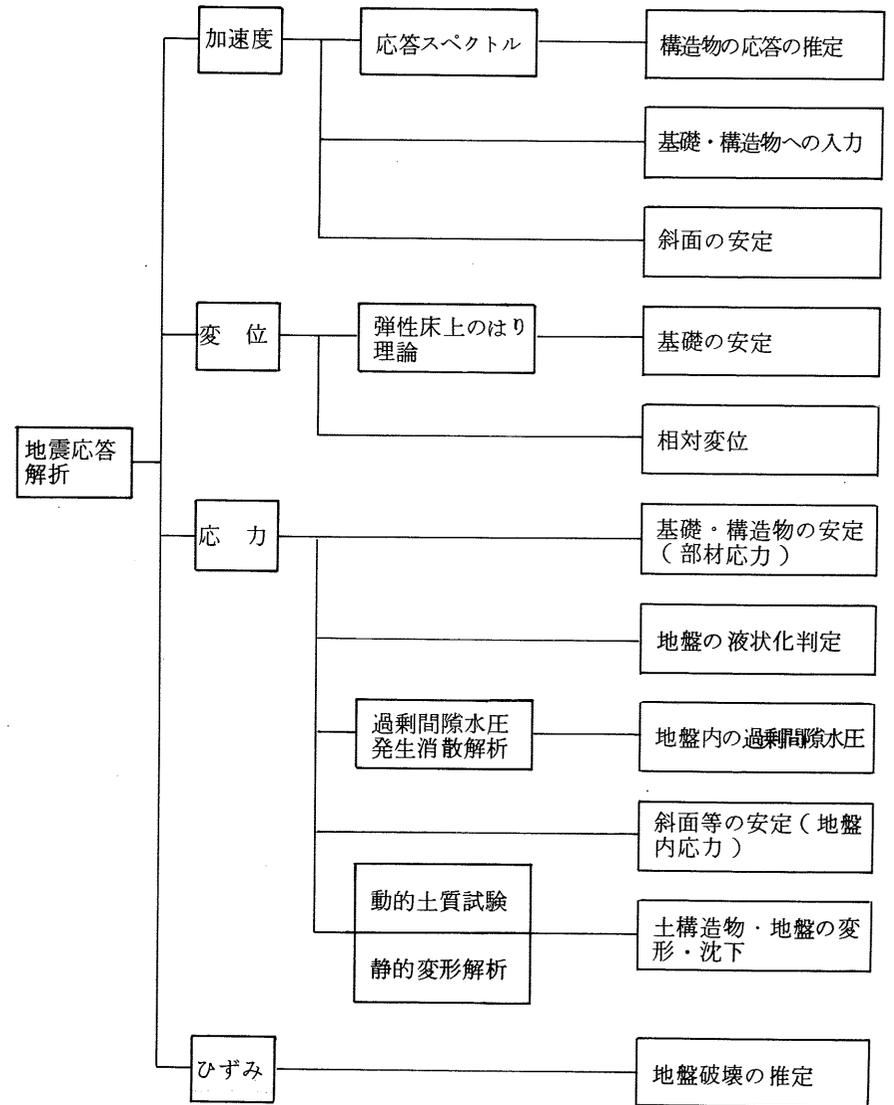


図3-25 地盤応答解析の適用

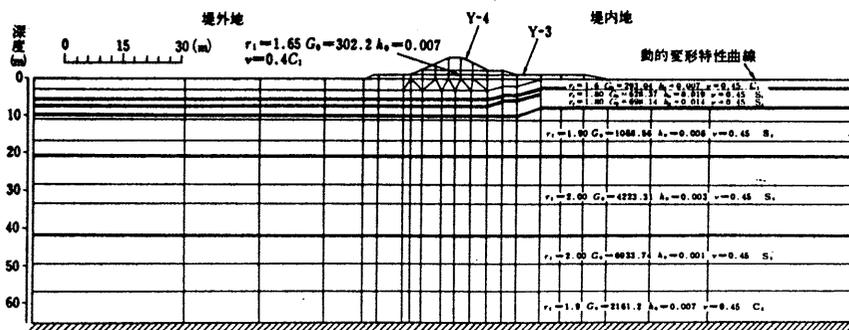


図3-28-a 解析モデル

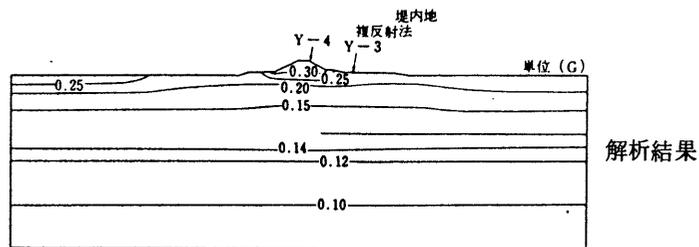


図3-28-b 構造物—地盤連成系の解析例(最大加速度分布)⁽¹²⁾

図3-28は地盤と構造物を一緒に解析した例である。a) 図は地盤—構造物のモデルを示したものである。このような二次元モデルの場合には一般に有限な要素に分割する有限要素法を用いる。二次元モデルの場合には地盤と構造物の相互作用のために地震応答は水平成層地盤のように水平にはならない。

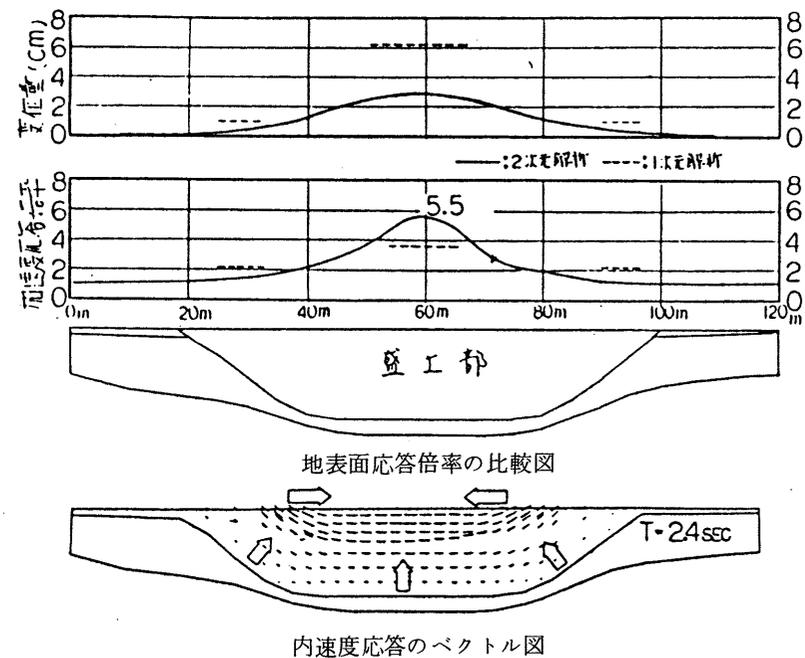


図3-29 切土・盛土地盤の解析例⁽¹³⁾

図3-29は谷地形を切盛して造成した地盤の応答を水平成層地盤の応答と比較したものである。このような地盤では地震波の伝播方向は複雑であり、鋭直方向の伝播しか考慮しない次元解析では表現できない。

第3章の引用, 参考文献

1. 「日本の科学と技術9」Vol 17, No 181 日本科学技術振興財団 1976
2. 宇津徳治, “地震学”, 共立全書, 1977
3. 宇佐美龍夫, “日本被害地震総覧”, 東大出版会, 1975
4. 松田時彦, “活断層と地震—その地質学的研究”, 地質学論集No.12 P 15 ~ 32 1976
5. 松田時彦, “活断層から発生する地震の規模と周期について”, 地震第2輯 Vol. 28, 269 ~ 283 1975
6. 藤井陽一郎, “写真図説 地震”, 図書刊行会, 1979
7. 金井清, “地震工学”, 共立出版, 1969
8. 岡本舜三, “耐震工学”, オーム社, P 95, 1971
9. 田治米辰雄他, “地盤と震害”, 槇書店, 1977
10. 静岡県: “静岡県地震対策基礎調査報告書—木造建物の被害想定—”, 静岡県地震対策課. 1978, P 7
11. 建設省建築研究所, モデル基礎及び周辺地盤における地震測定, 昭和49年度総合プロジェクト新耐震設計法の開発報告書, 49 - IV, 1(2)・建・報・2, 昭和50年3月
12. 建設省建築研究所, 同上題名, 昭和51年度総合プロジェクト新耐震設計法の開発報告書, 51, IV・1(1)建報2, 昭和52年3月
13. 藍田正和他, “傾斜基盤上造成地における地盤の振動特性”, 第19回土質工学研究発表会 1984, P 621
14. 石原研而他, “浦河沖地震による構造物の被害と地盤の関係, 土と基礎 Vol. 31, No. 6, P 51 ~ 56, 1983
15. 大久保忠良他, “土木研究所における高密度強震観測計画および記録の解析”, 第13回日米天然会議 1981 P 20 ~
16. 岩崎敏男他, “地震応答解析による沿道斜面の耐震性の検討”, 土研資料第1600号, 1980
17. 青森県, “青森県大震災の記録—昭和43年の十勝沖地震—”, P 123, 青森県, 1969
18. 川島一彦他, “最大地震動および地震応答スペクトルの推定法(その4)”, 土木研究所資料第1993号, P 121, 1983
19. (財)消防科学総合センター, “地域防災データ総覧—地震災害・火山災害編”, 1984
20. 萩原尊禮監修, “地震の事典”, 三省堂, 1983
21. 久田俊彦, “地震と建築”, 鹿島出版会, 1982
22. 土木学会編: “地震応答解析と実例”, P 111, 1973

4. 地盤の液状化



図4-1 明治以降の液状化履歴地点⁽¹⁾

噴砂、噴水の記録のある地震

地震名	発生日月日	マグニチュード M	震源深さ H(km)
浜田	1872年(明5) 3月14日	7.1	
新潟県古志郡	1887年(明20) 7月22日	6.1	
熊本	1889年(明22) 7月28日	6.3	
濃尾	1891年(明24) 10月28日	8.4	
東京	1894年(明27) 6月20日	7.5	
内庄	1894年(明27) 10月22日	7.3	
利根川下流	1895年(明28) 1月18日	7.3	
陸羽	1896年(明29) 8月31日	7.5	
上高井	1897年(明30) 1月17日,4月30日	6.3, 6.3	
新潟県南魚沼郡	1898年(明31) 5月	6.7	
福岡	1898年(明31) 8月10日,8月12日	6.5, 6.5	
江濃	1909年(明42) 8月14日	6.9	
羽後山	1914年(大3) 3月15日	6.4	
島原	1922年(大11) 12月8日	6.5, 5.9	
関東	1923年(大12) 9月1日	7.9	10
但馬	1925年(大14) 5月23日	7.0	
北丹後	1927年(昭2) 3月7日	7.5	10
石巻	1927年(昭2) 8月6日		
関原	1927年(昭2) 10月27日	5.3	0-10
加賀南西部	1930年(昭5) 10月17日		
北伊豆	1930年(昭5) 11月26日	7.0	0-5
西埼玉	1931年(昭6) 9月21日	7.0	10-20
能登	1933年(昭8) 9月21日	6.0	15
静岡	1935年(昭10) 7月11日	6.3	10
河内大和	1936年(昭11) 2月21日	6.4	20
金華山沖	1936年(昭11) 11月3日	7.7	
男鹿	1939年(昭14) 5月1日	7.0	0
長野	1941年(昭16) 7月15日	6.2	5-20
鳥取県沖	1943年(昭18) 3月4日, 3月5日	6.1, 6.1	20, 20
鳥取	1943年(昭18) 9月10日	7.4	10
東南海	1944年(昭19) 12月7日	8.0	0
南海	1946年(昭21) 12月21日	8.1	30
福井	1948年(昭23) 6月28日	7.3	20
十勝沖	1952年(昭27) 3月4日	8.1	45
大聖寺沖	1952年(昭27) 3月7日	6.8	20
徳島県南部	1955年(昭30) 7月	6.0	
二ツ井	1955年(昭30) 10月19日	5.7	0-10
長岡	1961年(昭36) 2月2日	5.2	20
日向灘	1961年(昭36) 2月27日	7.0	40
宮城県北部	1962年(昭37) 4月30日	6.5	0
新潟	1964年(昭39) 6月16日	7.5	40
えびの	1968年(昭43) 2月21日, 2月22日, 3月25日	5.7, 6.1, 5.6/5.7, 5.4	0.0/0/10
十勝沖	1968年(昭43) 5月16日	7.9	0

4.1 液状化による被害

(1) 過去の地震による液状化発生箇所

地盤の液状化現象とそれによる構造物の被害が認識される契機となったのは、1964年（昭和39年）に発生した新潟地震とアラスカ地震である。その後、表4-1に示したように国内では十勝沖地震（1968年）や日本海中部地震（1983年）などによって、また国外ではサンフェルナンド地震（1971年）や唐山地震（1976年）などで液状化が発生したことが明らかにされている。

それでは1964年以前には液状化は生じてこなかったのだろうか？

地盤が液状化すると後述するように建物が沈下したりするだけでなく、地表に噴砂孔が生じる。この現象は古文書等に記されていることが多いため、栗林・龍岡⁽¹⁾は過去の地震についてその記述を調べ、液状化地点を推定した。その結果、わが国では明治以降十勝沖地震までに43個の地震で液状化が発生し、その地点は全国の沖積低地に及んでいることが明らかにされた。また、図4-2に示されるように、マグニチュードが大きくなると液状化を生じる範囲が拡がることも明らかにされた。

図4-1の他にもいくつかの地震については、住民からの聞きこみ調査等により、さらに詳細に液状化地点が調べられている。

図4-1 新潟地震以降に液状化を生じた地震

	年	地震名	M	液状化発生範囲
国内	1968	十勝沖	7.9	青森から北海道の太平洋沿岸一帯
	1973	根室半島沖	7.4	花咲港, 霧多布港
	1978	伊豆大島近海	7.0	伊豆山中の鉱さい堆積場
	1978	宮城県沖の地震	6.8	宮城県名取川
	1978	宮城県沖	7.4	宮城県の平野一帯
	1982	浦河沖	7.3	北海道太平洋沿岸
	1983	日本海中部	7.7	秋田から青森の日本海沿岸一帯
国外	1971	サンフェルナンド	6.6	サンフェルナンドダム
	1975	海城（中国）	7.3	下遼河平野
	1976	グアテマラ	7.5	アマティトラン湖岸
	1976	唐山（中国）	7.8	唐山市南方の三角州地帯
	1977	ルーマニア	7.2	ブカレストほか
	1979	モンテネグロ	7.3	モンテネグロ
	1985	チリ	7.7	サンアントニオ港
	1985	メキシコ	8.1	ラサロカルデナス

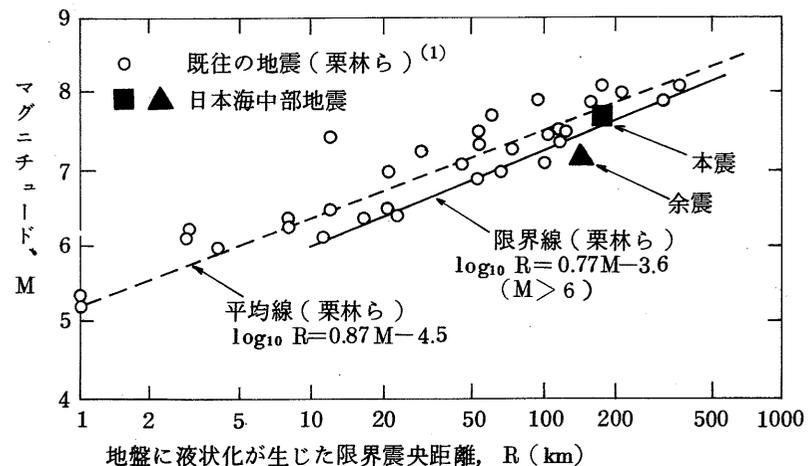
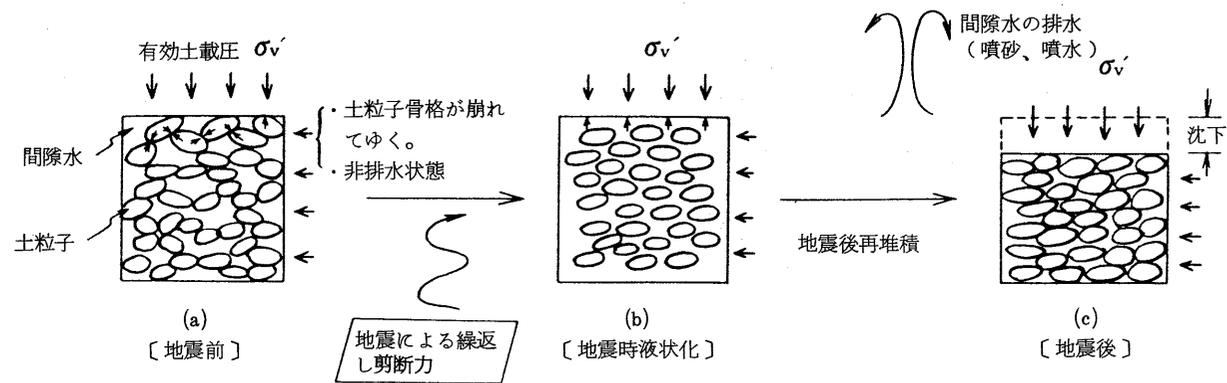


図4-2 液状化を生じる範囲



土の状態 \ 時点	地震前	地震時液状化	地震後
土粒子と間隙水の状態	土粒子間に間隙水が存在	間隙水の中に土粒子が浮いている	土粒子間に間隙水が存在
せん断強度	あり	失なわれる	回復
σ_v' を支えるもの	土粒子間力	間隙水の圧力	土粒子間力
過剰間隙水圧	なし	σ_v' の値まで上昇	0に戻る

図 4 - 3 液状化発生メカニズムの模式図

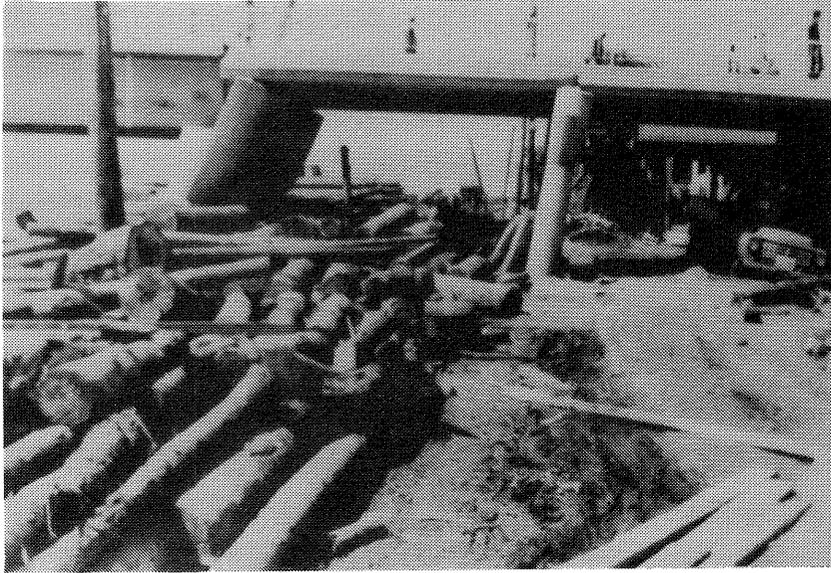


写真 4-1 地盤のすべり

新潟地震により信濃川沿岸の万代橋付近や川岸町付近では広範囲に液状化が発生し、地盤が河心に向かって最大 8 m 余りもすべった。

(2) 液状化発生のメカニズムと液状化による被害

液状化発生のメカニズムを模式図で示すと図 4-3 となる。

今、地下水位以下のある深さにある砂質土の要素の断面が、地震がやってくる前に図 4-3(a) のような状態にあったとする。図中、米粒状のものが土粒子であり、ゆるく（間隙の多い状態）で堆積しており、また間隙は水で飽和されている状況を想定する。ある深さのため、この要素には上載圧や水平圧が周囲から加わっているが、これは土粒子間力で支えられており、そのためにまた土の強度も有している。さて、この要素に地震時の S 波による繰返しせん断力が加わると、土粒子のかみあわせがはずれ、(b) のように水中に粒子が浮遊した状態へと変化してゆく。この状態では“泥水”と同じため、土の強度は失われ、“液状化”することになる。この場合でも周囲からの圧力は依然加わっているため、間隙の水の圧力でこれを支えなければならなくなり、“過剰間隙水圧”が発生する。地震後、この水が土粒子とともに地表に噴きあげ、噴砂、噴水現象を生じる。

このような状態の変化に伴ない、写真 4-1~4-7 に例を示したように、構造物は種々の被害を受ける。それを分類すると次のようになる。

- a) 強度低下……地盤のすべり
- b) 支持力低下・構造物の傾斜・不同沈下、クイ基礎の破損
- c) 過剰間隙水圧の発生……地中構造物の浮上
- d) 土圧（水平圧）の増加……護岸のはらみ出し

なお、図 4-3 のメカニズムから明らかなように、液状化しやすい地盤とは大雑把に言って次の 3 つの条件とも備えた地盤であり、これにある程度以上の地震力が加わった場合に液状化が生じると言える。

- i) 地下水位以下にある（間隙が飽和されている）
- ii) ゆるく堆積した（土粒子のかけあわせがはずれ易い）
- iii) 砂質土（土粒子間の粘着力が少ない）



写真4-2 鉄筋コンクリートビルの不同沈下
(新潟地震, 川岸町県営アパート)

新潟地震では液状化により地盤の支持力が失なわれ, 多くの鉄筋コンクリートビルが不同沈下した。

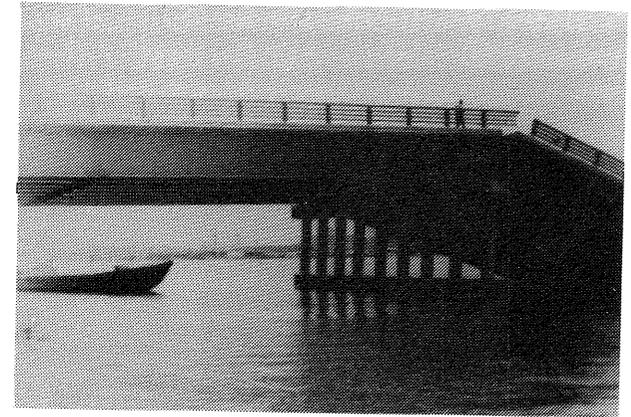


写真4-4 クイ基礎構造物の被害
(新潟地震, 昭和大橋)

信濃川に架かっている昭和大橋は落橋するといった大被害を受けた。地震後に引抜かれたクイは曲がっており, 液状化による地盤反力の低下とか地盤のすべりが原因ではないかと考えられている。



写真4-3 木造家屋の不同沈下(日本海中部地震, 車力村牛潟地区)⁽¹³⁾

日本海中部地震では, 秋田市から津軽半島にかけての底地で液状化が広く発生し, 非常に多くの木造家屋が不同沈下などの被害を受けた。



写真4-5 土構造物の被害
(日本海中部地震, 八郎潟
五明光橋)⁽¹³⁾

八郎潟干拓堤防は盛土材の液状化により, 最大1.5 m 余りにもおよぶ沈下陥没などの被害を受けた。五明光橋のとりつけ部もすべり破壊を生じた。

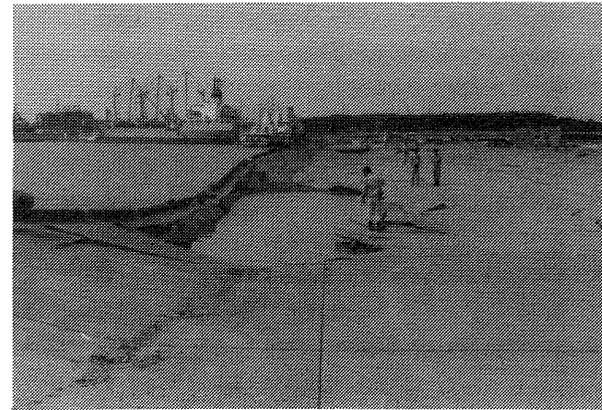


写真4-7 岸壁, 護岸の被害(日本海中部地震,
秋田港)⁽¹³⁾

秋田港では液状化に起因して多大な被害を受けた。写真の大浜2号岸壁では矢板が折れ曲り, エプロンは陥没した。

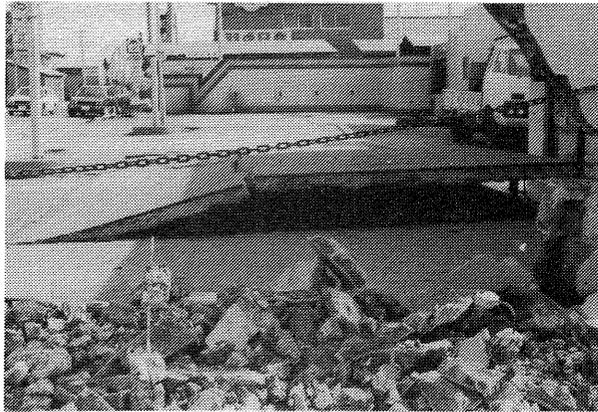


写真4-6 地中構造物の被害
(日本海中部地震, 能代市)⁽¹³⁾

地中構造物はその重量により, 地盤が液状化した場合に浮上したり沈下したりする。このガソリンスタンドタンクは約70 cm浮上った。

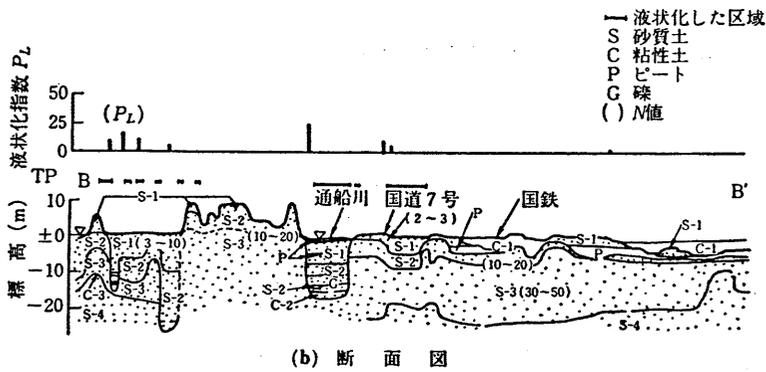
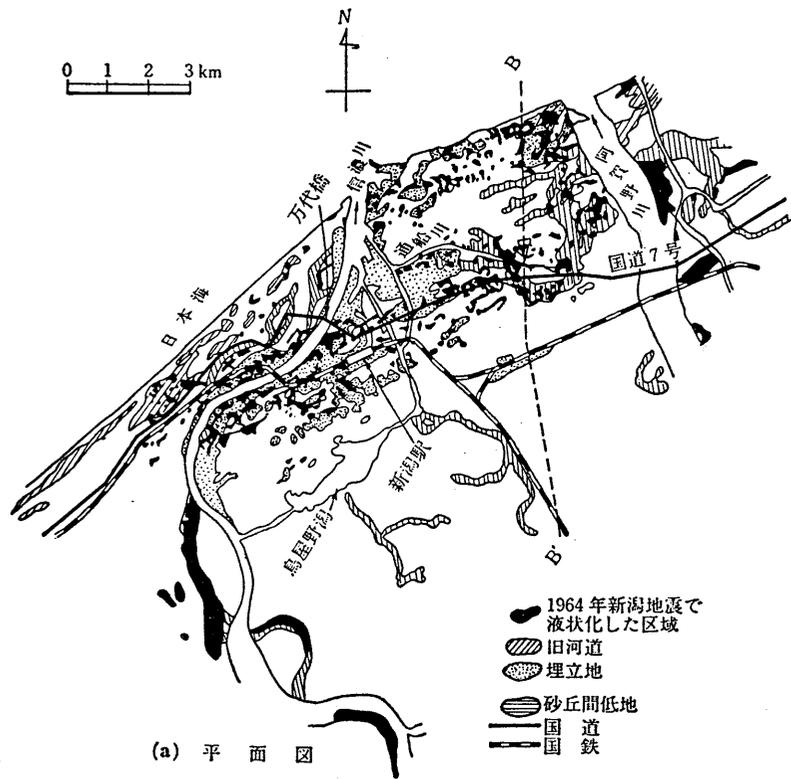


図4-4 新潟市における液状化地点と地形、地質の関係⁽³⁾

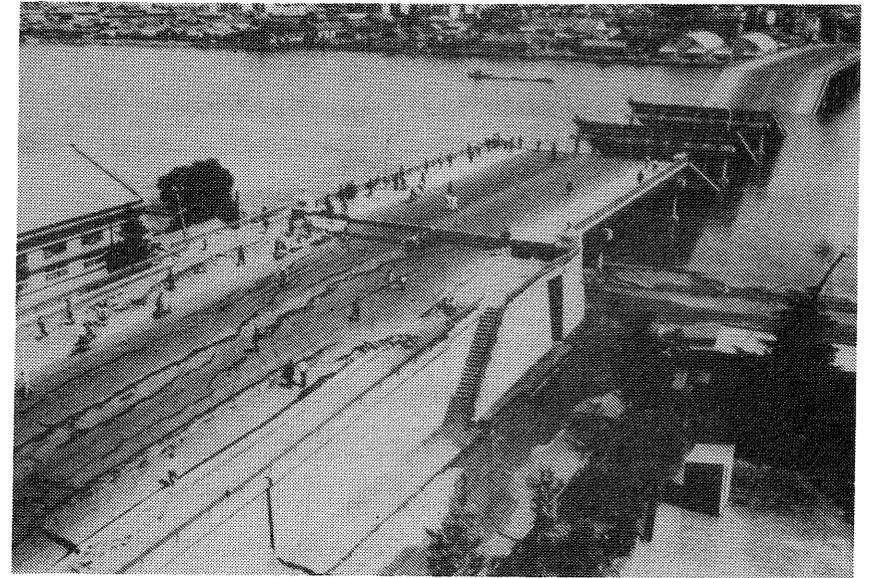


写真4-8 昭和大橋の被害

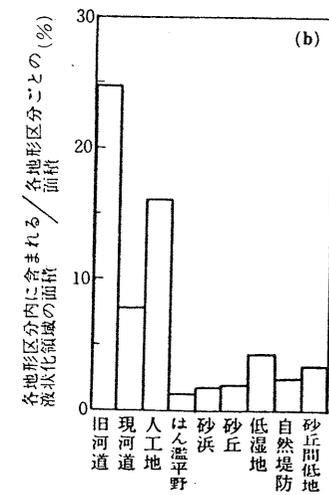


図4-5 新潟平野における液状化面積と地形との関係⁽³⁾

(4) 日本海中部地震による能代市，秋田市の液状化状況

日本海中部地震では秋田県から青森県にかけての日本海沿岸の低地で，広い地域にわたって液状化が発生し，多くの構造物が被害を受けた。液状化による被害としては19年前の新潟地震以来の甚大さであった。

液状化発生箇所の微地形をみると，従来から言われてきたように，海岸や湖・沼・潟の埋立地，旧河道，砂丘間低地などで多く発生していたが，さらに，砂丘と低地の境（ただし砂丘の裏側）や水田上の盛土地でも多く発生していた。

液状化による構造物の被害では，八郎潟干拓堤防に代表される土構造物の破壊，秋田港に代表される岸壁・護岸の被害，木造家屋の不同沈下などの他に，初めて見受けられるものとして，ガソリンスタンドの浮上などがあった。

図4-7には能代市における液状化発生箇所と地形分類図を示す。この地域では砂丘と低地の境（砂丘端部）で液状化が多く発生し，家屋の不同沈下，上・下水道やガス導管の破損などの被害が発生した。さらに2°程度のゆるやかな勾配の斜面が2 m余りもすべり移動をした箇所もあった。

図4-8は秋田市の秋田港付近の液状化発生箇所と地形分類図を示している。秋田港は旧雄物川河口両岸に造られた港であり，埋立てて造った岸壁と切込んで造った岸壁とが存在するが，液状化は前者で発生し，被害も集中した。岸壁によって被害状況は異なるが，大浜地区などの矢板岸壁でははらみ出しが生じ，ひどいものは矢板が折損してしまった。また，構造的には強い外港地区のケーソン岸壁も前面へ約2°傾き，背後のエプロンに最大1.5 mもの沈下が生じた。復旧にあたっては再び液状化で被害を受けることを防ぐために，岸壁を造り直すと同時に背後地盤を締固めたり砕石ドレーンを用いて，液状化対策工が施された。

図 4 - 7 能代市での液状化発生箇所と地形分類

図 4 - 8 秋田市での液状化発生箇所と地形分類

添付図参照

4.2 液状化の予測方法

(1) 液状化し易い地盤

液状化発生メカニズムから考えると、4.1(2)で述べたように、地下水位以下にある、ゆるく堆積した、砂質土が液状化を生じ易いと言える。さらに、4.2(5)で後述する液状化予測方法を用いた解析結果等によると、同一の地盤でも地下水位が浅いものほど液状化が発生し易いこともわかってきている。したがって、液状化し

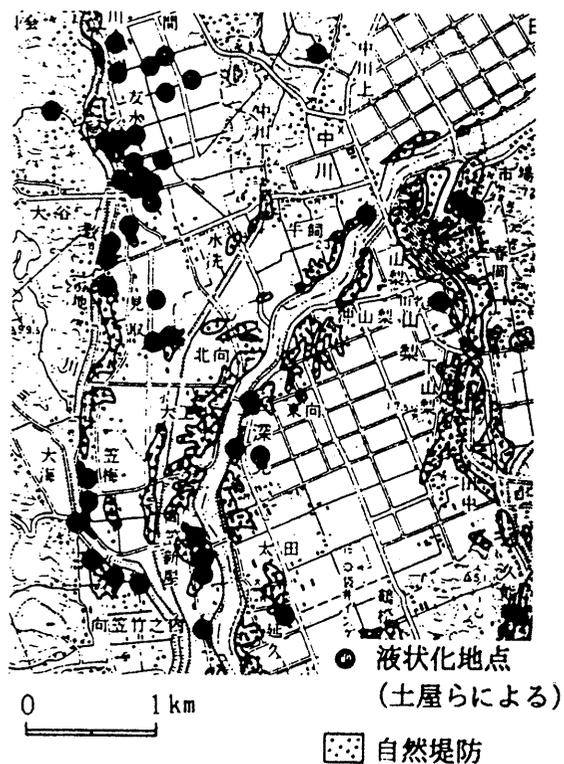


図4-12 発達した微弱な自然堤防での液状化例⁽⁷⁾

易い地盤とは、① 地下水位が浅く、② ゆるく堆積した砂質土層が存在する、といった地盤であると言える。勿論、加わる地震力も液状化発生の有無に関係していく。

①、②の限界値は発生する地震力などの種々の要因によって異なるが、大雑把なめやすとして、①は地表面下3 m以浅の場合、②はN値(標準貫入試験による)が10~15程度以下のシルト質砂~粗砂の場合、とすることができよう。

液状化が発生する地震力についても、地盤の条件等によって異なるため、一概にその値を言うことはできないが、過去の液状化事例からみると、気象庁震度階でV以上、地表最大加速度で80gal程度以上の地震力が生じた場合に、液状化が発生している。

ところで、液状化は表層の10~20 m位までの浅い層で発生すると考えられている。この表層土の性質は微地形区分で表現することが可能であると考えられるため、液状化し易い地盤を微地形から判断しようとするのがよく行われている。過去の液状化事例から、液状化がよく生じてきた微地形を挙げると次のようになる。

- a) 海岸・湖・沼などの埋立地
- b) 旧河道および現河道
- c) 砂丘間低地および砂丘と低地の境
- d) 発達した微弱な自然堤防

これらの事例を示すと図4-9~4-12となる。

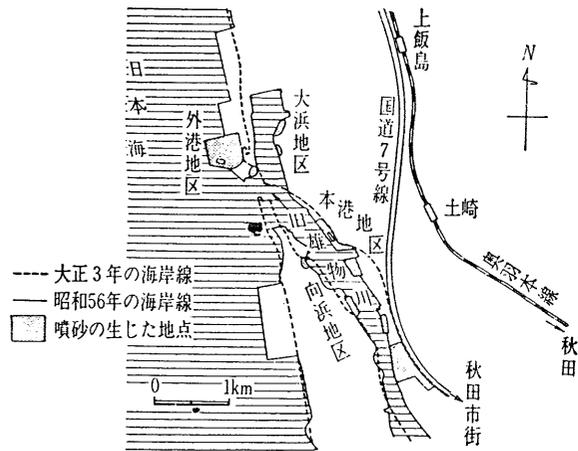


図4-9 埋立地での液状化例(日本海中部地震秋田港)⁽⁵⁾

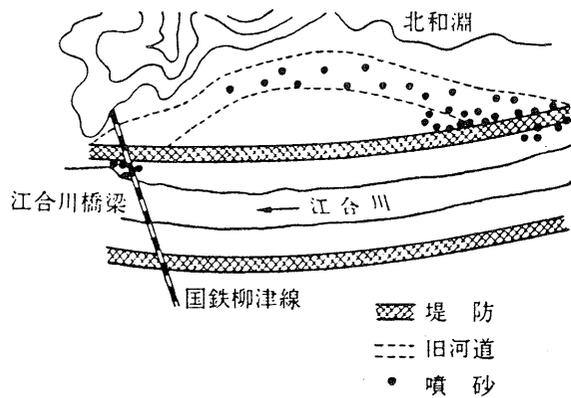


図4-10 旧河道での液状化発生例(宮城県沖地震, 江合川)⁽⁶⁾

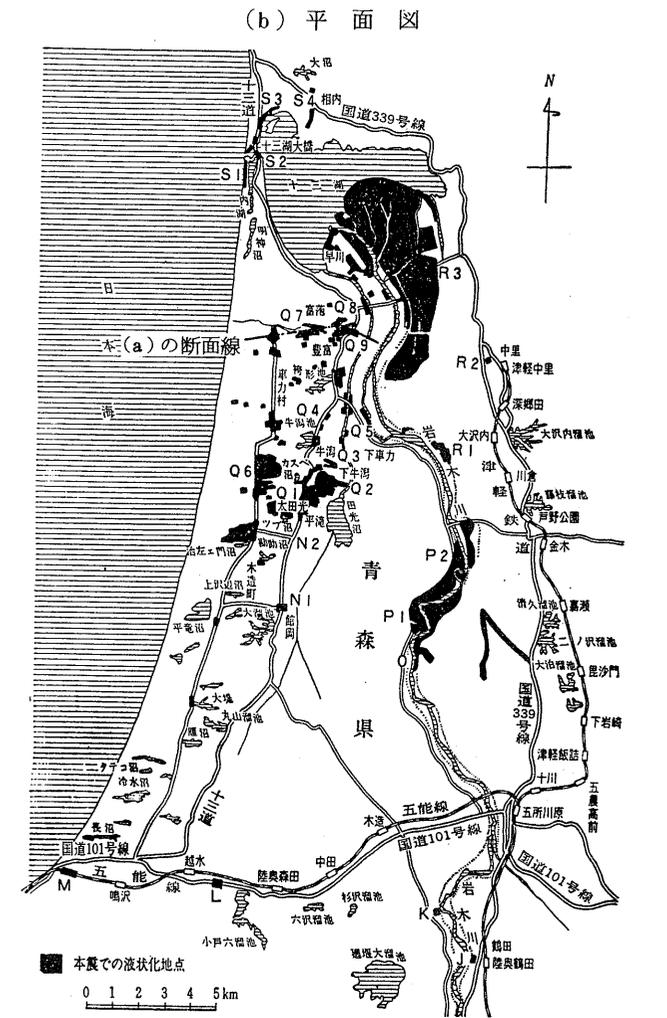
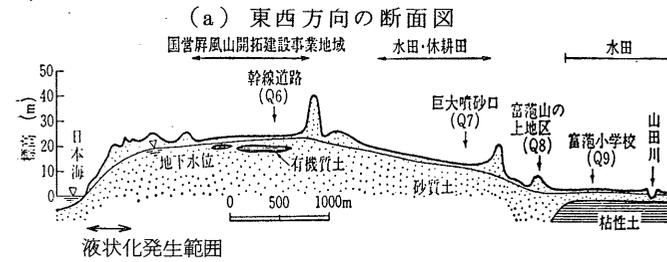


図4-11 砂丘間低地および砂丘と低地の境での液状化例(日本海中部地震, 津軽半島)⁽⁴⁾

② 液状化予測方法の種類

特定しているある地震に対し液状化が発生する可能性があるか否かを予測する“液状化予測方法”は現在多く提案されている。これを精度の面から分類すると次の4つに分けられる。

- (a) 地形，地質，液状化履歴による概略的な予測方法
- (b) N値や粒度による簡易的な予測方法
- (c) 地震応答解析や液状化試験による詳細な予測方法
- (d) 模型振動実験や原位置液状化実験による予測方法

これらの方法の概要を表4-3に示すが，(a)，(b)，(c)の順に精度が良くなる。(d)は精度が良いというわけではなく，特殊な予測方法なので分けてある。

これらのどの予測方法を用いればよいかは，予測内容や重要度などの条件によって異なる。一般には，個々の構造物に対しては(a)，(b)，(c)が必要とされる精度に応じて用いられている。これに対し，広い地域内における液状化危険地区を抽出する(マイクロゾーニング)場合には，(a)や(b)が用いられている。また，地盤が液状化した場合の構造物の挙動を予測する場合などでは(d)が用いられている。

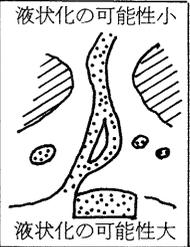
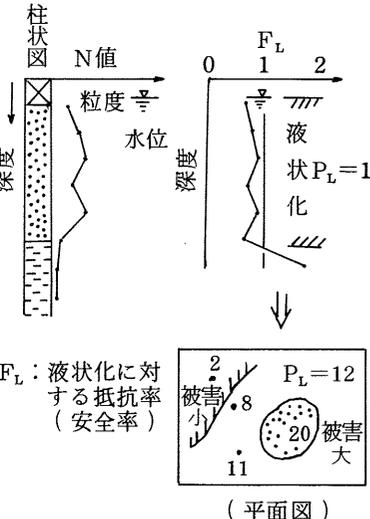
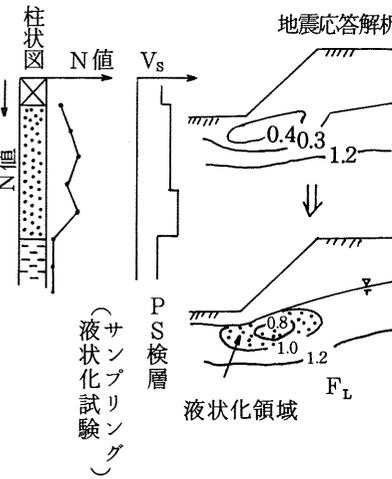
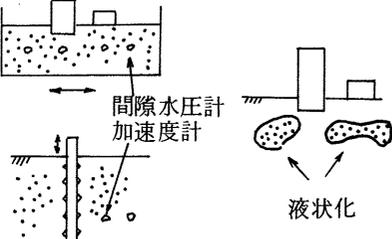
各方法による予測に必要な土質調査，試験項目を示すと，表4-4となる。

表4-4 液状化予測に必要な土質調査，試験項目

予測方法 土質調査	概略的な方法	簡易的な方法	詳細な方法	模型，原位置 実験による 方法
液状化履歴や地形，地質に関する資料収集	○			
ボーリング		○	○	△
サウンディング		○	△	△
原位置加振試験				○
振動台試験				○
PS検層，弾性波探査			○	
不かく乱試料採取			○	
室内物理試験		○	○	△
室内液状化試験			○	
室内動的変形特性試験				

○：よく用いられている △：場合によっては用いられている

表 4.3 地震による地盤の液状化予測手法の種類とマイクロゾーニングの適用性

予測手法の種類	a) 地形・地質および液状化履歴による概略的予測	b) N値や粒度分析による簡易な予測	c) 地震波応答解析や液状化試験による詳細予測	d) 模型実験や原位置液状化試験による予測
<p>予測手法の概要</p>	<p>過去の地震で液状化した履歴のある地点は再び液状化しやすいとか微地形分類で旧河道、湿地、埋立地、砂丘間低地と分類されているところは地震により液状化しやすい。これらの資料を収集して判定する。</p> <div data-bbox="331 678 716 989"> <p>微地形分類図 液状化履歴図</p>  <p>液状化可能性分類図</p>  </div>	<p>一般に地下水位以下のゆるい砂質土が大きな地震力を受けた場合に液状化するため、それぞれの地下水位、N値、粒度組成、地表最大地震加速度をパラメータとして判定する。中でも限界N値法とF_L法の二種類がある。さらに平面分布をあらわすには$(1 - F_L)$を深度方向に種分したP_L値もある。</p> <div data-bbox="750 662 1120 1181">  <p>F_L: 液状化に対する抵抗率 (安全率)</p> <p>(平面図)</p> </div>	<p>地震力によって地盤内に発生する繰返しせん断力比Lを地震応答解析により求め、一方地盤の液状化強度Rをサンプリングした試料について室内液状化試験を行って求め、両者の比から、$F_L = R/L$を計算して判定する。この中にもいくつかの手法がある。</p> <div data-bbox="1153 662 1545 1141">  <p>地震応答解析</p> <p>液状化領域</p> <p>(サンプリング試験)</p> </div>	<p>振動台上に構造物を含む模型地盤を作成し、加振力と液状化発生、模型の挙動状況から実際の地盤の液状化を予測する。原位置液状化実験ではクイヤケーシングの振動、発破振動を生じさせ、その結果から地震時の液状化の予測を行う。</p> <div data-bbox="1579 742 1971 981">  <p>間隙水圧計 加速度計</p> <p>液状化</p> </div>
<p>マイクロゾーニングへの適用性</p>	<p>広範な予測が簡単に行えるのが長所。ただし、精度はあまりよくない。とくに地震動の大きさによる液状化範囲の相違は予測しにくい。</p>	<p>既往ボーリング資料を収集し簡単な計算を行うだけでよい。また、(a)に比べて精度はよく地震動の大きさも考慮できる。ただし、ボーリング資料がない地点での予測は行えない。</p>	<p>最も信頼がおけ、また任意の地震動、地盤形状についても解析が行えるが、詳細な調査・解析が必要であり、広範囲な予測には適さない。</p>	<p>地盤の液状化による構造物の挙動や液状化対策工の効果などの予測には役立つが、液状化の発生の定量的な予測は困難であり、また費用もかかるため、マイクロゾーニングには適さない。</p>

(3) 地形・地質及び液状化履歴による液状化の概略的予測

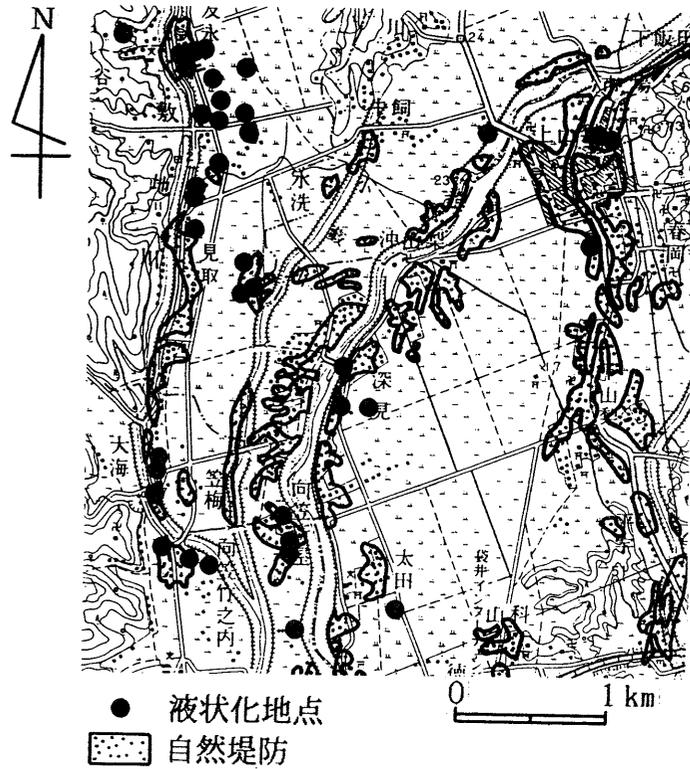


図 4-12



図 4-13 地形による液状化予測地図



図4-14 新潟地震による液状化発生範囲⁽¹²⁾に加筆したもの

4.2(1)で述べたように、液状化しやすい地盤と微地形との間には密接な関係がある。また、図4-1に示されるように、過去に液状化した履歴がある地盤では、次の地震によって再び液状化しやすいようである。そこで、これらの地形や液状化履歴をもとに、将来の地震に対する液状化発生の概略的な予測を行うことができる。

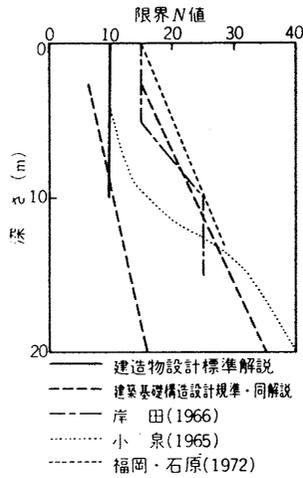
方法の一例を示すと表4-5となる。

表4-5 概略的な液状化予測方法の一例

微地形区分による検討	液状化履歴による検討	判定
海岸・湖・沼などの埋立地、現旧河道、砂丘間低地、砂丘と低地の境、発達微弱な自然堤防に相当する地域	過去に液状化履歴がある地域	液状化を生じる可能性が大きい
山地、台地、丘陵地に相当する地域	想定地震動と同じかまたは小さな地震動に対して明らかに液状化履歴のない地域	液状化を生じる可能性が小さい

新潟市を例にとり、微地形区分(ただしここでは土地分類図をもとに区分している)から液状化予測を行った結果と、実際に新潟地震の際に液状化が生じた範囲を対比して示すと図4-13、4-14となる。両者はあまりよく合っていると見えよう。

(a) 限界N値の規定



(b) 粒度の規定

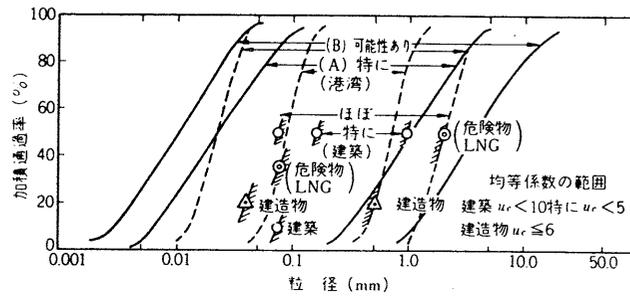


図 4-15 限界N値法による条件例

(4) N値や粒度による簡略な予測方法

N値や粒度による簡易な予測方法は手軽であり、また精度もかなり良いため、広く用いられている。わが国における耐震設計基準類でもこの方法がとり入れている。ただし、簡易的と分類される予測方法の中でも手法は数多く提案されている。それらのうち代表的なものを、限界N値による方法とFLによる方法に分けて示すと表4-6となる。

表 4-5 N値を用いる方法の分類

分類	我が国で用いている基準類	基準類以外の方法(提案者)
(A) 限界N値による方法	建築, 港湾, 鉄道, 石油タンク, LNG	岸田, 小泉, 福岡・石原
(B) FLによる方法	道路橋, 鉱さい堆積場, 水道	Seed, 柴田, 時松・吉見

限界N値法では、一般に ① 地下水位以下にあり、② ある限界のN値以下にあり、③ ある粒径範囲内にある土層を液状化する可能性がある」と判定する。②, ③の条件例を図4-15に示す。

FL値による方法では、一般に「液状化強度R」を「地震により加わる荷重L」で除して「液状化に対する抵抗率FL=R/L」を求め、 $FL \leq 1$ となる土層は液状化する可能性がある」と判定する。例として道路橋示方書で用いられている方法を示すと次のようになる。

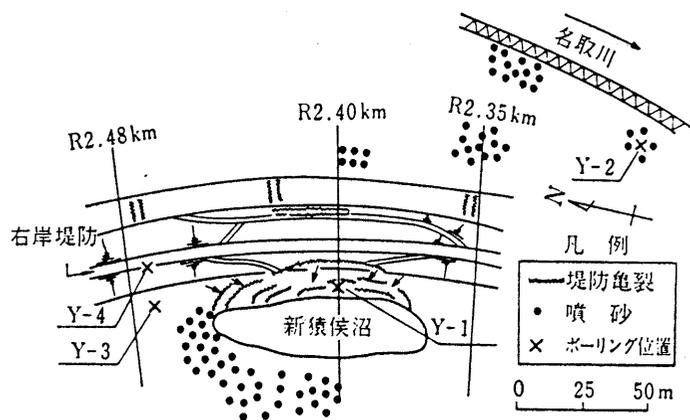


図 4-16 噴砂分布及び地盤調査箇所(閑上上地区)⁽⁸⁾

$R_{max} = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} + 0.19$ <p>(0.02 mm ≤ D₅₀ ≤ 0.05 mm)</p>	$L_{max} = (1 - 0.015z) k_s \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v}$ <p>ただし、$k_s = \nu_1 \times \nu_2 \times \nu_3 \times 0.15$ で、ν_1, ν_2, ν_3 は、地域、地盤、重要度に関する係数 $\nu_1 = 0.7, 0.85, 1.0$ $\nu_2 = 0.9, 1.0, 1.1, 1.2$ $\nu_3 = 0.8, 1.0$</p>
$R_{max} = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} + 0.225 \log_{10} \left(\frac{0.35}{D_{50}} \right)$ <p>(0.05 mm ≤ D₅₀ ≤ 0.6 mm)</p>	
$R_{max} = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} - 0.05$ <p>(0.6 mm ≤ D₅₀ ≤ 2.0 mm)</p>	

図4-16, 4-17には簡易な方法を用いて検討した例を示す。これは宮城県沖地震で液状化した名取川右岸閑上上地区につき、液状化した箇所と液状化しなかった箇所で行ったものであり、解析結果がよく一致している。

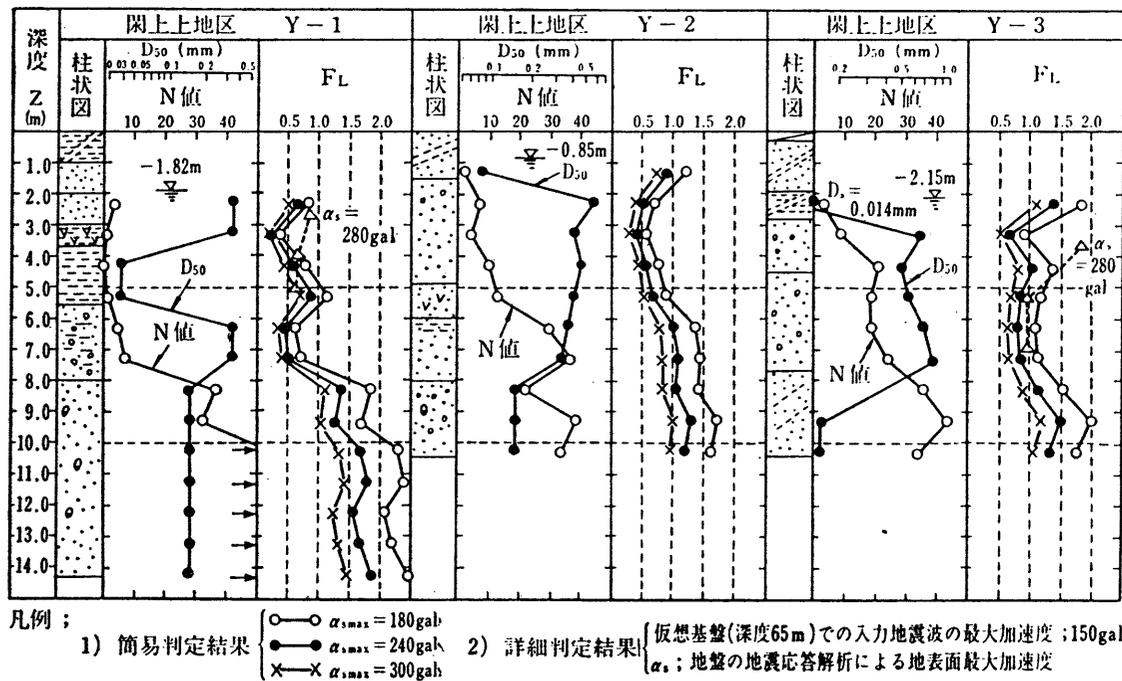


図 4 - 17 地盤の耐震性調査結果 (閑上上地区)

(5) 地震応答解析や液状化試験による詳細予測方法

地震応答解析や液状化試験を行う詳細な予測方法は、大別して全応力法と有効応力法に分けられ、現在のところほとんど前者が用いられている。この場合、図4-18に手順を示したように、液状化強度（繰返しせん断強さ応力比） R を室内液状化試験で求め、一方地震により加わる荷重（繰返しせん断応力比） L を地震応答解析により求め、両者の比を F_L とし、 $F_L < 1$ の場合に液状化の可能性があると判定している。

有効応力法は、砕石ドレーンによる液状化対策効果を検討する際などの特殊な場合に用いられ始めているが、まだ方法はあまり確立されていない。

図4-19, 4-20には河川堤防で詳細な予測が行われた例を示す。ここでは2次元地震応答解析が行われ、また液状化試験も行われて、両者ともに液状化の可能性のあるゾーンを予測してある。また、さらに過剰間隙水圧も求めて、それを考慮した安定解析を行って堤防の地震時安定性を判定している。

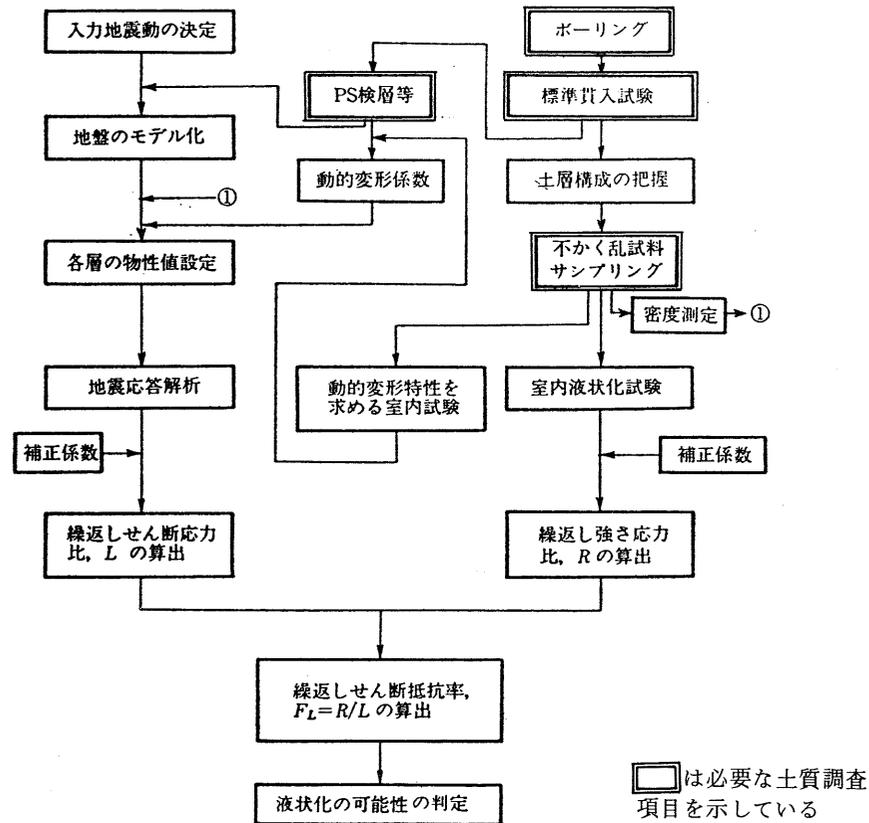


図4-18 詳細な液状化予測の手順

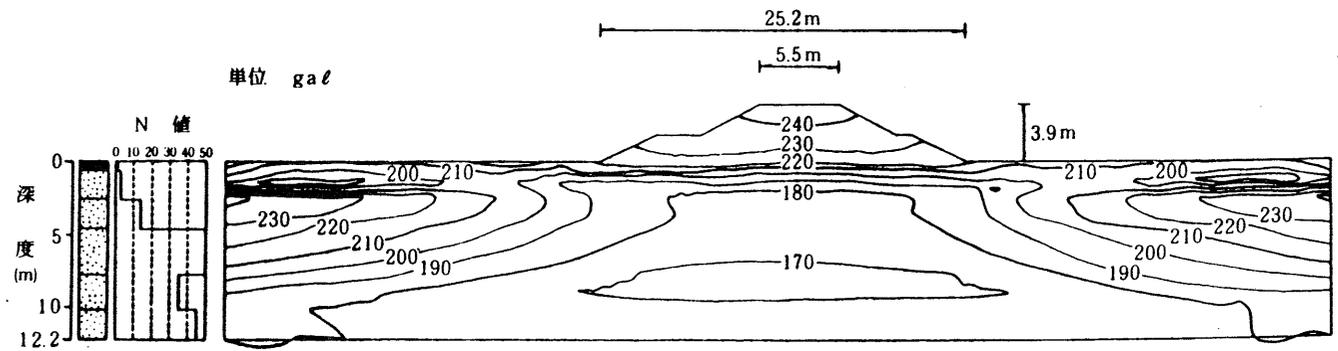


図 4 - 19 二次元地震応答解析結果 (最大加速度分布)⁽¹⁰⁾

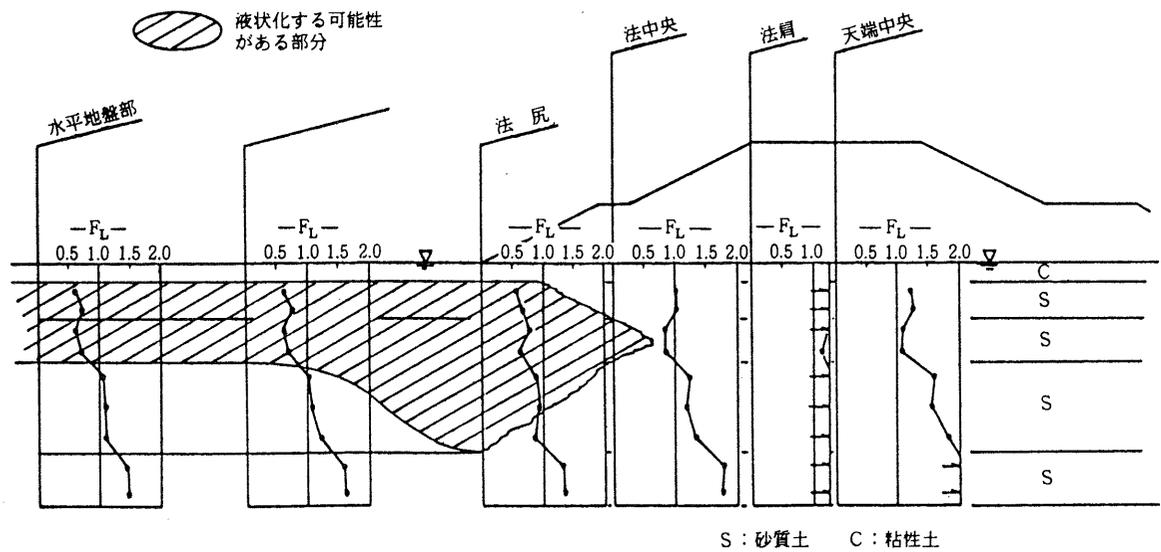


図 4 - 20 二次元断面での液状化解析結果⁽¹⁰⁾

4.3 液状化対策工

液状化対策工は ① 地盤が液状化しにくくする工法、② 構造物を強化して地盤が液状化しても被害を受けにくくする工法とがある。構造物の重要度、液状化の程度、工費、地盤改良工の施工性（周囲への振動の影響など）の条件に応じて、いずれかを選ぶか、または両者を組み合わせて用いられている。

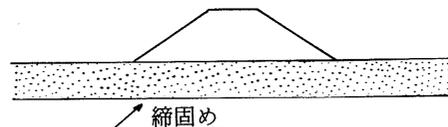
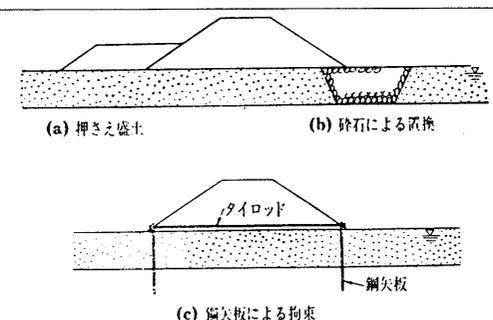
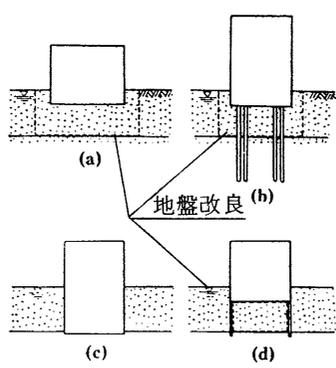
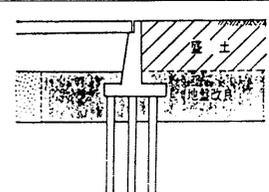
①の工法の中でも表4-7に示したように多くの方法がある。

構造物ごとによく用いられている工法例を示すと表4-8のようになる。

表4-7 地盤を液状化しにくくする工法の種類

原 理	工 法
密度の増大	バイフロローテーション サンドコンパクションパイル 爆 破 ロッドコンパクション 動 圧 密 パイプロタンパー 転 圧 群 杭 生石灰パイル
粒度改良または固結	置 換 注入固化 表層混合処理 深層混合処理
飽和度の低下	ウェルポイント ディープウェル
間隙水圧の消散	グラベルドレーン
せん断変形の抑制	シートパイル

表4-8 構造物ごとの代表的な液状化対策工（文献11をもとに作成）

構造物の種類	対 策 工 法	対策工施工状況の模式図
土 構 造 物	新設の土構造物に対して……地盤の締固め（場合によっては置換，押え盛土，水位低下，応力変形条件の変化）	
	既設の土構造物に対して……のり尻部の地盤の締固め，置換，押え盛土，変形の抑制	
建 築 基 礎	(a)密度の増大，粒度改良または固結，発生間隙水圧の消散，(b)杭基礎，密度の増大，発生間隙水圧の消散，(c)液状化対象層を地下構造で排除，(d)周囲からの水圧伝播の遮断，密度の増大，発生間隙水圧の消散，粒度改良，固結，地下水位低下	
橋 梁	液状化層の地盤反力係数を減じて設計クイ本数を増加させるなど 密度の増大による地盤改良	

<p>港湾構造物</p>	<p>(a)密度の増大，粒度改良，固結，発生間隙水圧の消散，(b)密度の増大，粒度改良，固結，発生間隙水圧の消散，矢板および控えを液状化対象層を期待せずに設計，(c)地盤には期待しないで設計</p>	
<p>地中構造物</p>	<p>(a)埋戻し材料の選択・安全処理・締固め，(b)周囲からの間隙水圧の伝播を遮断するためのグラベルドレーン</p>	
<p>杭や砂袋による拘束</p>	<p>杭や砂袋による拘束</p>	
<p>埋戻し材料を十分に締固めるとともに，周囲地盤から伝播する間隙水圧の遮断，速やかに消散する工法（グラベルドレーンなど）</p>	<p>埋戻し材料を十分に締固めるとともに，周囲地盤から伝播する間隙水圧の遮断，速やかに消散する工法（グラベルドレーンなど）</p>	
<p>タンク基礎</p>	<p>(a)密度の増大，発生間隙水圧の消散の促進，粒度改良，固結，(b)杭基礎により表層地盤には期待しない。</p>	

第4章の参考文献

1. 栗林栄一・龍岡文夫・吉田精一：明治以降の本邦の地盤液状化履歴，土木研究所彙報，No. 30，1974.
2. 安田進・岩崎敏男・龍岡文夫：流動化履歴地点の地盤特性（その2），土木学会第33回年次学術講演会講演集，第Ⅲ部門，pp. 205～206，1978.
3. 岩崎敏男・常田賢一・安田進・佐藤弘行：液状化履歴地点における地形・地質の特徴，第17回土質工学研究発表会講演集，2の2 pp. 1921～1924，1982.
4. 建設省国土地理院：新潟地震震災調査報告書，1965.
5. 陶野郁雄・安田進・社本康広：日本海中部地震における液状化現象とその被害状況，土と基礎，Vol. 31，No. 12. pp. 13～20，1983.
6. 建設省東北地方建設局北上川下流工事事務所：1978年6月12日宮城県沖地震による河川構造物等被害状況写真集，1978.
7. 安田進：液状化危険分布図への P_L 値の適用性，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ，pp. 87～88，1985
8. 建設省土木研究所：1978年宮城県地震災害調査報告，土木研究所報告，第159号，1983.
9. 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1980. 5.
10. 小原善蔵・沢田善治・佐々木正人：高瀬川高潮堤耐震構造の検討，第37回建設省技術研究会報告，pp. 919～927，1983.
11. 末松直幹・吉見吉昭・佐々木康：液状化被害を軽減するための対策，講座地盤の液状化，土と基礎，Vol. 30, No. 4, pp. 71～79，1982.
12. 建設省国土地理院：新潟地震震災報告書，1965.
13. 基礎地盤コンサルタンツ(株)：1983年5月26日日本海中部地震による被害状況速報，1983.

5. 地震による斜面崩壊

5.1 斜面崩壊による被害

(1) 過去の被害

過去の地震被害を調べてみると、大地震の際には必ずと言ってよいほど斜面崩壊が生じ、人的および物的被害をもたらしてきている。ただし、被害状況は地震によってかなり異なっている。

わが国における代表的な被害の概要を示すと表5-1となる。宮城県沖地震で生じたように、最近の地震では人工的に盛土した斜面の被害も目立ってきている。

芥川らはこの他に数多くの斜面崩壊資料を集め、図5-1に示したようにマグニチュードと崩壊箇所数の関係をまとめた。図にみられるように、マグニチュードが大きいほど崩壊箇所数も増す傾向がある。

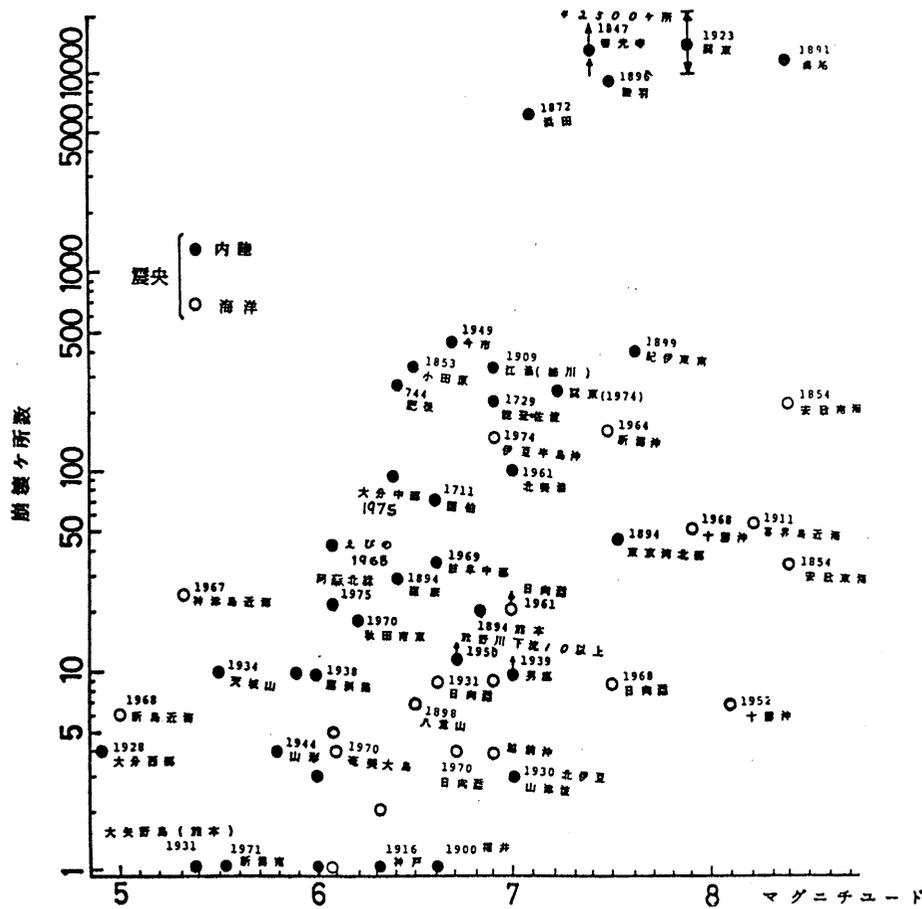


図5-1 本邦の既往地震による斜面崩壊発生個数とマグニチュード⁽¹⁾

表 5-1 過去の地震による斜面崩壊発生例

地震名	発生年	地震規模	被害の概要	参考文献
島原の地震	1792	M=6.4	雲仙岳の眉山南東面で幅約360 m、長さ330 mにわたって地すべりが発生した。さらにその後の地震で眉山東部が崩れ、崩土0.34 km ³ が島原海湾に流れ込んで津波を発生させ、対岸の天草諸島、宇土半島、荒尾などに大被害をもたらした。(島原大変、肥後迷惑)	宇佐美 ²⁾
善光寺地震	1847	M=7.4	地震を契機に4万箇所にも上る山崩れ・地すべりが発生した。中でも信濃川系の犀川右岸の虚空蔵山の崩れは90 mもの高さで犀川を堰き止め、上流数十箇所村を水没させた。その後の溢流破堤によって堰上げた水が一瞬のうちに流出し下流に大被害を与えた。	同上
関東地震	1923	M=7.9	地震と同時に山崩れ、崖崩れが無数に発生。特筆すべきは根府川の左岸上流で発生した山津波で6 kmの距離を5分間の間に100~300 m ³ の土砂が流れ落ち、根府川部落170戸全部を土中に埋め、折から走行中の東海道本線の列車をもまきこんだ。	同上
伊豆大島近海地震	1978	M=7.0	道路、鉄道の切土斜面に崩壊が数多く発生し、交通路は各所で遮断された。また地震後の降雨が崩壊拡大を助長した。中でも見高入谷では幅150 m、長さ150 m、深さ3~5 mの崩壊が発生した。	恒石ほか ³⁾
宮城県沖地震	1978	M=7.4	地震による斜面崩壊の箇所は200程度であり多くはなかったが、丘陵を切盛りして造成した階段状の住宅地の盛土部分に被害が集中した。この地震を契機に谷埋め盛土の施工方法に反省が求められた。	反町ほか ⁴⁾
日本海中部地震	1983	M=7.7	斜面表層の風化帯での崩壊や落石は少なかったが、砂丘端部斜面に地盤の液状化に起因した崩壊が発生した。	陶野ほか (第4章 ⁵⁾)
長野県西部地震	1984	M=7.6	大小約500箇所の崩壊が発生した。このうち、御岳南麓、松越、滝越、御岳高原の崩壊は規模が大きく、中でも御岳南麓で発生した御岳くずれの規模は3,250万m ³ に及び下流12 kmの地点まで土石流が流れ下り木曾川上流王滝川を堰き止め湖を生じさせた。	国土地理院 ⁵⁾

(2) 斜面の種類

地震時の斜面崩壊と一口に言っても、その発生位置や被災形態は多種多様である。これまでの被害例をもとに分類してみると表5-2のように分けられる。

表5-2 斜面崩壊の種類

位置	斜面の種類	被害形態
山地、台地	自然斜面	㉑ 落石や表層滑落
	切取斜面	㉒ 深いすべり面をなす崩壊
	斜面への片盛土	㉓ 盛土の圧縮沈下、キレツ ㉔ 盛土端の崩れ
	谷間の造成盛土 (高盛土)	㉕ 盛土全体のすべりや沈下 ㉖ 盛土端の崩れや沈下
低地	田、畑、湿地などの造成盛土 (低盛土)	㉗ 盛土全体の沈下 ㉘ 盛土端の崩れ
	海岸、河岸、湖沼の埋立て盛土	㉙ 盛土全体のすべり、沈下 ㉚ 盛土端の崩れ

分類した各被害形態について多少補足説明をつけ加えると次のようになる。

- ㉑……急斜面で浮石や風化層が存在する場合に生じ易い。これに相当する斜面はわが国では非常に多いため、地震のたびに必ずと言ってよいほど発生している。また、比較的規模が小さい地震でも発生している。
- ㉒……斜面内のある深さに風化層が存在する場合に発生し易い。発生頻度は少ないが、一度発生すると人的、物的被害は非常に大きくなることもある。
- ㉓,㉔……このような角部に地震動が集中し易いことや盛土の締固めがしにくいことなどのため、地震のたびに多く発生してきている。ただし被害の規模は小さい。
- ㉕～㉖……最近宅地開発が急速に進められてきていることに伴ない、この種の被害が急増してきている。特に締固め不足、盛土材の選定ミス、排水工法の不備な造成地において、被害が発生し易い。
- ㉗,㉘……これも造成地の被害であるが、特に造成盛土や原地盤が液状化して被害を受けるケースが多い。また、護岸が破壊したために被害を受けることもある。

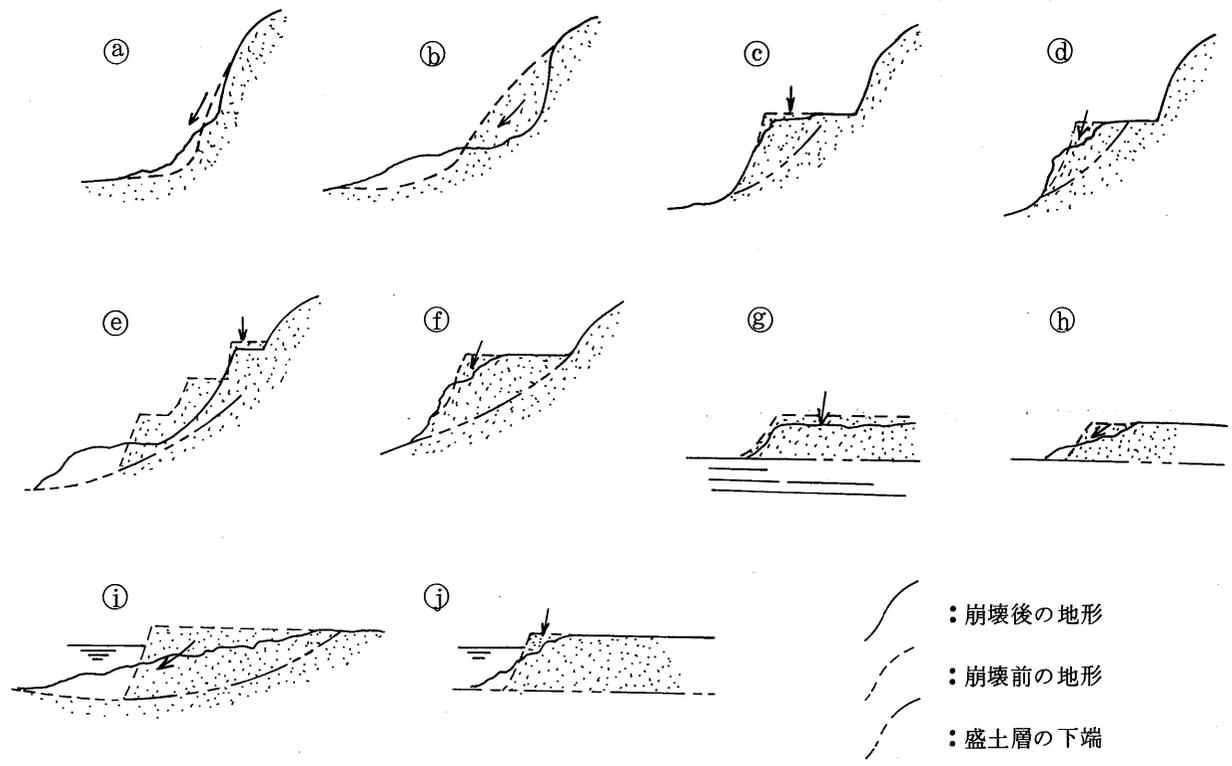


表 5-2 の斜面崩壊分類に対する模式図

③ 自然斜面・切取斜面の地震による崩壊例

a) 伊豆大島近海地震による崩壊

伊豆大島近海地震(1978年)の本震は伊豆大島と伊豆半島の中間の位置で発生した。その後余震の発生位置は伊豆半島を横切る恰好で西に移動した。この余震域内に図5-2に示すように地震断層が発生した。

この地震により、県道修善寺一下田線および国道135号線を主として、図5-2に示すように断層付近で多くの斜面崩壊が発生した。特に道路沿いの山腹斜面の大きな崩壊が目立ち、崩壊箇所も道路上50~110m余に及び、崩壊頂部よりはるか上方や崩壊周辺部に広範囲にわたるキレツ、段差などが生じた。崩壊のため、25名の死者をはじめとする多くの死傷者が出た。

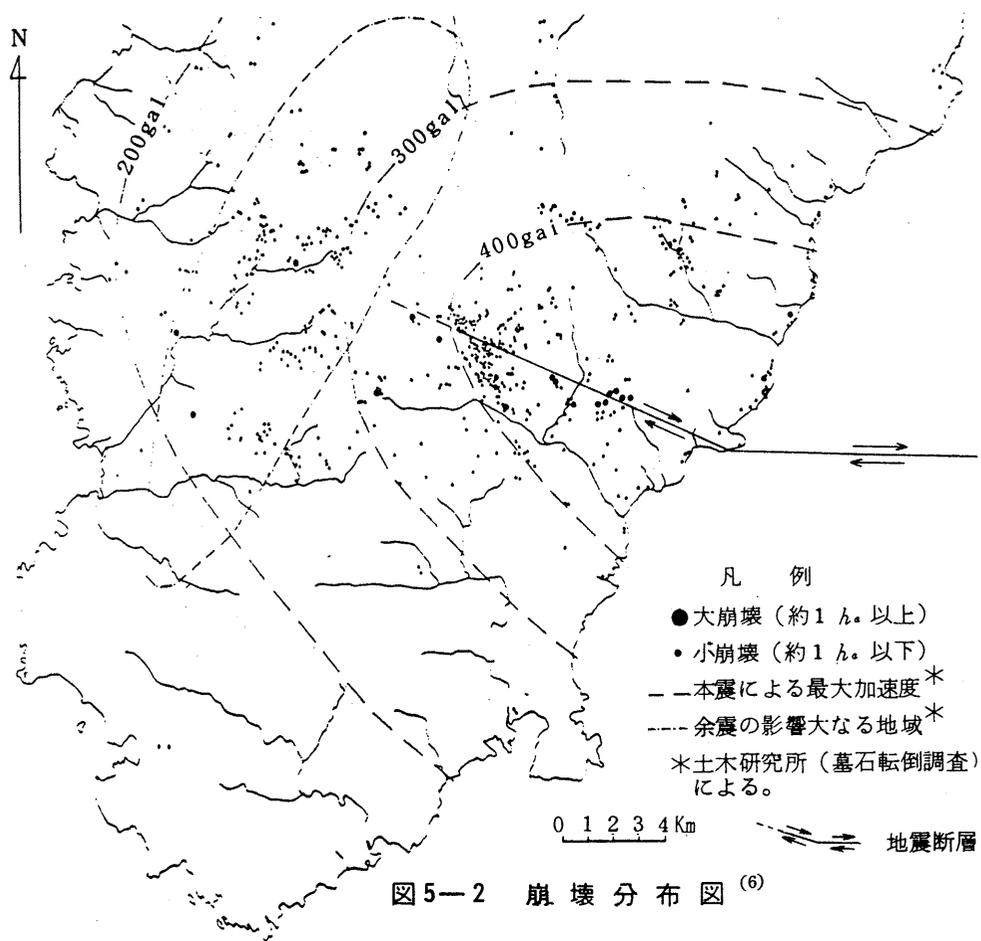


写真5-1 斜面の崩壊によって被害を受けた家屋



写真 5. - 2 道路盛土端の沈下例

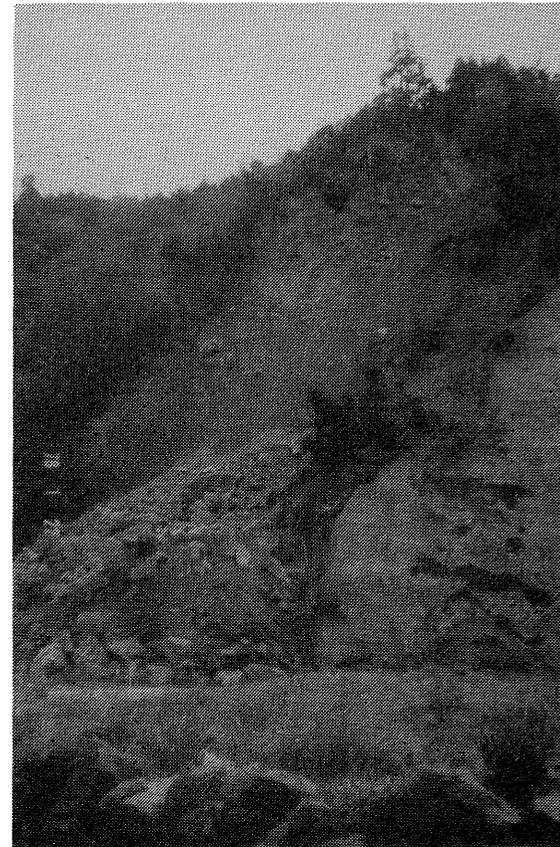


写真 5. - 3 斜面の崩壊例

添付図参照

図 5 - 3 大規模な斜面崩壊分布および地盤分類図



写真 5-4 御岳くずれによって生じた大規模な土石流跡
(朝日新聞社撮影)

b) 長野県西部地震による大規模崩壊

長野県西部地震(1984年)では王滝村を中心に大小400数十箇所の斜面が崩壊した。そのうち大部分は表層滑落型の小規模崩壊であり、溪谷沿いの急斜面もしくはその上位の遷急点付近でかつ粘着力の比較的小さい地質の分布域に集中した。

これに対し、伝上川源頭部、御岳高原、松越、滝越地区では図5-3に示したように大規模な崩壊が生じた。これらの大規模崩壊はすべり面が深く、数万年前以上も前に形成されたU字谷を埋積していた厚さ数十~百数十mの火山噴出物や湖成層が滑動したものである。各崩壊箇所の特徴をまとめると表5-2となる。

伝上川源頭部(御岳くずれ)の規模は最大であり。御岳山の南斜面で標高約2,600~2,000mにわたって尾根が崩壊した。すべり面は100~150mと深く、崩壊土量は3,250万 m^3 にも達した。写真5-5に崩壊状況を示すが、崩壊後は岩なだれを発生させ、写真5-4, 5-7にみられるように伝上川、濁川、王滝川と流れ下って、約12km下流まで達した。崩壊地の地質は、更新世の御岳火山噴出物よりなり、最上部より奥ノ院溶岩、伝上川溶岩、自破碎部、スコリア層、千本松軽石層、木曾谷層と地層を形成していたが、これらのうち風成未固結の千本松軽石層がすべり面となったと考えられている。

御岳高原と松越地区においても、千本松軽石層より古いものの、やはり風化した軽石層がすべり面になり崩壊を生じた。どちらの層も粘土化が進み、強度はかなり小さくなっていった。松越地区の崩壊状況は写真5-6に示した通りである。

これに対し、滝越地区ではシルト層をはさむルーズな砂勝ちの地層である滝越湖成層がすべり面となっており、この砂層の水飽和部が地震により部分的に液状化した可能性が強いと考えられている。

表5-3 大規模崩壊斜面の特徴⁽⁷⁾

地区	御岳くずれ	滝越	松越	御岳高原
崩壊土量	3,250万m ²	50万m ²	29万m ²	10万m ² (推定)
崩壊前の地形勾配	25度(脚部35度)	30度	17度(脚部33度)	20度
崩壊地点の地形的位置	尾根	尾根型段丘斜面	尾根型段丘斜面	尾根型緩斜面
すべり面の深さ	100~150m	50~70m	40m	5~15m
すべり面の横断形状	U字谷	平滑状	ダブルU字谷	平滑状
すべり面の地質	千本松軽石層(一部に伝上川溶岩類)	滝越湖成層(主としてルーズな砂層と粘土層)	御岳第3軽石層(Pm3A, Pm3B)で粘土化著しい	御岳第1軽石層(Pm1)で粘土化著しい
すべり地塊の地質	伝上川溶岩類	上部滝越湖成層(伝上川溶岩と砂層, 半固結粘土層)	上部滝越湖成層	御岳第1軽石層の上位に重なる全ての風成火山灰層(Pm2, 3と若いほど新鮮)
崩壊下端部における浸食作用	下刻作用顕著, 湧水浸食あり	斜面脚部における湧水浸食顕著	大又川の側方浸食による逐次破壊あり	道路等の築造による人工的急斜面化
隣接区域での既往崩壊	西隣に大崩壊あとあり	不詳	西隣はかつての崩壊あと	不詳



写真5-5 御岳くずれ崩壊状況⁽¹⁴⁾



写真 5-6 松越地区崩壊状況⁽¹⁴⁾

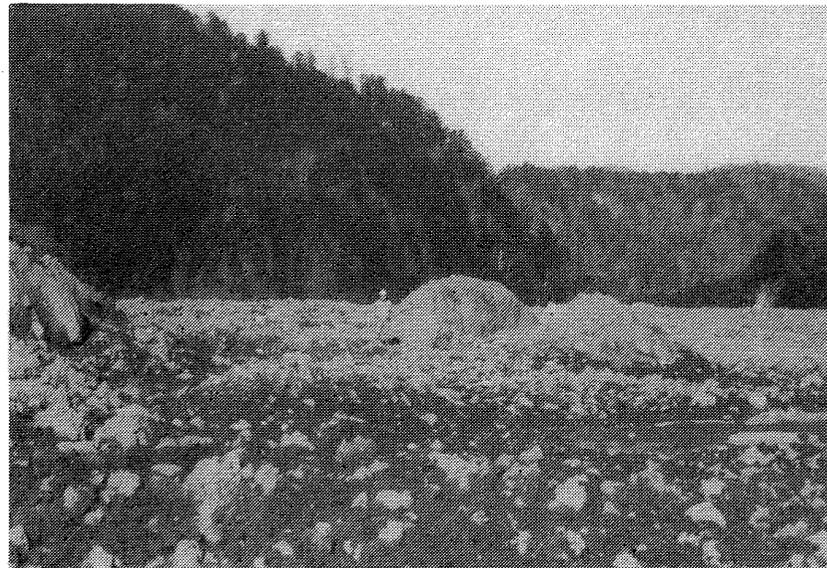


写真 5-7 柳ヶ瀬付近の土石流堆積状況⁽¹⁴⁾

(4) 谷間の造成盛土の地震による崩壊例

a) 十勝沖地震による清田団地の被害

十勝沖地震(1968年)の際、札幌市の南東約10kmに位置する清田団地では、造成盛土の滑り出しなどにより住宅が被害を受けた。ここでの震度はⅣであり、最大でも0.08Gの地表最大加速度しか受けていなかったと推定されている。

清田団地は火山灰の丘陵地を整地して昭和34年頃造成されていた。盛土材は火山灰が主であり、盛土厚は原地形により差があるが、旧沢筋が最も厚く10mほどの厚さであった。

団地内には276戸の住宅があったが、切土上の被害はゼロであったのに対し、盛土上では56%の住宅が被害を受けた。盛土の変状は地区ごとに異なり、滑り出し、沈下などが生じた。そのうち1つの地区の状況を図5-4に示すが、B-11付近では地盤の沈下により、またB-19付近は液状化により住宅が被害を受けたと推定されている。

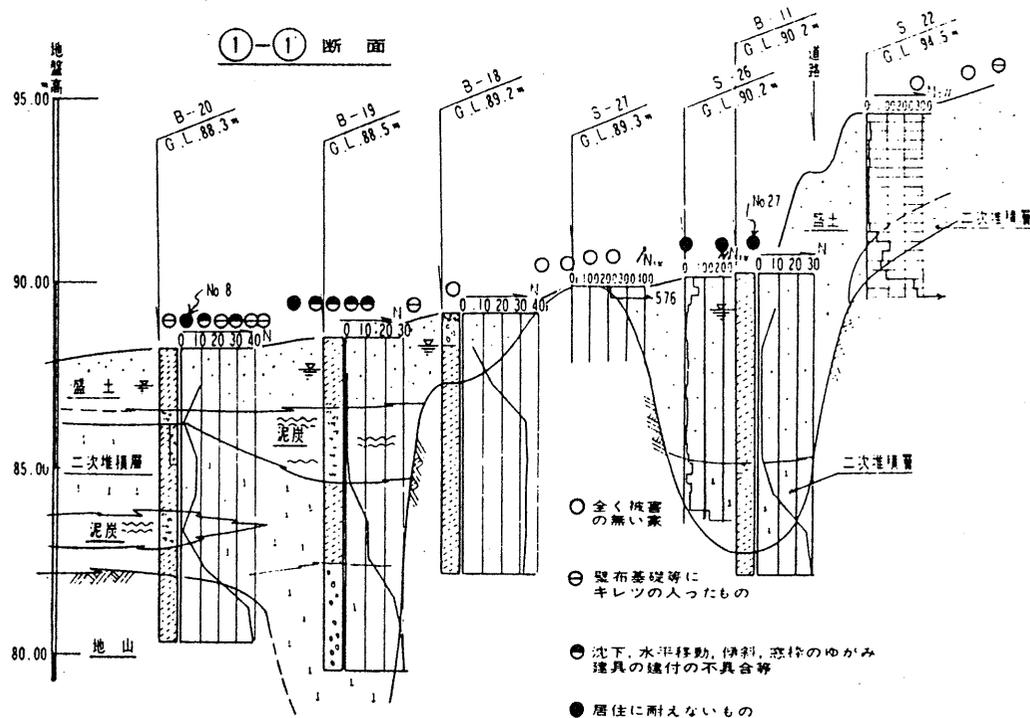


図5-4 清田団地の土層断面図と被害箇所⁽⁸⁾

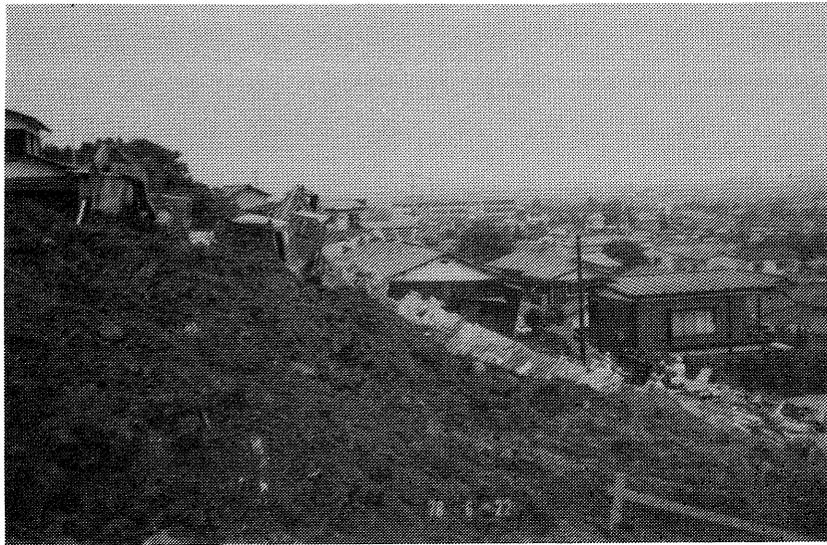


写真 5-8 緑ヶ丘 1丁目の被害状況

b) 宮城県沖地震による緑ヶ丘団地の被害

宮城県沖地震(1978年)では仙台市の緑ヶ丘団地, 黒松団地, 白石市の寿山団地で被害が生じた。

緑ヶ丘団地では1丁目と3丁目で被害が生じたが, そのうち前者の被害状況を写真 5-8に, 土層断面図を図 5-5に示す。ここでは昭和32, 33年にV字谷を厚さ5~15mの盛土で造成していたが, 盛土はN値が0~10(大部分5以下)と極めて軟弱な状態にあった。

地震により図中ハッチで示した住宅では擁壁のはみ出しおよび宅地地盤の沈下, 地割れが発生し, 家屋は使用に耐えないほど破壊された。図中鋼管杭は崩壊防止用に地震後に設置された。

緑ヶ丘3丁目ではやはり沢に盛土した部分がすべり出し, 家屋に被害を与えた。

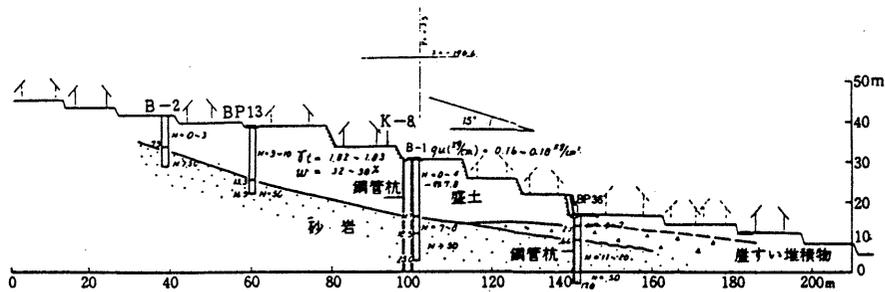


図 5-5 緑ヶ丘 1丁目の土層断面図⁽⁹⁾

5.2 被害予測の方法

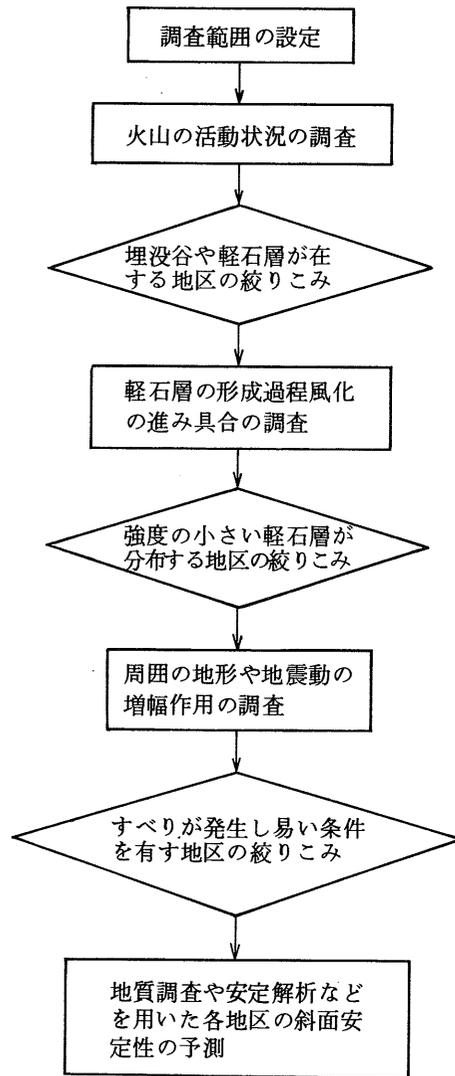


図5-5 火山地帯における斜面崩壊予測の手順⁽⁷⁾

(1) 予測の手順と種類

地震による斜面崩壊の予測手法に関する研究は従来あまり行われてこなかったが、近年における都市住宅域の丘陵地や山麓地への拡大を反映して、最近では地震被害箇所の詳細な調査や地震時安定解析による崩壊原因の考察が行われたり、斜面の耐震点検票の作成や崩壊危険度分級手法の検討が実施されるようになってきている。それらの手法を大別してみると表5-4のようになる。広い範囲内で崩壊の可能性がある斜面を把握する場合は主に(A)が適し、個々の斜面について安定性や変状を予測する場合には(B)や(C)が適する。また、広い地域についての予測でも(A)→(B)と段階を追って絞りこんで予測してゆく方法もある。火山地帯においてこのような手順を示した例を図5-5に示す。

表5-4 斜面崩壊予測方法の種類

種類	予測方法の概要	適用可能な被害形態 [※]	
(A) 経験式による点検(概略)	斜面勾配, 土質(地質), 斜面高などから大雑把に安定性を判断する。	㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕	
(B) 安定解析	(簡易)	通常の間弧すべり法による安定解析に設計震度を加える。	㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕
	(詳細)	地震応答解析により震度を求め, 一方, 動的試験により土の動的強度を求め, 両者を考慮した安定解析を行う。	
(C) 残留変形解析(詳細)	地震応答解析と常時応力解析とから応力分布を求めておき, その応力が加わった時の変形係数低下量を別に試験し, これを考慮した常時応力解析を再度行って両者の差から残留変形量を求める。	㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕, ㉖	

㉑～㉖の記号は表5-2に対応

(2) 試験式による点検方法

経験式による点検方法は過去の被害事例の原因を研究し、主要因をとりあげて手法が作成されている。その中にもいくつかあるが、代表的なものとして道路協会で作成された盛土の耐震調査票および斜面の耐震調査票を表5-5、5-6に示す。これらは伊豆大島近海地震(1978年)における道路斜面の被害などをもとに作られており、いくつかの判定項目の総合評点で被災の程度が予測されるようになってきている。

表5-5 盛土の耐震調査票⁽¹⁰⁾

項目		分類	評価	備考																				
山岳部盛土 (地山勾配が1:4を超える場合)	地盤条件	地山勾配 α	1:1.8< α 1:3.0< α ≤1:1.8 1:4.0< α ≤1:3.0	a b c																				
		盛土 標準のり勾配の盛土	盛土高 H(m)	35m≤H 20m≤H<35m 5m≤H<20m H<5m		a b c d																		
			条 標準のり勾配より急な盛土および構造物取付け部	盛土高 H(m)		30m≤H 15m≤H<30m 5m≤H<15m H<5m	a b c d																	
	地盤条件	粘性土地盤		地盤の軟弱度 (N値)		極めて軟弱 (N<4) 軟弱 (4≤N<8) その他 (8≤N)	a b c																	
平地部盛土 (地山勾配が1:4以下の場合)	盛土 標準のり勾配の盛土	砂質土地盤	液状化の可能性 (N値)	極めて高い (N<6) あり (6≤N<10) その他 (10≤N)	a b c																			
		条 標準のり勾配より急な盛土および構造物取付け部	盛土高 H(m)	10m≤H 6m≤H<10m 3m≤H<6m H<3m	a b c d																			
			盛土高 H(m)	8m≤H 4m≤H<8m 2m≤H<4m H<2m	a b c d																			
	盛土材料	盛土高(m)	勾配	備 考	<table border="1"> <tr> <td>粒度の良い砂(SW)、砂利および砂利まじり砂(GM)、(GC)、(GW)、(GP)</td> <td>5m以下 5~15m</td> <td>1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0</td> <td>基礎地盤の支持力が十分にあり、浸水の</td> </tr> <tr> <td>粒度の悪い砂(SP)</td> <td>10m以下</td> <td>1:1.8~1:2.0</td> <td>影響のない重</td> </tr> <tr> <td>岩塊(ずりを含む)</td> <td>10m以下 10~20m</td> <td>1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0</td> <td>土に適用する。</td> </tr> <tr> <td>砂質土(SM)、(SC)、強い粘質土、硬い粘土(洗練層の硬い粘土、粘土、開業ロームなど)</td> <td>5m以下 5~10m</td> <td>1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0</td> <td>()の統一</td> </tr> <tr> <td>軟らかい粘質土(VH)</td> <td>5m以下</td> <td>1:1.8~1:2.0</td> <td>類は代表的なものを参考に示す。</td> </tr> </table>	粒度の良い砂(SW)、砂利および砂利まじり砂(GM)、(GC)、(GW)、(GP)	5m以下 5~15m	1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0	基礎地盤の支持力が十分にあり、浸水の	粒度の悪い砂(SP)	10m以下	1:1.8~1:2.0	影響のない重	岩塊(ずりを含む)	10m以下 10~20m	1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0	土に適用する。	砂質土(SM)、(SC)、強い粘質土、硬い粘土(洗練層の硬い粘土、粘土、開業ロームなど)	5m以下 5~10m	1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0	()の統一	軟らかい粘質土(VH)	5m以下	1:1.8~1:2.0
粒度の良い砂(SW)、砂利および砂利まじり砂(GM)、(GC)、(GW)、(GP)	5m以下 5~15m	1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0	基礎地盤の支持力が十分にあり、浸水の																					
粒度の悪い砂(SP)	10m以下	1:1.8~1:2.0	影響のない重																					
岩塊(ずりを含む)	10m以下 10~20m	1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0	土に適用する。																					
砂質土(SM)、(SC)、強い粘質土、硬い粘土(洗練層の硬い粘土、粘土、開業ロームなど)	5m以下 5~10m	1:1.5~1:1.8 1:1.8~1:2.0	()の統一																					
軟らかい粘質土(VH)	5m以下	1:1.8~1:2.0	類は代表的なものを参考に示す。																					

表5-5 盛土の耐震ランク判定

判定ランク	山 岳 部				平 地 部					
	盛土条件	a	b	c	d	地盤条件	a	b	c	d
a	A	B	B	B	C	a	A	A	A	B
b	B	B	B	C	C	b	A	B	B	C
c	B	C	C	C	C	c	B	B	C	C

修正ランク判定ラ

当該盛土が下記の修正条件(1)、(2)、(3)のいずれかに該当するときは、上の判定ランクを1ランク修正する(C→B, B→A, A→A)。

- 盛土の地盤が傾斜した集水斜面のため、盛土の含水比が常時高い状態にある。
- 過去に降雨あるいは地震によって路面に沈下、き裂などの変状をきたしたことがある。
- 覆付け部あるいは拉張部などが供用開始後、沈下、き裂などの変状をきたしている。

A: 被災の程度または確率が高いと予想される。
B: 被災の程度または確率がやや高いと予想される。
C: 局部的には被災するが、被災の程度または確率がやや低いと予想される。

表5-6 斜面の耐震調査票⁽¹⁰⁾

項目	分 類	点数	備 考
①斜面高 H(m)	50m≤H	10	
	30m≤H<50m	8	
	10m≤H<30m	7	
	H<10m	3	
②斜面勾配 α	1:0.6≤ α	7	①のQ、P間の平均勾配とする。
	1:1.0≤ α <1:0.6	4	
	α <1:1.0	1	
③オーバーハング	構造物のない斜面のオーバーハング	7	岩の斜面などで一見してオーバーハングと見られるもの。
	構造物のある斜面のオーバーハング	4	
	オーバーハングなし	0	
④斜面の地質	斜面の表面に転石、浮石が多い	10	上位のものを用いる。例えば、土砂で表面に転石、浮石が多いものは10点とする。
	切土のり面に玉石が多い	7	
	風化、変質、き裂の発達した岩	6	
	崩れまじり土砂	5	
	風化、変質した岩	4	
	き裂の発達した岩	4	
	土砂	4	
粘質土	1		
き裂の発達していない岩	0		
⑤表土の厚さ	0.5m以上	3	表土とは、表面の腐植土、有機質土をさす。ただし、表土下に非常にルーズな崩壊土等があれば、それも含める。
	0.5m未満	0	
⑥ゆう水	有	2	常時見られるゆう水をさす。
無	0		
⑦落石、崩壊頻度	年1回以上	5	道路交通に対する支障または道路構造物等に損傷を与えない程度の軽微な落石、はた落ち、のり崩れ等をさす。
	年1回未満	0	
小 計		点	①~⑦の点数の和
⑧斜面の異常変状	有	a	斜面とは、自然斜面、無保護斜面(ネット工は入れる)、植生のありのり面をさす。異常、変状はクラック、段差等崩壊に直接つながるもの。
	無	c	
⑨斜面安定工の異常、変状	有	a	斜面安定工とは、地表面がモルタル吹付等何らかの人工構造物に覆われているもの。異常、変状はクラック、段差、はらみ出し等、崩壊に直接つながるもの。
	無	c	
⑩構造物や道路支障	有	a	過去に落石、崩壊等により事故または道路構造物等に損傷を与えた経緯があるもの。なお、当該箇所は満足な防護工が施されている場合は対象外。
	無	c	
	無	c	
⑪斜面の有無	顕著である	a	斜面高の範囲で盛土、水の放流、停滯、浸透等崩壊を助長させるような行為。
	若干見られる	b	
	なし	c	
小 計	a = 個, b = 個, c = 個		⑧~⑪のa, b, cの個数の集計
⑫斜面安定工による斜面の安定度	やや低い	a	道路土工指針等に照らしての技術的完全さの程度、および施工後の老朽化等を考慮して判断する。
	普通	b	
	高い	c	

表5-6 斜面の耐震ランク判定

判断要素 ⑧~⑫	aが1個以上 bが1個またはc 全部がc	(1) 斜面安定工がない場合			(2) 斜面安定工がある場合			
		基準要素点	左表(1)による判定ランク					
			13点以下	14~23点	24点以上	④	⑤	⑥
判断要素		④	④	④	a	A	A	A
		⑤	④	④	b	A	B	C
		⑥	⑤	④	c	B	C	C

A: 被災の程度または確率が高いと予想される。
B: 被災の程度または確率がやや高いと予想される。
C: 局部的には被災するが、被災の程度または確率がやや低いと予想される。

③ 斜面安定解析による方法

a) Keefer や田中⁽¹²⁾による比較的広い地域の予測方法

図5-6に示すように、 θ なる傾きの斜面で質量 m の土塊(厚さ h)が地震によって崩壊する場合を考える。土の単位体積重量を r 、粘着力を c 、内部摩擦角を ϕ とすると、すべりが発生するための臨界の加速度 a_c は、つりあいの式をたてて次のように表わされる。

$$a_c = g [(c/rh) + (\cos \theta \cdot \tan \phi - \sin \theta)]$$

したがって、予測しようとする地域内で土の強度常数(c, ϕ)、斜面の傾斜角、加速度の分布がわかっているならば、崩壊を生じる可能性がある区域を予測することができる。

この手法を田中は伊豆の梨本地区に適用し、伊豆大島近海地震による被害と対比して手法の妥当性を検討している。図5-

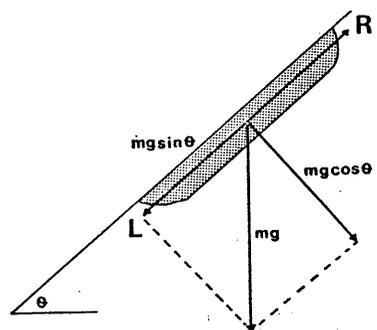


図5-6 ランドスライドのモデル⁽¹²⁾

7は傾斜分級図を、図5-8は地質図を示す。この地域内では4種類の地質に分けられるが、そのうち凝灰質砂岩の土質常数は $r=1.7 \text{ t/m}^3$, $c'=3 \text{ tf/m}^2$, $\phi'=30^\circ$ と見積られており、崩壊状況より $h=3 \text{ m}$ とみなすと、上式より図5-9が得られる。一方、墓石の転倒率より伊豆大島近海地震時の加速度は 0.4 g 程度と考えられるため、凝灰質砂岩では約 40° 以上の傾斜で崩壊が発生することになる。その他の岩石については土質常数はないが、現地踏査の結果より大略を見積ると表5-7の規準ができる。これをもとに予測を行った結果が図5-10であるがこの図では、また伊豆大島近海地震での被害と比較している。

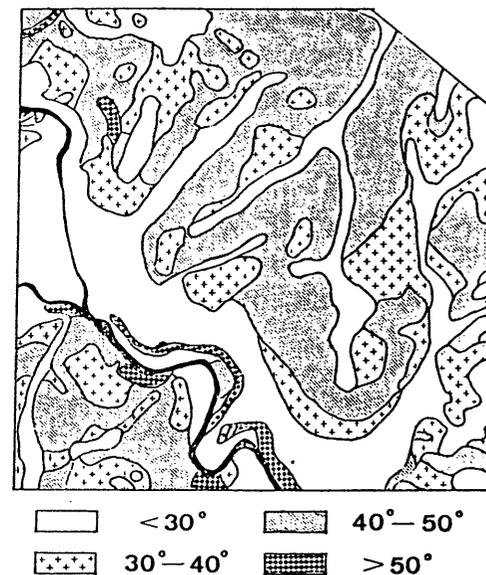
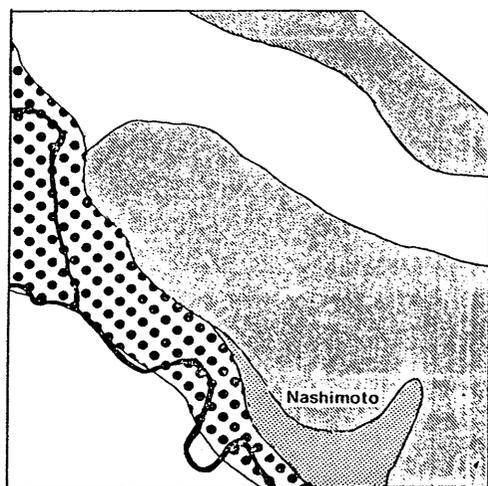


図5-7 梨本地区の傾斜分級図⁽¹²⁾



-  Tuffaceous Sandstone
-  Andesite
-  Basaltic Lava
-  Sand and Gravel

図5-8 梨本地区の地質図⁽¹²⁾
 地質調査所発行5万分の1
 地質図「下田」より抜粋一部加正

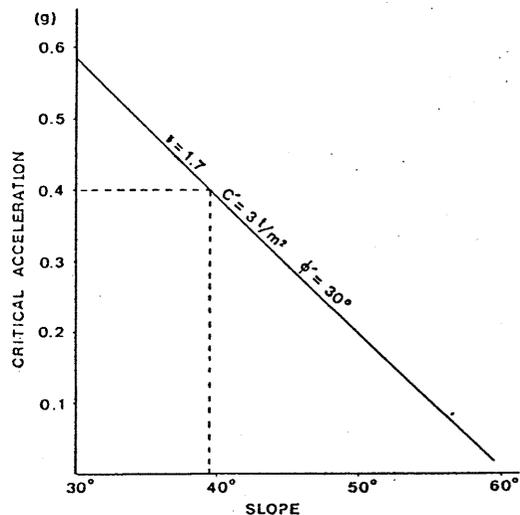
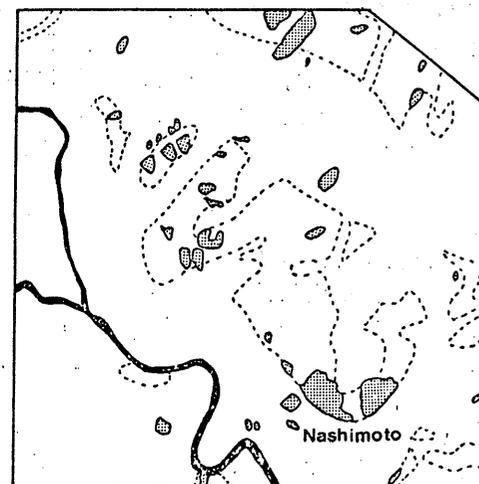


図5-9 梨本地区の凝灰質砂岩の臨界
 加速度と斜面角度図



-  Root area of Landslide
-  High Susceptibility area

図5-10 1978年伊豆大島近海地震による梨
 本地区ランドスライド発生域の分布⁽¹²⁾

表5-7 梨本地区の地震によるランドスライド発生予測 (No 2)⁽¹²⁾

Seismic landslide susceptibility criteria
 (No.2) for Nashimoto area

	T.S.S.	A.N.D.	B.LAVA
> 50°		⊙	○
50°-40°	⊙	○	×
40°-30°	×	×	×
< 30°	×	×	×

⊙High ○Moderate ×Low

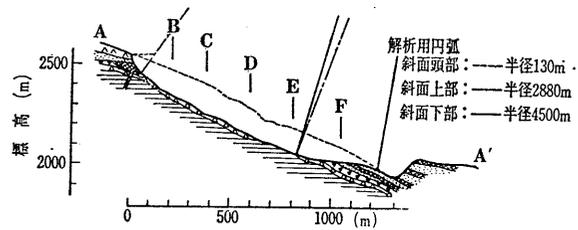


図5-11 安定解析用断面(御岳くずれ)⁽⁷⁾

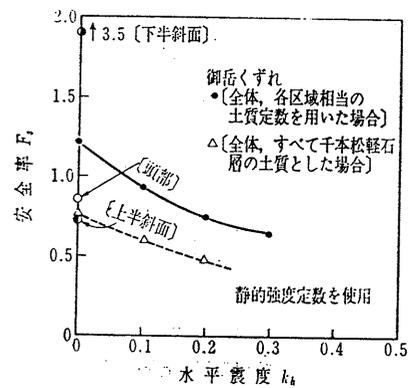


図5-12 すべりの安全率と水平震度(御岳くずれ)⁽⁷⁾

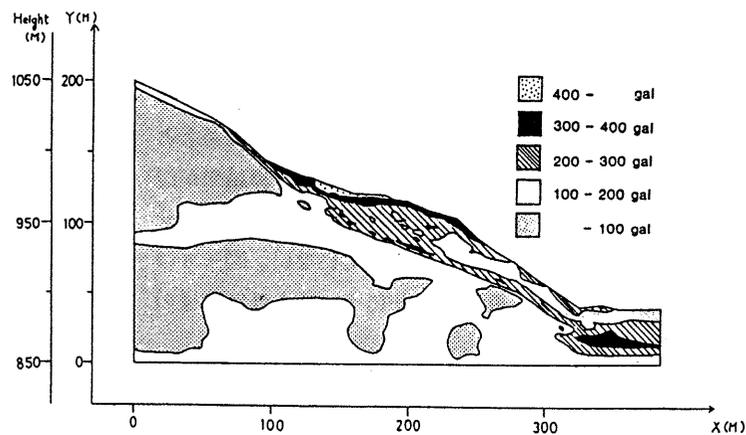


図5-13 地震応答解析による加速度分布(松越地区)⁽¹³⁾

b) 個々の斜面での安定解析

個々の斜面での安定解析は一般に円弧すべりや折線すべり法によって行われている。ただし、次のような点についていくつかの方法がある。

- i) 計算式…フェレニウス法が一般的であるが、他にいくつかある。
- ii) 地震力…簡易的にはすべり土塊に一樣に震度を加える。地震応答解析を行って詳細に検討する場合は、発生応力を用いたり、すべり土塊内の震度の分布を考えたりする。
- iii) 土の強度…簡易的には静的強度を用いる。室内動的試験を行って詳細に検討する場合には、動的強度常数や過剰間隙水圧を求め、これを考慮した解析を行う。

5.1(3)b)で被害状況を示した長野県西部地震による斜面崩壊について、上記の条件を変えて解析を試みた例を以下に述べてみる。

図5-11は3,250万 m^3 もの大崩壊を生じた御岳くずれの安定解析断面を示している。この断面について強度常数は静的な値を用い、フェレニウス法にて解析を行った結果が図5-12である。これによると頭部および斜面上部は斜面下部の支えがなければ常時でも滑動する状態にあったようであり、崩壊は上・下の両斜面が一体となって一挙に崩壊したことを裏付けている。また斜面全体のFsは $Kh=0.08$ 程度で1を下まわっており、実際に加わったと推定される震度(0.19~0.23程度)より小さくなって

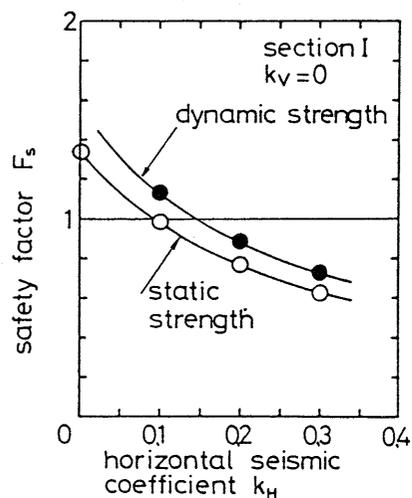


図5-14 すべり安全率と水平震度
(松越地区)⁽¹³⁾

いるが、この解析では動的強度や三次元効果を考慮していないため、 F_s は多少小さくなっていると考えられている。

図5-13、5-14は松越地区について行われた検討結果であるが、ここでは詳細な解析が行われている。地震応答解析を行って図5-13のように加速度分布を求めこれから震度を決定している。一方、室内動的試験も行って動的強度も求め、両者を用

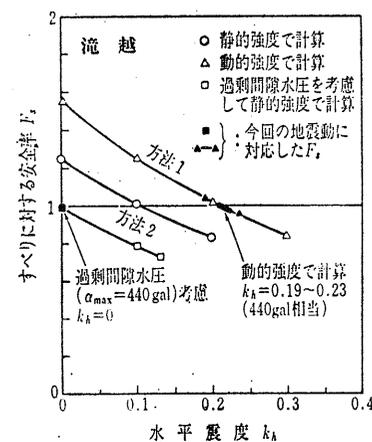


図5-15 すべりに対する安全率
(滝越地区)⁽⁷⁾

いて図5-14のように安全率を算出している。この場合、静的強度を用いた場合より動的強度を用いた方が崩壊状況がよく説明されている。

図5-15は滝越地区について解析した例で、この場合には過剰間隙水圧を考慮した場合とか動的強度を用いた場合に崩壊状況が説明できることが明らかにされている。

5.3 斜面崩壊の対策工法

地震時に斜面崩壊の危険性があると判断された箇所については、住家の移転や道路・鉄道の路線変更等の土地利用の変更で対処することが一つの方法であろう。ただし、代替地の見つけにくいわが国ではこの方法はなかなか難しく、崩壊防止用の対策工を施す必要が生じてくる。

斜面崩壊に対する防止工は、特定の盛土を除いてこれまで豪雨や地すべり時の崩壊に対して施工され、地震に対しては特別に施工されることはほとんど行われてこなかった。したがって、地震時のことを考えた対策工法を一般的に述べるわけにいかないため、ここでは伊豆大島近海地震(1978年)と宮城県沖地震(1978年)の際に崩壊した斜面に対してとられた対策工例を示しておくこととする。

伊豆大島近海地震では、5(3)a)で前述したように県道修善寺一下田線や国道135号線を中心に多くの斜面崩壊が生じた。この中には大規模な崩壊もいくつかあったため、橋梁やトンネルによって付け替えが行われた箇所もあった。図5-16は河津町梨本地区における例であるが、ここでは現道上の復旧は不可能と判断され、橋梁による付け替えが行われた。

少し規模が小さい箇所では現道をそのまま使い、防止工等の対策がとられた。図5-17は天城場ヶ島町与市坂における例を示したがここでは斜面下部に高さ6mの落石防護柵つきコンクリート擁壁を設け、斜面の下部を1割、上部を1割5分でそれぞれ段切りし、斜面上部のキレツのある付近の不安定な部分を切り取り除去して法覆工を施した。

宮城県沖地震では5(4)b)で示したように、造成盛土斜面が崩壊した。これに対し、図5-5に示すように整地したうえで原地盤に深く根入れした鋼管グイが施工された。

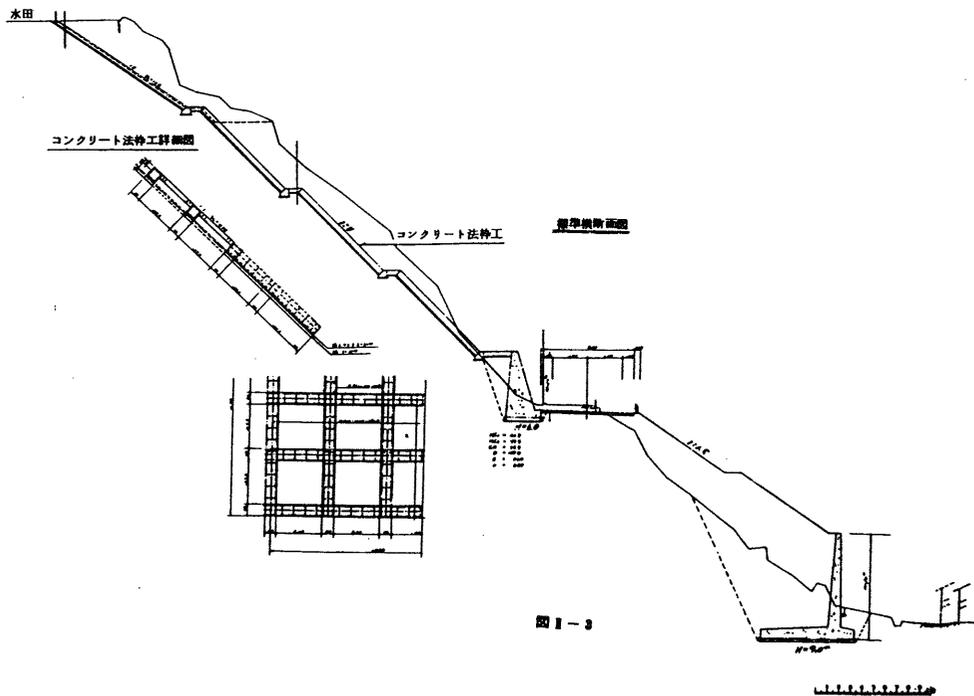


図5-17 与市坂における対策工例(伊豆大島近海地震)⁽⁶⁾

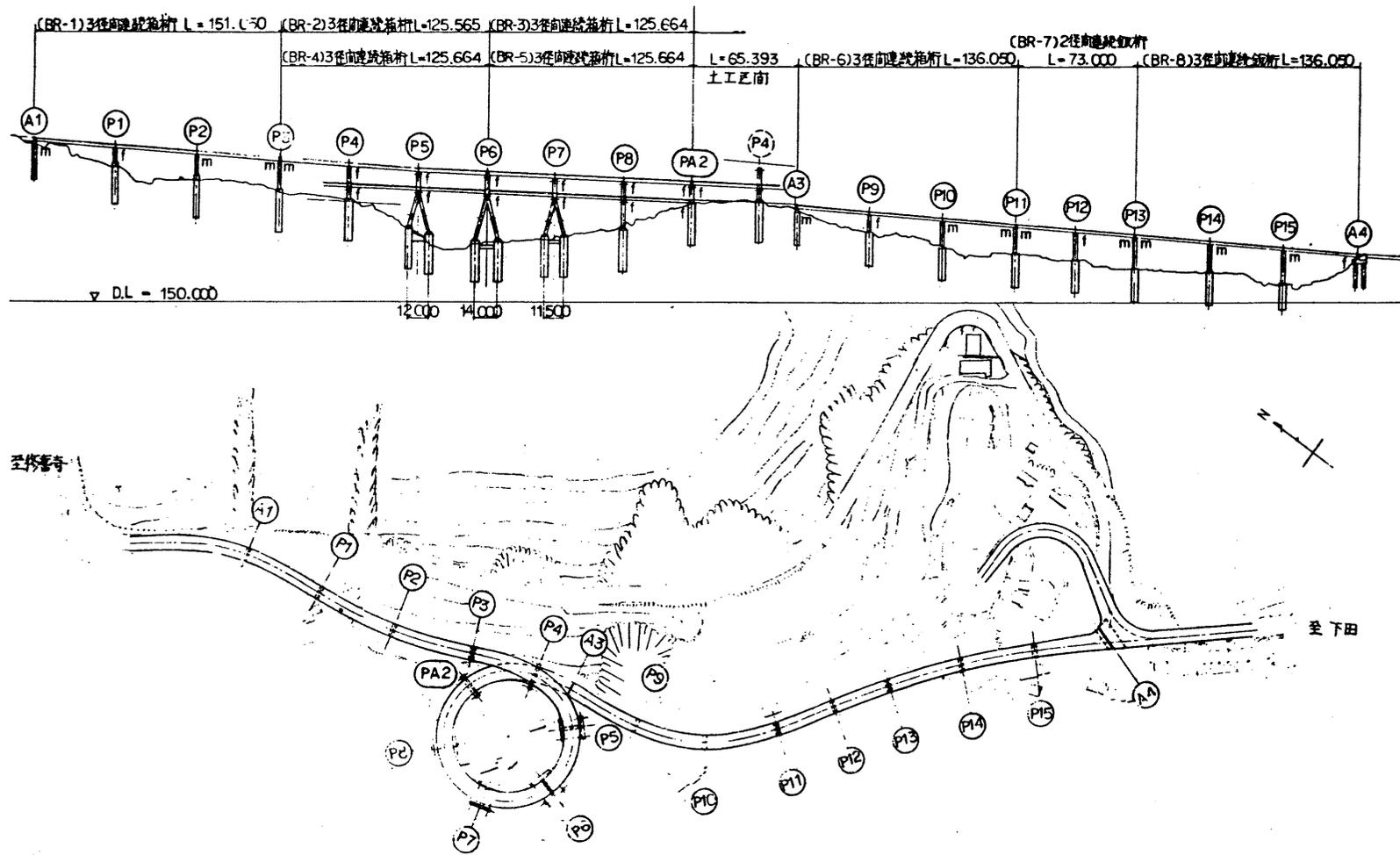


図 5 - 16 伊豆七滝高架橋
 梨本地区における対策工例 (伊豆七滝高架橋, 伊豆大島地震)⁽⁶⁾

第 5 章 の 参 考 文 献

1. 芥川真知・吉中龍之進：地震による斜面崩壊について，地学的特性を考慮した地震動災害予測の研究，文部省自然災害特別研究成果，No.A - 55 - 1, pp. 96 ~ 109, 1980.
2. 宇佐美龍夫：日本被害地震総覧，東京大学出版会，1980.
3. 恒石卒正・伊藤谷生・狩野謙一・千木良雅弘・木村敏雄：1978年伊豆大島近海地震による自然災害，地学的特性を考慮した地震動災害予測の研究，文部省自然災害特別研究成果，No.A-55 - 1, pp. 79 ~ 84, 1980.
4. 反町雄二：地震による斜面崩壊の実態，土木技術資料，Vol. 20, No.12, pp. 30 ~ 35, 1978.
5. 建設省国土地理院地理調査部・測図部：1984年長野県西部地震による災害（速報），国土地理院時報，No. 60, pp. 48 ~ 52, 1984.
6. 道路震災対策委員会：道路の震災対策に関する調査報告(I)，1978年伊豆大島近海地震災害，日本道路協会，1979.
7. 叔倉克幹・安田進・榊裕介：長野県西部地震での被害例にもとづいた斜面崩壊予測手法の検討，土と基礎，Vol. 33, No.11, pp. 41 ~ 46, 1985.
8. 1968年十勝沖地震調査委員会：1968年十勝沖地震調査報告，1969.
9. 浅田秋江・小沢初美・三橋至：宅地造成地・街路および公園，「1978年宮城県沖地震調査報告書」，土木学会東北支部，pp. 435 ~ 458, 1980.
10. 荻原良二：道路施設の耐震判定について，土と基礎，Vol. 31, No. 5, pp. 37 ~ 41, 1983.
11. Keefer, D.K., Wieczorek, G.F., Harp, E.L. and Tuel, D.H.: Preliminary Assessment of Seismically Induced Land slide Susceptibility, Proc. of 2nd Int. Conf. on Microzonation, Vol. 1, pp. 279 ~ 290, 1978.
12. 田中耕平：地震によるランドスライド発生予測図，地すべり，第19巻，第2号，pp. 12 ~ 19, 1982.
13. 谷口栄一：松越地区の大規模斜面崩壊，長野県西部地震における斜面崩壊の実態とその教訓，第20回土質工学研究発表会特別セッション講演集，pp. 27 ~ 35, 1985.
14. 基礎地盤コンサルタンツ株：1984年9月14日長野県西部地震による被害状況速報，1984.

6. その他の地震被害

6.1 泥炭地の被害

浦河沖地震(1983)では浦河町から静内町にかけて、家屋や道路の被害が生じた。このうちの多くの被害は泥炭地盤で生じている。図6-1は浦河町において家屋の被害が大きかった地区を示しているが、ウロコベシ川河口の常盤町、乳呑川河口の東町に被害が集中していた。これらの地区では家屋の倒壊、傾斜、モルタル壁のはく離等が軒並みに生じ、道路の歩道が10~20cm沈下している所もあった。この付近では表層に数m程度泥炭層が堆積している。

浦河沖地震による泥炭地盤のもう1つの被害例として、道路の横断クラックがあげられる。海岸線を走る国道235号線は、低地を走ったり、台地にあがったりしている。この境界には当然横断クラックが生じていたが、低地内でも細い横断クラックが多数発生していた。この原因は泥炭層の沈下によって生じたものと考えられている。

以上のような被害は1952年や1968年の十勝沖地震の際にも多く生じている。しかし、これらの被害がはたして泥炭の沈下によるものか否かは、明らかにされていなかった。これに対し、日高地方西部地震(1981)の際には、泥炭地盤での沈下量が実測され、被害との関連が検討されている。⁽³⁾

日高地方西部地震によって、国道36号線美々~植苗間において舗装面に横断クラックが発生した。丁度沈下観測をしていたため、地震による沈下量が測られた。図6-2に測定結果を示すが、最大3cm沈下し、沈下量は軟弱層の厚さに対応していた。なお、この沈下量を検証するため、ここでは軟弱層(泥炭とシルト等の互層)

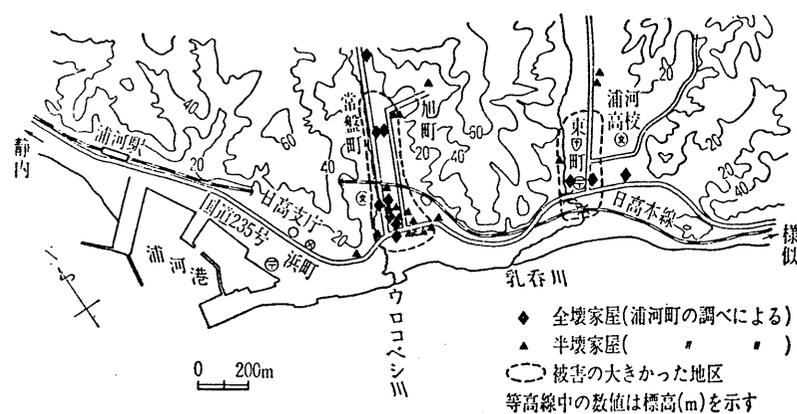


図6-1 浦河沖地震において浦河町内で被害が大きかった地区⁽³⁾

のサンプリングが行われ、これに地震時に発生したと推定される繰返しせん断力を加え、供試体に生じた圧縮ひずみから沈下量を求めている。図中の破線が結果であるが、実測値に比較的良好に合った値となっており、この方法で泥炭地盤の沈下量を予測する方法の有効性を示している。



写真 6-1 浦河沖地震における歩道の沈下(浦河町東町)⁽¹⁰⁾

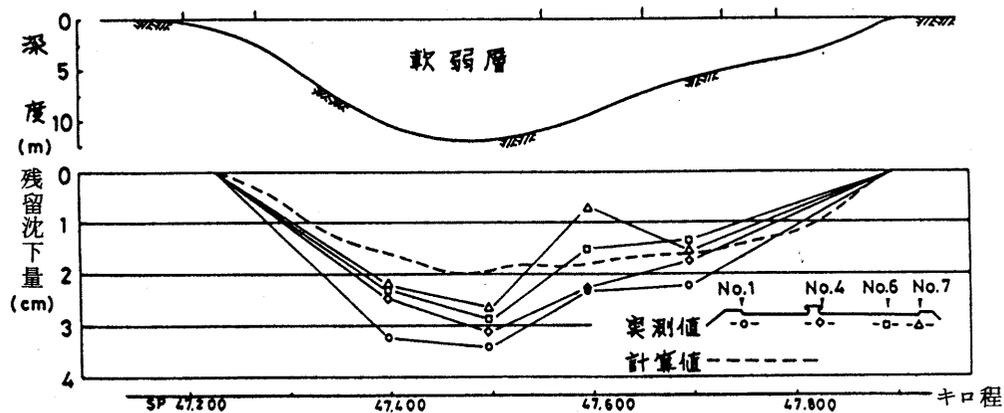


図 6-2 残留沈下量の実測値と計算値⁽⁴⁾

(2) 地震断層による被害例

a) 家屋

濃尾地震(1892)では7本の地震断層が生じたが、これらの断層沿いでは木造家屋の被害が著しかった。しかし、被害の著しい範囲は狭い範囲に限られていた。図6-9は断層からの距離と木造家屋の被害率との関係を示しているが、これによると断層の影響は約5kmまでで、それ以遠は被害が急激に減少し、15~20km離れると被害はほとんどなくなっている。

次に、地震断層の真上での被害例を示してみると図6-10となる。これは伊豆半島沖地震(1974)における石廊崎地区で

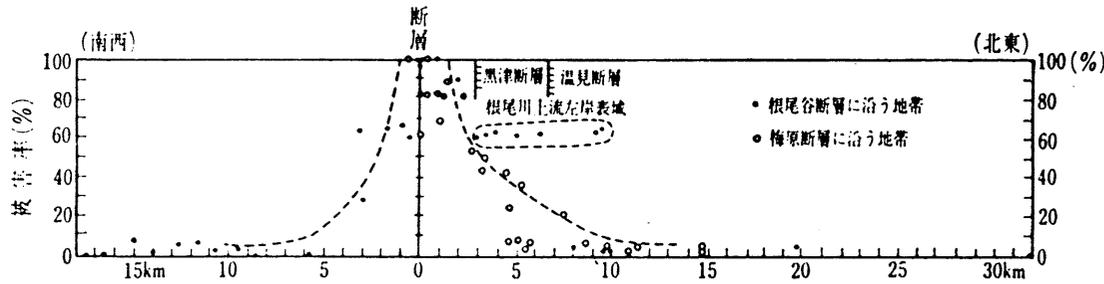


図6-9 濃尾地震による被害と断層からの距離の関係 — 山間部の場合⁽²⁾

の被害例である。図に示した建物は2年前に新築された木造建物であったが、地震断層の真上にあたり、1階部分はいたるところで壁にキレツがはいるり、水平ずれ、沈下、傾斜が生じていた。南側犬走りのすき間(25cm)と、北側布基礎の左右の喰違い(37cm)は、露頭で観察された断層の水平変位量に匹敵していた。

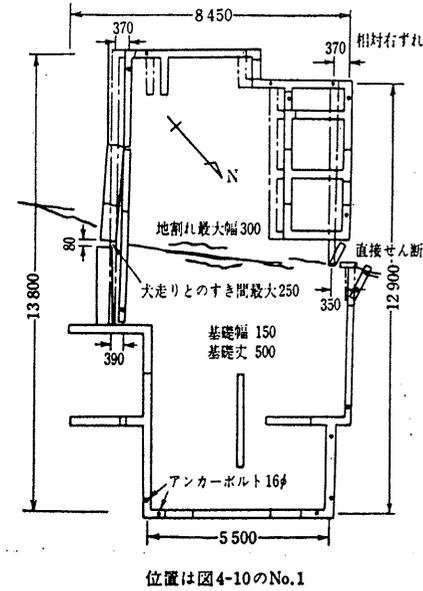


図6-10 石廊崎断層上の建物基礎の被害状況⁽⁷⁾

b) 鉄道トンネルの被害例

北伊豆地震(1930)により生じた丹那断層では、当時掘削中の東海道線の丹那トンネルが被害を受けた。図6-11に被害状況を示すが、東側が北に、西側が南に向かって2m余りずれ、導坑が閉じられた。

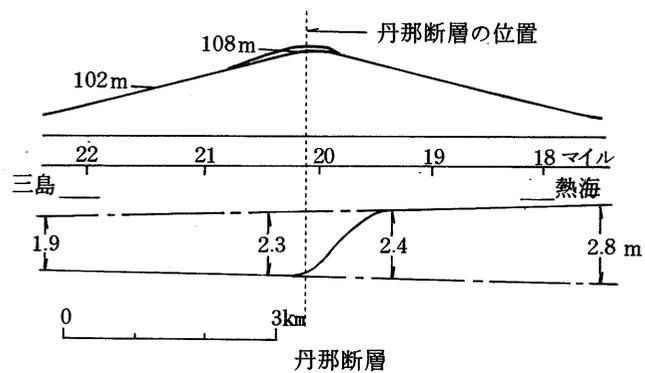


図6-11 丹那トンネル内でのずれ変形と線路の曲線⁽⁶⁾

(3) 地震断層による被害の予測手法 (案)

地震断層による被害の予測方法も確立されたものがないが、被害例などをもとに一案を作成してみると、図 6-13 となる。

活断層の位置および長さについては多くの調査が行われ、分布図としてまとめられている。これらから、検討対象地域に関係する断層を選定する。

地震の規模 M と生じた断層の長さ L (km) と変位置 D (cm) の関係についてはいくつかの研究がある。例えば、松田によると、

$$\log L = 0.6 M - 2.9 \quad (6.1)$$

$$\log D = 0.6 M - 4.0 \quad (6.2)$$

なる式が提案されている。そこで、断層の長さから式 (5.1) を用いて M を推定し、さらに式 (6.2) を用いれば、 D も求まることになる。なお、場合によっては断層の変位置も予測されているものもあるため、この時にはその値を用いればよい。

断層の変位置が推定されれば、断層真上の構造物 (例えば、トンネルやパイプラインなど) の被害予測を行うことができる。また、マグニチュードから、震央距離に応じた加速度分布が推定できるため、これにより各種構造物の被害予測を行うことができる。

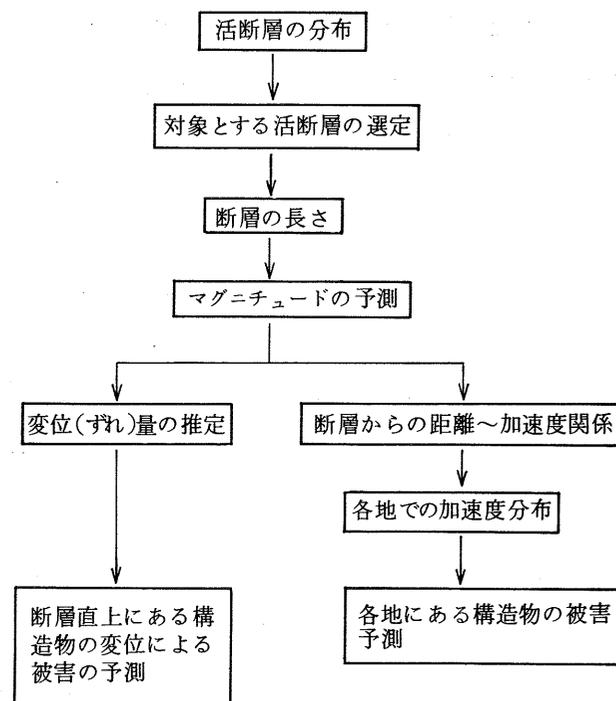


図 6-13 地震断層による被害予測 (案)

第6章 引用・参考文献リスト

1. 宇津徳治, “地震学”, 共立全書, 1977
2. 田治米辰雄他, “地盤と震害”, 槇書店, 1977
3. 石原研而他, “浦河沖地震による構造物の被害と地盤の関係”, 土と基礎 Vol. 31, No. 6, p51 ~ 56, 1983
4. 谷口秀男他, “1981年日高地方西部地震による盛土基層の応答解析例”, 土質土学会北海道支部技術報告集, 第22号 p27 ~ 32, 1982
5. 日本道路協会, “道路の震災対策に関する調査報告(I) — 1978年伊豆大島近海地震災害 —”, 1979
6. 久保慶三郎, “地震と土木構造物”, 鹿島出版会, 1981
7. 望月利男他, “1974年伊豆半島沖地震のおもな被災地の家屋被害”, 第11回災害科学総合シンポジウム, 1974
8. (財)消防科学総合センター, “地域防災データ総覧—地震災害・火山災害編”, 1984
9. 西川泰編, “災害研究図表集” 防災科学技術研究資料12号, 1970
10. 基礎地盤コンサルタンツ(株), “1982年3月21日浦河地震による被害状況速報” 1982

卷 末 資 料

江戸時代以前の主要被害地震（理科年表より抜粋）

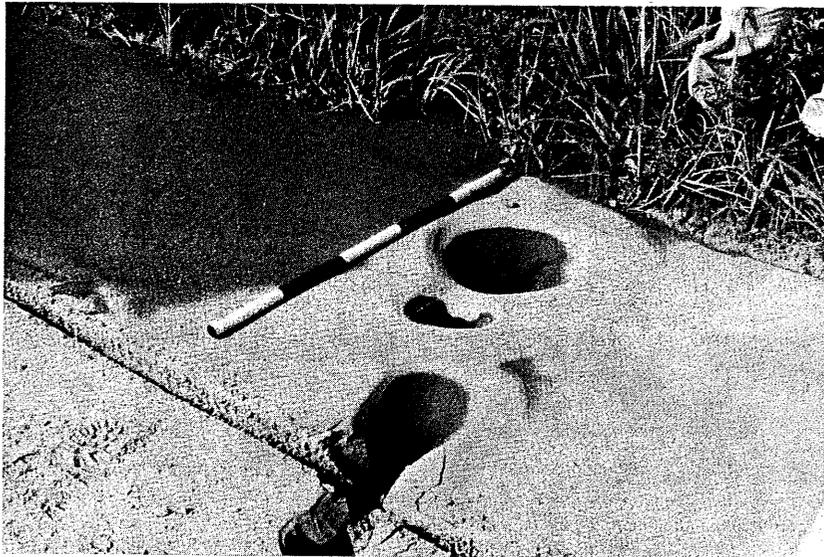
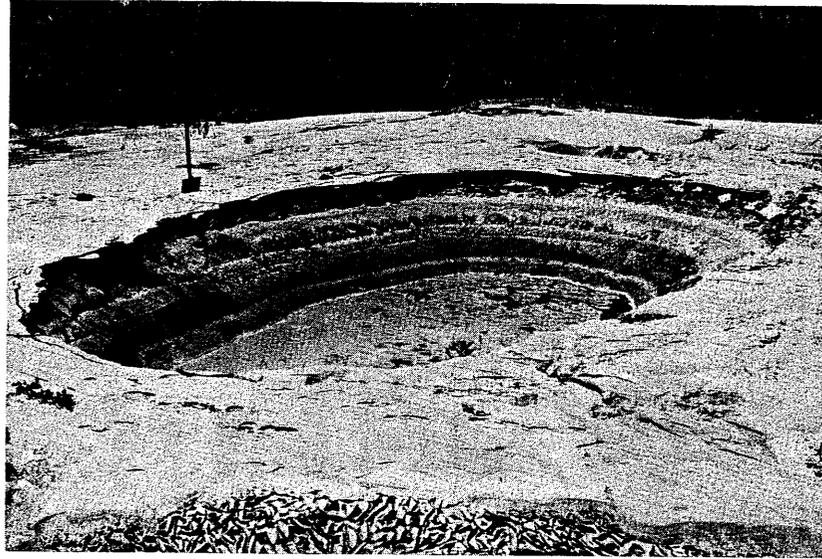
番号	発生年月日	地 域	M	被 害 概 要
1	599.05.28	大和	7.0	倒壊家屋を生じた
2	684.11.29	土佐その他南海、東海 西海諸道	8.4	山くずれ、河湧き家屋社寺の破壊、人畜の死傷多く、津波襲来、土佐の舟多数沈没、土佐で田苑約1.2km海中に沈む。
3	701.05.12	丹後	7.0	地震うこと3日、舞鶴沖の冠島（当時東西2.4km、南北4km）山頂を残して海中に没した。
4	734.05.18	畿内	7.0	民家倒壊し、圧死多く、山くずれ、川塞ぎ、地割れが無数に生じた。
5	745.06.05	美濃	7.9	正倉・仏寺・民家の倒壊多く、摂津では余震が約20日間続いた。
6	762.06.09	美濃、飛騨、信濃	7.4	上越後に地震あり、被害不詳。
7	818.	関東諸国	7.9	山くずれ、谷埋まること数里（1里=約4km）。百姓圧死多数、津波があった。
8	830.02.03	出羽	7.4	秋田の城廓、家屋倒壊、圧死15人、傷100人余、地割れ多く長いものは20~30丈（60~90m）。
9	841.	伊豆	7.0	里落完からず、死傷があった。6月と推定される。同年7月5日以前の地震。
10	850.	出羽	7.0	地裂け、山くずれ、圧死者多数、国府の城柵が傾き倒れた。
11	857.04.04	出羽	7.0	大船北方松峯山伝寿院堂舎揺りくずれる。正史に見当たらない。
12	863.07.10	越中、越後	7.0	山くずれ、谷埋まり民家破壊し圧死者多数、直江津付近の小島壊滅。
13	868.08.03	播磨、山城	7.1	播磨諸郡の官舎堂塔ことごとく破壊、京都で垣屋くずれる。
14	869.07.13	三陸海岸	8.6	城廓、門櫓、垣壁くずれ、倒壊するもの無数、津波多賀城下を襲い、溺死約1000人、流氷屋の如く隠映するという。
15	878.11.01	関東諸国	7.4	相模・武蔵でひどく、地陥り、家屋破壊し、死者多数。京都奈良で有感。
16	880.11.23	出雲	7.4	社寺、家屋倒壊破損多く、京都でも強く感じた。
17	887.08.26	信濃北部	7.4	山くずれ、河を塞ぎ、のち決壊して大洪水となり北部6郡で被害、流死が多かった。
18	922.	紀伊	7.0	浦々津波。正史に見当たらない。
19	1096.12.17	畿内、東海道	8.4	東大寺の巨鐘落ち、諸寺に被害。京都大極殿破損。勢多橋落ちる。余震多く、津波伊勢、駿河を襲い、駿河で社寺民家流失400余。
20	1099.02.22	畿内	8.0	興福寺西金堂壊れ、大門が倒れた。土佐で田千余町皆海底に沈む。
21	1185.08.13	近江、山城、大和	7.4	京都特に白河辺の被害大、社寺、家屋の倒壊破損多く、死者多数。宇治橋落ち、余震9月に及び230を数える。
22	1241.05.22	鎌倉	7.0	津波を伴い、由比ヶ浜大鳥居拝殿が流失した。
23	1257.10.09	関東南部	7.0	鎌倉の社寺完きものなく、山くずれ、家屋転倒し、地割れを生じた。余震多数。この日三陸沿岸に津波。別の地震によるものか？震源地あるいは鎌倉付近か？
24	1293.05.27	鎌倉	7.1	鎌倉強震。諸寺つぶれ、死者数千人といい、2万3千人余ともいう。この日越後魚沼郡で山くずれ死者多数、地震との関係不明。
25	1331.08.15	紀伊	7.0	千里浜（田辺市の北）干潟20余町隆起して陸地となる。

番号	発生年月日	地 域	M	被 害 概 要
2 6	1360. 11. 22	紀伊, 摂津	7.0	4日に大震。5日九ツ時再び大地震, 津波熊野・尾鷲から兵庫まで来襲し, 人馬牛の死多数。
2 7	1361. 08. 03	畿内, 土佐, 阿波	8.4	山城, 摂津より紀州熊野に至る諸堂倒壊破損多かつた。津波被害は摂津, 土佐, 阿波で多く, 阿波雪湊で流失1700戸, 流死60人余, 余震多数。
2 8	1403.	紀伊	7.0	津波を伴う, 被害不詳。1408年の地震と同じか?
2 9	1408. 01. 21	紀伊, 伊勢	7.0	紀伊, 伊勢, 鎌倉の海岸に津波があったようである。
3 0	1433. 11. 06	相模	7.1	(子の刻)鎌倉で社寺の被害多く, 余震夜明けまでに30余回, 20日間続く。
3 1	1498. 09. 20	東海道全般	8.6	(6月11日に京都, 三河, 熊野で強震を感じたが被害記録はない)紀伊から房総に至る海岸と甲斐で振動強く, 津波が, 紀伊から房総に至る海岸を襲い, 伊勢大湊で流失1000戸, 溺死5000人, 静岡県志太郡地方で流死26000人, 伊勢志摩で溺死10000人という。浜名湖海に通じた。
3 2	1520. 04. 04	紀伊	7.0	熊野, 那智の寺院破壊。津波あり民家流亡す。
3 3	1586. 01. 18	畿内, 東海, 東山, 北陸諸道	7.9	飛騨白川谷で山くずれ, 城, 民家300余戸倒壊埋没, 多数圧死, 大垣壊家多く, 尾張長嶋被害大。近江長浜で数十人圧死。阿波にも地震れ余震は年をこえてもやまなかった。
3 4	1596. 09. 04	豊後	6.9	7月3日より前震, 閏7月11日未刻より12日申刻までに地震多数, 夕刻大地震。高崎山などくずれ。大津波襲来, 別府湾岸に被害, 大分と付近の邑里皆流失。佐賀関で, 崖くずれ, 家屋倒れ, 60余町歩流没。瓜生島80%陥没, 死者708人。
3 5	1596. 09. 05	京都および畿内	7.0	三条より伏見の間被害最も多く, 伏見城天主大破, 約600人圧死。諸寺民家の倒壊死傷多く, 大阪, 神戸でも壊家多く, 堺で死者600人余。奈良, 比叡山被害なし, 余震翌年に及んだ。
3 6	1605. 02. 03	東海, 南海, 西海諸道	7.9	震害の記録としては, 淡路島, 安坂村, 千光寺で諸堂倒れ仏像が飛散る。津波は, 大吠岬より九州に至り, 八丈島で死57人, 三崎で溺死153人, 浜名湖付近の橋本で100戸中80戸流失し, 死多く, 紀州西岸村で1700戸中700戸流失。阿波の鞆浦で波高10丈, 死100人余, 突嶮で波高2丈, 死1500人余, 土佐甲浦で死350人余, 崎浜で50人余, 室戸岬付近で400人余, 九州では, 東日(大隅)より西日(薩摩)に大波が寄せ, 死者があった。慶長地震。
3 7	1611. 09. 27	会津	6.9	岩代四部, 若松付近で被害大。社寺民家倒壊大破20,000余戸。死3,700人。山くずれで会津川, 只見川塞ぎ, 南北60kmの範囲に多数の沼を作った。
3 8	1611. 12. 02	三陸および北海道東岸	8.1	三陸地方で強震。震害軽く, 津波の被害大。伊達領内で死1,783人。南部, 津軽で人馬死3,000余。三陸地方で家屋流失多く, 溺死者1,000人をこえた。岩沼付近でも家屋皆流失。北海道東部でも溺死者多かつた。
3 9	1614. 11. 26	越後高田	7.7	震域はきわめて広く, 会津, 小田原, 伊豆, 駿府, 伊那, 奈良, 大阪, 田辺, 松山などで大地震。津波あり, 死者が多かつた。
4 0	1616. 09. 09	仙台	7.0	仙台城破損, 津波あり, 江戸で有感。10月28日陸中に地震あり, 釜石, 大槌, 鶴住居に津流あり, 死多しというも1611年の誤りか?
4 1	1633. 03. 01	相模, 駿河, 伊豆	7.1	小田原城矢倉, 門塀などことごとく破壊, 民家倒壊多く, 圧死150人, 箱根で山くずれ, 熱海に津波襲来した。
4 2	1640. 07. 31	北海道噴火湾	-	駒ヶ岳噴火に伴い津波あり, 死者700人余(駒ヶ岳山麓)
4 3	1646. 06. 09	陸前	7.6	仙台城の石壁数十丈くずれ, 櫓3つ倒れる。白石城破損, 東照宮の垣破損。江戸でも強かつた。
4 4	1648. 06. 13	相模	7.1	小田原城破損, 壊家多く, 江戸にて屋根瓦落ち, 土蔵や棟塀半ばくずれ倒れる。

番号	発生年月日	地	域	M	被害概要
4 5	1649.03.17	伊予, 安芸		7.1	松山城城壁くずれ, 壊家少々, 宇和島城石垣 116間くずれ, 民家も破損。
4 6	1649.07.30	武蔵, 下野		7.1	江戸城石垣破損, 家屋破損し庄死多し。余震日々40~50回。
4 7	1662.06.16	山城, 大和, 河内, 和泉, 摂津, 丹後, 若狹, 近江, 美濃, 伊勢, 駿河, 三河, 信濃		7.6	比良岳付近の被害大。唐崎で田畑85町湖中に没し, 壊家1,570。大溝, 彦根で壊家各1,000余, 滋賀榎村死300人, 所川村300人中生残り37人。京都で町屋倒壊1,000, 死200人余。諸所の城破損。
4 8	1662.10.31	日向, 大隅		7.6	佐土原, 県, 秋月, 高鍋, 飫肥の諸城邑に被害。山くずれ, 津波を生じ, 壊家3,800, 死200人, 宮崎原沿岸7カ村周囲7里35町の地没して海となる。
4 9	1666.02.01	越後西部		6.4	積雪14~15尺。高田城破損。待屋敷700余つぶれる。夜火災, 死約1,500人。
5 0	1677.04.13	陸中南部		8.1	八戸に震害。余震多く, 津波により, 大錦浦, 宮古浦, 鉾ヶ崎浦被害。
5 1	1677.11.04	磐城, 常陸, 安房, 上総, 下総		7.4	上旬より地震多く, 常磐房総に津波。小名浜, 神白, 永崎にて溺死80人, 水戸領の壊家189, 溺死36人。房総で倒家220余, 死261, 岩沼領で流家490余, 死123人。津波尾張, 八丈にも及んだ。震央34.7 N. 141'Eか?
5 2	1678.10.02	陸中		7.4	花巻城石垣くずれ, 家屋損壊, 死1人, 白石城破損。江戸にて天水涌の水が溢れる。
5 3	1683.06.18	日光		7.3	卯刻から辰の刻まで地震7回。已下刻に六地震。石垣, 燈籠くずれ, 坊舎大小破れる。夜中までに地震数200回。江戸小被害。
5 4	1686.01.04	安芸		7.0	壊家多く死者あり, 備後三原城石垣ふくらみだす。長門にて城の石垣くずれる。伊子被害あり, 道後温泉黄濁。
5 5	1686.10.03	遠江, 河		7.0	新居の関所番所町家破壊し, 死者あり, 三河田原城矢倉屋敷等破損死者あり。
5 6	1694.06.19	能代地方		7.0	42カ村被害。秋田死394人, 壊家1,273, 焼失859, 破損447, 秋田, 弘前で被害あり。岩木山で岩石崩落, 硫黄平火を荣した。
5 7	1703.12.31	江戸, 関東諸国		8.2	武蔵, 相模, 安房, 上総で震度大。小田原領で出火し壊家8,007, 死2,291人, 江戸本所あたりで壊家が多かった。津波は下田から大吠岬に至る海岸に押し寄せ。震災地を通じ, 壊家20,162, 死約5,233人, 三浦房総両半島沿岸が最大5.5m 隆起。元祿地震。
5 8	1707.10.28	五畿七道		8.4	全体で壊家29,000, 死49,000人, 家屋倒壊範囲は, 東海道から中国, 九州に及ぶ。震害は, 東海道, 伊勢湾, 紀伊半島で最もひどく, 袋井全滅, 田辺で431戸中158戸つぶれ, 大阪壊家1061, 死734人, 徳島で630戸倒壊。津波は伊豆半島から九州に至る沿岸を襲い, 瀬戸内海にも達した。土佐で流家11,170, 死1844人。尾鷲で死1,000人余。波高は室戸, 種崎23m(溺死700余), 久礼25.7m。室戸で15m, 串本で1.2m, 御前崎で1~2m隆起し, 高知市の東20kmが最大2m沈下, 海水に浸された。遠州灘沖および紀伊半島沖の2つの地震とも考えられる。宝永地震[4]
5 9	1711.12.20	讃岐中部		6.7	被害は高松領のみ。壊家1,713, 死1,000人余, 津波が1日の内に100回押し寄せる。余震日に約30回。この地震, 「珍事録」にあるのみ。
6 0	1717.05.13	花巻		7.6	家屋破損多く, 地割れで泥噴出した。津軽で天水桶の水がこぼれ, 江戸でやや強かった。
6 1	1739.08.16	陸奥, 南部		7.1	高森で特に強く, 青森では蔵がつぶれた。八戸諸士町屋ともに, 被害が多かった。
6 2	1741.08.26	渡島西岸, 津軽, 佐渡		6.9	北海道西岸沖の大島上旬より活動し, 18日に津波があり, 北海道で流家729, 溺死1467人, 津軽で流家82, 流死8人, 佐渡でも流失家屋は少なくなかった。

番号	発生年月日	地	域	M	被害概要
6 3	1749. 05. 25	伊予宇和島		7.0	宇和島城楼破損, 他被害多かった。広島, 土佐, 鳥取で地震を感じた。
6 4	1763. 01. 29	陸奥, 八戸		7.4	1 1 月初めより地震あり, この日大地震家屋破損, 地割れがあった。函館で強く感じる。津波があった。余震が多かった。
6 5	1763. 03. 11	陸奥, 八戸		7.8	旧冬以来地震止まず。市中建物の倒壊が昨冬の倍あった。
6 6	1763. 03. 15	陸奥, 八戸		7.1	湊村津波に襲われ, 家屋人馬の流出が多く, 余震3〜4月まで止まなかった。
6 7	1766. 03. 08	津軽		6.9	弘前破破損, 各地に地割れ, 弘前領で, 寺社, 侍屋敷, 町屋倒壊約7,000, 焼失300余, 圧死1,027人, 焼死308人, 青森で全半壊547, 焼死175, 圧死101人, 焼死91人, 余震は翌日夜明けまでに約120回, 12月になってからも止まなかった。2月8日の余震が強く, 家屋が破損した。
6 8	1769. 08. 29	日向, 農後		7.4	大分城, 寺社町屋破損が多かった。高鍋, 延岡城破損, 宇和島で強かった。
6 9	1770. 05. 27	陸中, 盛岡		7.4	諸所破損多く, 人馬の死があった。江戸で有感。
7 0	1771. 04. 24	宮古, 八重山両群島		7.4	震害はなさそう。津波による被害は甚大だった。石垣島で最高2.8丈(一説によると約40m), 全体で家屋流出3,237, 溺死1,741人。八重山地震津波。
7 1	1772. 06. 03	陸前, 陸中		7.4	山田, 大槌, 沢内などで山くずれ, 人馬が死んだ。仙台領でも家屋壊敗多かった。
7 2	1782. 08. 23	相模, 武蔵		7.3	小田原城の櫓, 石垣破損。民家倒壊1,000戸。津波あり。箱根で山くずれ, 江戸で壊家死者があった。名古屋, 富山, 金沢, 飛騨でも地震を感じた。17日の余震により沼津付近に壊家があった。
7 3	1789. 05. 10	阿波		7.4	寺院, 町家土蔵に被害があった。山くずれがあった。室津でも石垣がくずれ地が裂けた。広島, 鳥取で有感。
7 4	1792. 05. 21	温泉岳		6.4	前年10月8日から地震鳴動頻発。正月18日より噴火が始まる。この日2回強い地震があり, 前山東部くずれ, 崩土0.48m。島原海に入り津波を起こした。津波は3回襲来し, 波高は30尺くらい。津波による死者全体で15,030人, 島原領内の本家流失のみで3,284戸。
7 5	1793. 02. 17	陸前, 陸中		7.1	仙台藩で1,060余戸壊れ, 死12人。津波があり, 両石で17戸流失, 死者12〜13人。波高は大船渡で9尺。
7 6	1804. 07. 10	羽前, 羽後		7.1	象潟地震。5月より鳴動があった。由利, 飽海, 田川郡で死者333人, 壊家5,500余り。象潟湖隆起し陸および沼になった。津波があった。6日朝の強い地震で酒田で壊家15。
7 7	1819. 08. 02	伊勢, 美濃, 近江		7.4	琵琶湖東岸から木曾川下流にかけて被害著しく, 近江八幡で壊家500, 安土付近で家の過半がつぶれ, 死傷者が多かった。津, 山田, 金沢, 教賀, 小浜, 奈良, 河内にも小被害。
7 8	1828. 12. 18	越後		6.9	激震地域は, 燕, 三条, 今町, 見付, 長岡, 寺坂を囲む範囲三条, 見付全壊全焼。全壊98,066, 半壊7,276, 焼失1,204, 死1,443人。
7 9	1830. 08. 19	京都および隣国		6.4	御所, 二条城, 諸寺破損, 京中の土蔵すべてこわれる。民家の倒壊0.1%以下という。京都で死280人, 龜山, 伏見, 大津, 伊丹などで被害。余震は翌年の1月までに600余回。
8 0	1833. 12. 07	羽前, 羽後, 越後, 佐渡		7.4	庄内地方の被害が最大。庄内で壊家475, 死42人, 津波が象潟から新潟に至る海岸と佐渡を襲い, 佐渡でも流失建物123。能登, 函館で地震を感じ, 津波があった。
8 1	1835. 07. 20	仙台		7.6	城の石垣がくずれ, 家土蔵に破損あり。羽前最上郡に大地震があった。江戸で有感。
8 2	1839. 05. 01	鉦路, 厚岸		7.3	国泰寺門前の石燈籠が倒れ, 戸障子が破損した。津軽で地震を強く感じた。
8 3	1843. 04. 25	鉦路, 根室		8.4	津波あり, 鉦路で高さ15尺の波が2回。鉦路, 根室両国で溺死46人, 家破壊75。江戸で有感。

番号	発生年月日	地 域	M	被 害 概 要
8 4	1847.05.08	北信および越後西部	7.4	善光寺地震、被害範囲は高田から松本、上田に至る南北40 km、東西4.0 kmの地域、壊家29,633、死8,600人余、断層を生じ、落差2.4 m。山くずれ松代領内で42,000、松本領で1,900ヶ所。犀川が堰止められ数十カ村が水没した。4月13日に決壊洪水を生じた。
8 5	1847.05.13	越後頸城郡	6.5	3月24日とこの日の地震で高田城下で全壊293、死二百数十人。直江津でも150軒つぶれた。
8 6	1854.07.09	伊賀、伊勢、大和および隣国	6.9	12日から前震があった。上野付近で壊家2,259、死593人、四日市で壊家342、死157人、奈良で全壊700~800、死284人、大和郡山で死110人余。被害範囲が広く、断層を生じ最大1.5 m沈下。
8 7	1854.12.23	東海、東山、南海諸道	8.4	家屋倒壊範囲は伊豆から伊勢に至る沿岸と、甲斐、信濃、近江、越前、加賀に及ぶ。津波は房総から土佐に至る沿岸を襲い、下田で875戸中841戸流失、碓泊中のロシア軍艦ディアナ号大破、27日沈没。波高は甲賀1.0 m、鳥羽5~6 m、錦浦6 m余、二木島9 m、尾鷲6 m。御前崎で80~100 cm隆起、浜名湖北端、渥美湾沿岸は沈下した。全体で倒壊流失8,300余、焼死600、圧死300人、流死300人。安政地震。
8 8	1854.12.24	畿内、東海、東山、北陸、南海、山陰、山陽道	8.4	前の地震の32時間後。被害は、近畿、中国、四国全部と九州、中部地方の一部に及び、津波は房総から九州に至る海岸を襲った。全壊20,000、半壊40,000、焼死15,000、死者約3,000人。波高は久礼1.61 m、種崎1.1 m、室戸3.3 m、安喰5~6 m。室戸、紀伊半島は南上がりの傾動を示し、室戸、串本で1.2 m隆起、甲浦、加太で約1 m沈下、没水。安政地震〔4〕
8 9	1854.12.26	伊予西部	7.0	伊予大洲、吉田で壊家あり、大分、小倉でも壊家があった。
9 0	1855.11.11	江戸	6.9	江戸とその東、径2.0 kmの範囲に被害大。山手で被害少なく、下町被害大。江戸の被害壊家焼死14,346、町人の死4,000人余。有感半径500 kmに達した。出火30余カ所、焼失面積2.3 km ² 。江戸地震。
9 1	1856.08.23	日高、胆振、渡島、津軽南部	7.8	19日より前震。被害はきわめて軽かった。有感範囲は江戸中仙道に及ぶ。津波が、北海道太平洋岸、三陸を襲う。波高、函館3 m、野田6 m、釜石3 m。南部領で家屋流失93、流死26人。
9 2	1858.04.09	飛騨、越前、越中、加賀	6.9	飛騨北部で全壊319、半壊385、死203人、高岡、石動、金沢などで壊家多数。山くずれが多く、成願寺川上流堰止められ、3月10日、4月26日に泥水を押し出し、金沢領で流失家屋1,612、溺死140人。
9 3	1872.03.14	石見、出雲	7.1	4~5日前から鳴り動き、3日前から前震を感じず。石見と出雲で全壊47,622、死5,522人。山くずれ6,567。おもに石見、浜田付近の海岸が最大2 m程度隆起または沈下した。浜田地震



日本海中部地震による液状化現象

