

3. 盛土構造物の振動台実験および地震被害事例の分析

3.1 はじめに

盛土構造物の地震による被害事例の研究は、道路盛土、河川堤防、鉄道盛土等に対し大地震の発生の際に関係研究機関により精力的に実施されてきた。研究の多くは、盛土構造物の地震時の被害を将来的に予測し軽減しようという目的のもとで、盛土の諸条件と破壊形態および被害の大きさとの関係を調べるというものであった。

既往の盛土構造物の地震被害事例の収集および分析についての文献を表 3.1-1 に示す。これらの文献による盛土構造物の地震被害事例についての分析の概要を以下にまとめる。

- ① 対象地震は、主に新潟地震から日本海中部地震まで。
- ② 対象盛土は、道路盛土、河川堤防、鉄道盛土、農業用溜め池。
- ③ 破壊形態は、図 3.1-1 のように、概ね以下の 4 通りに分類されている。

タイプ I : 法面が流出あるいは崩壊したもの。(法面崩壊と呼ぶ)

タイプ II : 盛土がすべり破壊したもので、盛土本体のみのすべり破壊と、基礎地盤を含むすべり破壊の 2 タイプある。(盛土すべり破壊と呼ぶ)

タイプ III : 基礎地盤が支持力を失い、盛土本体が原形をとどめないまでに分断されて破壊したもの。(盛土分断破壊と呼ぶ)

タイプ IV : 盛土が比較的形状を保ったまま沈下したもの。(盛土沈下と呼ぶ)

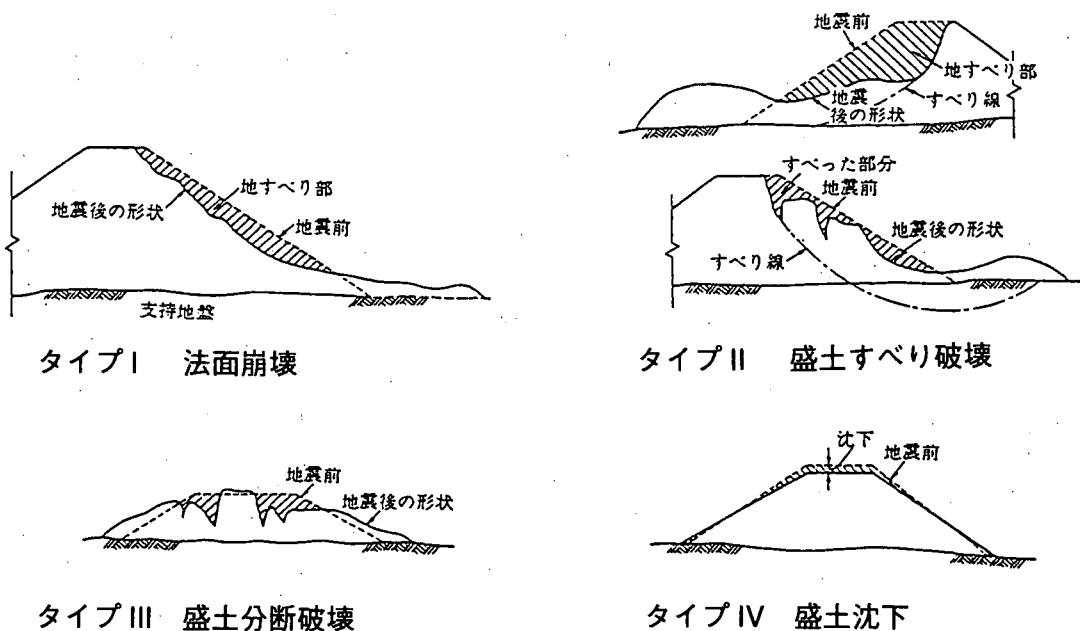


図 3.1-1 盛土の破壊形態の分類

表 3.1-1 盛土の地震被害事例分析の文献

番号	著者名	対象盛土	対象地震	文献名
1	佐々木	河川堤防	濃尾地震、関東地震、 福井地震、十勝沖地震、 新潟地震、 1968年十勝沖地震の6地震	河川堤防の地震被害、 土と基礎、No.28-8、1980.
2	佐々木、他	道路盛土 河川堤防 鉄道盛土	新潟地震、十勝沖地震、 大分地震、宮城県沖地震 の4地震	土構造物の地震被害事例、 建設省土木研究所、 土木研究所資料第1576号、1980
3	荒川・木全	道路盛土	新潟地震、十勝沖地震、 宮城県沖地震、 大分県中部地震、 伊豆半島沖地震、 伊豆半島近海地震の6地震	道路盛土の地震被害事例 およびその破壊形態に関する 調査、建設省土木研究所、 土木研究所資料第2000号、1983
4	那須、他	鉄道盛土 道路盛土 河川堤防	濃尾地震～宮城県沖地震 までの13地震	盛土の地震被害－文献調査－ 鉄道技術研究所速報、 No.A-86-33、1986.
5	那須	鉄道盛土 道路盛土 河川堤防 溜め池	新潟地震、十勝沖地震、 宮城県沖地震、 日本海中部地震の4地震	盛土の地震被害と地盤構造、 鉄道総研報告、Vol.3、No.8 1989
6	古賀、他	道路盛土 河川堤防 鉄道盛土 溜め池	新潟地震から日本海中部 地震、長野県西部地震まで の9地震	地震による盛土の被災・復旧 事例調査報告書、 建設省土木研究所、 土木研究所資料第2716号、1989
7	上部、他	河川堤防 鉄道盛土 道路盛土 溜め池	関東地震～日本海中部地震 までの14地震	盛土の地震被災事例に基づく 円形すべり安定解析手法の 検討、港湾技術研究所報告、 第30巻、第2号、1991.
8	谷・長谷川	溜め池	日本海中部地震	溜池の地震時安全性の評価法、 農業土木学会論文集、第152号 1991

- ④ 破壊形態を破壊メカニズムと明確に関係付け、破壊形態ごとに事例を挙げている文献は荒川・木全のみである。
- ⑤ 盛土の諸条件と被害の大きさの相関について、共通して指摘している点は以下の通り。
 - ・ 基礎地盤がN値の小さい砂質土の場合は、液状化に起因した大きな残留変位が発生する。
 - ・ 盛土高さが大きい方が被害が大きくなる傾向がある。
 - ・ 基盤の傾斜により大きな残留変位が発生する。

本章では、上記の既往の分析方法および分析結果を踏まえ、過去の地震による盛土の被害分析と模型による振動実験（IG場、遠心載荷試験）について、文献を中心にデータを収集・解析したものである。

地震被害分析については、地震の度に調査・分析が行われてきた被害の報告に基づき、被害のパターンを分析し、高地震力における盛土の耐震性について検討することが目的である

このため、盛土の被害形態、盛土の土質、地盤条件等についてデータがあるものに限定して分析した。十勝沖地震以降のデータについて、既発表の文献（22件、47事例）について主な項目ごとに整理を行った。この中では被害の形態に主に注目して残留沈下量との関係を検討した。検討事例が少ないために、必ずしも明確な結論を得るに至らなかったが、盛土の破壊形態、破壊原因との関連で残留沈下量がある程度決まってくることが明らかになった。換言すれば地盤の液状化、あるいはフローによる場合に大きな沈下が発生することになり、液状化を伴わないようなケースでは、まれな事例を除くと許容変位（沈下）内に納まるともいえる。この場合、許容変位量については設定が難しいが、たとえば貯水構造物では余裕高（Free bord）範囲内であれば貯水が堤体を越流することはないため、これも1つの許容変位量の目安になる。今後、レベル2地震動を考慮する場合には、各々盛土構造物ごとに適切で具体的な許容変位量の議論がなされる必要がある。

振動台模型実験については、①解析方法の検証、②破壊形態及び定性的変形量の把握、③補強工法の検証などの目的で行われた模型実験について、文献（26件、73事例）からデータを分析したものである。実験はIG場と遠心載荷試験に分けられるが、各々について、破壊形態を中心にパターン分けして、破壊原因、残留変位量について検討したものである。

以降、1)被災事例の解析、2)模型実験について、以下の2項目を実施する。

- ① 盛土の破壊メカニズムと破壊形態の関係を調べ、盛土の諸条件から破壊メカニズムおよび破壊形態を推定する資料を作成する。
- ② 盛土の諸条件から、盛土の破壊メカニズムおよび破壊形態に対して、発生する地震時残留変位量のオーダーを推定する資料を作成する。

なお、破壊形態としては、既往の分析に多く用いられている図3.1-1の4つのタイプを採用する。

3. 2 盛土構造物の振動台実験の分析

3. 2. 1 盛土の振動台実験の分析方法

盛土の振動台実験の分析にあたり、平成10年度に実施した文献調査をもとに、盛土の諸条件と破壊形態および変化量が明確に記載されているものについて分析した。以下、分析方法を示す。

- ① 今回の分析で特に重要である盛土の破壊形態及び残留変形量について文面より推察できるものを抽出した。
- ② 各々の論文は遠心場、1G場に分けて抽出し、破壊形態、破壊メカニズム、残留沈下量、基礎沈下、盛土土質、盛土高、基盤傾斜、最大加振加速度、基盤相対密度 D_r 、盛土相対密度 D_r 、盛土締固め度 D_c 、遠心加速度、変形率、地下水位、液状化層厚（基盤層厚）及び振動数を記入した。
この時、残留沈下量と加振加速度は実験のうち、最大値を示すものとし、変形率については残留沈下量／盛土高で定義している。また加振時間については特に考慮していない。
- ③ 遠心場における残留沈下量、盛土高はすべて実物スケールに換算した。

以上より、抽出された振動台事例は、遠心場38事例、1G場35事例の合計73事例であり、その概要は以下の通りである。

遠心場における、盛土及び基礎地盤の土質の組み合わせはS（砂質土）+S（砂質土）のものが38事例中27事例であり、1G場においては、全てがS+Sの組み合わせである。すなわち、破壊メカニズムについては、基盤の液状化（過剰間隙水圧の上昇）に起因するものがほとんどであり、基盤が粘性土のものは遠心場での11事例のみである。

- ・ 破壊形態については、3.1で述べたようにI～IVのタイプに分類した。本分析で用いた事例は遠心場において38事例中24事例、1G場において35事例中26事例がタイプIV（盛土沈下）であり、ほとんどを占めている。
- ・ 破壊メカニズムについては、前述したように基盤の液状化に起因するものが遠心場においては38事例中23事例、1G場においては35事例中35事例と最も多い。

今回の分析に用いた振動台実験事例の一覧表を表3.2.1-1（遠心場）、表3.2.1-2（1G場）に示す。

表 3.2.1-1(1) 振動台実験データシート (遠心場)

実験データ分析シート(遠心加速度場)

※遠心加速場での盛土高、残留沈下量はすべて実物スケールに換算

リスト No.	① 破壊 形態	② 破壊 メカニズム	③ 残留沈下量 (m)	④ 基礎 地盤	⑤ 盛土 土質	⑥ 盛土高 (m)	⑦ 基礎傾斜 (°)	⑧ 最大加振 加速度(cm/sec ²)	⑨ 基礎Dr (%)	⑩ 盛土Dr (%)	⑪ 盛土 締固め度(%)	⑫ 遠心加速度 (g)	⑬ 変形率 (⑩/⑧)	⑭ 地下水位 (m)	⑮ 液化化層厚 (基礎層厚)(m)	⑯ 振動数 (Hz)	備考
1	IV	A2	0.430	S	S	1.60	0	178	39.5		89.4	50.0	0.269	0.0	6.00	4.0	盛土土質: 豊浦砂(9)+カオリナイト(1)
1	IV	A2	0.240	S	S	1.60	0	187	56.2		86.7	50.0	0.150	0.0	6.00	4.0	盛土土質: 盛土土質: 豊浦砂(9)+カオリナイト(1)
1	IV	A2	0.100	S	S	1.60	0	156	93.2		88.3	50.0	0.063	0.0	6.00	4.0	盛土土質: 盛土土質: 豊浦砂(9)+カオリナイト(1)
5	III	B2	0.100	S	S	2.00	0	300				50.0	0.050	0.0	0.00	1.2	盛土土質: 珪砂+クレーサント
6	IV	A2	0.580	S	S	2.10	0	300	62.5			30.0	0.276	0.0	6.00	2.0	盛土土質: 盛土土質: 豊浦砂+カオリナイト
6	IV	A2	0.430	S	S	2.10	0	300				30.0	0.205	1.0	5.00	2.0	盛土土質: 盛土土質: 豊浦砂+カオリナイト
6	IV	A2	0.350	S	S	2.10	0	300				30.0	0.167	3.0	3.00	2.0	盛土土質: 盛土土質: 豊浦砂+カオリナイト
6	IV	A2	0.800	S	S	2.90	0	300				30.0	0.276	0.0	6.00	2.0	盛土土質: 盛土土質: 豊浦砂+カオリナイト
12	IV	A2	0.180	S	S	1.50	0	196	50.0			50.0	0.120	0.0	7.50	2.0	破壊形態不明 盛土土質:珪砂
18	I	A2	0.750	S	S	5.00	0	505				37.5	0.150	0.0	7.00	2.0	
18	I	A2	0.500	S	S	5.00	0	167				50.0	0.100	0.0	7.00	2.0	
18	I	A2	0.500	S	S	5.00	0	273				50.0	0.100	0.0	7.00		美地震波
74	不明	B2	0.190	C	S	1.30	0	100				50.0	0.146	0.0	0.00	1.4	盛土土質:シルコン砂 i=20
74	不明	B2	0.330	C	S	1.50	0	200				50.0	0.220	0.0	0.00	2.0	盛土土質:シルコン砂 i=20
74	不明	B2	0.550	C	S	1.50	0	100				50.0	0.367	0.0	0.00	1.4	盛土土質:シルコン砂 i=350
74	不明	B2	0.420	C	S	1.50	0	100				50.0	0.280	0.0	0.00	1.4	盛土土質:シルコン砂 i=20
74	不明	B2	0.090	C	S	1.50	0	50				50.0	0.060	0.0	0.00	0.9	盛土土質:シルコン砂 i=35
80	IV	A2	0.001	S	S	2.10	0	39	47.0			30.0	0.000	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント
80	IV	A2	0.012	S	S	2.10	0	82	44.0			30.0	0.006	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント
80	IV	A2	0.108	S	S	2.10	0	121	58.0			30.0	0.051	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント
80	IV	A2	0.150	S	S	2.10	0	180	52.0			30.0	0.071	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント
80	IV	A2	0.183	S	S	2.10	0	239	41.0			30.0	0.087	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント
80	IV	A2	0.237	S	S	2.10	0	294	60.0			30.0	0.113	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント
82	IV	A2	0.180	S	S	2.10	0	137	52.0			50.0	0.086	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント
82	IV	A2	0.140	S	S	2.10	0	114	60.0			50.0	0.067	0.0	5.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂 盛土土質:豊浦砂+クレーサント

表 3.2.1-1(2) 振動台実験データシート (遠心場)

実験データ分析シート(遠心加速度場)

※遠心加速度場での盛土高、残留沈下量はすべて実物スケールに換算

① リスト No	② 破壊 メカニズム	③ 残留沈下量 (m)	④ 基礎 地盤	⑤ 盛土 土質	⑥ 盛土高 (m)	⑦ 基礎傾斜 (°)	⑧ 最大加振 加速度(cm/sec ²)	⑨ 基礎Dr (%)	⑩ 盛土Dr (%)	⑪ 盛土 締固め度(%)	⑫ 遠心加速度 (g)	⑬ 変形率 (⑪/⑩)	⑭ 地下水位 (m)	⑮ 液化化層厚 (基礎層厚)(m)	⑯ 振動数 (Hz)	備考
94	IV	A2	S	S	2.10	0	186	22.0			30.0	0.219	0.0	5.70	2.0	5波
94	IV	A2	S	S	2.10	0	213	11.0			30.0	0.154	0.0	5.70	2.0	
94	IV	A2	S	S	2.10	0	157	8.0			30.0	0.169	0.0	5.70	2.0	
94	IV	A2	S	S	2.10	0	105	10.0			30.0	0.054	0.0	5.70	2.0	
103	III	B2	C	S	5.00	0	294				50.0	0.180	0.0	0.00	1.0	盛土土質:カオリン+砂
109	IV	B2	C	C	3.00	0	196				50.0	0.100	—	0.00	1.0	基礎地盤:カオリン 盛土土質:関東ローム
109	IV	B2	C	C	3.00	45	196				50.0	0.025	—	0.00	1.0	クワン-軟 基礎地盤:カオリン 盛土土質:関東ローム
109	IV	B2	C	C	3.00	0	196				50.0	0.042	—	0.00	1.0	クワン-硬 基礎地盤:カオリン 盛土土質:関東ローム
109	IV	B2	C	C	3.00	45	196				50.0	0.008	—	0.00	1.0	クワン-硬 基礎地盤:カオリン 盛土土質:関東ローム
121	III	B2	C	S	0.75	0	350				50.0	0.533	0.0	0.00	1.2	盛土土質:珪砂+クワイヤント
123	IV	C	S	S	5.00	0	370			D _c =90	50.0	0.028	—	0.00	2.0	基礎地盤:砂+カオリン 盛土土質:砂+カオリン
123	IV	C	S	S	3.00	0	370			D _c =90	50.0	0.033	—	0.00	2.0	基礎地盤:砂+カオリン 盛土土質:砂+カオリン
123	IV	C	S	S	7.00	0	370			D _c =90	50.0	0.016	—	0.00	2.0	基礎地盤:砂+カオリン 盛土土質:砂+カオリン

表 3.2.1-2(1) 振動台実験データシート (1G場)

実験データ分析シート(1G場)

※遠心加速場での盛土高、残留沈下量はすべて実物スケールに換算

① リスト No.	② 破壊 メカニズム	③ 残留沈下量 (m)	④ 基礎 地盤	⑤ 盛土 土質	⑥ 盛土高 (m)	⑦ 基礎傾斜 (°)	⑧ 最大加振 加速度(cm/sec ²)	⑨ 基礎Dr (%)	⑩ 盛土Dr (%)	⑪ 盛土 締固め度(%)	⑫ 遠心加速度 (g)	⑬ 変形率 (⑪/⑧)	⑭ 地下水位 (m)	⑮ 液状化層厚 (基礎層厚)(m)	⑯ 振動数 (Hz)	備考
3	A2	0.087	S	S	0.15	0	229	36.0			1.0	0.580	0.0	0.30	3.0	破壊形態不明
7	A2	0.160	S	S	1.00	0	300	55.0			1.0	0.160	0.0	4.50	5.0	破壊形態不明 盛土土質:相馬砂
14	A2	0.060	S	S	0.20	0	300	60.0			1.0	0.300	0.0	0.50	5.0	破壊形態不明
43	A2	0.340	S	S	0.80	0	250	56.4	21.9		1.0	0.425	0.0	1.00	5.0	基礎地盤:浅間山砂 盛土土質:しらす
44	A2	0.200	S	S	0.60	0	201	36.0	40.0		1.0	0.333	0.0	1.00	5.0	基礎地盤:浅間山砂 盛土土質:浅間山砂
44	A2	0.230	S	S	0.60	0	186	19.0	40.0		1.0	0.383	0.0	1.00	5.0	基礎地盤:浅間山砂 盛土土質:浅間山砂
44	A2	0.060	S	S	0.60	0	341	62.0	40.0		1.0	0.100	0.0	1.00	5.0	基礎地盤:浅間山砂 盛土土質:浅間山砂
44	—	0.000	S	S	0.60	0	682	88.0	62.0		1.0	0.000	0.0	0.00	5.0	基礎地盤:浅間山砂 盛土土質:浅間山砂
45	A2	0.250	S	S	0.60	0	180	31.0	21.0		1.0	0.417	0.0	1.00	5.0	
45	A2	0.150	S	S	0.60	0	186	45.0	43.0		1.0	0.250	0.0	1.00	5.0	
45	A2	0.160	S	S	0.60	0	171	60.0	30.0		1.0	0.267	0.0	1.00	5.0	
45	A2	0.180	S	S	0.60	0	168	36.0	28.0		1.0	0.300	0.0	1.00	5.0	
46	A2	0.023	S	S	0.15	0	204	60.0	28.0		1.0	0.153	0.0	0.15	5.0	
46	A2	0.026	S	S	0.15	0	197	68.0	25.0		1.0	0.173	0.0	0.20	5.0	
46	A2	0.043	S	S	0.15	0	163	80.0	36.0		1.0	0.287	0.0	0.30	5.0	
46	A2	0.043	S	S	0.15	0	159	61.0	36.0		1.0	0.287	0.0	0.40	5.0	
46	A2	0.037	S	S	0.15	0	161	64.0	40.0		1.0	0.247	0.0	0.50	5.0	
46	A2	0.030	S	S	0.15	0	195	66.0	25.0		1.0	0.200	0.0	0.60	5.0	
48	A2	0.062	S	S	0.20	0	409	79.0			1.0	0.310	0.0	0.40	2.5	基礎地盤:豊浦砂 [-8
48	A2	0.051	S	S	0.20	0	542	73.0			1.0	0.255	0.0	0.40	10.0	基礎地盤:豊浦砂 [-2
48	A2	0.051	S	S	0.20	0	358	76.0			1.0	0.255	0.0	0.40	5.0	基礎地盤:豊浦砂 [-4
48	A2	0.017	S	S	0.20	0	991	79.0			1.0	0.085	0.0	0.40	5.0	基礎地盤:豊浦砂 [-5
48	A2	0.017	S	S	0.20	0	832	73.0			1.0	0.085	0.0	0.40	5.0	基礎地盤:豊浦砂 [-5
48	A2	0.017	S	S	0.20	0	774	68.0			1.0	0.085	0.0	0.40	2.5	基礎地盤:豊浦砂 [-10

表 3.2.1-2(2) 振動台実験データシート (1G場)

実験データ分析シート(1G場)

※遠心加速場での盛土高、残留沈下量はすべて実物スケールに換算

リスト No.	① 破壊 形態	② 破壊 メカニズム	③ 残留沈下量 (m)	④ 基礎 地盤	⑤ 盛土 土質	⑥ 盛土高 (m)	⑦ 基礎傾斜 (°)	⑧ 最大加振 加速度(cm/sec ²)	⑨ 基礎Dr (%)	⑩ 盛土Dr (%)	⑪ 盛土 締固め度(%)	⑫ 遠心加速度 (g)	⑬ 変形率 (⑩/⑧)	⑭ 地下水位 (m)	⑮ 液化化層厚 (基礎層厚)(m)	⑯ 振動数 (Hz)	備考
62	IV	A2	0.062	S	S	0.20	0	405	79.0			1.0	0.310	0.0	0.40	2.5	
62	IV	A2	0.052	S	S	0.20	0	540	73.0			1.0	0.260	0.0	0.40	10.0	規則液
62	IV	A2	0.051	S	S	0.20	0	350	76.0			1.0	0.255	0.0	0.40	5.0	
62	IV	A2	0.017	S	S	0.20	0	980	79.0			1.0	0.085	0.0	0.40	5.0	
62	IV	A2	0.018	S	S	0.20	0	830	73.0			1.0	0.090	0.0	0.40	5.0	不規則液
62	IV	A2	0.018	S	S	0.20	0	770	68.0			1.0	0.090	0.0	0.40	2.5	
65	不明	B1	0.014	S	S	1.00	0	700		50.0		1.0	0.014	—	0.00	4.0	基礎地盤:砂質シルト
93	IV	A2	0.013	S	S	0.29	0	158	65.0			1.0	0.045	0.0	0.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂
93	IV	A2	0.002	S	S	0.29	0	179	90.0			1.0	0.007	0.0	0.70	2.0	基礎地盤:豊浦砂
110	IV	A2	0.072	S	S	0.15	0	228	49.0			1.0	0.480	0.0	0.40	3.0	
112	IV	A2	0.030	S	S	0.15	0	150	50.0			1.0	0.200	0.0	0.44	3.0	

3.2.2 盛土の振動台実験の分析結果

盛土の振動台実験事例の分析は、前述した16パラメータのうち、残留沈下量と破壊メカニズム、盛土基礎地盤、盛土高さ、基盤の最大加速度に絞り、それぞれの相関関係を調べる。基盤の傾斜については事例が少ないこと、盛土の土質については明確に残留沈下量との関係が把握できなかったことから割愛した。また、盛土の地震時残留変位量として残留沈下量（振動台実験では天端沈下等）を選定したのは、4つの破壊形態のいずれに対しても発生が予想されることである。

(1) 破壊メカニズムと残留沈下量の関係

抽出した振動台実験事例より、盛土の破壊メカニズムとして以下の7種類を設定する。

- 1 : A 1 盛土本体の過剰間隙水圧上昇(液状化)に伴うすべり破壊
- 2 : A 2 基礎地盤の過剰間隙水圧上昇(液状化)に伴う盛土のすべり破壊
- 3 : B 1 盛土本体のすべり破壊(過剰間隙水圧上昇はからまない)
- 4 : B 2 基礎地盤のすべり破壊(過剰間隙水圧上昇はからまない)
- 5 : C 盛土本体または基礎地盤のせん断振動に伴う累積沈下
- 6 : D 1 傾斜基盤上の盛土で過剰間隙水圧上昇に伴う基盤との境界でのすべり破壊
- 7 : D 2 傾斜基盤上の盛土で基盤との境界でのすべり破壊(過剰間隙水圧上昇はからまない)

破壊形態ごとの破壊メカニズムについて、残留沈下量と変形率との関係をそれぞれ図3.2.2-1、3.2.2-2に示す。

- ・ 遠心場においてはほとんどが基礎地盤の液状化に起因するものであり、液状化に起因しないものに比べて残留沈下量は大きい。また、破壊形態はタイプⅣ（盛土沈下）のものが多く、変形率で見るとタイプⅢ（盛土分断破壊）の方が大きい。
- ・ 1G場においてはすべてが基礎地盤の液状化に起因するものである。また破壊形態はタイプⅢ盛土分断破壊とⅣ盛土沈下のものである。
- ・ 振動台実験の場合において、破壊メカニズムは基礎地盤が砂質土の場合は概ねA2（基礎地盤の過剰間隙水圧に伴う盛土のすべり破壊）、粘性土の場合は概ねB2（基礎地盤のすべり破壊）といえる。

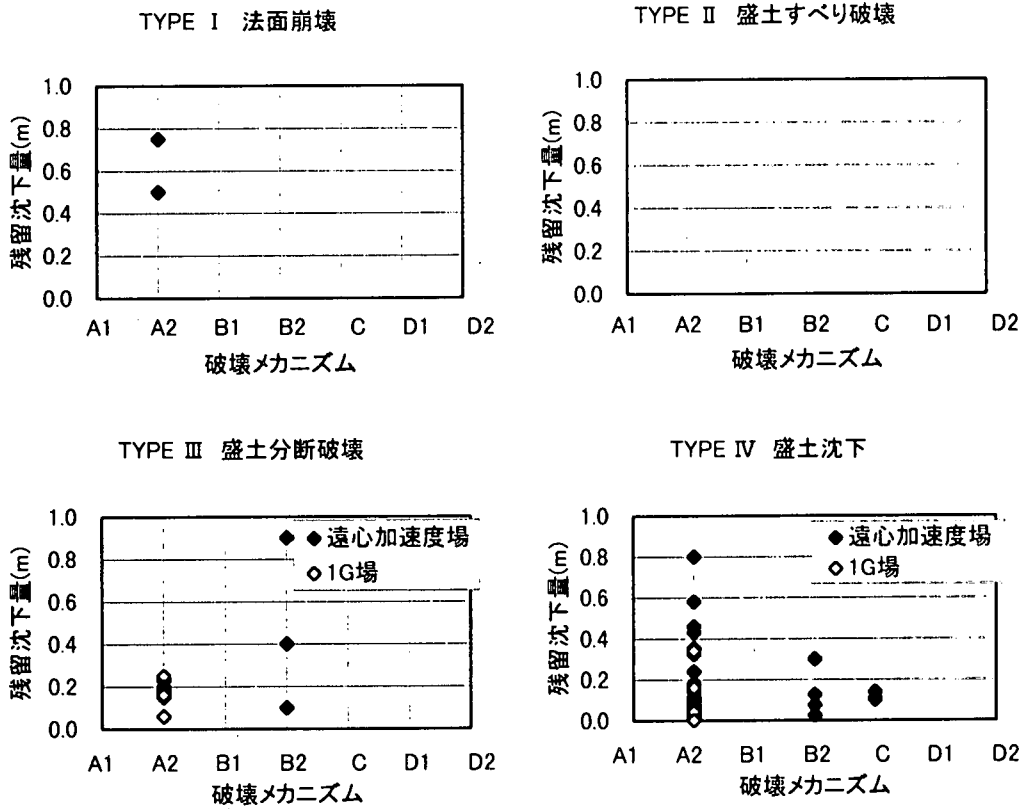


図 3.2.2-1 破壊形態ごとの破壊メカニズム～残留沈下量関係

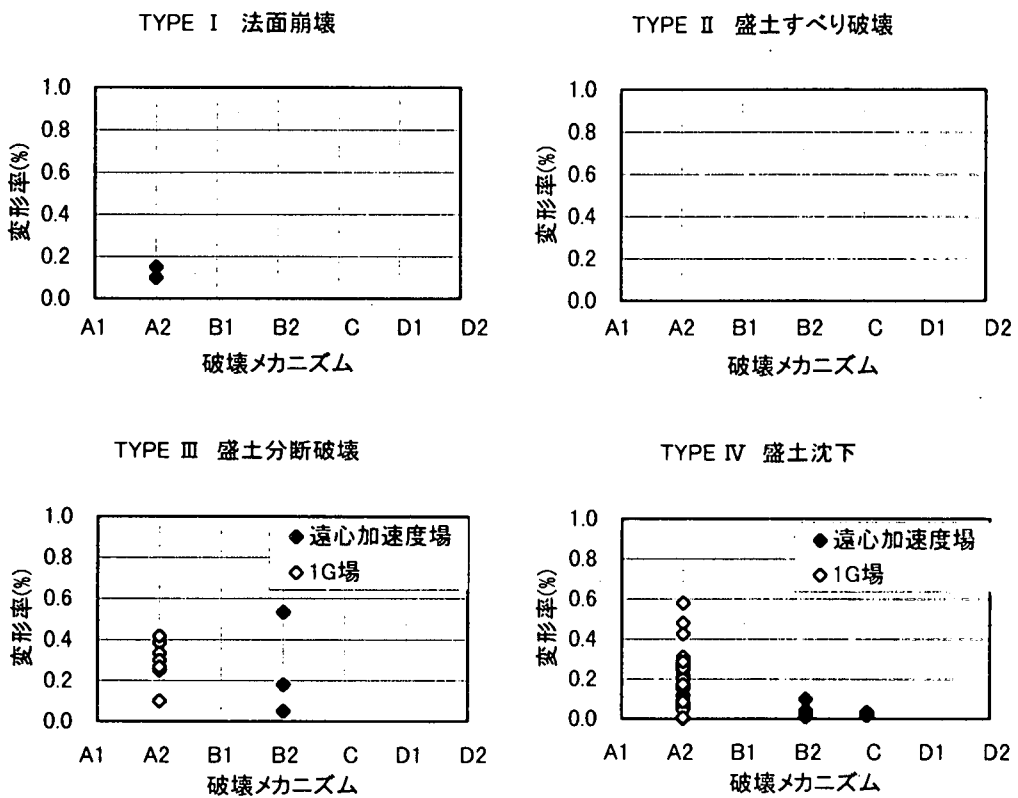


図 3.2.2-2 破壊形態ごとの破壊メカニズム～変形率関係

(2) 盛土基礎地盤の土質と残留沈下量の関係

基礎地盤の土質は以下の4種類に分類する。

- 1 : S 砂質土
- 2 : C 粘性土
- 3 : SC 砂質土と粘性土の互層
- 4 : R 岩

盛土基礎地盤と残留沈下量および変形率との関係においてそれぞれ図 3.2.2-3、3.2.2-4 に示す。

- ・ 遠心場においては、基礎地盤が砂質土のものと粘性土のものがあるが、タイプIV（盛土沈下）では、変形率で見ると砂質土のものの方が大きく、その値は最大0.3程度である。
- ・ 1G場においては、基礎地盤が砂質土のもののみであり、変形率は最大0.6にも及ぶ。

(3) 盛土高さとの残留沈下量の関係

盛土高さについて、残留沈下量と変形率との関係をそれぞれ図 3.2.2-5、3.2.2-6 に示す。

- ・ 遠心場においては、タイプIV（盛土沈下）において基礎地盤が粘性土のもの（盛土高5m、7m）を除けば、最大の残留沈下量は盛土高とともに大きくなる傾向にあるが、すなわち変形率で見ればほぼ一定である。
- ・ 1G場においてもタイプIV盛土沈下において多少、遠心場のものと同様の傾向がみられる。

(4) 基盤の最大加速度との残留沈下量の関係

両者の関係図については、基盤の相対密度 D_r が60%未満と以上のものを同図上に遠心場と1G場とに分けてそれぞれ図 3.2.2-7、3.2.2-8（遠心場）、図 3.2.2-9、3.2.2-10（1G場）にプロットした。

- ・ 遠心場のタイプIV盛土沈下において、加振加速度が大きくなると、残留沈下量の最大値は大きくなる傾向にある。変形率の最大値で見ると、基盤の相対密度が小さいほどその値は大きくなる傾向も明瞭となる。
- ・ 1G場においても、 $600\text{cm}/\text{sec}^2$ 以上のデータを除けば遠心場のデータと同様の傾向がある。 $600\text{cm}/\text{sec}^2$ 以上で加振したデータは基盤の相対密度が80%程度の密な地盤であり、この場合の変形率は0.1以下と極めて小さなものとなる。

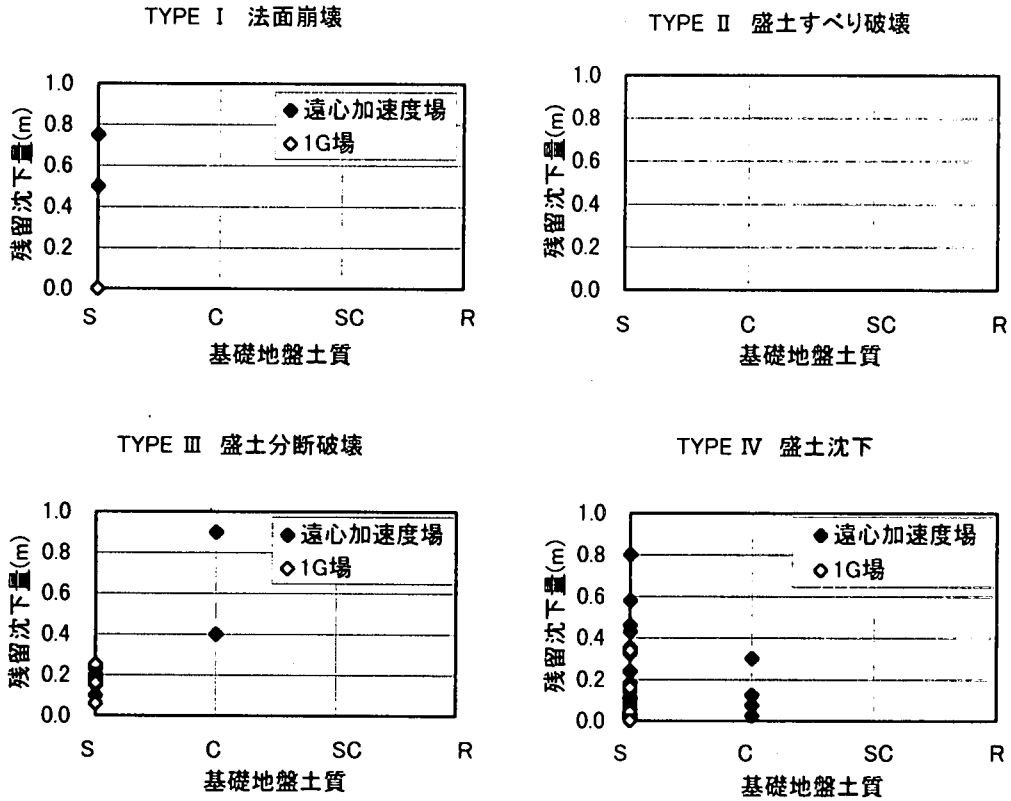


図 3.2.2-3 破壊形態ごとの基礎地盤土質～残留沈下量関係

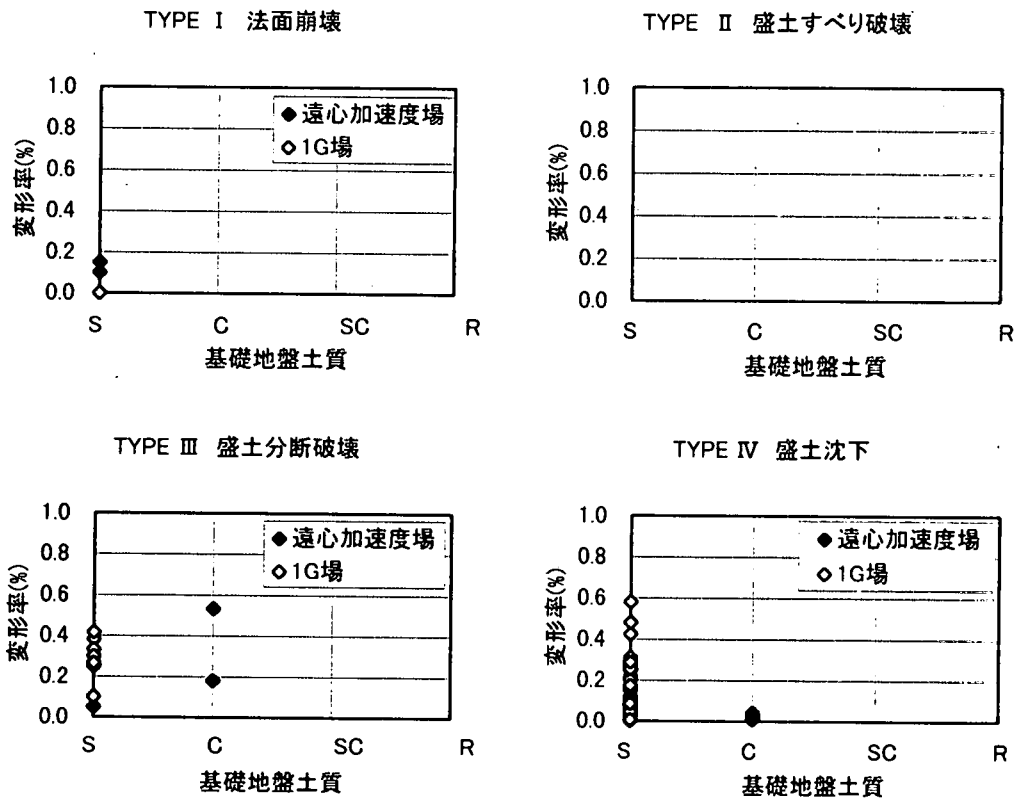


図 3.2.2-4 破壊形態ごとの基礎地盤土質～変形率関係

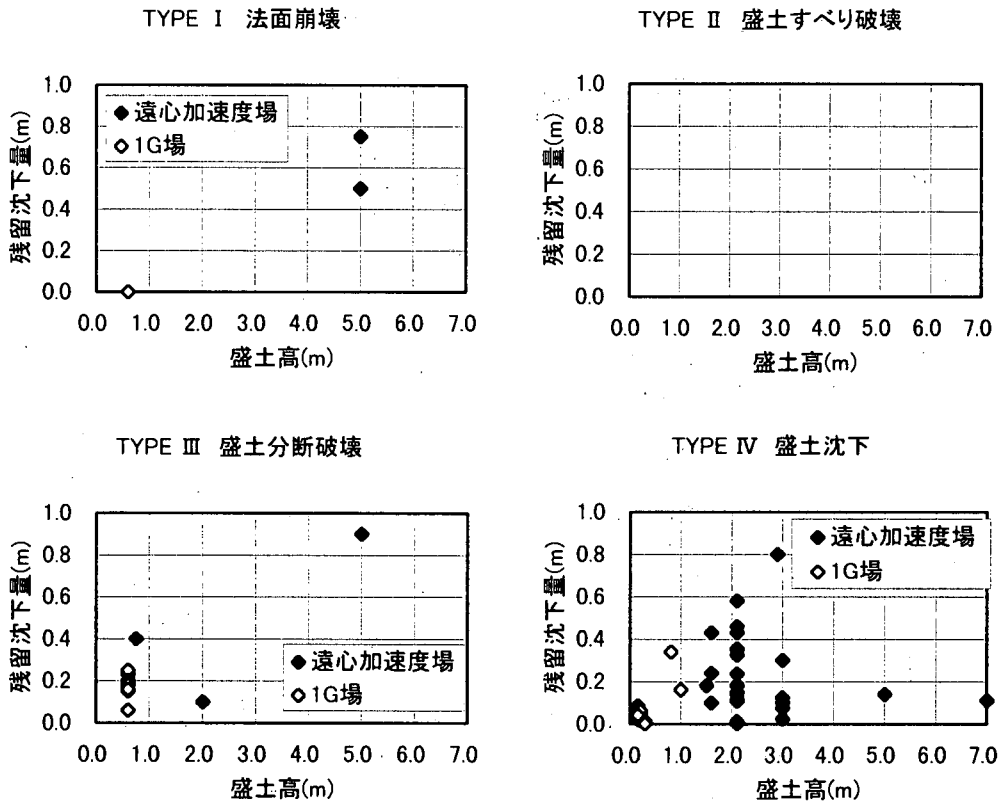


図 3.2.2-5 破壊形態ごとの盛土高～残留沈下量関係

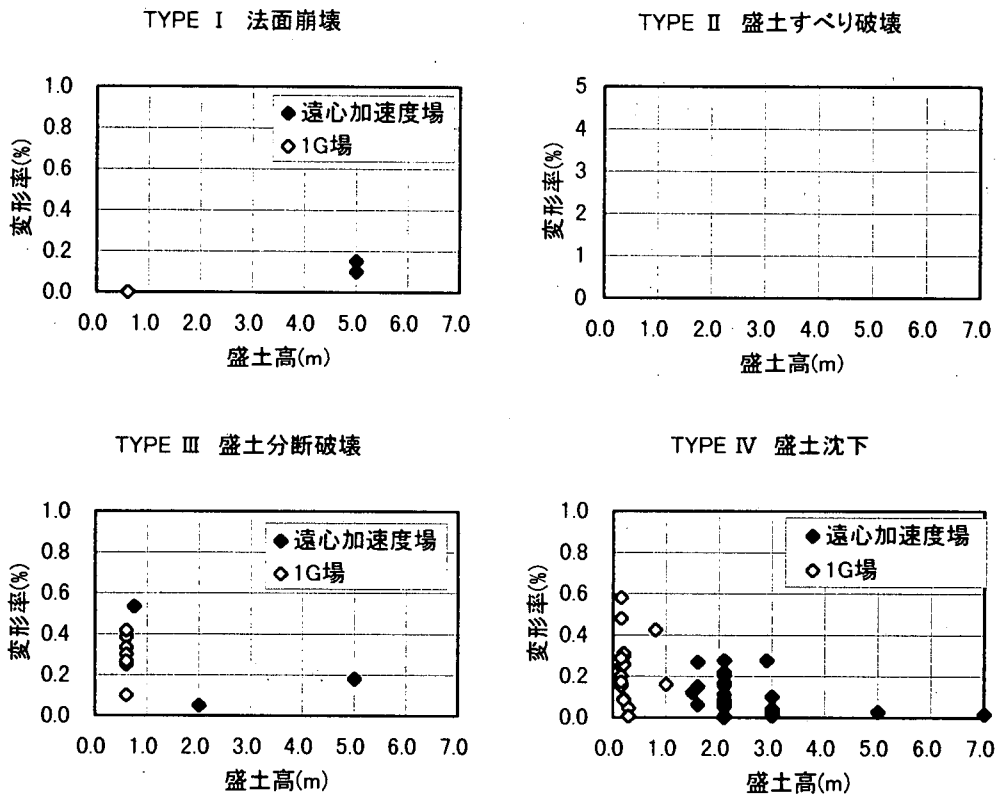


図 3.2.2-6 破壊形態ごとの盛土高～変形率関係

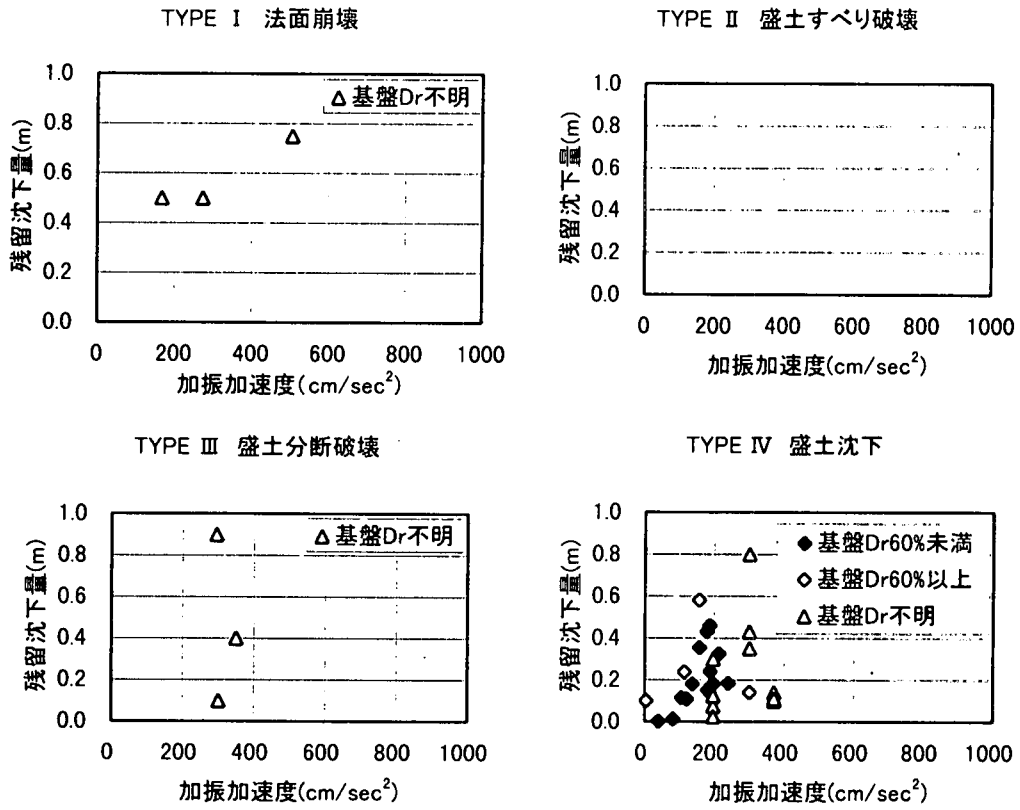


図 3.2.2-7 破壊形態ごとの基盤の最大加速度～残留沈下量関係（遠心加速度場）

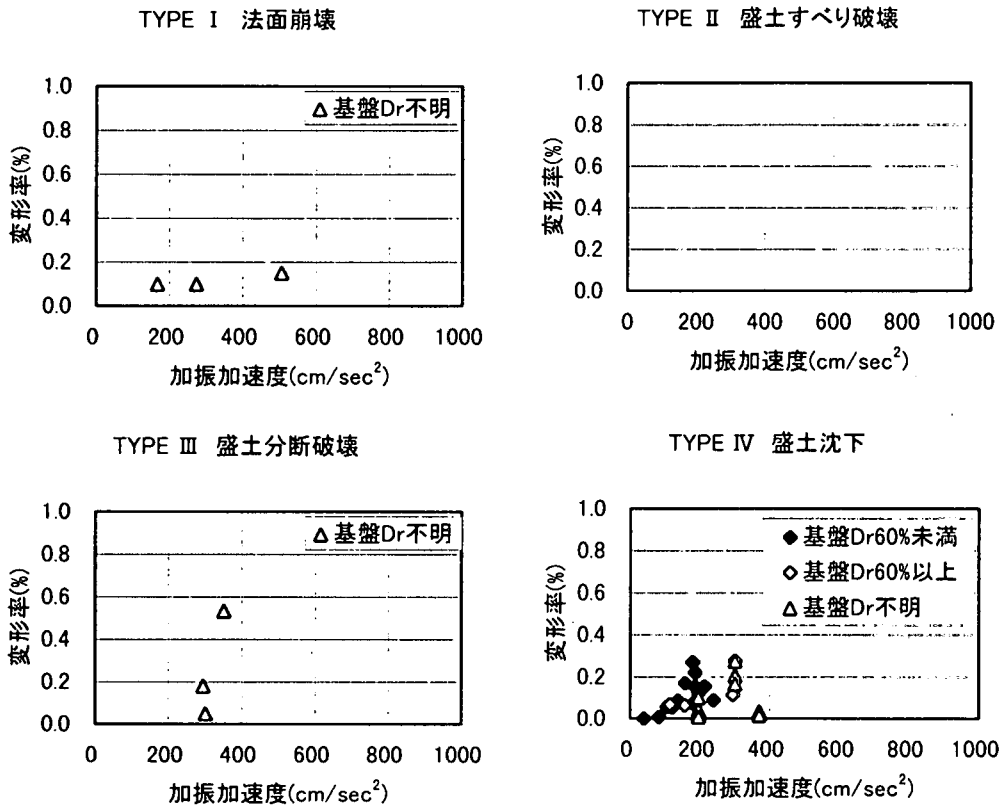


図 3.2.2-8 破壊形態ごとの基盤の最大加速度～変形率関係（遠心加速度場）

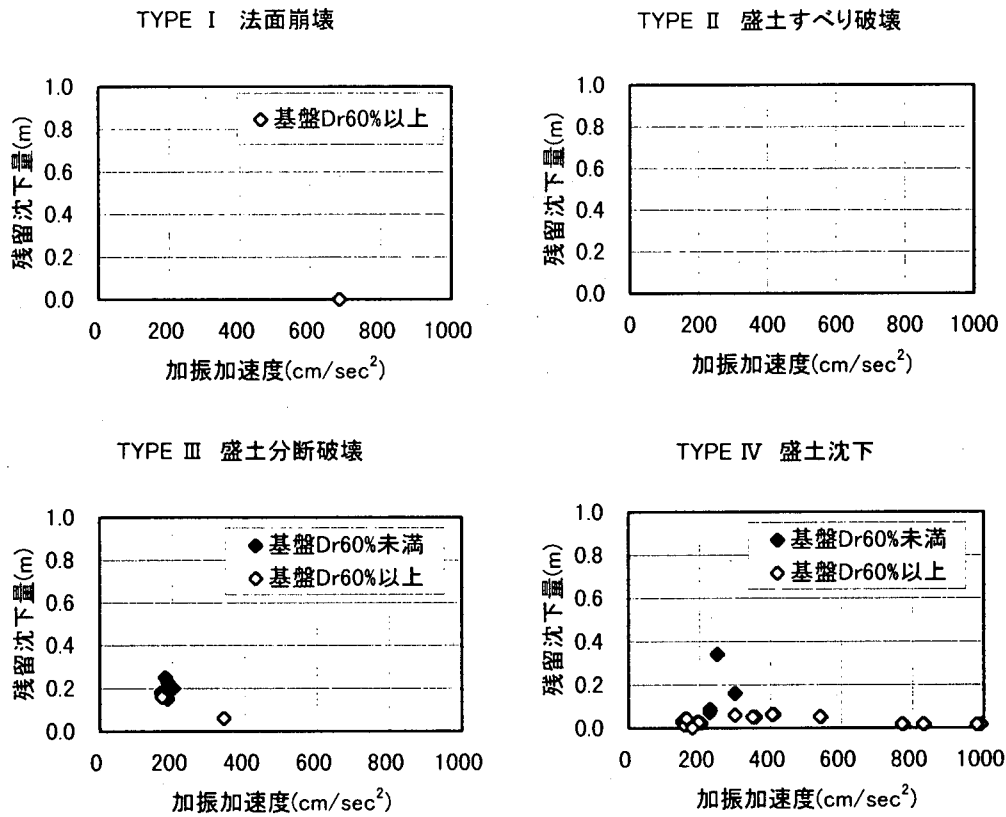


図 3.2.2-9 破壊形態ごとの基礎の最大加速度～残留沈下量関係（1 G場）

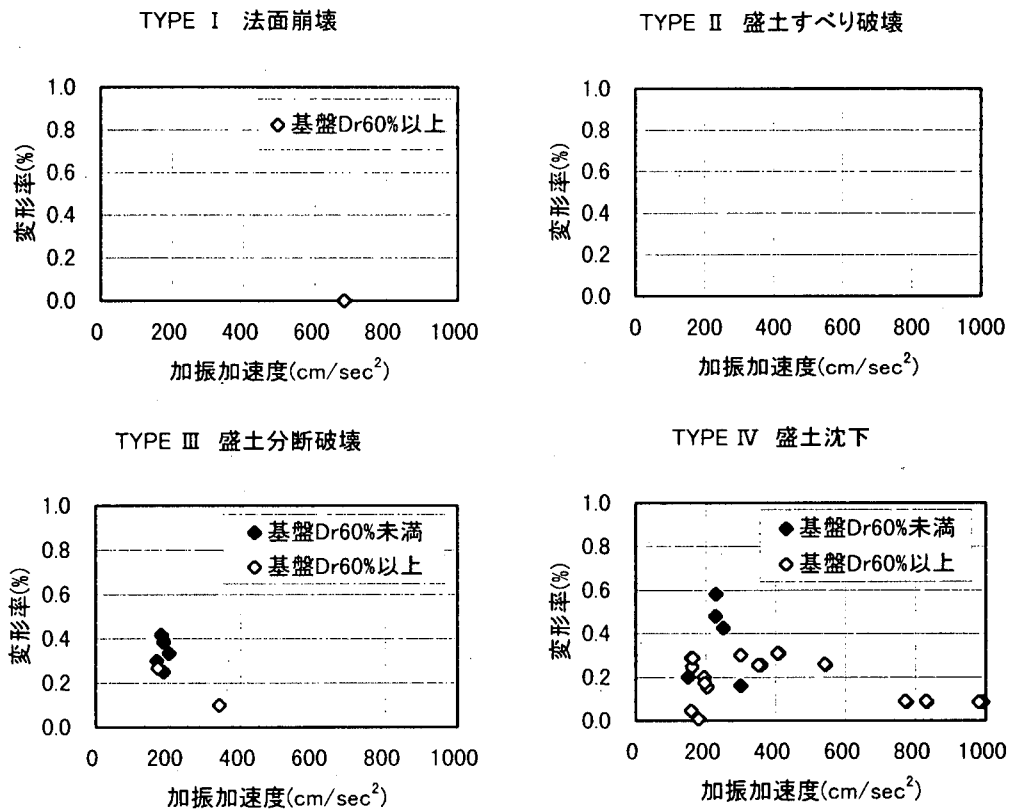


図 3.2.2-10 破壊形態ごとの基礎の最大加速度～変形率関係（1 G場）

参考文献

(遠心加速場)

- 1) 川井田実、殿垣内正人、別井智行(道路公団)、大保直人、吉迫和生(鹿島建設): 盛土の液状化対策として用いる締切り鋼矢板の挙動に関する振動台実験、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.226-227、1997
- 2) 島津多賀夫、松尾修、田本修一(建設省土木研究所): 粘土地盤上の盛土の動的遠心模型実験、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.266-267、1996
- 3) 田本修一、島津多賀夫、松尾修(建設省土木研究所): 地盤条件の違いによる液状化性地盤盛土の耐震性の検討(その2)、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.268-269、1996
- 4) 布川修、廣岡明彦、桑野二郎、竹村次朗(東京工業大学)、龍田昌毅、原田典佳(新日本製鉄): 砂地盤上の既往盛土の液状化対策に関する研究、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.546-547、1995
- 5) 永吉貴行(五洋建設)、風間基樹(東北大学 工)、稲富隆昌、飯塚栄寿(運輸省港湾技術研究所): 飽和砂地盤上の斜面の安定に関する遠心力振動実験、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.522-523、1994
- 6) 廣岡明彦(東工大)、宮本憲一、竹村次朗、木村孟、中瀬明男: 軟弱粘性土地盤上の盛土の地震時挙動、第23回地盤工学研究発表会講演集1988、P.911
- 7) 古関潤一(建・土研)、江頭毅、森下義、古賀泰之: 砂地盤上盛土の動的遠心模型実験、第24回地盤工学研究発表会講演集1989、P.1021
- 8) 古関潤一(建・土研)、高橋晃浩、古賀泰之: 砂地盤上盛土の動的遠心模型実験(その2)、第25回地盤工学研究発表会講演集1990、P.973
- 9) 高橋晃浩(建・土研)、古関潤一、古賀泰之、山根行弘: 砂地盤上盛土の動的遠心模型実験(その4)、第28回地盤工学研究発表会講演集1993、P.1163
- 10) 末政直晃(武蔵工大)、片田敏行、豊沢康男、堀井宣幸: 堤体盛土の動的遠心模型実験、第29回地盤工学研究発表会講演集1994、P.959
- 11) 田中秀樹(武蔵工大)、清水道浩、末政直晃、堀井宣幸、片田敏行: 軟弱粘土地盤上の遠心模型実験、第30回地盤工学研究発表会講演集1995、P.1069
- 12) 田本修一(建・土研)、松尾修、島津多賀夫、横川青司: 粘土地盤上の盛土の動的遠心模型実験(その2)、第32回地盤工学研究発表会講演集1997、P.1021
- 13) 林宏親(北海道開発局)、西川純一、谷口啓二郎: 盛土の地震時挙動に関する遠心模型実験、第32回地盤工学研究発表会講演集1997、P.1025

(1G場)

- 14) 田中宏征、喜田浩(住友金属工業)、松尾修、堤達也(土木研): 盛土の液状化対策として用いる締切り鋼矢板の挙動に関する振動台実験、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.270-271、1996
- 15) 村松伴博、林健太郎(五洋建設)、北條一男、藤井斉昭(中央大学): 遠心模型実験による固化工法を対象とした改良効果の検討、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.276-277、1996

- 16) 島津多賀夫、松尾修（建設省土木研究所）、田中紀和（大林組技術研究所）、鈴木吉夫（竹中技術研究所）、奥村良介（竹中土木）、桑原正彦（不動建設）：深層混合処理工法により補強した砂地盤盛土の耐震設計法に関する検討（その2）、土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部、pp.570-571、1995
- 17) 佐々木、松尾：しらす堤防の耐震補強対策に関する模型振動実験、土木技術資料 25-9、1983
- 18) 荒川、木全、近藤：砂質地盤上の盛土の地震時破壊特性に関する模型振動実験、土木技術資料 25-11、1983
- 19) 荒川、松本、近藤：盛土の破壊特性に与える盛土条件及び再液状化の影響に関する模型振動実験、土木技術資料 27-1、1985
- 20) 佐々木、松本、近藤：盛土の破壊特性に与える液状化層厚の影響に関する模型振動実験、土木技術資料 28-4、1986
- 21) 古賀、松尾、武藤、唐沢：液状化性地盤上の盛土の地震挙動に関する模型振動実験、土木技術資料 30-8、1988
- 22) 武藤正人（飛島建設）、古賀泰之、松尾修、唐沢安秋：盛土の地震時被災度に及ぼす入力地震動特性の影響に関する模型振動実験、第22回地盤工学研究発表会講演集 1987、P.801
- 23) 伊藤良弘（建・土研）、古賀泰之、島津多賀夫：傾斜地盤上の補強盛土の耐震性について、第22回地盤工学研究発表会講演集 1987、P.811
- 24) 阿部博（都・土研）、草野郁：盛土を含む砂地盤の液状化対策振動台実験、第27回地盤工学研究発表会講演集 1992、P.1135
- 25) 田中宏征（住友金属工業）、喜田浩：鋼矢板による盛土の液状化対策に関する振動台実験、第30回地盤工学研究発表会講演集 1995、P.1077
- 26) 野村博之（東京電機大）、安田進、喜田浩、田中宏征、加藤元：液状化による盛土の沈下に対する排水機能付き矢板の対策効果、第30回地盤工学研究発表会講演集 1995、P.1083

3.3 盛土構造物の地震被害事例の分析

3.3.1 盛土の地震被害事例の分析方法

盛土の地震被害事例を既往の文献を調査し、分析する。分析の方法は以下の通り。

- ① 対象を人工的な盛土構造物とする。具体的には、道路盛土、河川堤防、鉄道盛土、農業用溜め池、宅地造成とする。自然斜面、護岸構造物は除く。
- ② 破壊形態と破壊メカニズムの関係を明らかにするため、盛土条件、基礎地盤条件および破壊形態の明解な事例を抽出する。ここに、盛土条件としては、盛土高さ、盛土形状、盛土の材質、地盤定数（N値など）、基礎地盤条件としては、基礎地盤の土質、基盤傾斜角度、地盤定数（N値など）、地下水位、を必要最低限の情報とする。
- ③ 破壊メカニズムに言及しているか、あるいはシミュレーション解析等により破壊メカニズムを明らかにしている事例を抽出する。
- ④ 破壊形態ごとの地震時残留沈下量の最大値を抑えるため、破壊形態ごとに代表的でかつ大被害の事例を対象とする。

結果として、抽出された地震被害事例は計 47 例であった。内訳を以下に示す。

- ・ 地震は、最近の代表的な 8 地震で、十勝沖地震 10 例、宮城県沖地震 8 例、日本海中部地震 8 例、釧路沖地震 6 例、北海道南西沖地震 6 例、北海道東方沖地震 2 例、三陸はるか沖地震 1 例、兵庫県南部地震 6 例。
- ・ 破壊形態は、タイプ I 法面崩壊 5 例、タイプ II 盛土すべり破壊 23 例、タイプ III 盛土分断破壊 12 例、タイプ IV 盛土沈下 7 例。
ここに、破壊形態としてタイプ I およびタイプ IV の事例が少ない理由としては、実際の被害としてはタイプ I、タイプ IV とも多いが、被災程度が比較的軽いため、詳細に調査検討されている事例が少ないことによる。
- ・ 盛土の種類としては、道路盛土 13 例、河川堤防 10 例、鉄道盛土 13 例、農業用溜め池 5 例、宅地造成 5 例、その他 1 例。

地震被害事例 47 例の分析表を表 3.3.1-1～3.3.1-6 に示す。

表 3.3.1-1 地震被害事例分析表 (タイプ I 法面崩壊)

破壊形態		I								
地震名	地点名	盛土種別	基礎地盤条件			盛土条件		残留沈下量 (cm)	震央距離 (km)	破壊原因
			土質	平均N値	平均傾斜 (度)	土質	盛土高さ (m)			
十勝沖地震	1 国道4号線 十和田市伝法寺付近	道路盛土	砂と粘土の互層	3	—	火山灰	9.0	100	191	盛土表層部における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊
	2 東北本線 尻内・陸奥市川間 648km250~350m	鉄道盛土	洪積砂とビート	5	17	砂質土	15.0	500以上	178	盛土表層部における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊
宮城県沖地震	3 牡鹿半島公園線 コバルトライン 1.98km	道路盛土	泥岩・シルト岩	—	25	不明	25.6	300	68	山岳盛土 急傾斜地盤上の盛土
	4 国道4号 仙台バイパス 355.3km~355.5km	道路盛土	粘土	2	—	砂質土	6.5	30	110	盛土表層部のすべり破壊
北海道 南西沖 地震	5 道道奥尻島線 米岡地区	道路盛土	粘性土	12	—	粘性土	4.0	50	66	盛土表層部のすべり破壊

表 3.3.1-2 地震被害事例分析表 (タイプ II 盛土すべり破壊(1))

破壊形態		II・II'								
地震名	地点名	盛土種別	基礎地盤条件			盛土条件		残留沈下量 (cm)	震央距離 (km)	破壊原因
			土質	平均N値	平均傾斜 (度)	土質	盛土高さ (m)			
十勝沖地震	1 国道4号線 青森県三戸郡 三戸町目時	道路盛土	粘性土	3	18	火山灰	3.8	250	196	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊
	2 東北本線 尻内・陸奥市川間 649km540m	鉄道盛土	洪積砂とビート	5	14	砂質土	7.0	400以上	178	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊
	3 東北本線 小川原駅構内	鉄道盛土	ビート	5	—	火山灰	10.0	600以上	191	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊
宮城県沖地震	4 名取川 左岸2.8km 種次第一堤防地区	河川堤防	砂	5	—	粘性土	5.0	120	105	基礎地盤が過剰間隙水圧上昇に伴い支持力を失い、盛土が基礎地盤も含みすべり破壊
	5 牡鹿半島公園線 コバルトライン 23.96km	道路盛土	泥岩・シルト岩	—	32	不明	34.8	200	59	山岳盛土 急傾斜地盤上の盛土
	6 仙台市 緑ヶ丘3丁目	宅地造成	凝灰質砂岩 (風化層)	20	25~35	礫混じり砂質粘土	20以上	100以上	110	盛土の締固めが不十分だったため盛土と傾斜地盤の間ですべり破壊
	7 白石市寿山第四団地 南側盛土斜面	宅地造成	凝灰岩	50以上	10	火山灰	盛土35.0 擁壁5.5	1400	125	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴う傾斜地盤上のすべり破壊
日本海中部地震	8 奥羽本線 森岳・北金岡間 351km940m	鉄道盛土	粘性土 (腐植土)	5	10	粘性土	5.0	100	95	傾斜基礎地盤上に地下水が溜まり、盛土底面の軟弱粘性土層がすべり破壊
	9 奥羽本線 森岳・北金岡間 347km300m	鉄道盛土	砂質土	4	凹状	砂質土	6.0	300	95	浸透水により盛土下部が飽和し、過剰間隙水圧上昇に伴い盛土内ですべり破壊
	10 奥羽本線 鯉川・鹿渡間 334km650m	鉄道盛土	腐植土	1	22	中砂・シルト質砂	4.0	250	85	基礎地盤が軟弱かつ基礎が傾斜していることによるすべり破壊
	11 秋田県能代市 一の沢ため池	農業用溜め池	砂質土 (砂混りシルト)	3	0	シルト	5.5	150	60	盛土直下のサトウペが液状化して支持力を失い、盛土が基礎地盤も含みすべり破壊
	12 秋田県若美町の木 うの木1号ため池	農業用溜め池	粘土質シルト 細砂	1 9	0	細砂	5.0	120	66	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊

表 3.3.1-3 地震被害事例分析表 (タイプ II 盛土すべり破壊(2))

破壊形態		II・II'									
地震名	地点名	盛土種別	基礎地盤条件			盛土条件		残留沈下量 (cm)	震央距離 (km)	破壊原因	
			土質	平均N値	平均傾斜 (度)	土質	盛土高さ (m)				
釧路沖地震	13 国道272号線 柳茶町東阿歴内地区	道路盛土	砂質土 (軽石混じり 火山砂)	8~25	10	砂質土 (軽石混じり 火山砂)	8.0	300	31	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴う傾斜切土上のすべり破壊	
	14 国道44号線 厚岸町糸魚沢 60.9km	道路盛土	段丘堆積物 ~ 崖錘 堆積物	20~50	35	細粒分 混じり砂	10.0	500	49	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴う傾斜切土上のすべり破壊	
	15 釧路川 遊水池右岸築堤 KP11.65	河川堤防	砂と粘土の 互層	砂7 粘土5	-	砂質土	6.0	150	24	盛土下部が液状化して、盛土上部がすべり破壊	
	16 釧路管内 柳茶町茅沼地区 シラルトロエト口	宅地造成	シルト (火山灰性シルト・砂質シルト)	4	11	シルト (火山灰性シルト・砂質シルト)	10.0	500	36	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴う傾斜基盤上のすべり破壊	
	17 緑ヶ岡6丁目	宅地造成	砂と腐植土の 互層	5	-	火山灰	11.0	500	18	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊	
北海道 南西沖地震	18 函館本線 渡島大野~仁山間	鉄道盛土	砂質土 (腐植シルト・腐植質細砂)	3	ほぼ水平	粘性土 (礫混じり)	4.0	200	139	盛土本体の強度不足によるすべり破壊	
	19 尻別川 右岸初田築堤 長名地先KP5.0	河川堤防	砂質土 (河成堆積層)	5	-	砂質土	5.0	50	96	基礎地盤が過剰間隙水圧上昇に伴い支持力を失い、盛土が基礎地盤も含みすべり破壊	
	20 国道5号線 長万部町知来地区	道路盛土	礫混り粘土 ~ 泥炭混り 粘土	礫混粘土7 粘土2	礫混粘土 40	不明	7.0	250	91	傾斜基盤上の地下水位以下の軟弱粘性土層がすべり破壊	
北海道 東方沖地震	21 花咲線 別当賀~落石間	鉄道盛土	砂質土 (シル質砂)	3	11	不明	3.8	60	177	傾斜基盤上の薄い軟弱粘性土層がすべり破壊	
三陸 はるか沖地震	22 霞森県三沢市 山中ため池	農業用 溜め池	砂質土	5	0	砂質土	5.0	80	225	盛土本体および基礎地盤が液状化し、盛土がすべり破壊	
兵庫県南部地震	23 神戸市東灘区 住吉山手6丁目	宅地造成	旧表土:粘土 基盤:花崗岩	粘土5	17	砂質土 (まさ土)	5.0	40	24	傾斜基盤上の薄い軟弱粘性土層がすべり破壊	

表 3.3.1-4 地震被害事例分析表 (タイプ III 盛土分断破壊(1))

破壊形態		III									
地震名	地点名	盛土種別	基礎地盤条件			盛土条件		残留沈下量 (cm)	震央距離 (km)	破壊原因	
			土質	平均N値	平均傾斜 (度)	土質	盛土高さ (m)				
十勝沖地震	1 県道 天間林村甲田沼付近	道路盛土	シルト	2	-	砂	2.5	120	193	盛土本体における過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊	
	2 東北本線 乙供・石文間 683km960m	鉄道盛土	ビート	5	0	火山灰	4.5	300	204	盛土が傾方向に引張破壊し、盛土底部で過剰間隙水圧上昇に伴い傾方向にすべり破壊	
宮城県沖地震	3 吉田川 右岸13.4~18.2km 山崎堤防地区	河川堤防	砂と粘土の 互層	2	凹凸	砂	5.0	300	102	基礎地盤が過剰間隙水圧上昇に伴い支持力を失い、盛土が基礎地盤に沈下	
	4 北上川 左岸5.2~9.8km 橋浦第四堤防地区	河川堤防	砂	4	-	粘性土・砂	5.0	50	80	基礎地盤が過剰間隙水圧上昇に伴い支持力を失い、盛土が基礎地盤に沈下	
日本海中部地震	5 八郎潟 中央干拓堤防 正面堤防FD6+900	干拓堤防	砂	11	0	砂	3.2	110	91	基礎地盤が過剰間隙水圧上昇に伴い支持力を失い、盛土が基礎地盤に沈下	
	6 国道7号 能代南バイパス 325km400付近	道路盛土	砂	15	-	砂	2.5	140	83	基礎地盤が過剰間隙水圧上昇に伴い支持力を失い、盛土が基礎地盤に沈下	
	7 霞森県木造町 勘助ため池	農業用 溜め池	細砂	5	-	細砂	5.4	150	118	盛土本体および基礎地盤が液状化し、盛土が分断破壊	

表 3.3.1-5 地震被害事例分析表 (タイプ III 盛土分断破壊(2))

破壊形態		III									
地震名	地点名	盛土種別	基礎地盤条件			盛土条件		残留沈下量 (cm)	震央距離 (km)	破壊原因	
			土質	平均N値	平均傾斜 (度)	土質	盛土高さ (m)				
釧路沖地震	8 釧路川 遊水池左岸築堤 KP9.85	河川堤防	砂質土	15	-	砂質土	6.0	200	24	盛土下部が液状化して、盛土上部が沈下、分断し、横方向にすべり破壊	
北海道 南西沖 地震	9 後志利川 兜野築堤 0.865km	河川堤防	砂質土	10	0	砂質土	6.0	200	62	基礎地盤が液状化して、盛土が分断破壊	
兵庫県南部 地震	10 淀川 左岸0.1~2.4km 西島地区	河川堤防	砂質土	5	-	シルト質砂	盛土6.0 ハット 8.1	300	41	基礎地盤が液状化して支持力を失い盛土が基礎地盤に沈下	
											11 藻川 右岸0.4km+70m
	12 兵庫県一宮町 井出の尻ため池	農業用 溜め池	砂質土 (礫混り砂)	4	0	砂質土 (シル質砂)	6.0	150	28	盛土本体および基礎地盤が液状化して、盛土が分断破壊	

表 3.3.1-6 地震被害事例分析表 (タイプ IV 盛土沈下)

破壊形態		IV									
地震名	地点名	盛土種別	基礎地盤条件			盛土条件		残留沈下量 (cm)	震央距離 (km)	破壊原因	
			土質	平均N値	平均傾斜 (度)	土質	盛土高さ (m)				
十勝沖 地震	1 東北本線 三沢・小川原間 669km250m	鉄道盛土	ビート,砂, シルトの 互層	ビート3 砂10 シルト1	-	砂質土	3.0	20	191	基礎地盤の軟弱粘性土層における非排水条件下での繰り返しせん断に伴う累積沈下	
											2 東北本線 小川原・上北町間 673km420m
	3 県道 上北町新館付近	道路盛土	砂と粘土の 互層	砂3 粘土2	-	ローム	3.0	50	198	粘性土材料の盛土本体が非排水条件下での繰り返しせん断に伴い累積沈下	
北海道 南西沖 地震	4 国道5号線 長万部町豊津	道路盛土	砂	5	-	砂質土	1.7	49	97	基礎地盤が液状化して支持力を失い盛土が基礎地盤に沈下	
北海道 東方沖 地震	5 釧路本線 茅沼~五十石間	鉄道盛土	泥炭層	(1)	-	不明	4.0	120	249	基礎地盤の軟弱層が非排水条件下での繰り返しせん断に伴い累積沈下	
兵庫県南部 地震	6 淀川 左岸3.4km 高見地区	河川堤防	砂質土	浅部4 深部12	-	砂質土	盛土8.2 ハット 10.0	30	41	基礎地盤が液状化して支持力を失い盛土が基礎地盤に沈下	
											7 山陽線 新長田駅周辺

3.3.2 盛土の地震被害事例の分析結果

盛土の地震被害事例の分析は、パラメータとして、破壊形態、破壊メカニズム、地震時残留沈下量、基礎地盤の土質、盛土の土質、盛土高さ、基盤の平均傾斜角度、地震力、を用い、破壊形態ごとに、各パラメータと残留沈下量および変形率との相関関係を調べる。ここに、変形率とは、残留沈下量から盛土高さの影響を除くために残留沈下量を盛土高さで除して基準化したものである。また、盛土の地震時残留変位量として残留沈下量を選定したのは、亀裂幅あるいは段差量と異なり、4つの破壊形態のいずれに対しても発生が予想されることによる。

(1) 破壊メカニズムと残留沈下量の関係

抽出した盛土の地震被害事例より、盛土の破壊メカニズムとして以下の7種類を設定する。

- A1 : 盛土本体の過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊
- A2 : 基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊
- B1 : 盛土本体のすべり破壊（過剰間隙水圧上昇は関係しない）
- B2 : 基礎地盤のすべり破壊（過剰間隙水圧上昇は関係しない）
- C : 盛土本体または基礎地盤のせん断震動に伴う累積沈下
- D1 : 傾斜基盤上の盛土で過剰間隙水圧上昇に伴う基盤との境界でのすべり破壊
- D2 : 傾斜基盤上の盛土で基盤との境界でのすべり破壊（過剰間隙水圧上昇は関係しない）

ここに、破壊メカニズム D1 および D2 において、傾斜基盤上の盛土としては、山岳盛土、傾斜した切土上の盛土、盛土直下の硬質地盤が傾斜していて盛土の破壊に直接影響していると推定される場合、を含めた。

破壊メカニズムと残留沈下量との関係を図 3.3.2-1 に、変形率との関係を図 3.3.2-2 に示す。図より以下に考察する。なお、考察では、タイプ I 法面崩壊とタイプ II 盛土すべり破壊とは同じタイプの破壊形態であり、盛土の締固めの状態および地震力の違いにより発生形態が異なったものと考え、ひとくくりで検討した。

1) 破壊メカニズムと破壊形態の関係について

- ① 盛土本体の過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊 A1 は、タイプ I 法面崩壊、タイプ II 盛土すべり破壊、タイプ III 盛土分断破壊のいずれかの破壊形態を引き起こす。いずれの破壊形態となるかは、盛土の締固め度、地震力が関係しているものと推定される。
- ② 基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊 A2 は、タイプ II 盛土すべり破壊、タイプ III 盛土分断破壊、タイプ IV 盛土沈下のいずれかの破壊形態を引き起こす。いずれの破壊形態となるかは、盛土の締固め度、基礎地盤の液状化層厚、地震力が関係しているものと推定される。
- ③ 盛土本体のすべり破壊（過剰間隙水圧上昇は関係しない） B1 は、タイプ I 法面崩壊、タイプ II 盛土すべり破壊のいずれかの破壊形態を引き起こす。いずれの破壊形態となるかは、盛土の締固め度、地震力が関係しているものと推定される。

- | | | | |
|---|-------------------------|---|----------------------------|
| ○ | A1 盛土内水圧上昇によるすべり破壊 | × | C セン断震動による累積沈下 |
| □ | A2 基礎地盤内水圧上昇によるすべり破壊 | △ | D1 傾斜基盤上盛土の水圧上昇によるすべり破壊 |
| ● | B1 盛土すべり破壊 (水圧上昇無関係) | ▲ | D2 傾斜基盤上盛土のすべり破壊 (水圧上昇無関係) |
| ■ | B2 基礎地盤のすべり破壊 (水圧上昇無関係) | | |

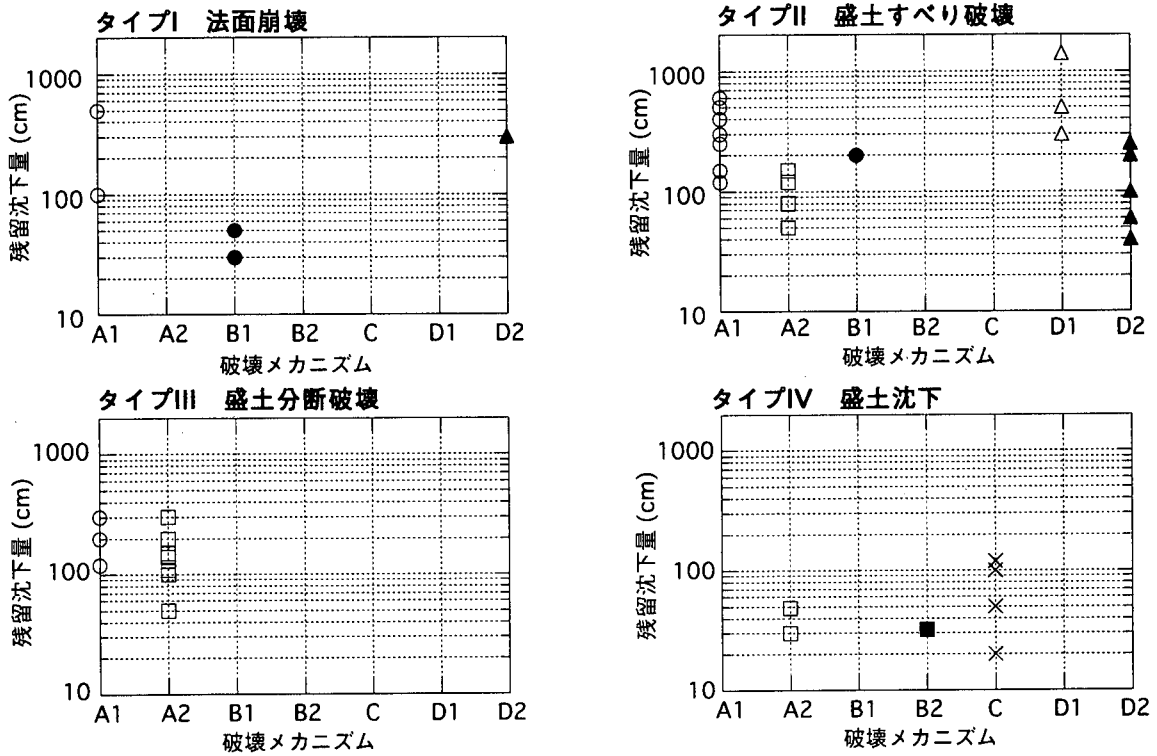


図 3.3.2-1 破壊メカニズム～残留沈下量

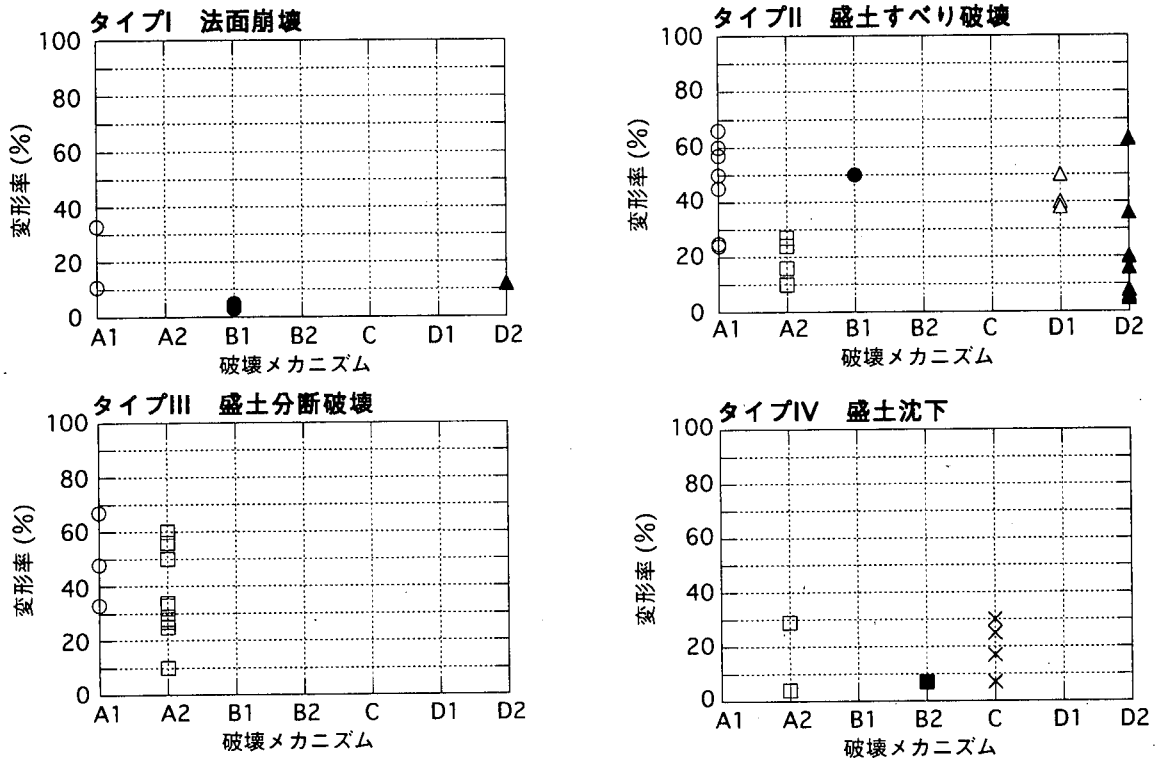


図 3.3.2-2 破壊メカニズム～変形率

- ④ 基礎地盤のすべり破壊（過剰間隙水圧上昇は関係しない）B2は、本調査では、タイプIV盛土沈下のみに1例だけ見られた。この事例は、地震1カ月前の盛土嵩上げ時に基礎地盤ですべり破壊を起しており、地震時に同じすべり面においてすべりが発生したものと推定されている。
- ⑤ 盛土本体または基礎地盤のせん断震動に伴う累積沈下Cは、タイプIV盛土沈下の破壊形態のみを引き起こす。
- ⑥ 傾斜基盤上の盛土で過剰間隙水圧上昇（液状化）に伴う基盤との境界でのすべり破壊D1、および過剰間隙水圧上昇は関係しない基盤との境界でのすべり破壊D2は、どちらもタイプII盛土すべり破壊の破壊形態を引き起こす。
- 2) 破壊メカニズムと最大残留沈下量あるいは最大変形率の関係
- ① タイプI法面崩壊とタイプII盛土すべり破壊について
- ・ 過剰間隙水圧上昇の最大残留沈下量に対する影響を見ると、盛土本体のすべり破壊A1、B1、傾斜基盤上の盛土のすべり破壊D1、D2、でそれぞれ比較すると、過剰間隙水圧上昇の関係するA1、D1の方が最大残留沈下量は大きい。
 - ・ 基盤傾斜の最大残留沈下量に対する影響を見ると、過剰間隙水圧上昇に関係する場合、関係しない場合とも、傾斜基盤上の盛土の方が平坦な基盤上の盛土より最大残留沈下量は大きい。
 - ・ 最大残留沈下量のオーダーおよび最大変形率を盛土高さ10mまでの盛土について調べると、破壊メカニズム別に、A1は500cm・70%、A2は200cm・30%、B1は200cm・50%、D1は500cm・50%、D2は300cm・70%、である。
- ② タイプIII盛土分断破壊について
- ・ 盛土本体の過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊A1と基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に伴うすべり破壊A2では、最大残留沈下量および最大変形率には大きな違いはなく、盛土高さ6mまでの盛土に対しA1、A2とも300cm・70%となっている。
- ③ タイプIV盛土沈下について
- ・ 最大残留沈下量および最大変形率は、盛土高さ8mまでの盛土に対し、基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に関係するすべり破壊A2では50cm・30%、基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に関係しないすべり破壊B2では50cm・10%、盛土あるいは基礎地盤の累積沈下Cでは100cm・30%で、他の破壊形態に比べ最大残留沈下量、最大変形率とも小さい。

(2) 盛土および基礎地盤の土質と残留沈下量の関係

抽出した盛土の地震被害事例より、盛土の土質は以下の2種類に分類する。

S 砂質土（火山灰、シルト含む）

C 粘性土（ローム、腐植土、PEAT含む）

基礎地盤の土質は以下の4種類に分類する。なお、平面的に異なる土質からなる場合は軟質な土質で分類する。

S 砂質土（火山灰、シルト含む）

C 粘性土（ローム、腐植土、PEAT含む）

SC 砂質土と粘性土の互層

R 岩

盛土と基礎地盤の土質の組合せ 8 パターンと残留沈下量との関係を図 3.3.2-3 に、変形率との関係を図 3.3.2-4 に示す。図より以下に考察する。

1) 盛土および基礎地盤の土質と破壊形態の関係

- ① 盛土の土質は、いずれの破壊形態においても砂質土が大半を占めるが、これは粘性土盛土の被害事例が少ないことによるものと推定される。
- ② 盛土が砂質土であることにより破壊に至った事例を見ると、過剰間隙水圧上昇に関係するすべり破壊 A1 あるいは D1 がこれに該当し、結果としてタイプ I 法面崩壊、タイプ II 盛土すべり破壊、タイプ III 盛土分断破壊のいずれかが発生している。この場合、地下水位が盛土内にあることが条件となるが、大雨直後の地震の場合（例えば十勝沖地震）、沢や谷等の集水地形により地下水位が盛土底面付近にある場合、盛土本体が経年変化により基礎地盤に潜り込み地下水位以下になった場合も含まれる。
- ③ 基礎地盤が砂質土であることにより破壊に至った事例を見ると、粘性土との互層も含めて、過剰間隙水圧に関係するすべり破壊 A2 がこれに該当し、結果としてタイプ II 盛土すべり破壊、タイプ III 盛土分断破壊、タイプ IV 盛土沈下のいずれかが発生している。この場合、地下水位が基礎地盤内の比較的高い位置（例えば盛土底面付近）にある場合が前提条件となる。
- ④ 盛土が粘性土であることにより破壊に至った事例を見ると、収集した事例では、過剰間隙水圧上昇に関係しないすべり破壊 B1、またはせん断震動に伴う累積沈下 C が発生しており、結果としてすべり破壊 B1 によりタイプ I 法面崩壊、タイプ II 盛土すべり破壊のどちらかが発生し、累積沈下 C によりタイプ IV 盛土沈下が発生している。
- ⑤ 基礎地盤が粘性土であることにより破壊に至った事例を見ると、砂質土との互層も含めて、過剰間隙水圧上昇に関係しない傾斜基盤上のすべり破壊 D2、またはせん断震動に伴う累積沈下 C が発生しており、結果としてすべり破壊 D2 によりタイプ II 盛土すべり破壊が発生し、累積沈下 C によりタイプ IV 盛土沈下が発生している。この場合、盛土が砂質土の場合は地下水位が盛土内にないことが前提条件となる。

すべり破壊 D2 が発生するのは、収集した事例では、盛土直下の傾斜基盤上部に軟弱粘性土層がある場合であり、対照的に累積沈下 C は基礎地盤は平坦である場合に発生している。

2) 盛土および基礎地盤の土質と最大残留沈下量あるいは最大変形率の関係

- ① 砂質土盛土と粘性土盛土の最大残留沈下量を比較すると、いずれの破壊メカニズムにおいても、事例は少ないものの砂質土盛土の最大残留沈下量の方が粘性土盛土より大きい。これは、粘性土盛土の粘着力が盛土の変形を抑制するためと推定される。
- ② 最大残留沈下量のオーダーは、タイプ II 盛土すべり破壊では、すべり破壊 A2 については砂質土盛土 200cm に対して粘性土盛土 150cm、すべり破壊 D2 については砂質土盛土 300cm に対して粘性土盛土 100cm、タイプ IV 盛土沈下の累積沈下 C については砂質土盛土 100cm に対して粘性土盛土 50cm、となっている。

- | | | | |
|---|-------------------------|---|----------------------------|
| ○ | A1 盛土内水圧上昇によるすべり破壊 | × | C せん断震動による累積沈下 |
| □ | A2 基礎地盤内水圧上昇によるすべり破壊 | △ | D1 傾斜基礎上盛土の水圧上昇によるすべり破壊 |
| ● | B1 盛土すべり破壊 (水圧上昇無関係) | ▲ | D2 傾斜基礎上盛土のすべり破壊 (水圧上昇無関係) |
| ■ | B2 基礎地盤のすべり破壊 (水圧上昇無関係) | | |

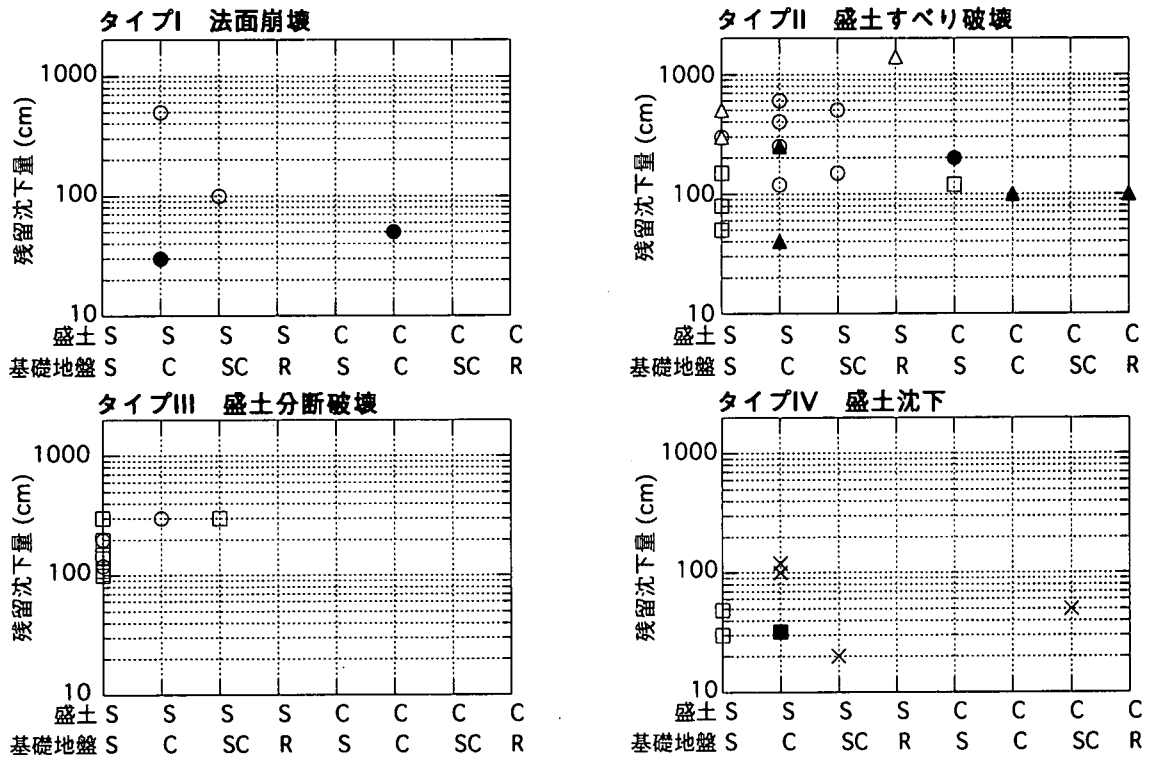


図 3.3.2-3 盛土および基礎地盤の土質～残留沈下量

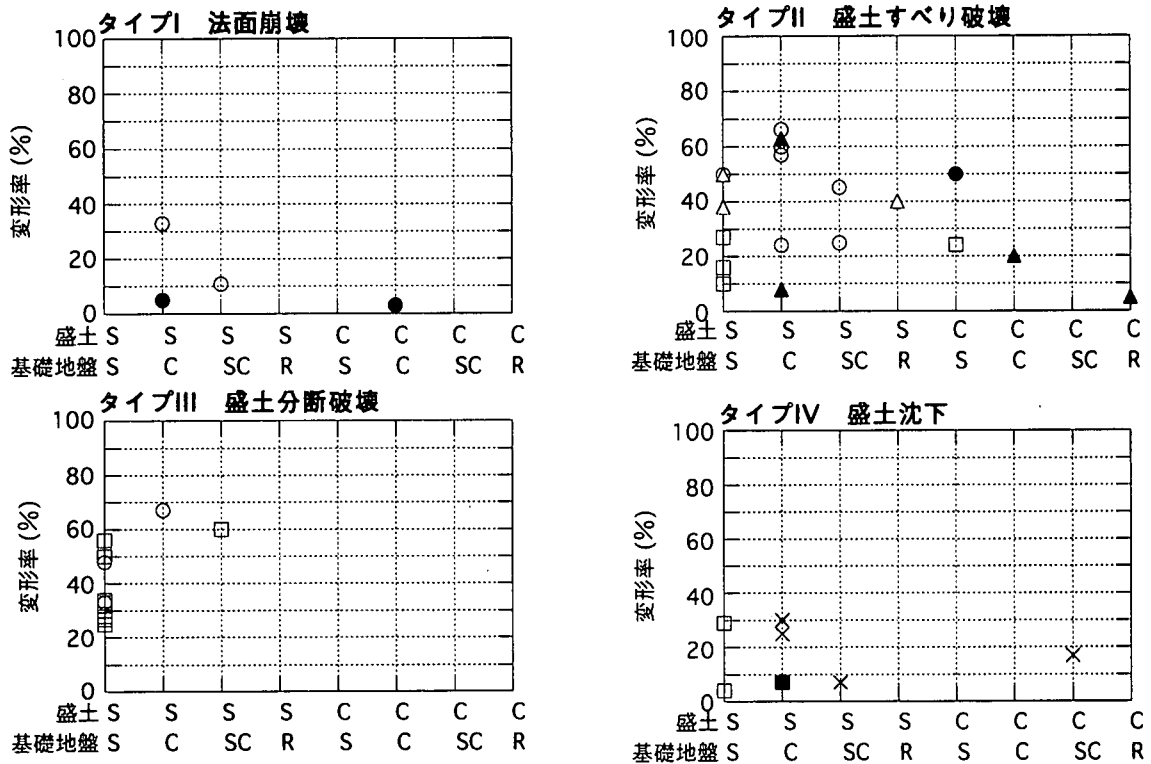


図 3.3.2-4 盛土および基礎地盤の土質～変形率

(3) 盛土高さと残留沈下量の関係

抽出した盛土の地震被害事例より、盛土高さと残留沈下量との関係を図 3.3.2-5 に、変形率との関係を図 3.3.2-6 に示す。図より以下に考察する。

1) 盛土高さと破壊形態の関係

- ① 盛土の高さは、10m 以下の事例がほとんどであり、10m を越えるのは傾斜基盤上の盛土（破壊メカニズム D1、D2）のうち山岳盛土および宅造盛土の事例である。
- ② タイプ I 法面崩壊とタイプ II 盛土すべり破壊を合わせて見ると、破壊メカニズムごとに見て、過剰間隙水圧上昇に関係するすべり破壊 A1 および D1 は、盛土高さの増加とともに残留沈下量が増大していると言える。これ以外の破壊メカニズムについては事例が少ないこともあり、明確な傾向は読み取れない。
- ③ タイプ III 盛土分断破壊については、破壊メカニズムとしては、盛土本体または基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に関係するすべり破壊 A1、A2 であるが、いずれも盛土高さと残留沈下量に明確な相関関係は読み取れない。
- ④ タイプ IV 盛土沈下については、破壊メカニズムとしては、基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に関係するすべり破壊 A2 とせん断震動に伴う累積沈下 C であるが、いずれも盛土高さと残留沈下量に明確な相関関係は読み取れない。

以上より、盛土高さと残留沈下量、変形率の関係については検討しない。

(4) 基盤の傾斜角度と残留沈下量の関係

抽出した盛土の地震被害事例より、基盤の平均傾斜角度と残留沈下量との関係を図 3.3.2-7 に、変形率との関係を図 3.3.2-8 に示す。図より以下に考察する。

1) 基盤の平均傾斜角度と破壊形態の関係

- ① 基盤の平均傾斜角度は、不明の事例が多いことから、データの的には残留沈下量との相関を検討できるのはタイプ II 盛土すべり破壊のみである。
- ② タイプ II 盛土すべり破壊は、傾斜基盤上の盛土のうち、過剰間隙水圧上昇に関係しないすべり破壊 D2 については、平均傾斜角度 10 度～40 度の範囲において、基盤傾斜角の増加とともに残留沈下量が増大する傾向がうかがえる。

これ以外の破壊メカニズムについては事例が少ないこともあり、明確な傾向は読み取れない。

以上より、基盤の平均傾斜角度と残留沈下量、変形率の関係については検討しない。

(5) 基盤の最大加速度と残留沈下量の関係

盛土の位置での工学的基盤における最大加速度を、地震のマグニチュード、対象盛土の震源距離から、道路橋示方書（平成 2 年 2 月）で示されている I 種地盤に対する以下の距離減衰式より推定した。

$$a_{\max}^H = 987.4 \times 10^{0.216M} \times (\Delta + 30)^{-1.218}$$

- | | | | |
|---|-------------------------|---|----------------------------|
| ○ | A1 盛土内水圧上昇によるすべり破壊 | × | C せん断震動による累積沈下 |
| □ | A2 基礎地盤内水圧上昇によるすべり破壊 | △ | D1 傾斜基盤上盛土の水圧上昇によるすべり破壊 |
| ● | B1 盛土すべり破壊 (水圧上昇無関係) | ▲ | D2 傾斜基盤上盛土のすべり破壊 (水圧上昇無関係) |
| ■ | B2 基礎地盤のすべり破壊 (水圧上昇無関係) | | |

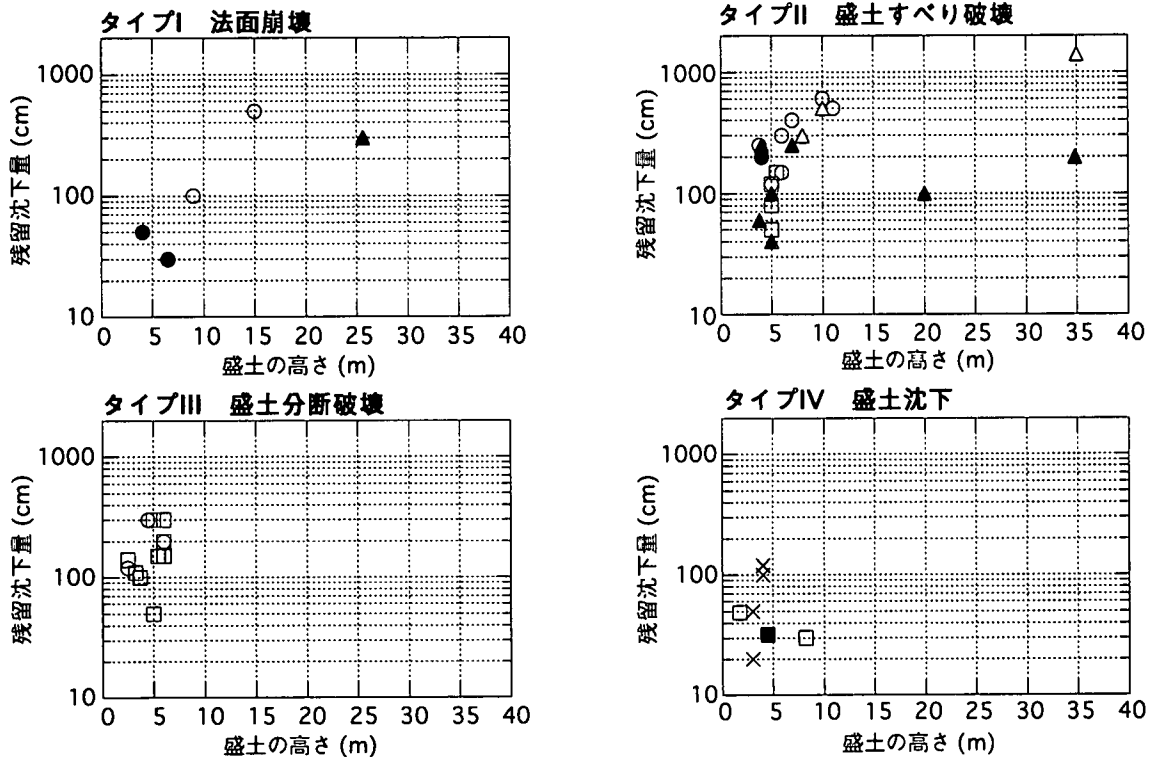


図 3.3.2-5 盛土の高さ～残留沈下量

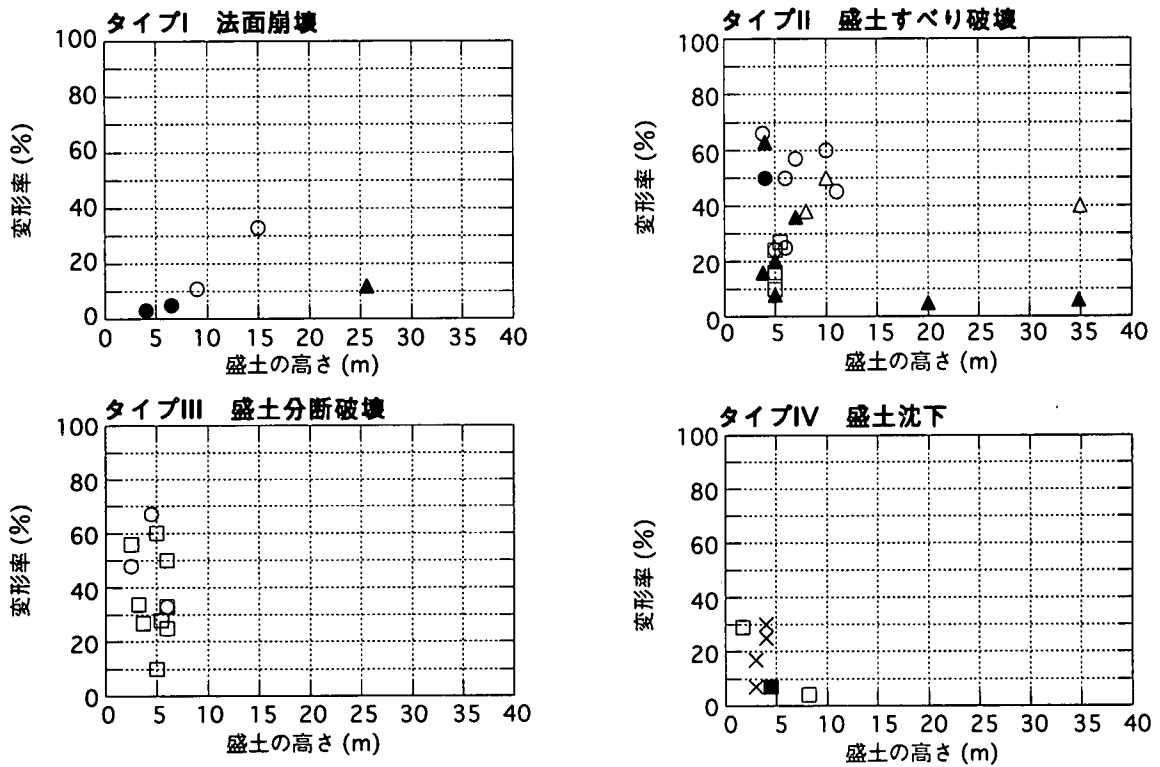


図 3.3.2-6 盛土の高さ～変形率

- | | | | |
|---|-------------------------|---|----------------------------|
| ○ | A1 盛土内水圧上昇によるすべり破壊 | × | C せん断震動による累積沈下 |
| □ | A2 基礎地盤内水圧上昇によるすべり破壊 | △ | D1 傾斜基礎上盛土の水圧上昇によるすべり破壊 |
| ● | B1 盛土すべり破壊 (水圧上昇無関係) | ▲ | D2 傾斜基礎上盛土のすべり破壊 (水圧上昇無関係) |
| ■ | B2 基礎地盤のすべり破壊 (水圧上昇無関係) | | |

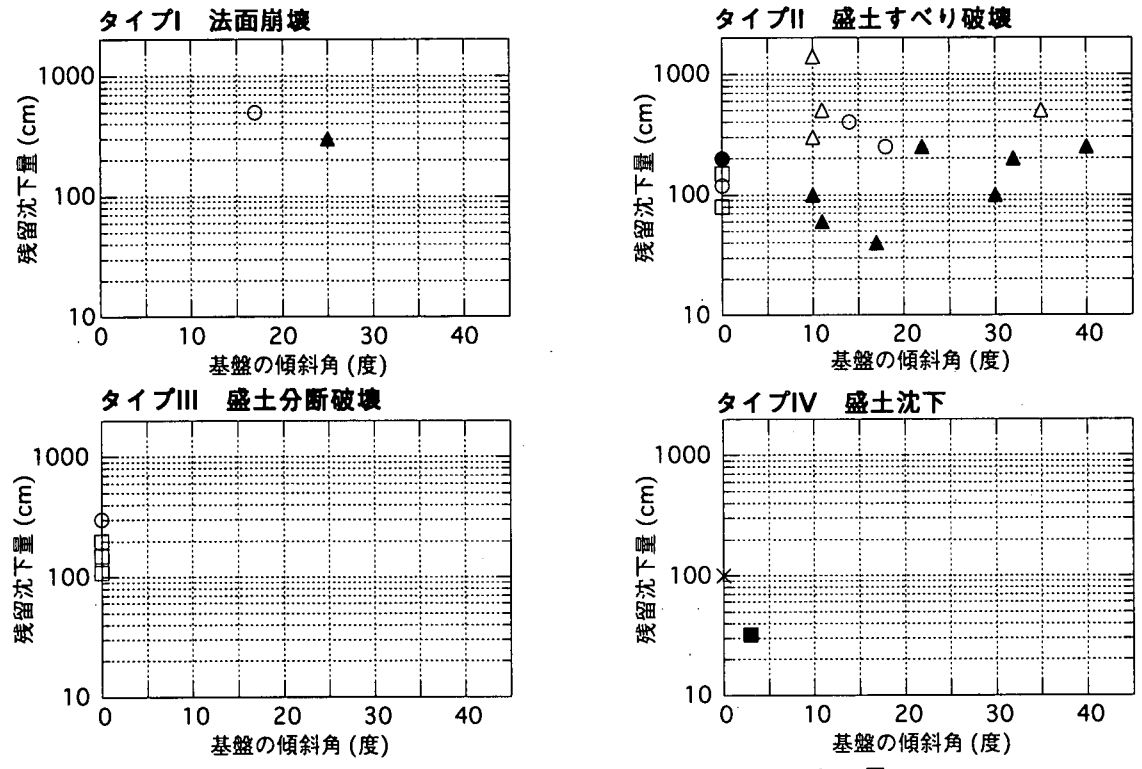


図 3.3.2-7 基礎の平均傾斜角度～残留沈下量

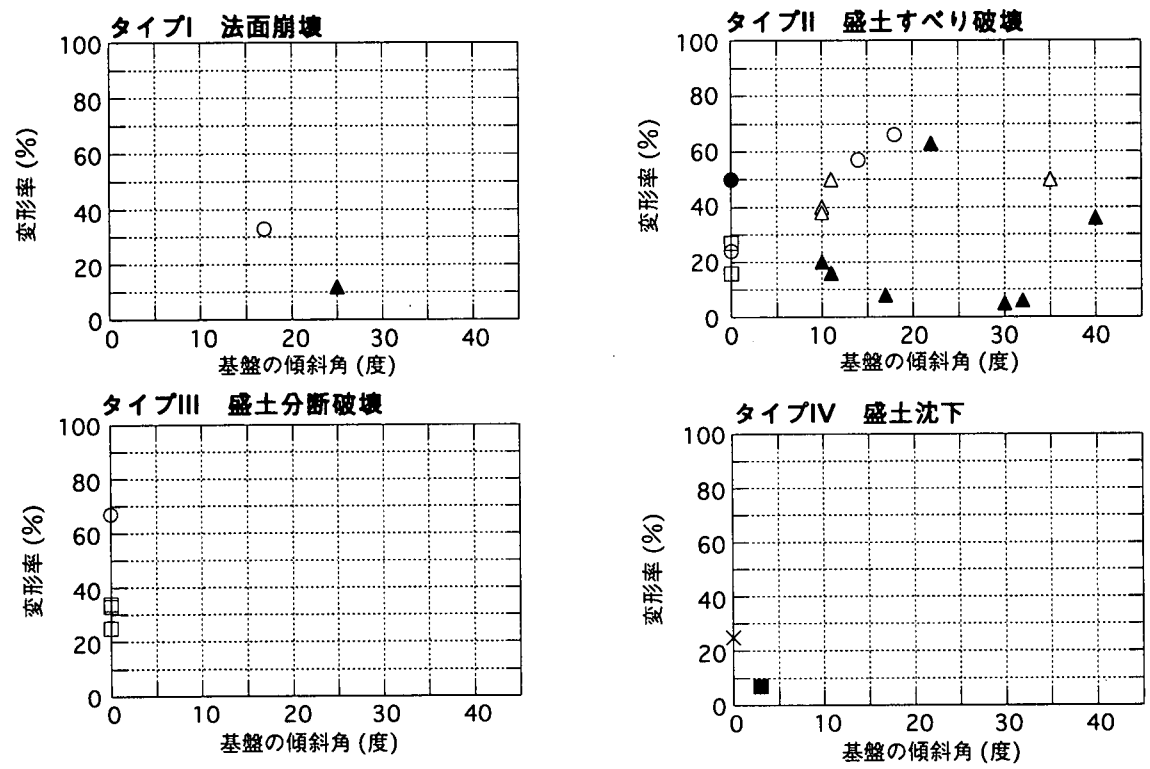


図 3.3.2-8 基礎の平均傾斜角度～変形率

ここに、 M は地震のマグニチュード、 Δ は震源距離。

検討にあたり、震源深さが100km以上と非常に深い釧路沖地震および直下型地震である兵庫県南部地震は、使用する距離減衰式を適用することが難しいと判断し、対象外とした。

なお、基盤の最大速度に対しても、同様な整理を試みたが、基盤最大加速度による結果と大きな違いが見られなかったことから、ここでは図および考察は省略した。

基盤の最大加速度と残留沈下量との関係を図 3.3.2-9 に、変形率との関係を図 3.3.2-10 に示す。図より以下に考察する。

1) 基盤最大加速度と破壊形態の関係

- ① タイプ II 盛土すべり破壊については、過剰間隙水圧上昇に関係しない傾斜基盤上の盛土のすべり破壊 D2 では、基盤最大加速度の増加とともに残留沈下量が増大する傾向がうかがえる。
- ② タイプ III 盛土分断破壊については、破壊メカニズムとしては、盛土本体または基礎地盤の過剰間隙水圧上昇に関係するすべり破壊 A1、A2 であるが、基盤最大加速度に対し明確な相関関係は読み取れない。これは、基礎地盤の強度が低い事例が大半であるため、レベル 1 地震動による地震力に対しても基礎地盤は液状化に至り、結果として地震力に対する相関性が低くなったものと考えられる。
- ③ これ以外の破壊メカニズムについては事例が少ないこともあり、明確な傾向は読み取れない。これは、一般に盛土や基礎地盤の動的応答には局所的な地盤の増幅特性が影響する可能性が高く、基盤最大加速度では十分な相関性を見ることができないことが考えられる。

(5) 盛土の破壊形態および残留沈下量可能最大値の推定フロー

今回の地震被害事例分析結果に基づき、盛土の諸条件から盛土の破壊形態および残留沈下量の可能最大値を推定するフローを作成した。フローを図 3.3.2-11、図 3.3.2-12 に示す。

フロー作成の考え方を以下に示す。

- ・ 盛土の基礎データとして、盛土の土質、基礎地盤の土質、地下水位、盛土基盤の傾斜、とする。ここに、盛土と基礎地盤の土質は、砂質土または粘性土に限定する。
- ・ 盛土の破壊メカニズムを 7 種類に分類し、これにより発生する破壊形態 4 タイプと、今回の抽出した地震被害事例から得られる残留沈下量の可能最大値を 50cm 単位で与える。なお、盛土の基礎データから工学的に発生しえる破壊メカニズムと破壊形態に対し、今回の抽出した地震被害事例が 1 つしかない場合、あるいは事例がない組合せもある。
- ・ フローに示した残留沈下量の可能最大値は、基になったデータが兵庫県南部地震の 6 例を除いてレベル 1 地震動によるものであることから、基本的にはレベル 1 地震動に対する可能最大値であること留意する必要がある。

- | | | | |
|---|-------------------------|---|----------------------------|
| ○ | A1 盛土内水圧上昇によるすべり破壊 | × | C セン断震動による累積沈下 |
| □ | A2 基礎地盤内水圧上昇によるすべり破壊 | △ | D1 傾斜基礎上盛土の水圧上昇によるすべり破壊 |
| ● | B1 盛土すべり破壊 (水圧上昇無関係) | ▲ | D2 傾斜基礎上盛土のすべり破壊 (水圧上昇無関係) |
| ■ | B2 基礎地盤のすべり破壊 (水圧上昇無関係) | | |

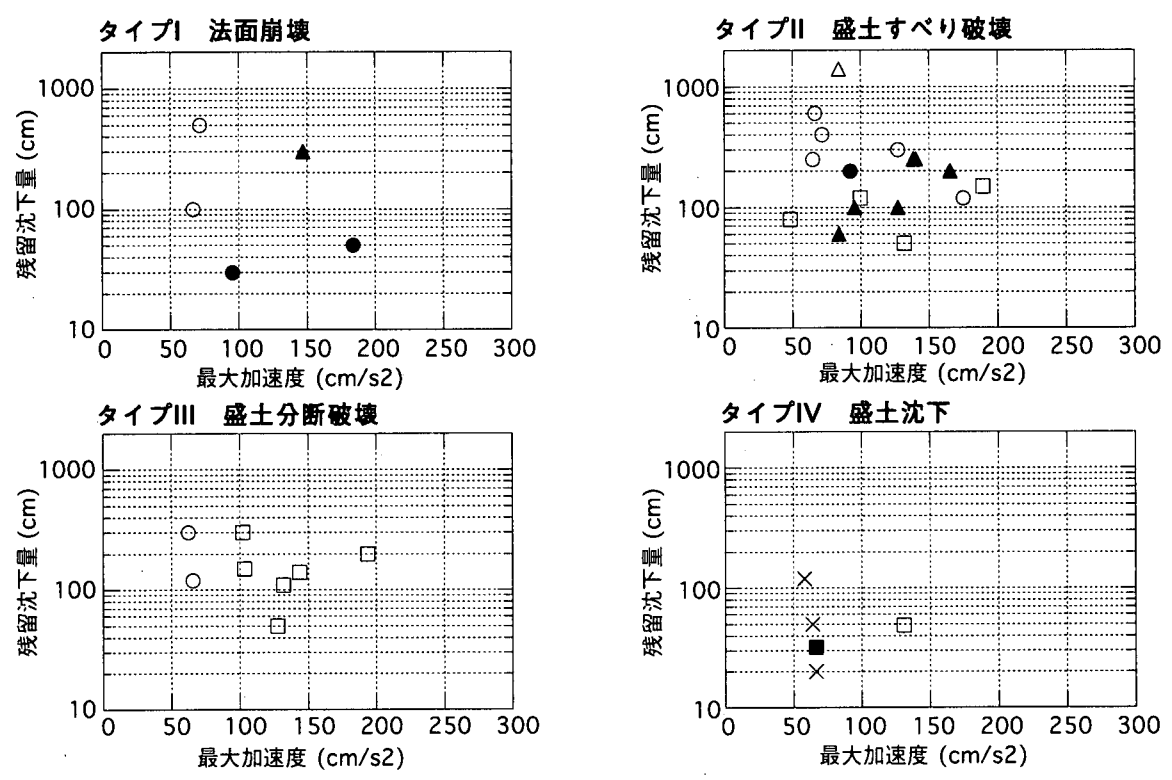


図 3.3.2-9 基礎の最大加速度～残留沈下量

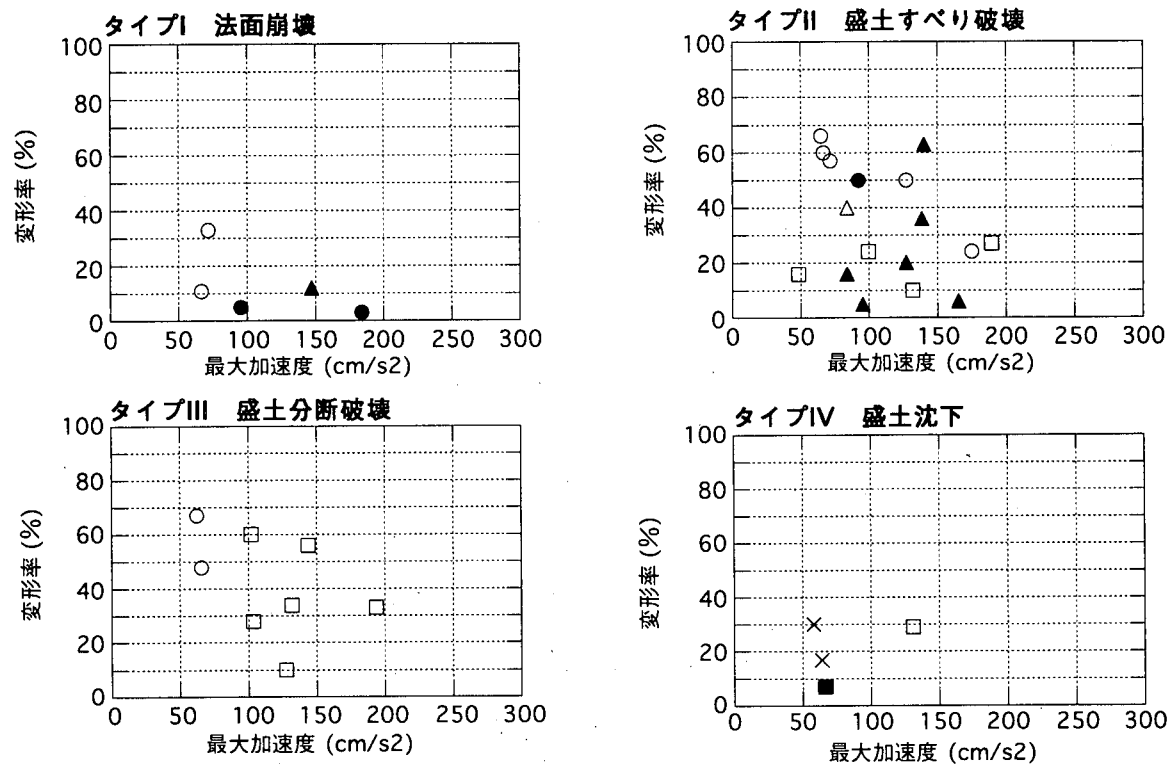


図 3.3.2-10 基礎の最大加速度～変形率

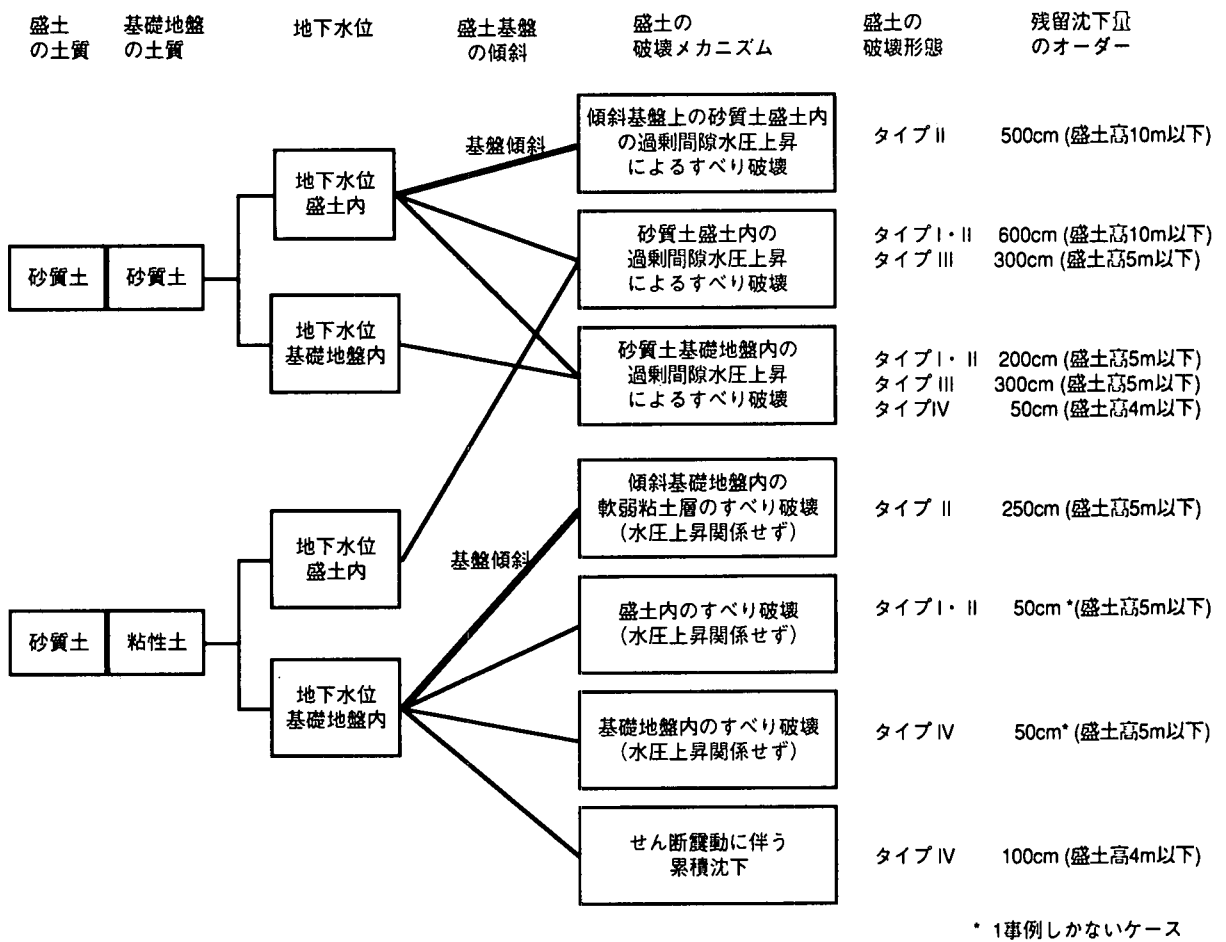


図 3.3.2-11 砂質土盛土の地震時破壊形態と残留沈下量可能最大値の推定フロー

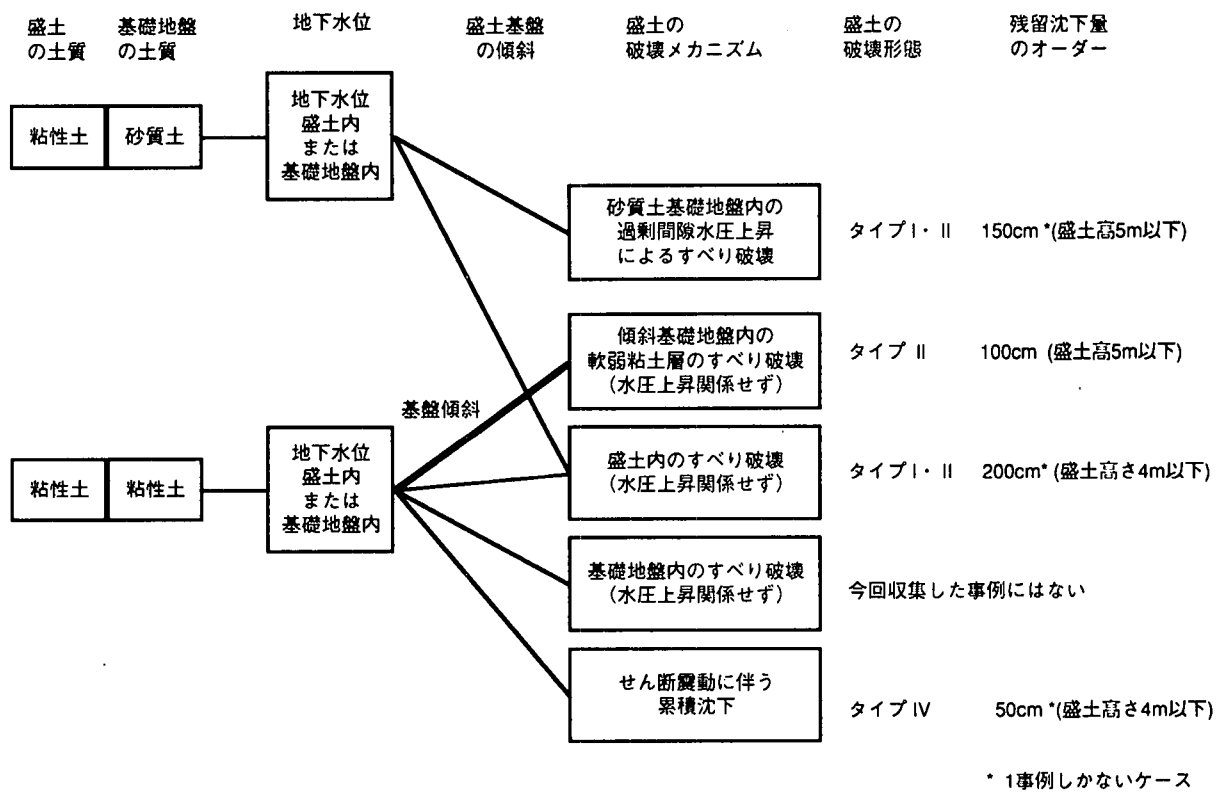


図 3.3.2-12 粘性土盛土の地震時破壊形態と残留沈下量可能最大値の推定フロー

参考文献

- 1) (株) 応用地質調査事務所：1968年十勝沖地震による青森県下の災害調査報告。
- 2) 日本国有鉄道鉄道技術研究所：十勝沖地震による鉄道盛土の被害に関する研究、鉄道技術研究所報告、No.791、1972年1月。
- 3) 建設省土木研究所：1968年十勝沖地震災害調査報告、土木研究所報告、No.141、昭和46年6月。
- 4) 建設省土木研究所：1978年宮城県沖地震災害調査報告、土木研究所報告、No.159、昭和58年3月。
- 5) 原勝重・大塚孝義・森芳信：白石市寿山第四団地の常時微動特性について、第6回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.2001-2007、1982。
- 6) (社) 土木学会東北支部：1978年宮城県沖地震調査報告、1980。
- 7) 那須誠・岡田勝也：日本海中部地震災害と復旧<被災調査概要>、鉄道土木、No.26-6、昭和59年6月。
- 8) 日本海中部地震調査研究グループ：1983年日本海中部地震調査報告、鉄道技術研究報告、No.1267、1984年3月。
- 9) 農業工学研究所：1983年日本海中部地震によるため池の被害調査報告、農業工学研究所技報、169号、1985。
- 10) 建設省土木研究所：1983年日本海中部地震災害調査報告、土木研究所報告、No.165、昭和60年3月。
- 11) 建設省土木研究所：平成5年(1993年)釧路沖地震災害調査報告、土木研究所報告、No.193、平成6年1月。
- 12) 松尾修：最近の地震における土構造物の被害、基礎工、pp.94-99、1993年12月。
- 13) 三浦均也・西村右敏・鷲尾朝昭・吉田望：1993年釧路沖地震による造成地被害に関する解析的検討、第9回日本地震工学シンポジウム、pp.763-768、1994年。
- 14) 建設省土木研究所：平成5年(1993年)北海道南西沖地震災害調査報告、土木研究所報告、No.194、平成6年7月。
- 15) 西川純一・高橋光昭・山下彰司：1993年北海道南西沖地震における道路・鉄道・河川堤防の被害、土と基礎、Vol.43、No.11、1993年。
- 16) 西川純一・鎌田拓司・加治昌秀：1994年北海道東方沖地震における道路・鉄道・河川堤防の被害、土と基礎、Vol.43、No.4、1995年。
- 17) 地盤工学会：三陸はるか沖地震災害調査報告、1996年。
- 18) 輔信捷三・柳原和憲・松井保・鳥居剛・黒田修一：兵庫県南部地震における被災盛土の動的安定性に関する研究、第24回地震工学研究発表会論文集、pp.941-944、1997年。
- 19) 建設省土木研究所：平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告、土木研究所報告、No.196、平成8年3月。
- 20) Tani, S. : Damage to earth dams, Soils and Foundations, 1996.
- 21) 地盤工学会：阪神・淡路大震災調査報告 資料編 Vol.2、平成8年10月。
- 22) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書、鉄道総研報告、特別第4号、1996年4月。