

#### 4. 活断層の将来的な活動

##### (1) 将来的な活動想定の方

活断層の将来的な活動については不確定な要因があること、断層活動に関する十分なデータが得られていない等から、様々な可能性が考えられるが、起こりうる事象として、今回の地震において実際に発生した事象を踏まえて想定することを基本とする。

このため、本報告の想定と異なる活動となることもあり得るものである。

##### (2) 布田川断層帯布田川区間と連動した場合の将来的な活動想定

今回と同様に、布田川断層帯布田川区間の活動と連動する場合、発生する地震規模は今回とほぼ同程度と推定されるが、今回の地震と同じメカニズムの地震は今後 8 千年～26 千年程度発生しないと推定される。

今回の調査結果では、益城町市街地では断層は階段状であり、表層に軟弱層が堆積していることから、活断層C～南の秋津川までの範囲は、活断層による地盤のズレが生じる可能性がある範囲と考えられる。また、市街地で実施したピット調査結果からも、断層線周辺においても活動の痕跡が確認されたことから、断層線沿いおよびその周辺でズレが生じる可能性が推定される。

##### (3) 布田川断層帯宇土区間と連動した場合の将来的な活動想定

今回活動していない布田川断層帯宇土区間（図 4-1）は、木山－嘉島地溝帯の南側を通る北西側落ち（南東側隆起）の断層と推定されている。また、図 4-2 に示すように木山断層（活断層A～Cはその一部と推定）は、その西側が熊本平野まで延び、布田川断層宇土区間と対になって木山－嘉島地溝帯を形成している（図 4-3）とも考えられている。

今回の調査で推定した断層の広域的な位置付けは、図 4-4 に示すように段丘面と沖積低地の境界部に位置する木山断層の一部が、益城町周辺では北側の段丘面上に数条に分岐して位置していると考えられる。今回推定した断層は、妙見川の東 100m 付近までしか確認できないが、その西側延長はほぼ東北東-西南西方向に伏在し、木山断層に連続している可能性がある。

したがって、木山断層と対になって分布する宇土区間の活動と連動することも想定される。その際の木山断層のズレの量については、布田川区間と宇土区間の想定される地震規模は同程度であることから、布田川断層の今回の活動で確認されたズレと同程度のズレが発生しうるものと推定される。ただし、宇土区間の将来的な活動間隔については不明である。

表 4-1 布田川断層帯・日奈久断層帯の活動に関する長期評価パラメータ

	布田川区間	宇土区間	宇土半島北岸区間	高野白旗区間
地震規模	M7.0 程度	M7.0 程度	M7.2 程度以上	M6.8 程度
1回のズレ量	横ズレ主体 2m	ズレ 2m	ズレ 3m	横ズレ主体 2m
平均活動間隔	8,100～26,000 年程度	不明 (平均変位速度 0.2～0.5m/千年)	不明	不明

出典：布田川・日奈久断層帯の評価、地震調査研究推進本部、地震調査委員会、2013.2.1 より

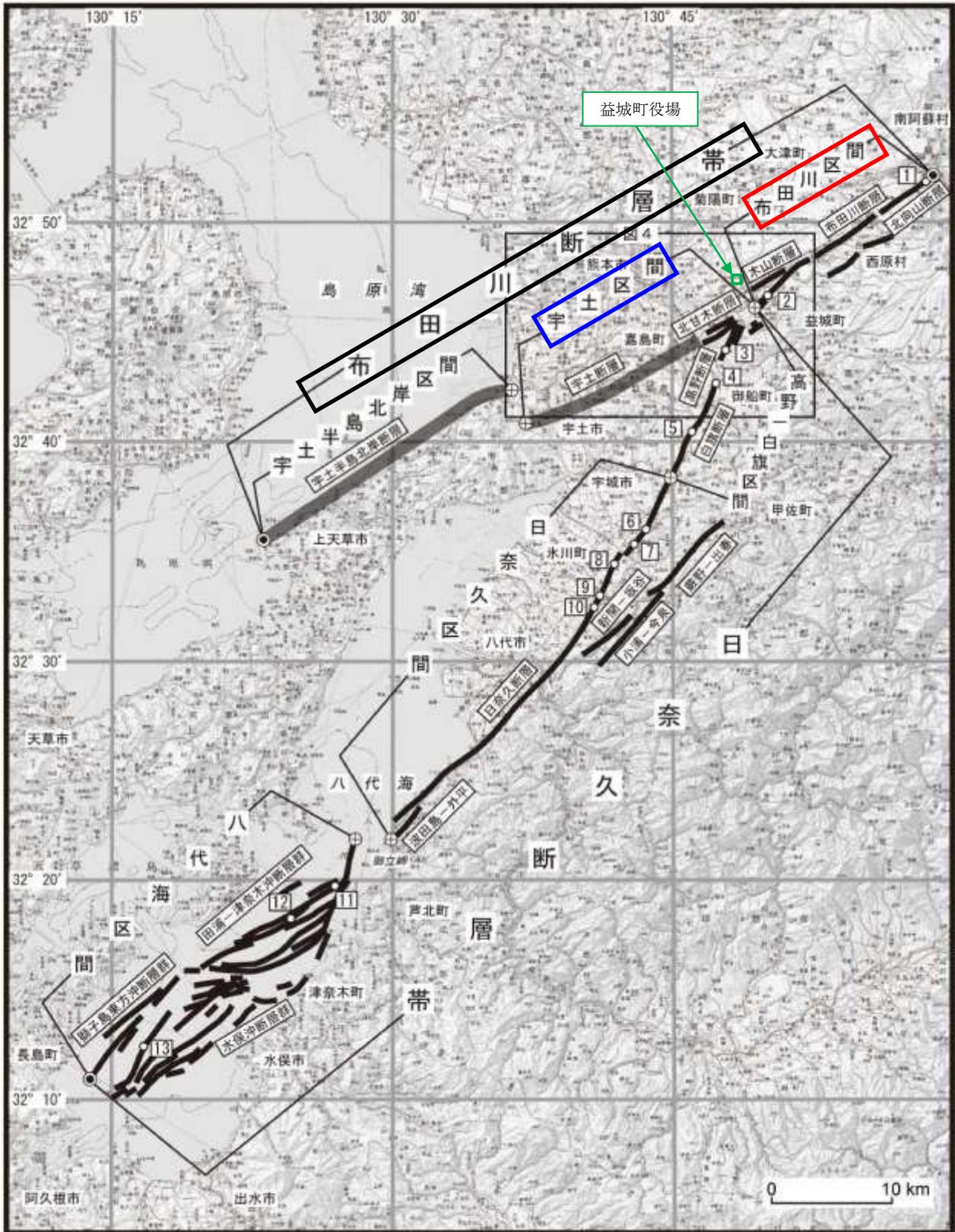


図 4-1 布田川断層帯・日奈久断層帯の区分

出典：布田川・日奈久断層帯の評価、地震調査研究推進本部、地震調査委員会、2013.2.1 より



赤色実線および赤色薄太線は、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2013)による活断層の地表トレースおよび伏在活断層の位置を示す。黒色実線および黒色破線は石坂ほか(1992)による活断層および推定活断層を示す。

図 4-2 宇土区間とその周辺の表層地質図

出典：産業技術総合研究所、2016

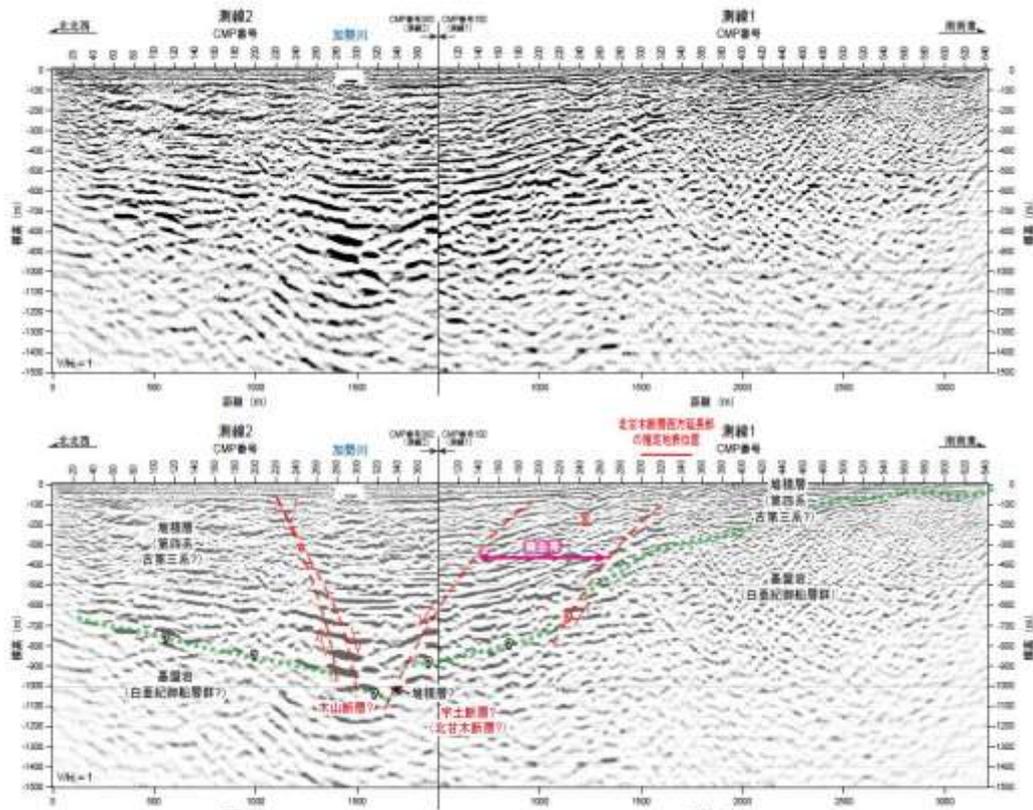


図9 中型パイプソースを震源とした反射法地震探査による深度断面図(測線1と2を接合)(上)と解釈断面図(下)鉛直誇張なし。

図 4-3 反射法地震探査による深度断面図と解釈断面図

出典：産業技術総合研究所、2016

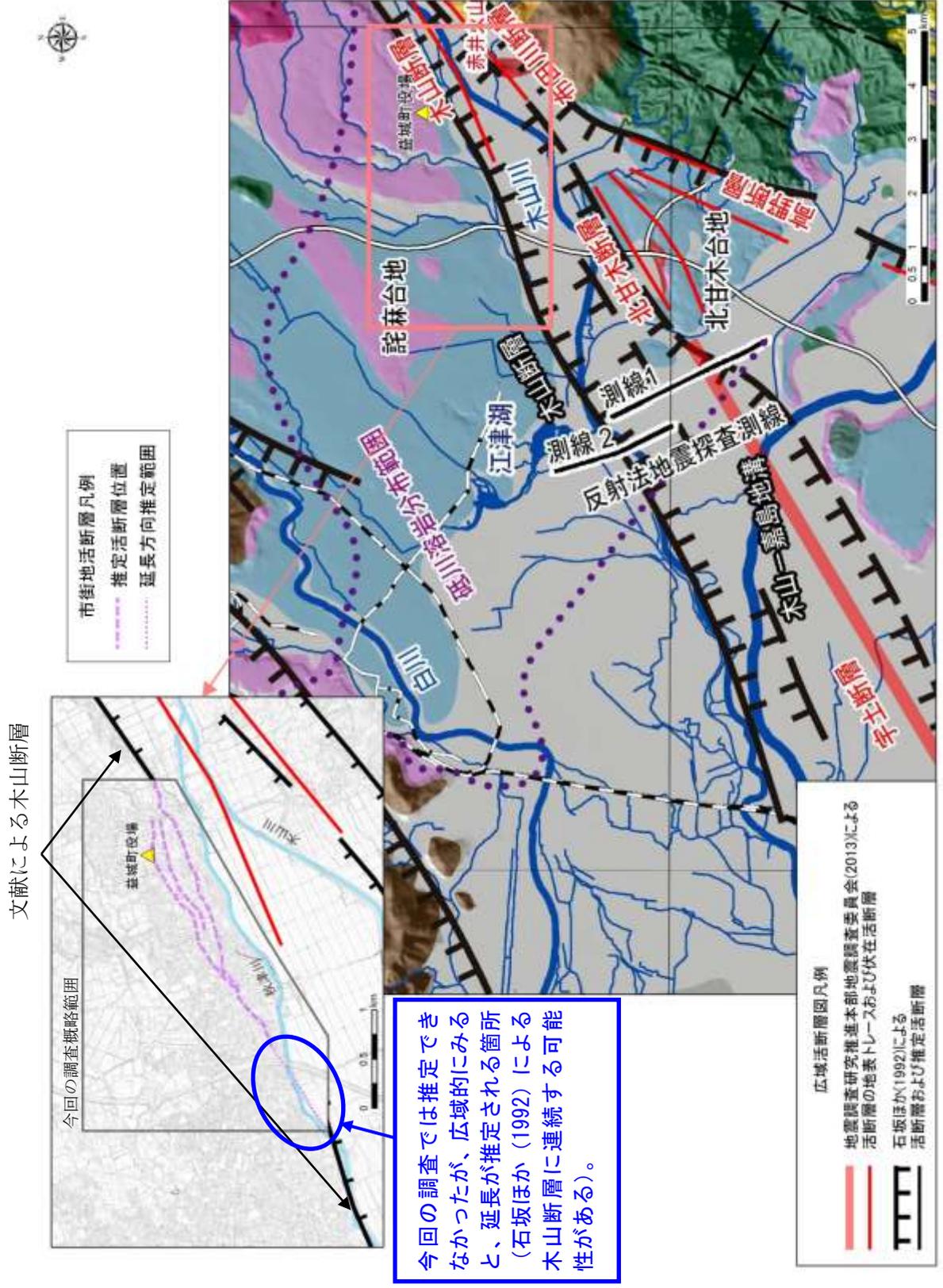


図 4-4 活断層の広域的な位置付け

(4) 今後の活動に関する評価

益城市街地で推定される活断層 A～C の調査結果の評価と今後の活動に関する評価を表 4-2 に示す。

表 4-2 益城市街地で推定される活断層の評価と今後の活動に関する評価

断層名	【再掲】 調査結果の評価		将来の活動に関する評価			
			布田川区間と連動 する場合		(今回活動していない) 宇土区間と連動する場合	
			ズレ量の 評価	発生しやす さの評価	ズレ量の 評価	発生しやす さの評価
活断層 A	鉄砂川の東側	幅広い低速度帯とほぼ一致していること、下位層と上位層で変位の累積性が推定されることなどから、複数回の断層変位によるダメージゾーンが形成されていると推定され、活断層と評価。	最大で今回と同程度(活断層 A の最大ズレ量)と推定	今後、8 千年～2 万 6 千年程度は発生しないと推定	ズレ量は今回と同程度と推定	発生間隔は不明
	鉄砂川の西側	地表のズレ、低速度帯、地層の標高差の位置がほぼ一致することから活断層と評価。 ただし、断面 V 付近より東側では、地表の亀裂が小さいことから今回の活動は限定的と推定される。				
活断層 B	鉄砂川の東側	地表のズレ、一部低速度帯、地層の標高差の位置がほぼ一致することから活断層と評価。 ただし、推定される断層線の東側では地表に亀裂が生じていないことから今回の活動は限定的であると推定。				
	鉄砂川の西側	鉄砂川沿いの沖積層分布域より西側への連続性は不明。				
活断層 C	鉄砂川の東側	地表のズレ、地層の標高差の位置がほぼ一致することから活断層と評価。 ただし、低速度帯との位置の対応は不明瞭であり、明瞭なダメージゾーンが形成されていないこと、鍵層の標高差が活断層 A、B に比べ小さいことから今回の活動は限定的と推定。				
	鉄砂川の西側	断面 IV 付近より西側では、推定される活断層は 1 本になることから、この付近から活断層 A に収れんと推定。				

## 5. 建築物、宅地の被害状況とその要因

### 5.1. 建築物、宅地の被害状況

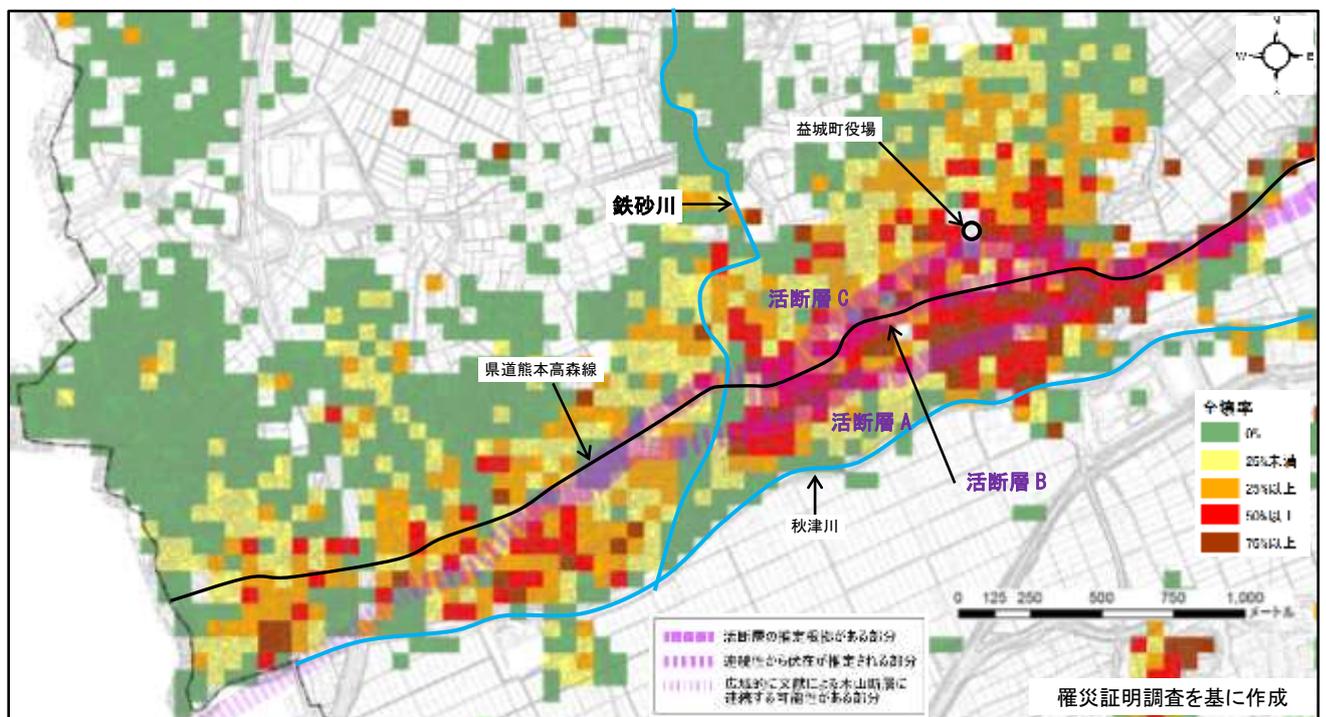
#### (1) 建築物被害

##### 1) 発行された罹災証明書に基づく建築物の被害状況

発行された罹災証明書に基づく建築物の被害程度のデータ（以下、「罹災証明調査」とする）は、益城町市街地全域を網羅しているため、これを用いた建築物の被害状況について述べる。

壊率は県道熊本高森線の南側で50%以上のエリアが多く、北側のエリアでも点在している。また、鉄砂川よりも東側のエリアは、西側に比べ全壊率が高くなっている（図5-1）。

活断層の位置との関係では、鉄砂川の東側のエリアでは、活断層A B間で被害が大きい傾向にある。一方、鉄砂川よりも西側では、活断層Aの南側で被害が大きい傾向にある。



※1：調査エリアにおけるメッシュごとの全壊率（＝メッシュエリア内の全壊の建築物の数／メッシュエリア内の全建築物数）を示した。全壊は図5-1・5-2の大破、倒壊・崩壊に相当する（※2）。メッシュは総務省基準地域メッシュを東西方向は20分の1、南北方向は16分の1した区分（＝約57×57m）。

※2：岡田ら,地震被害のための建物分類と破壊パターン,日本建築学会構造系論文集,第524号,1999.

図5-1 罹災証明調査による建築物の全壊率の分布と活断層位置

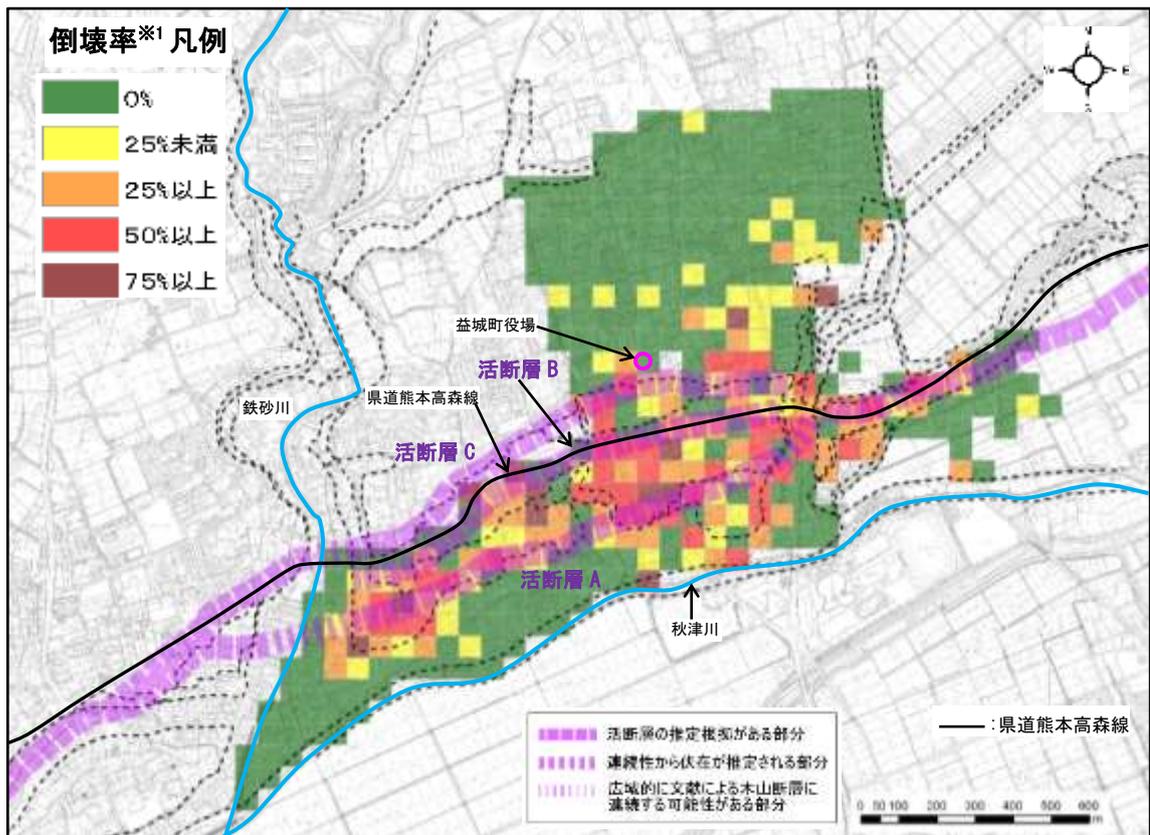
## 2) 悉皆調査に基づく建築物被害

1)で整理対象とした罹災証明調査は被災者支援策の判断材料として活用され、最も被害程度が大きい「全壊」は「住家の損壊が甚だしく、補修により元通りに再使用することが困難なもの」「住家の損壊割合が50%以上に達した程度のもの」(内閣府)と定義されているため、外見上被害が認められない建物から倒壊し建物まで幅広く認定される可能性がある。このため、建物被害が相対的に小さいと考えられる県道より北側においても高い全壊率となっている(図5-1)。

ここでは被害が大きい範囲を対象としたより詳細な分析を行うことを目的として、「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書」(平成28年9月)で、実施された被害が大きい鉄砂川より東側の益城町市街地における建築物の被害状況の悉皆調査を用いた建築物被害の状況を整理する。大破率・倒壊率の分布を図5-2、図5-3に示す。

倒壊率については県道熊本高森線の南側で50%以上のエリアが多く、北東の辻の城地域と南側の秋津川に近い地域では0%のエリアが多くなっており、大破率については県道の北側～益城町役場周辺にも50%以上のエリアが広がっている。罹災証明調査(図5-1)の全壊率は、悉皆調査の大破率(図5-3)に相当し<sup>※2</sup>、両図は同様な結果となっている。

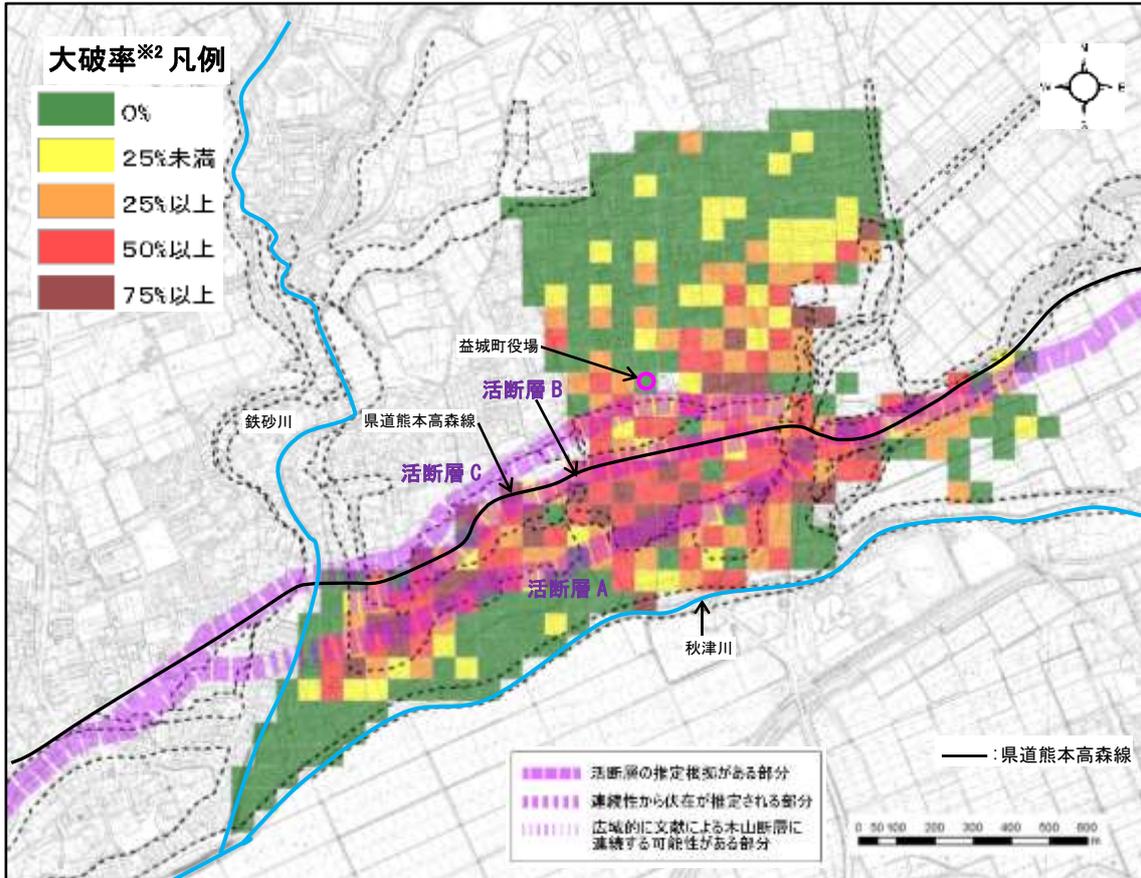
活断層の位置との関係では、特に活断層A B間で被害が大きい傾向にある。



※3: 調査エリアにおけるメッシュごとの倒壊率(=メッシュエリア内の倒壊・崩壊の建築物の数/メッシュエリア内の全建築物数)を示した。メッシュは総務省基準地域メッシュを東西方向は20分の1、南北方向は16分の1した区分(=約57×57m)。

図5-2 悉皆調査結果による倒壊率の分布と活断層位置

出典:「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書」を基に作成



※2：調査エリアにおけるメッシュごとの大破率（＝メッシュエリア内の大破・倒壊・崩壊の建築物の数／メッシュエリア内の全建築物数）を示した。メッシュは総務省基準地域メッシュを東西方向は 20 分の 1、南北方向は 16 分の 1 した区分（＝約 57×57m）。

図 5-3 悉皆調査結果による大破率の分布と活断層位置

出典：「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書」を基に作成

(2) 宅地被害

益城町市街地における宅地危険度判定調査結果で調査エリアにおけるメッシュごとの危険率（＝メッシュ内の危険と判断された宅地数／メッシュエリア内の全宅地数）を図 5-4 に示す。

1) 宅地被害状況と活断層位置及び段差地形の関係

活断層を含むメッシュ全体の危険率は 24.8%と含まないメッシュ全体 9.8%の約 2.5 倍となっており（表 5-1）、活断層沿いで危険率が高くなる傾向が伺えるが、活断層上には図 5-4 に示すように崖・段差地形が多く見られる。そこで、崖・段差地形の有無に着目した危険率の比較を行うと、崖・段差地形を含むメッシュ全体での危険率は 22.3%であるのに対して含まない場合の危険率は 8.5%と約 2.6 倍であり（表 5-2）、崖・段差地形の影響も示唆される。これを踏まえ、活断層上のメッシュのみに着目して崖・段差地形を含む場合と含まない場合の危険率を算定すると、崖・段差地形を含む場合は 34.3%と、含まない場合の 18.8%の約 2 倍となった（表 5-1）。

また、今回の地震による変位量がほぼ同じであった活断層 B と C の比較では、崖・段差地形が多くみられる活断層 C の方が危険率は高く、さらに活断層 C の危険率は、変位量が最も大きかった活断層 A と比べても高いことから、崖・段差地形と宅地被害の関連が強いと考えられる（表 5-3）。なお、鉄砂川を境に東西で被害程度に差が認められるが、傾向は上記と同様である。

表 5-1 崖・段差地形と活断層に着目した危険率

区 分		鉄砂川より東側	鉄砂川より西側	全 域
崖・段差地形を含むメッシュ	活断層上	39.7%	24.1%	34.3%
	上記以外	26.3%	11.7%	18.8%
上記以外	活断層上	19.9%	11.4%	17.4%
	上記以外	10.6%	6.1%	7.8%
全 体	活断層上	28.3%	17.4%	24.8%
	上記以外	14.1%	6.9%	9.8%

表 5-2 崖・段差地形に着目した危険率

区 分	鉄砂川より東側	鉄砂川より西側	全 域
崖・段差地形を含むメッシュ	29.7%	13.7%	22.3%
上記以外	11.8%	6.3%	8.5%

表 5-3 活断層毎の危険率

区 分	鉄砂川より東側	鉄砂川より西側	全 域
活断層A	26.8%	13.2%	20.7%
活断層B	20.7%	—	20.7%
活断層C	39.4%	26.3%	34.7%

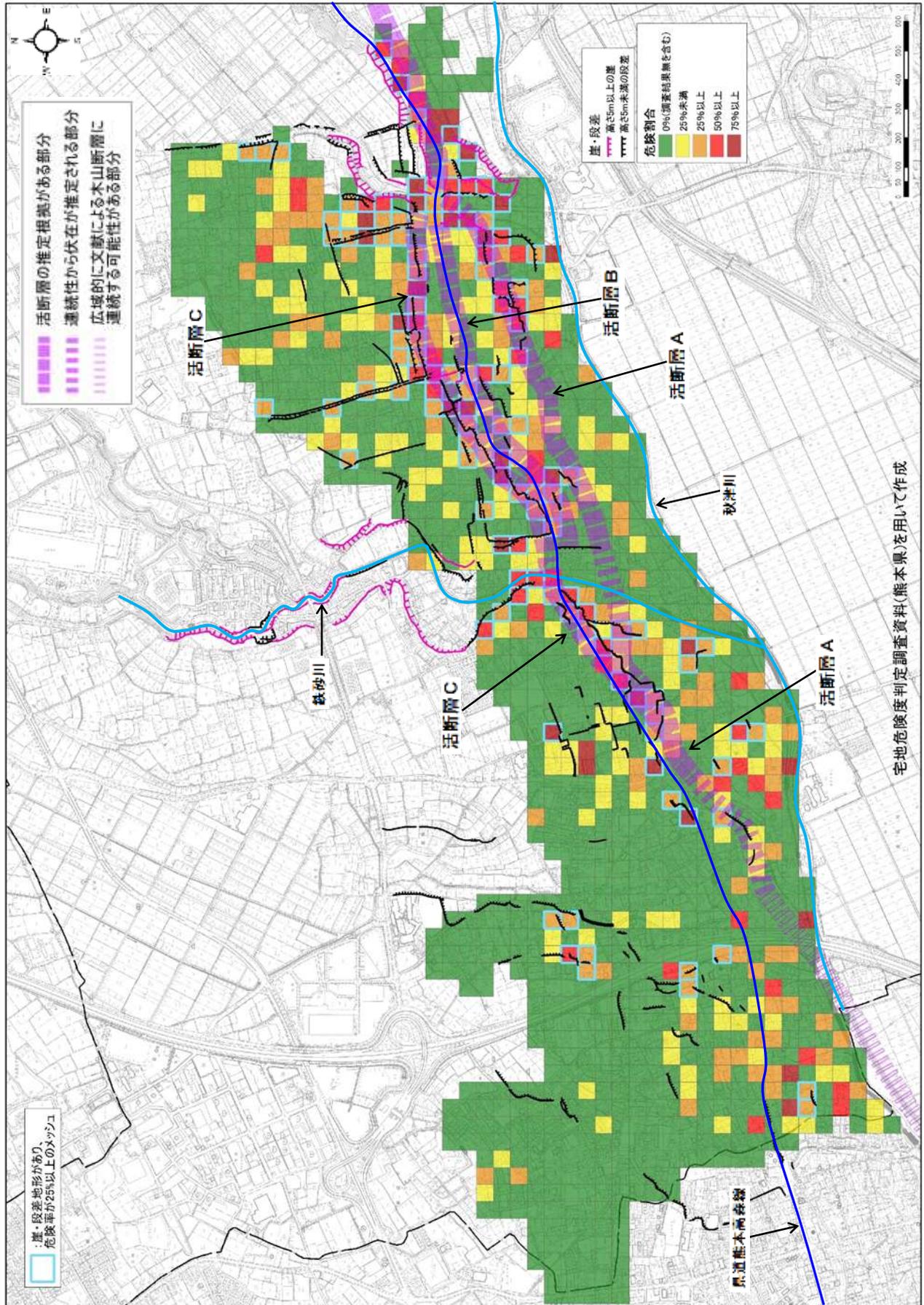


図 5-4 宅地危険度判定調査結果と活断層、崖・段差地形の位置

## 2) 構造形式別等の被害状況

危険・要注意と判定された構造は、擁壁が最も多く、次いで宅地地盤となっている。擁壁の被害種別では、傾斜・倒壊・崩壊を含むものが危険と判定される傾向にある。危険と判定された擁壁の高さ別では1～3mのものが多くなっている。

表 5-4 構造別の危険度判定

構造	危険：赤	要注意：黄	調査済
擁壁	699(11.2%)	1087(17.4%)	66(1.1%)
宅地地盤	83(1.3%)	476(7.6%)	89(1.4%)
法面・自然斜面	23(0.4%)	25(0.4%)	0(0%)
合計	805	1588	155

表 5-5 擁壁の被害種別  
(危険と判定されたもの)

擁壁被害形態	危険(赤)
クラック	76
水平移動	31
不同沈下	14
目地開き	35
ハラミ	49
傾斜	233
倒壊	287
擁壁折損	41
崩壊	218
支柱損傷	0
基礎地盤被害	3
排水施設変状	0

表 5-6 擁壁の被害種別

擁壁高さ H(m)	データ数	危険：赤	要注意：黄
H≤1	349	188(17%)	142(13%)
1<H≤3	669	407(36%)	241(21%)
3<H≤4	80	62(5%)	17(2%)
4<H≤5	17	15(1%)	1(0%)
5<H	16	15(1%)	1(0%)

※( )内は全調査数に占める割合

※構造が不明な調査結果は除く※調査済みは構造の記載なしが多い

## 5.2. 各被害要因が建築物、宅地に与えた影響の分析結果と安全対策の必要性

### (1) 活断層による地盤のズレ

#### 1) 建築物被害

推定された活断層上にあり、かつ周辺の宅地・道路等で地表地震断層と推定されるクラックが確認された建築物の被害状況について調査を行った(表 5-7)。建築時期については、新耐震基準が施行された 1981 年と木造の構造関係の基準が改正された 2000 年を分岐点として、1981 年以前(旧耐震)、1981~2000 年、2000 年以降の 3 つの建築年代に分類した。

断層変位量が大きく、今回の活動の主体と考えられる活断層 A 上においては、倒壊や大破等の建築物の被害が多く見られる。特に、旧耐震基準や 1981~2000 年の建築物に多くの被害が見られるが、活断層による地盤のズレが生じている部分での折れ曲がりや明瞭な亀裂の発生等、直接的な倒壊の要因となった建築物は確認できなかった。

また 2000 年以降基準の建築物については活断層上でも倒壊したものはなかったことから、活断層による地盤のズレは今回の地震において建築物被害の主要因ではないと判断される。

表 5-7 推定活断層上で、かつ周辺の宅地・道路等で地表地震断層と推定されるクラックが  
確認された建築物の被害状況

活断層	エリア	No.	建築年代	建物構造形式	断層変位量 <sup>※2</sup>	建物被害度	基礎構造形式	備考
A	鉄砂川より東側	K1	2000年以降	木造	15cm	軽微	不明	基礎にひびきはみられる
		K2	2000年以降	木造	5cm	小破	布基礎	外壁にクラックみられる
		K3	2000年以降	木造	5cm	小破	べた基礎	外壁にクラックみられる
		K4	1981～2000年	木造	10cm	—	布基礎	基礎にひびきはみられるが倒壊していない 被害度は北側の母屋のデータのため不明
		K5	1981～2000年	木造	20cm	大破	べた基礎	
		K6	1981年以前	木造	20cm	倒壊	布基礎	断層部分で折れ曲がるような状況はみられない
		K7	1981～2000年	木造	30cm	倒壊	不明	擁壁のズレは確認できないため揺れによって倒壊した ものと考えられる
		K8	2000年以降	木造	35cm	無被害	不明	変位量最大。壁や基礎にクラックはみられない
		K9	1981年以前	RC造	10～20cm	無被害	不明	宅盤にクラックが多く見られるが建物は無被害
		K10	1981～2000年	木造	不明	倒壊	布基礎	
		K11	2000年以降	木造	不明	大破	べた基礎	
		K12	1981～2000年	木造	5cm	軽微	べた基礎	
		K13	1981～2000年	木造	20～30cm	倒壊	不明	断層部分で折れ曲がるような状況はみられない
		K14	1981～2000年	木造	8cm	大破	布基礎	
	鉄砂川より西側	K15	1981～2000年	木造	1cm	全壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K16	1981～2000年	木造	1cm	一部損壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K17	2000年以降	鉄骨造	5cm	大規模半壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K18	1981年以前	木造	5cm	全壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K19	1981年以前	木造	不明	全壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
B	鉄砂川より東側	K1	1981年以前	混合	なし	軽微	布基礎	
		K2	2000年以降	軽鉄プレハブ	2cm	軽微	不明	
		K3	2000年以降	木造	不明	軽微	布基礎	
		K4	1981～2000年	木造	なし	軽微	べた基礎	
		K5	1981～2000年	木造	なし	軽微	不明	
C	鉄砂川より東側	K1	1981～2000年	木造	1cm	無被害	布基礎	
		K2	1981年以前	木造	1cm	倒壊	布基礎	
		K3	1981年以前	木造	なし	軽微	布基礎	
		K4	1981～2000年	木造	なし	軽微	べた基礎	
		K5	2000年以降	木造	10cm	無被害	べた基礎	※1、宅地擁壁に10cmのズレがみられる
		K6	1981年以前	木造	不明	半壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K7	2000年以降	耐火	3cm	一部損壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
	鉄西砂川より側	K8	2000年以降	木造	5cm	一部損壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K9	2000年以降	鉄骨造	5cm	一部損壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K10	2000年以降	木造	5cm	一部損壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ
		K11	1981年以前	木造	5cm	一部損壊	—	建築構造・被害度は罹災証明データ

※1：活断層直上の建築物ではないが、近隣に建築物直下を通過する変位を有するクラックが認められた箇所

※2：断層変位量なしのものは、確認されたクラックを活断層と判断したが、変位は確認されなかったもの

※3：建物被害度で罹災証明調査の全壊⇒倒壊・大破、半壊⇒中破に相当する（岡田ら、地震被害のための建物分類と破壊パターン、日本建築学会構造系論文集、第524号、1999。）

活断層 A		
No.	K8	
断層変位量	横ズレ35cm	
建築年代	2000年以降	
構造形式	木造	
基礎形式	不明	
被害程度及び状況	【無被害】 建物の壁や基礎にクラックは確認できない	
No.	K9	
断層変位量	横ズレ10~20cm	
建築年代	1981年以前	
構造形式	RC造	
基礎形式	不明	
被害程度及び状況	【無被害】 宅盤にクラックが多くみられるが建物は無被害 背後の擁壁が倒壊	
No.	K10	
断層変位量	(確認できない)	
建築年代	1981~2000年	
構造形式	木造	
基礎形式	布基礎	
被害程度及び状況	【倒壊】 断層部で折れ曲がる状況は見られない 写真手前は1981年以前の建物で崩壊している	
No.	K12	
断層変位量	横ズレ5cm	
建築年代	1981~2000年	
構造形式	木造	
基礎形式	不明	
被害程度及び状況	【軽微】	
No.	K13	
断層変位量	横ズレ20~30cm	
建築年代	1981~2000年	
構造形式	木造	
基礎形式	不明	
被害程度及び状況	【倒壊】 断層部で折れ曲がる状況は見られない	
No.	K18	
断層変位量	横ズレ5cm	
建築年代	1981年以前	
構造形式	木造	
基礎形式	-	
被害程度及び状況	【全壊】 断層は写真手前側の建物直下を通過する。 全壊ではあるが建物は傾いていない。	

図 5-5 活断層上の建築物被害状況 (活断層 A\_その1)

活断層 A	
No.	K19
断層変位量	不明
建築年代	1981年以前
構造形式	木造
基礎形式	-
被害程度及び状況	【全壊】 断層は建物奥を通過する。倒壊しているが、断層の明瞭なズレは確認できない。



図 5-6 活断層上の建築物被害状況（活断層 A\_その 2）

活断層 B	
No.	K1
断層変位量	(確認できない)
建築年代	1981年以前
構造形式	混合
基礎形式	布基礎
被害程度及び状況	【軽微】
No.	K2
断層変位量	横ズレ2cm
建築年代	2000年以降
構造形式	軽量鉄骨プレハブ
基礎形式	不明
被害程度及び状況	【軽微】 ベランダ側は改修工事を実施しており、状況確認できない
No.	K3
断層変位量	(確認できない)
建築年代	2000年以降
構造形式	木造
基礎形式	布基礎
被害程度及び状況	【軽微】 基礎ブロックにわずかな亀裂有





図 5-7 活断層上の建築物被害状況（活断層 B）

活断層C		
No.	K1	
断層変位量	1cm	
建築年代	1981年以前	
構造形式	木造	
基礎形式	布基礎	
被害程度及び状況	【倒壊】 断層は写真奥を通過 断層部で折れ曲がる状況は見られない	
No.	K5	 
断層変位量	横ズレ10cm（擁壁ズレにより確認）	
建築年代	2000年以降	
構造形式	木造	
基礎形式	べた基礎	
被害程度及び状況	【無被害】 擁壁に横ズレが認められ、基礎部分がやや沈下しているが、建物に影響は認められない	
No.	K11	
断層変位量	横ズレ5cm	
建築年代	1981年以前	
構造形式	木造	
基礎形式	－	
被害程度及び状況	【一部損壊】 断層は写真手前側の建物直下を通過するが、建物は一部損壊の被害であった。	

図 5-8 活断層上の建築物被害状況（活断層 C）

## 2) 宅地被害

活断層上の宅地被害について現地調査を実施した。その結果、宅地に変状が認められた箇所について、表 5-8 及び図 5-9～図 5-13 に整理した。

活断層上の宅地被害は、断層変位に起因するとみられる宅盤のアスファルトやコンクリートの亀裂被害が多く、浮き上がりや側方への移動もみられた。また、活断層上及び活断層付近での擁壁の崩壊もみられ、ねじれるように倒壊している事例もみられた。さらに、斜面崩壊の事例(C-T6)もみられた。

しかし、活断層上以外の宅地においても擁壁・宅地・法面(斜面)崩壊は多くみられたことや 5.1(2)に示したように宅地被害が崖・段差地形といった地形との関連が強いと考えられることから、活断層による地盤のズレが今回の地震における宅地被害の主要因とは考えにくい。

表 5-8 活断層上の宅地被害

活断層	エリア	No.	種別	変 状	
A	鉄砂川より東側	T1	宅地	地表地震断層沿いに開口クラック	
		T2	擁壁	ブロック積擁壁の傾動、階段の破損	
		T3	ブロック壁	断層のズレによるブロックのズレ	
		T4	宅地	アスファルト舗装面に波うちやクラックがみられる	
		T5	宅地	宅盤コンクリートにクラックが顕著	
		T6	擁壁・ブロック壁	コンクリート擁壁の破壊(倒壊)、ブロックの破壊	
		T7	宅地・ブロック壁	宅地にクラック、上下最大7cm変位、宅盤間のブロックの破壊	
		T8	擁壁	コンクリート擁壁の倒壊	
		T9	コンクリート壁・宅地	コンクリート壁及び宅盤コンクリートのズレ	
		T10	宅地	アスファルト舗装面に波うちやクラックが顕著	
		T11	側溝	断層のズレによる側溝の浮き上がり	
		T12	宅地	コンクリート宅盤の水平移動、門柱の傾動	
		T13	宅地	舗装面にクラックが多くみられる	
		鉄り砂川西よ側	T14	擁壁	民地界の小規模な擁壁が転倒している
	T15		擁壁	水路護岸のブロック積擁壁が割れ、ブロックが抜け落ちている	
	T16		擁壁	擁壁が割れて傾動している	
B	鉄砂川より東側	T1	擁壁	ブロック積擁壁の倒壊・崩壊	
		T2	側溝	道路側溝のコンクリート蓋のズレ	
		T3	宅地	宅盤コンクリートに開口クラックがみられる	
		T4	宅地	宅盤コンクリートに開口クラックがみられる	
		T5	ブロック壁	ブロック壁の破壊	
		T6	ブロック壁	ブロックの破壊により背後の地山も崩壊	
		T7	宅地	地表地震断層沿いに開口クラック	
		T8	擁壁	ブロック積擁壁の倒壊	
		T9	擁壁・宅地	ブロック積擁壁の傾動、倒壊と宅地地盤の崩壊	
		T10	擁壁・宅地	断層による擁壁がねじれ倒壊、宅盤の窪み	
C	鉄砂川より東側	T1	擁壁・宅地	ブロック積擁壁の破壊、アスファルト舗装面の破壊	
		T2	擁壁	石積擁壁の破壊	
		T3	宅地・ブロック壁	宅地にクラック、ブロック壁の破損	
		T4	擁壁	擁壁の傾動	
		T5	盛土法面	谷沿いの道路盛土の破壊	
		T6	斜面	宅地隣接斜面の崩壊	
		T7	コンクリート壁・法面	コンクリート壁の崩壊、モルタル吹付のクラック	
		T8	擁壁・宅地	擁壁のズレ、宅盤のクラック・沈下	
		T9	擁壁・宅地	擁壁のズレ、宅盤コンクリートのクラック	
		T10	擁壁	空石積擁壁の崩壊	
		鉄り砂川西よ側	T11	擁壁	コンクリート擁壁が割れて、傾動している
	T12		擁壁・宅地	宅盤コンクリートのクラックがみられる	

※上記被害の内、宅盤のクラックは小規模で宅地被害としては軽微なもの是对象としていない。したがって、調査箇所は表 5-7 の建築物調査箇所とは一致しない。

活断層 A		
No.	T2	
断層変位量	不明	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	ブロック積擁壁の傾動や破損 階段の破損	
No.	T6	
断層変位量	不明	
種別	擁壁・ブロック壁	
被害程度及び状況	コンクリート擁壁の破壊（倒壊） ブロックの破壊	
No.	T8	
断層変位量	横ズレ10cm	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	コンクリート擁壁が倒壊している	
No.	T9	
断層変位量	コンクリート壁・宅地	
種別	不明	
被害程度及び状況	宅盤コンクリートにズレがみられる 基礎のコンクリートがずれている	
No.	T10	
断層変位量	なし	
種別	宅地	
被害程度及び状況	宅盤アスファルト舗装の開口亀裂 アスファルトスラブが水平に揺すられることによって生じた亀裂と考えられる	
No.	T13	
断層変位量	横ズレ30cm、上下不明	
種別	宅地	
被害程度及び状況	舗装面にクラックが多くみられる	

図 5-9 活断層上の宅地被害例（活断層 A\_その 1）

活断層 A		
No.	T14	
断層変位量	横ズレ5cm、上下不明	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	民地界の小規模な擁壁が転倒している	
No.	T15	
断層変位量	横ズレ2~3cm、上下2~3cm	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	水路護岸のブロック積擁壁が割れて、ブロックが抜け落ちている	
No.	T16	
断層変位量	横ズレ0.5cm、上下不明	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	擁壁が割れて、南側（写真向かって奥）が傾動している	

図 5-10 活断層上の宅地被害例（活断層 A\_その 2）

活断層 B		
No.	T1	
断層変位量	不明	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	写真手前、ブロック積擁壁が破壊、写真中央奥、ブロック積擁壁の傾動みられる	
No.	T5	
断層変位量	不明	
種別	ブロック壁	
被害程度及び状況	コンクリート擁壁の破壊 断層位置に対応するコンクリートブロックの亀裂	
No.	T7	
断層変位量	横ズレ不明、上下数cm	
種別	宅地	
被害程度及び状況	地表地震断層沿いに開口クラックがみられる	
No.	T8	
断層変位量	不明	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	ブロック積擁壁の破壊。浮上がるように移動している	
No.	T9	
断層変位量	横ズレ5cm、上下不明	
種別	擁壁・宅地	
被害程度及び状況	ブロック積擁壁の倒壊 写真右側の宅盤でも擁壁の傾動と背後地盤の壊は崩壊がみられる	
No.	T10	
断層変位量	横ズレ9cm、上下不明	
種別	擁壁・宅地	
被害程度及び状況	断層による擁壁のねじれて倒壊している 宅盤では窪みみられる	

図 5-11 活断層上の宅地被害例（活断層 B）

活断層 C		
No.	T4	
断層変位量	不明	
種別	擁壁	
被害程度及び状況	コンクリート擁壁が写真手前側に傾斜傾動しており、隅角部分で開きがみられる	
No.	T5	
断層変位量	不明	
種別	盛土法面	
被害程度及び状況	谷沿いの道路盛土の崩壊 谷側に崩壊しており、道路上には段差がみられる	
No.	T6	
断層変位量	不明	
種別	斜面	
被害程度及び状況	宅地に隣接する斜面が崩壊しているが、建物に影響はない	
No.	T7	
断層変位量	不明	
種別	コンクリート壁・法面	
被害程度及び状況	コンクリート壁の崩壊しており、モルタル吹付のクラックがみられる	
No.	T8	
断層変位量	横ズレ数cm、上下3~5cm	
種別	擁壁・宅地	
被害程度及び状況	擁壁端部にズレがみられる 宅盤のクラックや地盤の沈下もみられる	
No.	T9	
断層変位量	横ズレ5cm、上下5cm	
種別	擁壁・宅地	
被害程度及び状況	コンクリート擁壁のズレ、宅盤コンクリートのクラックがみられる	

図 5-12 活断層上の宅地被害例（活断層 C\_その 1）

活断層 C		
No.	T11	
断層変位量	不明	
種別	擁壁	
被害程度 及び状況	コンクリート擁壁が割れて、傾動している	
No.	T12	
断層変位量	横ズレ5cm	
種別	擁壁・宅地	
被害程度 及び状況	宅盤コンクリートのクラックがみられる	

図 5-13 活断層上の宅地被害例（活断層 C\_その 2）

活断層上以外		
No.	T1	
断層変位量	—	
種別	擁壁	
被害程度 及び状況	擁壁の崩壊 (辻の城地区・市ノ後団地)	
No.	T2	
断層変位量	—	
種別	擁壁	
被害程度 及び状況	ブロック積擁壁の崩壊 (辻の城地区)	
No.	T3	
断層変位量	—	
種別	擁壁	
被害程度 及び状況	擁壁の崩壊（役場北西方・宮園地区） 建物への影響が生じる可能性がある大規模な崩壊 が発生	
No.	T4	
断層変位量	—	
種別	法面	
被害程度 及び状況	道路沿いの法面崩壊により小屋が倒壊している (辻の城地区)	
No.	T5	
断層変位量	—	
種別	宅盤	
被害程度 及び状況	宅地地盤の沈下 (安永地区)	
No.	T6	
断層変位量	—	
種別	宅盤	
被害程度 及び状況	法面保護工のコンクリート盤の崩落 (保健福祉センター東側)	
No.	T7	
断層変位量	—	
種別	宅盤	
被害程度 及び状況	宅地擁壁の緩み (惣領地区・県道235号沿い)	
No.	T9	
断層変位量	—	
種別	道路	
被害程度 及び状況	マンホールの浮上がり (馬水地区・秋津川沿い)	

図 5-14 活断層上以外の宅地被害例

### 3) 活断層による地盤のズレに伴う建築物等被害リスク

断層直上の建築物及び宅地の被害状況の調査の結果、今回の地震では活断層による地盤のズレが主要因と考えられる建築物倒壊や宅地の大きな被害は認められなかった。

今回、活断層上に存在した主な建築物は、基礎構造が布基礎やべた基礎構造等の低層建築物であったが、活断層による地盤のズレが主要因と考えられる倒壊被害は認められなかったことから、鉄筋コンクリート造の布基礎やべた基礎で一体化された基礎構造を持つ低層建築物については、今回の地震と同程度の規模と想定される将来発生する地震においても、今回と同様に、活断層による地盤のズレを要因とする倒壊被害が発生する可能性は低いことが推測される。

ただし、中高層建築物等の杭基礎構造の場合は、今回、活断層上に建築された中高層建築物はほとんど無く、大きな被害を受けたものは存在していないが、今回と同様の最大 35cm の横ズレや最大 15cm 程度の上下変位が発生した場合には、杭基礎の損壊等が生じるリスクも考えられる（台湾集集地震等の過去の活断層直上における中高層建築物の被害事例や川島（2001）による断層変位を受ける橋梁の杭基礎の解析検討結果等を参考資料 7, P.119 に示す）。

なお、活断層 C 上に 3 階建ての中層建築物が存在していたが、当該敷地での活断層による地盤のズレは 3cm とわずかであり、大きな被害は生じていなかった。

活断層による地盤のズレが建築物に与える影響については、今後の更なる調査研究が必要であるが、まちづくりを行う上で、リスク回避の観点から安全対策を行うことが望ましいと判断される。

## (2) 強震動

建築物被害の大きな範囲は、高位面の一部と中位面、低位面に位置している（図 5-1）。これらの範囲は、3 において地震観測記録や地震応答解析により地表応答が大きくなった地形であることから、強い揺れが発生したものと推測され、建築物被害の主要因となったと考えられる。（「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会報告書」（以下、委員会報告書とする。）においても、2000 年以降の基準を満たす木造住宅の倒壊要因として、想定を上回る地震動による可能性が指摘されている。）また、建築物倒壊方向が地震動の強震方向と一致していることから強震動が被害の主要因であると考えられる。（参考資料 4, P.116）

さらに、図 5-16 に示す各地点での地震応答解析の結果、建築物被害が大きい地点に位置する②、③、⑤、⑨では固有周期 1 秒程度の応答が大きくなることが明らかとなった（図 5-17、図 5-18）。この点からも建築物被害の主要因が強震動であることを示唆するものである。

以上のことから、益城町市街地における建築物被害は強震動が主要因であると考えられるが、委員会報告書の調査結果や、建築に係る関係機関による今後の検討状況を踏まえ、必要に応じて建築物の安全対策を行うことが望ましいと考えられる。

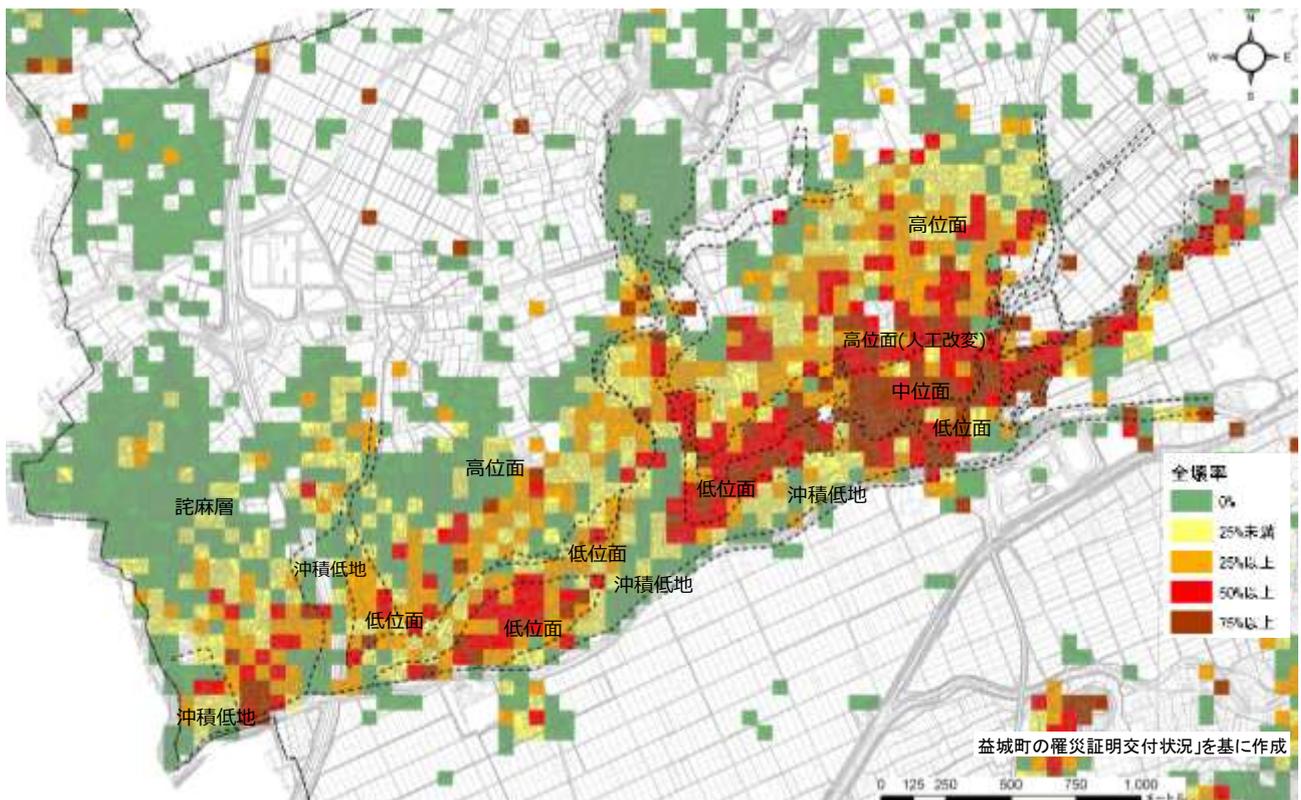


図 5-15 地形区分と建築物被害状況（被害状況は罹災証明調査による）

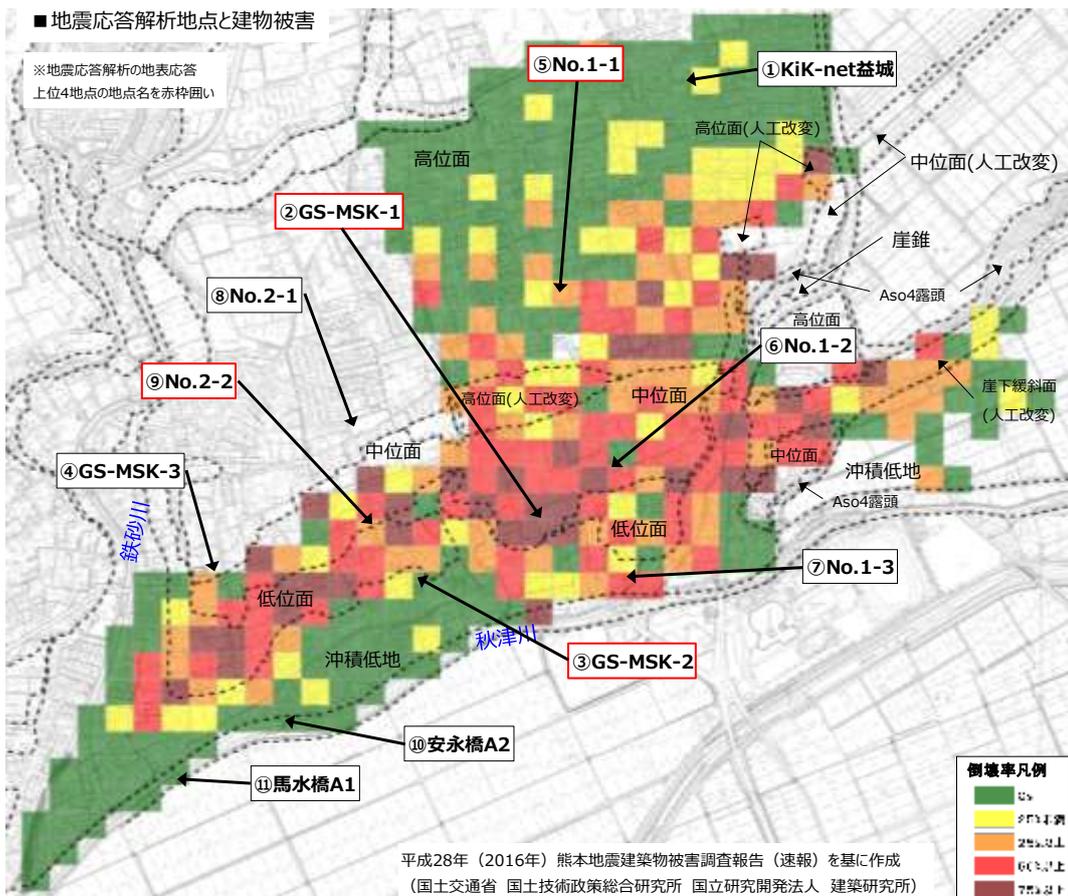
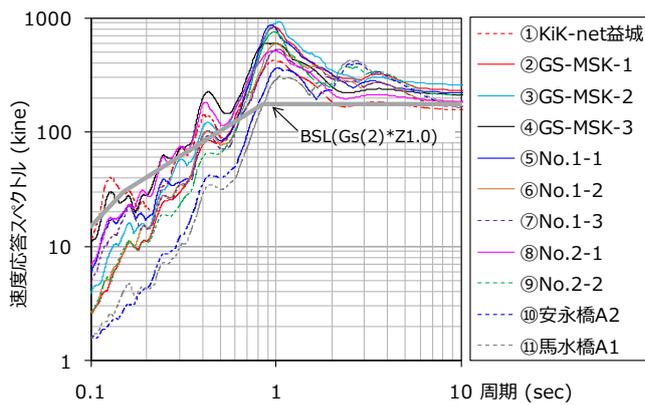
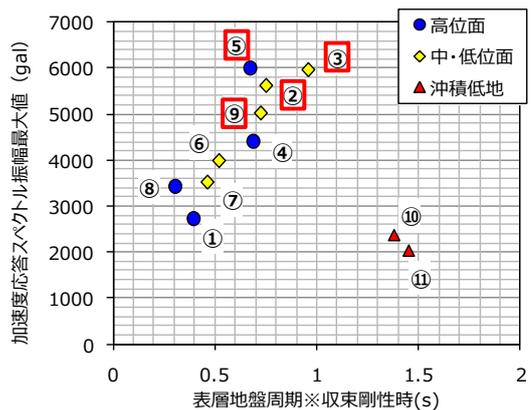


図 5-16 解析地点と建築物被害(鉄砂川東側)



■補足  
 図中の灰色線：建築基準法第2種地盤の極稀地震(地域係数  $Z=1.0$ )に対応する速度応答スペクトル

図 5-17 速度応答スペクトル



■補足  
 ・表層地盤周期：Aso4 火砕流堆積物より上面の地盤固有周期とした。ここでは、地震応答解析の収束時のせん断波速度と層厚により算出した。  
 ・③GS-MSK-2、⑦No.1-3は平面図上では沖積低地に位置しているが、ボーリング調査結果より低位面と分類した。

図 5-18 加速度応答スペクトル最大振幅  
と表層地盤周期

5.1 で述べたように、宅地被害は崖・段差地形との関連が強いものと考えられるが、危険と判定された構造は擁壁が大部分であり（表 5-4）、さらに高さ 3m 以下の構造が大半を占める（表 5-6）。

従来小規模の宅地擁壁は耐震設計の対象外とされており、耐震設計を行う場合においても中規模地震相当（設計水平震度  $K_h=0.2$  程度）である。今回の地震では KiK-net 益城において 1,000gal（単純に設計水平震度に換算すれば  $K_h=1.0$ ）以上が観測されていること、及び擁壁の被災状況が背後土圧の作用により前面に崩壊している場合が多く確認できることから、強震動による過大な土圧の作用が被害の主要因であると考えられる。

現在、「被災宅地復旧技術マニュアル」の改訂に向けて検討が進められているところであるが、これらの安全基準等を踏まえ、宅地擁壁等の安全対策を行うことが望ましいと考えられる。

### (3) 液状化

液状化被害の発生は主として沖積低地部、鉄砂川～妙見川間の低位面（中州状）に分布しており、建築物被害の大きな高～低位面とは一致しない。また、液状化の痕跡の多くが確認された沖積低地部も粘性土が主体であり、全面的な地盤の液状化ではなく、埋設管等の埋戻し材料が液状化した事例が多い。よって、建築物被害の主要因ではないと考えられる。

しかし、2004 年新潟中越地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震等過去の地震で発生したマンホールの浮上りや管路部の沈下等の埋戻し土の液状化に伴うライフライン被害と同様の現象確認されていることから、ライフライン施設の被害においては埋戻し土の液状化が主要因であるものと考えられる。また、現行基準類に基づく液状化判定結果では、沖積低地部に部分的に分布する沖積砂層は今後の地震時の液状化が懸念される結果となっている。

以上のことから、各種ライフライン施設の技術基準や市街地液状化対策のガイダンス等を踏まえた安全対策を行うことが望ましいと考えられる。

## 6. 今回の地震被害を踏まえた益城町での安全対策の提案

### 6.1. 安全対策の基本方針

安全対策の基本方針として、平成 28 年熊本地震の被害要因として考えられる強震動を対象とした安全対策を行うことが基本となると考えられる。ただし、活断層による地盤のズレが中高層建築物等の杭基礎に被害を与えるリスクも想定されることから、活断層による地盤のズレについても安全対策上配慮することが考えられる。また、ライフライン施設への影響の観点から、液状化に対する安全対策にも配慮することが考えられる。したがって、本報告では、強震動、活断層による地盤のズレ、液状化についての安全対策のあり方について検討し、益城町における復興まちづくりを進めるにあたっての配慮点を提案することとする。

### 6.2. 活断層による地盤のズレに対する安全対策の提案

活断層による地盤のズレに対する安全対策の考え方として以下を提案する。

なお、以下の提案は、現在、益城町において急ぎ進められている復興まちづくりの計画策定への支援として、限られた期間・範囲で行われた調査結果をもとにした一つの提案である。今後、新たな事実の判明や新しい知見が得られた場合には、内容を見直す可能性もあることを申し添える。

#### (1) 活断層による地盤のズレの生じる可能性のある範囲

市街地での活断層メカニズム（階段状断層であり表層に軟弱層が堆積）から、活断層 C から南の秋津川までの範囲は、活断層による地盤のズレが生じる可能性がある範囲と考えられる。鉄砂川西側で活断層 C は活断層 A に収斂するが、これより西側では活断層 A と秋津川の間が活断層による地盤のズレが生じる可能性がある範囲と考えられる。

今回活動した活断層周辺では過去の活動の痕跡もボーリング調査等で確認されており、将来も活動する可能性が高く、概ね今回の断層線沿いおよびその周辺で発生するものと推測される。

#### (2) 活断層による地盤のズレに対する安全対策の考え方

基礎構造が布基礎やべた基礎等の低層建築物については、今回と同様の地盤のズレに対しては建築物の倒壊被害が生じる可能性は低いと想定されるため、今後新築されるこれらの低層建築物については特段の追加的配慮は必要ないものと考えられる。

一方、杭基礎構造を有する中高層建築物等については、活断層による地盤のズレによる被害リスクも想定されるため、このような杭基礎構造を有する建築物を新たに建築する場合は、必要な地盤調査等により、敷地内における活断層の存在の確認等を行うことが考えられる。

活断層の存在を確認するための地盤調査は、ある程度狭い範囲を対象として断層位置を特定することが目的であることを踏まえ、本調査で実施した亀裂調査結果の活用、ボーリング調査及びピット調査を中心とした方法を一例として提案する。なお、物理探査は広範囲からダメージゾーンを特定するために有効な方法であることから、限られた敷地内における調査方法としては除外する。

提案する地盤調査（図 6-1）の概要は以下の通りである。

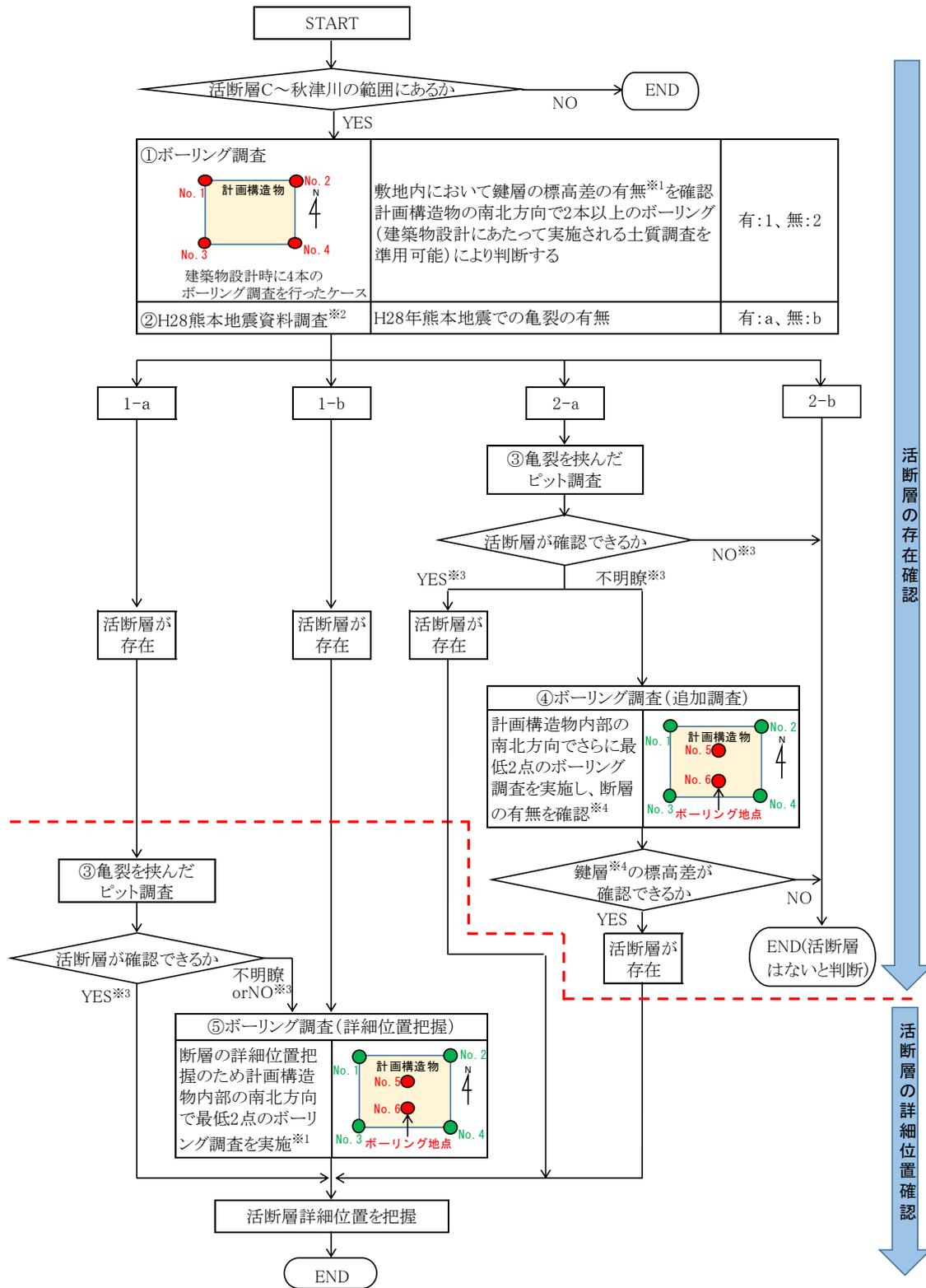
- ・地盤調査は、敷地内の活断層の存在確認を行った後、詳細位置の確認を行う。活断層の存在確認は、①ボーリング調査と②H28 熊本地震の地表亀裂調査結果のレビュー、③ピット調査に基づき判断する。ボーリング調査で鍵層の標高差が確認される場合やピット調査で活断層が明瞭に確認できる場合は、活断層が存在すると判断する。また、ピット調査で活断層の存在が不明瞭である場合は、④ボーリング追加調査を実施し、活断層の有無を判断する。なお、①のボーリング調査は中高層建築物を設計する際に実施される土質調査結果を準用することが考えられ、また、地表亀裂調査については本調査で実施した調査結果の活用が可能である。
- ・⑤活断層の詳細位置確認のためのボーリング調査は、活断層の存在確認のボーリング調査①で、活断層の存在が確認される場合（1-a,1-b）に実施する。

地盤調査の詳細は図 6-1 のフローに示す。また、①～⑤について、地盤調査の概要・調査位置・活断層と判断する基準・調査実施における留意点を表 6-1 に整理した。

### (3) 町の中心部における市街地整備にあたっての安全対策の考え方

町役場周辺の町の中心部は、都市拠点としての整備を進めることを目的として、様々な都市機能の誘導・立地が図られる予定の地区であることから、益城町市街地の中でも有効高度利用が図られる地区であり、今後、杭基礎構造を有する中高層建築物が多く建築されることが想定される。

このため、町の中心部で土地区画整理事業等による面的な市街地整備を行う際には、事業の計画を、被害リスク回避の観点から活断層上の土地利用に配慮したものとすることが有効と考えられる。



※1: Aso-4 直下の間隙層を活断層による地層のズレの指標となる主要な鍵層とするが、Aso-4 上面についても同時期の堆積面を示す鍵層として用いることができる。標高差については、地層の傾斜による標高差について差し引いた上で、断層による変位の有無を検討する。

※2: H28年熊本地震における地表面の亀裂の有無を、「平成28年度熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する報告書,p.30-32、図3-8～3-10」や益城町市街地における亀裂調査成果等の資料調査により把握する。

※3: 亀裂が地下まで連続しないことが明らかな場合はNOとする。また、亀裂が地下まで連続し活断層であることが確かな場合はYES、ピット調査では判断が不明な場合は不明瞭とする。

※4: これまでの調査で、活断層の存在が不明瞭であるため、鍵層は第1候補のAso-4 直下の間隙層とする。

図 6-1 活断層位置確認を目的とした地盤調査の手順

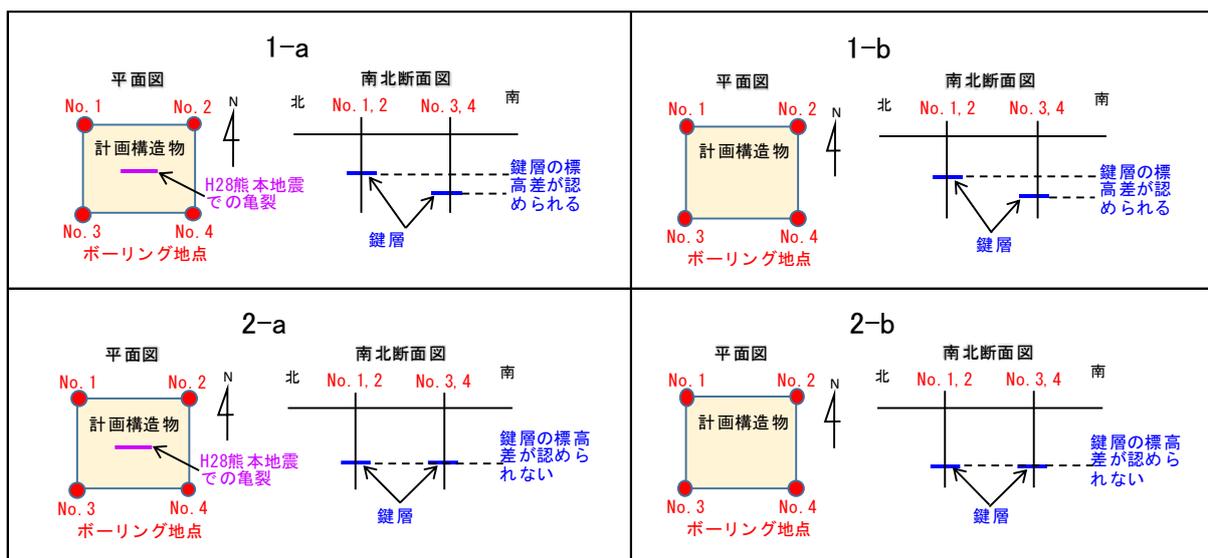
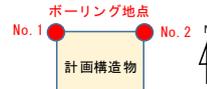
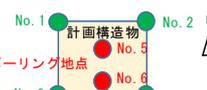


図 6-2 活断層存在確認調査（①ボーリング調査・②H28 熊本地震資料調査）結果の状況イメージ図

表 6-1 活断層位置確認を目的とした地盤調査の方法

調査手法	調査概要	調査位置※1	活断層と判断する基準※2	調査実施における留意点
①④⑤ボーリング調査	<p>ボーリング調査で鍵層の標高差を確認することにより活断層の有無を把握する。Aso-4直下の間隙層を活断層による地層のズレの指標となる主要な鍵層として用いるほか、Aso-4上面についても同時期の堆積面を示す鍵層として用いることとする。</p> <p>調査深度は、鍵層をAso-4上面とする場合(①)は概ね10～20m、Aso-4直下の間隙層とする場合(④⑤)は概ね50～60mとなる。</p>	<p>①では、計画構造物の南北方向で2本以上のボーリング(建築物設計にあたって実施される土質調査を準用可能)により判断する。</p>  <p>④⑤のボーリング調査では、計画構造物毎部の南北方向で最低2点(No.5, No.6)のボーリングを実施する。</p> 	<p>・鍵層に標高差※3が認められる場合は活断層と判断する。</p>	<p>・鍵層をAso-4上面として調査を行った場合、北側標高の方が低くなる等、活断層の有無が判断できない場合は、Aso-4直下の間隙層を鍵層としたボーリングを実施する必要がある。</p>
②H28熊本地震の地表面の亀裂調査結果※4の利用	<p>H28熊本地震における地表面に変位を有する亀裂が確認された箇所を把握することにより活断層を推定する。</p>	—	<p>・変位を有する亀裂発生箇所を活断層が通っていると想定する。</p>	<p>・計画地内に亀裂がある場合は、ビット調査を実施する。</p>
③亀裂を挟んだビット調査	<p>地表面から1～数mを掘削し、壁面の地層のズレの有無を確認することにより活断層を把握する。②亀裂調査で亀裂が確認されている場合の詳細調査として実施する。</p>	<p>計画構造物を南北に跨ぐ測線上に幅数m、深さ1～3m程度の溝状のビットを掘削。</p> 	<p>・壁面に活断層とみられる土層の変位が認められるか否かで判断する。</p>	

※1：調査位置について、当地の断層走向が東西方向なので便宜的に南北と表現しており、本来断層に対して直角方向の意である。

※2：活断層と判断する基準については、今回の調査結果を踏まえたものであり、地質状況が異なる他地域に適用する場合には、それぞれの現地状況を踏まえて適切に設定する必要がある。

※3：判断基準としての標高差は、調査地点間隔や地層の傾斜により異なるが、例えば本調査で得られた Aso-4 直下の間隙層の標高差は 5.5～15.1m、Aso-4 上面の標高差は 4.0～9.9m であった。

※4：H28 年熊本地震における地表面の亀裂の有無を、「平成 28 年度熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する報告書, p.30-32、図 3-8～3-10」や益城町市街地における亀裂調査成果等の資料調査により把握する。

### 6.3. 強震動に対する安全対策の提案

強震動に対する安全対策の考え方として以下を提案する。

#### (1) 建築物の耐震化の考え方

建築物の安全対策については、「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書」  
※1における被害原因の分析結果を参考にして取り組む必要がある。

#### (2) 宅地の耐震化の考え方

宅地の安全対策については、「被災宅地復旧マニュアル(作成中)」に基づいた以下の内容とする。  
空石積擁壁（不適格擁壁）の被害が多かったことから、既存の不適格擁壁については目標構造耐震基準以上に補強ないし再構築による復旧を促進することが必要である。また、適格擁壁については、被災程度が軽微～中規模までは補修工法による原形復旧、被災が大規模の場合は、目標構造耐震基準以上に再構築することによる復旧を促進することが必要である。

また、盛土材に適さない火山灰質土を広く分布する地域であることから、盛土材に火山灰土を用いる場合、含水量調節及び安定処理により入念に施工することが必要である。

※1 熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書

<http://www.nilim.go.jp/lab/hbg/0930/report.htm>

#### 6.4. 液状化に対する安全対策の提案

ライフライン施設の液状化に対する安全対策の考え方として以下を提案する。

ライフライン施設のうち特に下水道管路施設（管きょ及び人孔）は、幹線道路から細街路を含め多くの道路に敷設されており、液状化による浮上り、沈下等の被害が生じた場合、管きょの流下機能を損失するだけでなく、道路交通への影響、土砂流入等に伴う周辺地盤変状の発生等が生じる可能性もある。

益城町市街地における下水道管路施設の被害は、2004年新潟中越地震や2011年東北地方太平洋沖地震の際にも問題となった埋戻し土の液状化によるものが主体であった。管きょ及び既設人孔の埋戻し土の液状化に対する安全対策としては、「下水道施設の耐震設計指針と解説－2014年版－」に耐震対策工法（図6-1）が紹介されており、この考え方に基づき安全対策を促進することが望ましい。

ただし、これらの工法は固化材料の強度、砕石材や埋戻し土自体の締固め程度によりその効果が発揮されるものであり、所定の強度、締固め度の確保について施工管理等で十分配慮が必要である。

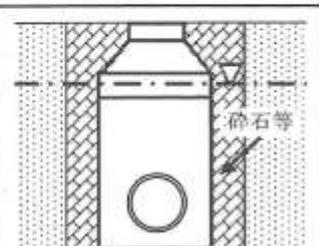
埋戻し方法 <sup>※</sup>	(1)埋戻し土の固化	(2)砕石等による埋戻し	(3)埋戻し土の締固め
概要図	<p>地下水位以深を固化改良土等で埋戻す。</p> 	<p>透水性の高い材料(砕石等)で地下水位より上方まで埋戻す。</p> 	<p>良質土で締固め(締固め度 90%程度以上)ながら、埋戻す。</p> 
埋戻し材料	現地発生土あるいは購入土。	透水性の高い材料。 例えば、10%通過粒径(D <sub>10</sub> )が1mm以上の砕石、又は、排水効果の確認されている材料。	良質な砂、又は埋戻しに適した現地発生土。
施工管理	液状化被害防止と再掘削を考慮した強度を確保する。 例えば、現地における一軸圧縮強度の平均値で、50kPa～100kPa	道路管理者の基準を準用する。 例えば、締固め度90%以上確保。	締固め度で90%以上。 なお、90%以上でも周辺地盤が軟弱な場合には液状化した実験事例があることから、現地の特性に留意することが必要。
特徴等	埋戻し部が非液状化層となるため、液状化に対する効果は大きい。	マンホール・管路近傍部の過剰間隙水圧が消散するため、液状化に対する効果は大きい。	十分な締固めを行うことにより、埋戻し部の過剰間隙水圧を小さくすることができる。 地下水位が高い場合には、適用に十分注意する。

図 6-1 埋戻し土の液状化対策工法<sup>※1</sup>

※1 下水道施設の耐震設計指針と解説－2014年版－、日本下水道協会

## 7. おわりに

本報告は、2016年熊本地震の影響により大きな被害を受けた益城町市街地において、地形・地質及び地盤特性の把握を目的とした地質調査等を実施し、その結果を踏まえて将来の活断層の活動に関する評価や、市街地の復興に向けた安全対策の提案等を行った。

なお、本調査は限られた期間・範囲で行われた調査結果をもとに分析等を行ったものであり、必ずしもすべてが解明されているわけではない。現在、多くの研究機関や学識関係者等により益城町の地質・土質の調査、分析・評価が精力的に進められており、今後新たな知見が得られることも十分考えられる。今後新たな知見・事実が判明した場合には、関係機関において本提案をベースとして更なる改良を期待する。

本調査では、市街地直下の活断層の活動という地震の特殊性を踏まえ、被害要因や安全対策の検討においては、活断層や地震・地盤及び建築の専門家からなる有識者会議を設置して意見を聴取し、その結果を本報告に反映した。また、被災者の皆さまや益城町をはじめとした関係各機関には調査の目的を十分理解頂いた上で、調査実施にあたって各段の配慮を頂いた。関係各位に深謝の意を表す。

以上

益城町の市街地復興に向けた安全対策等検討有識者会議 委員名簿

専門	氏名	所属
断層	○熊木 洋太	専修大学 文学部環境地理学科 教授
	宇根 寛	国土交通省国土地理院 地理地殻活動研究センター センター長
地盤	小長井 一男	横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授
地震動	池田 隆明	長岡技術科学大学大学院 工学研究科 環境社会基盤工学専攻 教授
建築	五十田 博	京都大学生存圏研究所 生活圈構造機能分野 教授

○ 座長

## 参 考 资 料

# 1. 地質調査概要

## 1.1. 標準貫入試験

標準貫入試験は、地盤の硬軟・締まり具合を把握するために JIS A 1219 に基づき実施した。試験深度は他の試験との重複箇所を除き深度 1m 毎に行うことを基本とした。

標準貫入試験方法の概要は、以下のとおりである。

- ・ 試験開始深度まで掘削を行った後に、孔底のスライムを除去する。
- ・ ロッドの先端に SPT サンプラーを取り付け孔底まで降ろし、アンビルを取り付ける。
- ・ 重さ  $63.5 \pm 0.5 \text{kg}$  のハンマーで、アンビルを打撃する。この時最初の 15cm を予備打ち、次の 30cm を本打ちとし、本打ちは高さ  $76 \pm 1 \text{cm}$  から自由落下させこの時の打撃回数を N 値として記録する。なお、本打ち貫入量が 30cm に満たない場合は N 値の上限を 50 とし、そのときの貫入量を記録する。

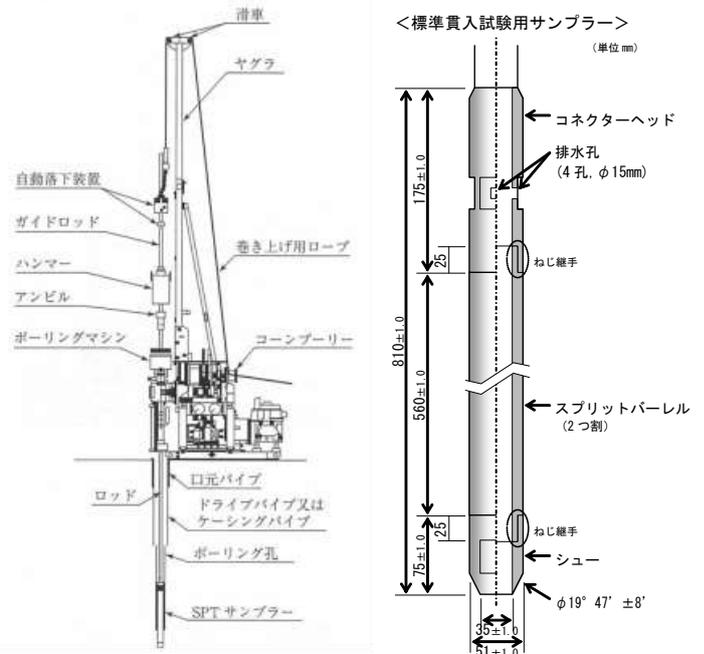


図 1-1 標準貫入試験概念図

出典：地盤調査の方法と解説 (社)地盤工学会

## 1.2. PS 検層

PS 検層（速度検層）は地盤内を伝播する弾性波速度を測定することを目的とし、JGS 1122 に準拠し、実施した。測定は原則として深度 1m 間隔毎に実施した。

試験方法は以下に示すとおりである。

- ・ ボーリング孔内の所定の深度に降下させたゾンデを、孔壁に圧着させる。
- ・ S 波の起振は、左右両側から交互に板をハンマーによる打撃で行う。
- ・ 波形収録は起振時から開始するか、起振時の信号を波形と同時に記録する。

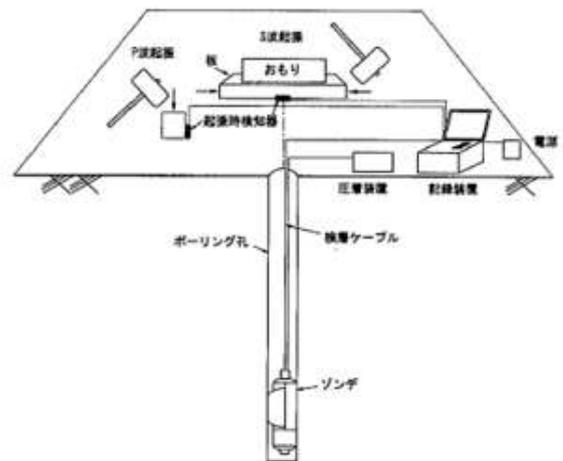


図 1-2 ダウンホール方式測定概念図

出典：地盤調査の方法と解説 (社)地盤工学会

### 1.3. 常時微動計測

#### 1.3.1. 常時微動計測の計算方法・H/V スペクトル算出方法

- ・各観測地点において、水平 2 方向、鉛直 1 方向の成分に対して、15 分前後の計測を実施し、車両等の交通振動による乱れの少ない 163.84 秒×3 区間の常時微動時刻歴データを抽出した。
- ・3 成分の常時微動時刻歴データをフーリエ変換し、parzen ウィンドウ（バンド幅 0.2Hz）にて平滑化したフーリエスペクトルを算出した。
- ・H/V スペクトルは、水平と鉛直成分のフーリエスペクトルの比として算出し、水平成分は 2 成分の 2 乗平均の平方根とした。
- ・3 区間の H/V スペクトルを平均化し、当該地点の H/V スペクトルを算出した。

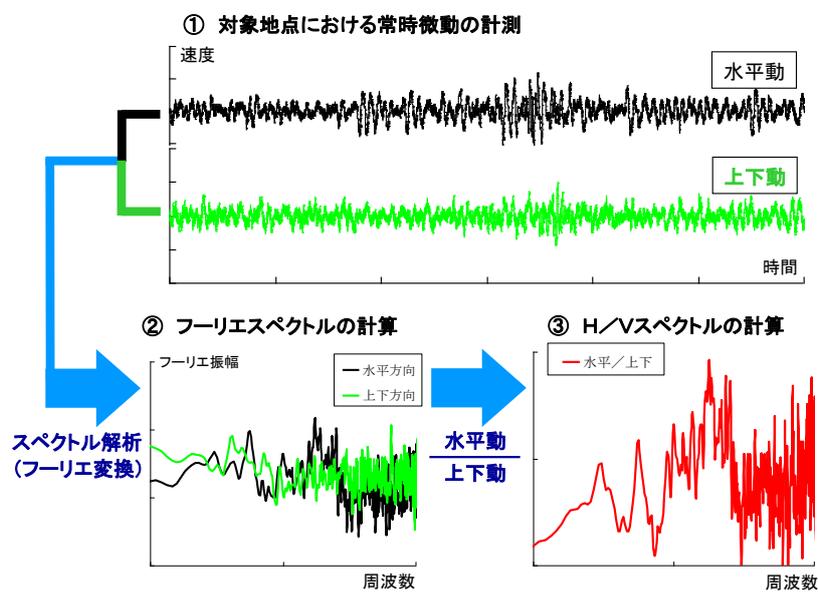


図 1-3 H/V スペクトル算出概念図

#### 1.3.2. 計測機器・観測状況

計測機器および計測状況を以下に示す。



図 1-4 (左：計測機器 右：計測状況)

## 1.4. 表面波探査

### 1.4.1. 表面波探査の原理

表面波探査は、人工的に表面波（レーリー波）を発生させ、その波動を、地表に等間隔で設置した受振器で測定し解析する調査方法で二次元的 S 波速度構造を求める技術である。

図 1-5 に測定概念図を示す。カケヤ等で地表面を起振すると弾性波が、発生し、地中ならびに地表を伝播していく。このうち、地表近傍を横方向に伝播するものを表面波と呼ぶ。地盤の S 波速度は、物質の硬さなど工学的な目安となる剛性率に直接関係する値であり、N 値との相関も良い。

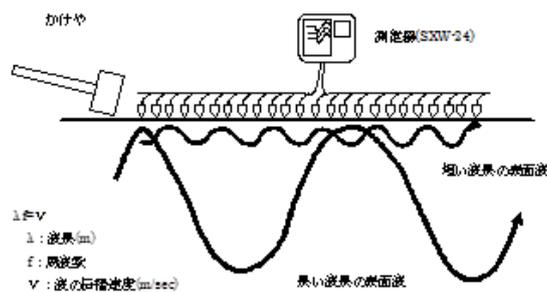


図 1-5 測定概念図

### 1.4.2. 表面波探査測定方法

#### (1) 受信器・ケーブルの設置

測量によって設けた受振点の位置に受振器を設置し、受振器と観測本部の測定器との間を多芯ケーブルで接続する。受振器を同一間隔で設置し、起振は、カケヤを用いて展開端部からで行う。

#### (2) 起振、測定

ノイズ等の小さいときを見計らい、測定本部の合図により起振する。発生した弾性波（表面波）は、地中を伝播し各受振点で受振される。各受振点で受振された振動は、受振器において電気信号に変換され、多芯ケーブルを介して観測本部の測定器に入り、適当な振幅に増幅、A/D 変換された後、測定器に内蔵されているハードディスクに収録される。

#### (3) 起振・受振点の移動

起振点・受振点を平行移動し、再度展開の端部から順次起振を行い、これを繰り返す。

## 2. ピット調査結果

ピット調査は、活断層の活動履歴を把握する目的で、地表に発生した亀裂の地下の状況を目視で確認するために実施した。活断層 A の推定位置近傍で、今回の地震により比較的連続性のある亀裂群が生じたところを対象に適地を選定した。調査位置は、**図 2-1** に示す地点である。

### 1) ピット調査位置の選定

#### ◇ 調査地点の地形・地質状況

- ・産総研実施のボーリング GS-MSK-1 と南側崖下で実施したボーリング No.1-6 の間は、**図 2-1** に示すような地質断面図になっており、この 2 孔の間に活断層 A が存在することが推定される。
- ・活断層 A の活動に伴う、東西性の横ズレ変位を伴う連続的な亀裂群が、台地の上にも下の低地面にも雁行して確認される。
- ・No.1-6 周辺でみられる亀裂群は、雁行状に配列し、比較的明瞭な鉛直変位を伴って連続し、西側のブロック塀に横ズレ変位を与えている。

#### ◇ 用地の条件

- ・ピット掘削可能なある程度広いスペースが確保されており、掘削により周辺の地盤や地下水に障害を与えない。
- ・埋蔵文化財などに関する条件（掘削時立ち会い）

以上のような地形地質条件と用地条件に合致する場所を選定した。

### 2) ピットの配置

以下のようなことに配慮し、ピットの配置と規模を計画した。

- ・地表変位の状況を保存するため、事前に現地の平板測量と写真撮影を実施した。
- ・東西方向に連続する亀裂の一部を残し、ピット壁面との関係がわかるように南北方向を長軸に配置した（南北方向 10m、東西方向約 4m）。
- ・掘削深度は、概ね地下水位が出現するとみられる 2m を目処とした。

ピット配置計画と規模を測量図と写真（**図 2-2**）に示す。

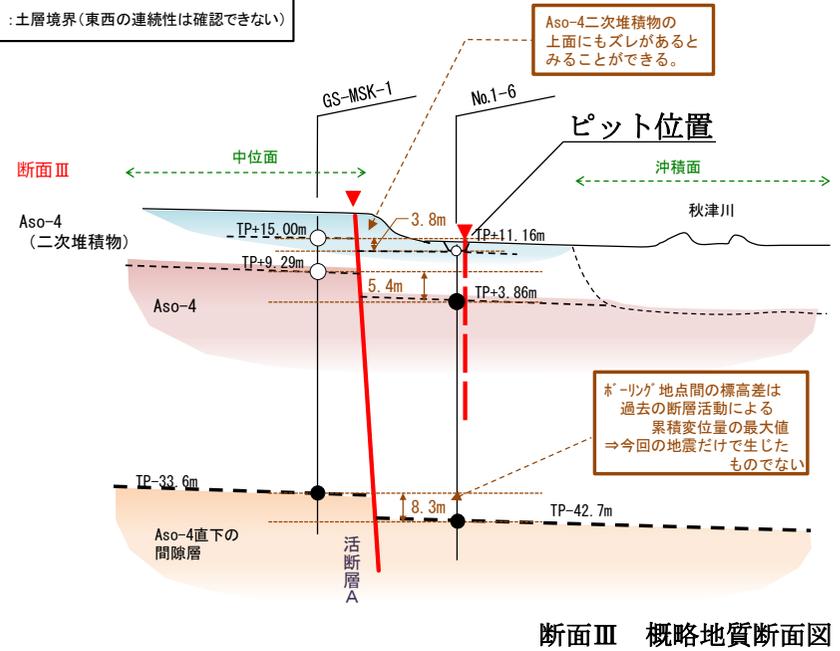
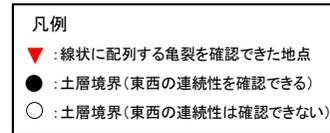


図 2-1 ピット調査位置図

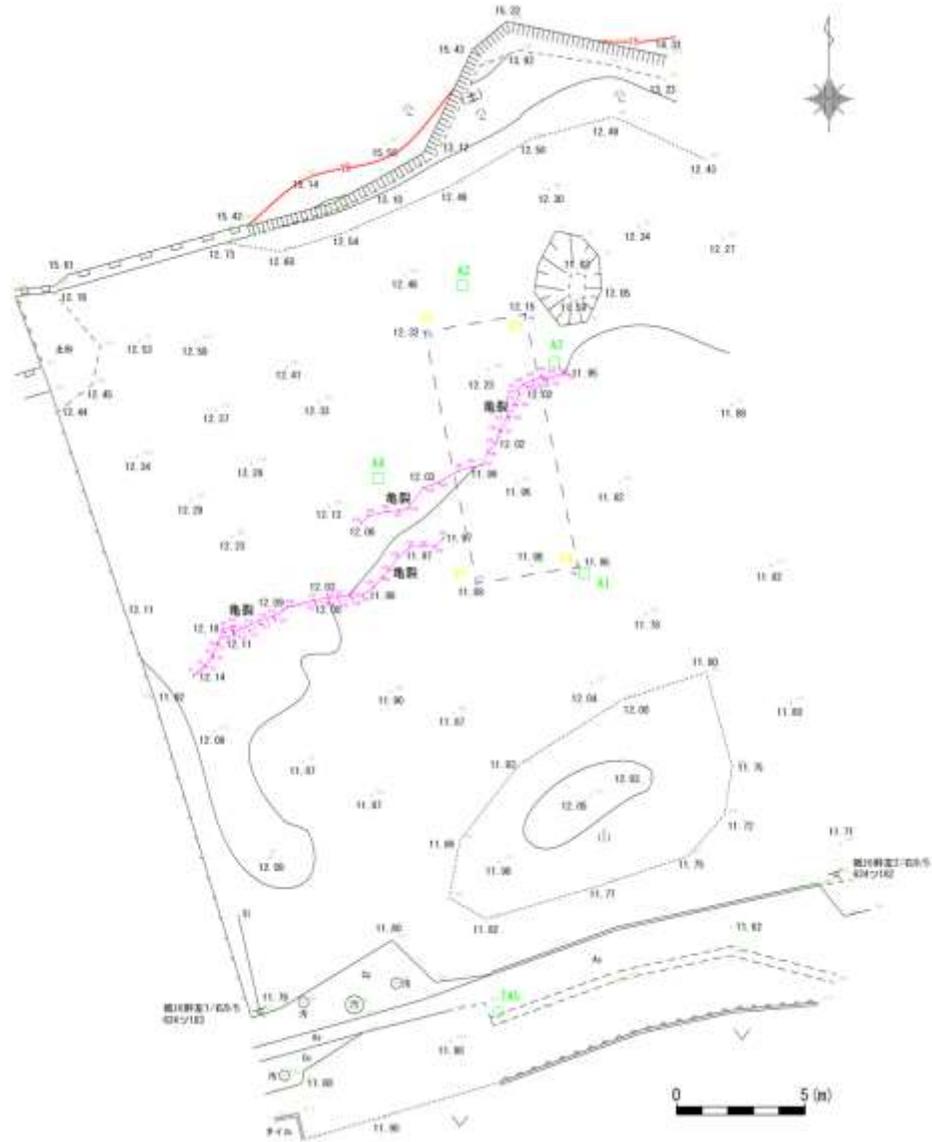


図 2-2 ピット配置図

### 3) ピット調査結果

ピット壁面の概略スケッチを図 2-3 に示す。概略スケッチは、東側壁面・北側壁面・および西側壁面をスケール 1/50 で示した。また、これら壁面の全体写真を図 2-4 に示す。

ピットを構成する土層構成は、相対的に下位のものから順次番号をつけて表示した (表 2-1)。

また、断層と②層中の開口性の亀裂については、走向傾斜を付記して記載した (表 2-2)。以下にそれぞれの壁面の状況を示す。

#### ◇東側壁面

- ・壁面中央部 (3~6.5m) にかけて特徴的な陥没状の部分があり、その両側には周辺地盤を構成する土層が分布する。この壁面には、表 2-1 に示すすべての構成土層が分布する。
- ・陥没部には、下端の一部に分布する③、④層、その上位の特徴的な黒色土層 (⑤層)、さらにそれを不整合に覆い⑥~⑧層までの礫状~粒状の土層が分布する。これらの土層は、南側に 20° 程度傾斜して分布し、上位層ほど境界面は凸凹しているが緩くなる傾向にある。この陥没帯の詳細スケッチを 1/20 で作成し図 2-7 に示す。(同図に年代測定試料採取位置も示す。)
- ・⑨層および⑩層は人工的に転圧された土層とみられ、この陥没帯の表層部に分布するが、陥没帯の北側にも一部みられる。
- ・陥没帯の両側にはアカボク土②層が分布し、陥没帯との境界はシャープな断層関係で接する。
- ・底盤付近の②層の下位には、ほぼ水平に Aso-4 二次堆積物①層が分布する。西側で実施したボーリング No.1-6 の調査結果と整合している。
- ・①層は陥没部より南側では、確実には把握できなかったが、掘削途中の地下水の湧水の状況などから判断して、それほど深くない位置に出現するとみられる。陥没部の下も大きくは落ち込んでいないとみられる。(地下水は、①層と②層の不整合面から湧出しており、ボーリングの調査結果と調和している)
- ・地表亀裂のある 6.7m 付近の段差は約 15cm であるが、北側の断層線はほぼこの段差の背後にのびているように観察される。ここで⑨、⑩層が切られて落ち込んでいる。

#### ◇北側壁面

- ・基底部に①層が分布し、その上部に②層が不整合に重なっている。表層部に玉石を含む表土 (⑩層) が東側に薄く、西側に厚く覆っている。
- ・北西側の高さ 1m 基線を底部にした人工的なピットが掘られておりここに底部にクロボク土壌を基底にし、その上位に礫状の茶色土層が覆い、さらにその上位に玉石を伴う砂質の黒色土壌 (⑩層) が覆っている。この中には、陶器のかけらなどが混じっている。人工的なピット跡と判断される。

#### ◇西側壁面

- ・底盤付近の①層の上位にアカボク土 (②層) が分布し、その上を直接表土 (⑩層) が覆っている。東側壁面に対して単調な土層構成となっている
- ・3.6m 付近に地表の亀裂につながる割れ目 c が見られるほかはほとんど明瞭なものは見られない。これは、両側がアカボク土のため断層としての確証は得られないが、地表の亀裂が連続

して西方に延びて、地表に縦ズレ・横ズレ変位を示していることから東壁面の活断層 a につながるものとみられる。

・アカボク土の下にある Aso-4 二次堆積物は、この c の北側にある亀裂 d の付近からトレンチでは見られなくなっている。

表 2-1 ピット内の土層構成

土層区分	特徴	備考		
⑪ 表土・盛土	まれに玉石を伴う黒色細粒を主とするルーズな土層	転圧縞はみられない 場所によって材質が異なる	人工盛土層	
⑩ 転圧盛土	黒色土と茶色土の薄い縞状層の繰返しがみられる 茶碗破片を伴う	⑨層・⑩層は陥没部の外側にも分布する		
⑨ 黒色土	暗紫色やや砂質な土層 凹部の最下端に炭化木片伴う	年代測定実施		
⑧ 土塊状茶色土	茶色土の塊や礫状の茶色土 質的にはほぼ②と同じ		陥没部構成土層	
⑦ 黒色土	茶色土小礫が混入する砂状黒色土層 上下の境界不規則だが、縞状茶色土を挟み厚みがある	⑤層の北端部を除いて不整合に覆う 年代測定実施		
⑥-2 小礫状茶色土	1～数 cm 程度の礫状～粒状の茶色土の集合体のような土層	水付きのような堆積構造はみられない		
⑥-1 灰色礫状土	灰色の礫状土塊と粒状土からなり淘汰が悪い。	⑥-2 層の下端部にあり、連続性が不明瞭になる部分もある		
⑤ 礫状・粒状黒色土	全体としては塊状にみえるが、礫状・粒状の黒色土からなる土層で北端部は砂状	年代測定実施		
④ 茶色土	黒色土の縞を挟む扁平礫状の茶色土からなり、締りが悪い			
③-2 暗灰色細砂	黒色土を薄く覆うラミナの見られるシルト質細砂			
③-1 黒色有機質土	有機質な黒色土 小礫状・粒状を呈する	年代測定実施		
② 赤ボク土 (茶色土)	茶褐色均質風化火山灰 砂質シルト	ボーリング No.1-6 の出現深度とピットは一致する 地下水位：境界部にある		周辺部土層
① Aso-4 二次堆積物	淡橙色 軟質火山灰質シルト 風化火山礫をわずかに伴う			

\*当該地域では 1 万数千年以降は黒色土が形成される時代であり、茶色土の形成はないとされる。従って、1 万年より若い時代に形成された茶色土は、背後斜面等からの急激な堆積もしくは、人為的な埋め戻しによって形成されたと考えられる。

## ◇断層・亀裂の状況

概略スケッチに示すように陥没部を区切る明瞭な断層と②層アカボク土内にやや連続性に乏しいが、走向が平行する開口した亀裂群がみられる。

### <断層>

- ・断層 a は東壁面で N80E88～76N の走向傾斜を示し、地表の亀裂につながる。この面の陥没帯との境界はシャープで密着しているが、境界付近の⑤層や⑥層一部を引きずっている。一方南側の亀裂 d との間アカボク土内に幅 30cm のガサガサに乱れたゾーンができています。この断層線は、西壁面の亀裂 c につながるとみられるが、ここでは面がシャープでなく不規則な開口亀裂の性状を示す。a とほぼ同じ方向性をもった高角度亀裂であり、地表面にはつながる。西側壁面では c と 4.3m 付近の高角度亀裂 f にかけての範囲がやや割れ目が多く、ガサガサしている。
- ・北側の断層 b は地表に段差を生じさせた断層であり、走向はやや不規則である。地表付近と底盤付近では、高角度であるが、中間部分では傾斜 70° 程度の弧状をなす。この境界部はシャープで地表部以外は、土層はあまり擾乱されていない。こちらの断層の西側壁面への連続性は確認できない。

### <亀裂>

- ・②層内部には、N30～40° E70～80° E あるいは同じ走向で 70～80° W 傾斜を示す連続性の悪い亀裂群が数本抽出される。これらの走向は、ピットの表面で見られた亀裂の走向と調和的である。これら亀裂周辺はルーズで、亀裂にそって土層がはがれやすくなっている。

表 2-2 断層・亀裂一覧表

記号	方向性・特徴	評価
a	N80E76-88N やや傾斜が揺らぐがシャープな境界面 ⑤層・⑥層およびそれより上位の土層を切っている 地表亀裂と一致する 地表変位はほとんどない	断層 ②層と⑤層より上位の土層と接する
b	N60E85S～N60E90 中間部が弧状になり見かけ傾斜 がやや緩くなる 境界面はシャープである 地表亀裂と一致 地表に約 15cm の段差を生じている	断層 陥没部構成層③層～⑤層およびさらに上位の⑨～⑩層と接する
c	N85E80S～N80E76N 西面②層内の開口状亀裂 地表亀裂とつながっている 地表の西側延長部では段差あり	断層 b の延長部にあたるとみられる
d	②層内の a に並走するやや不明瞭な亀裂 a との間がガサガサのクラッキーゾーンとなっている	
e	②層内の b に並走する亀裂 シャープであるが雁行状	
f	西面②層内の開口亀裂 N40E75W	

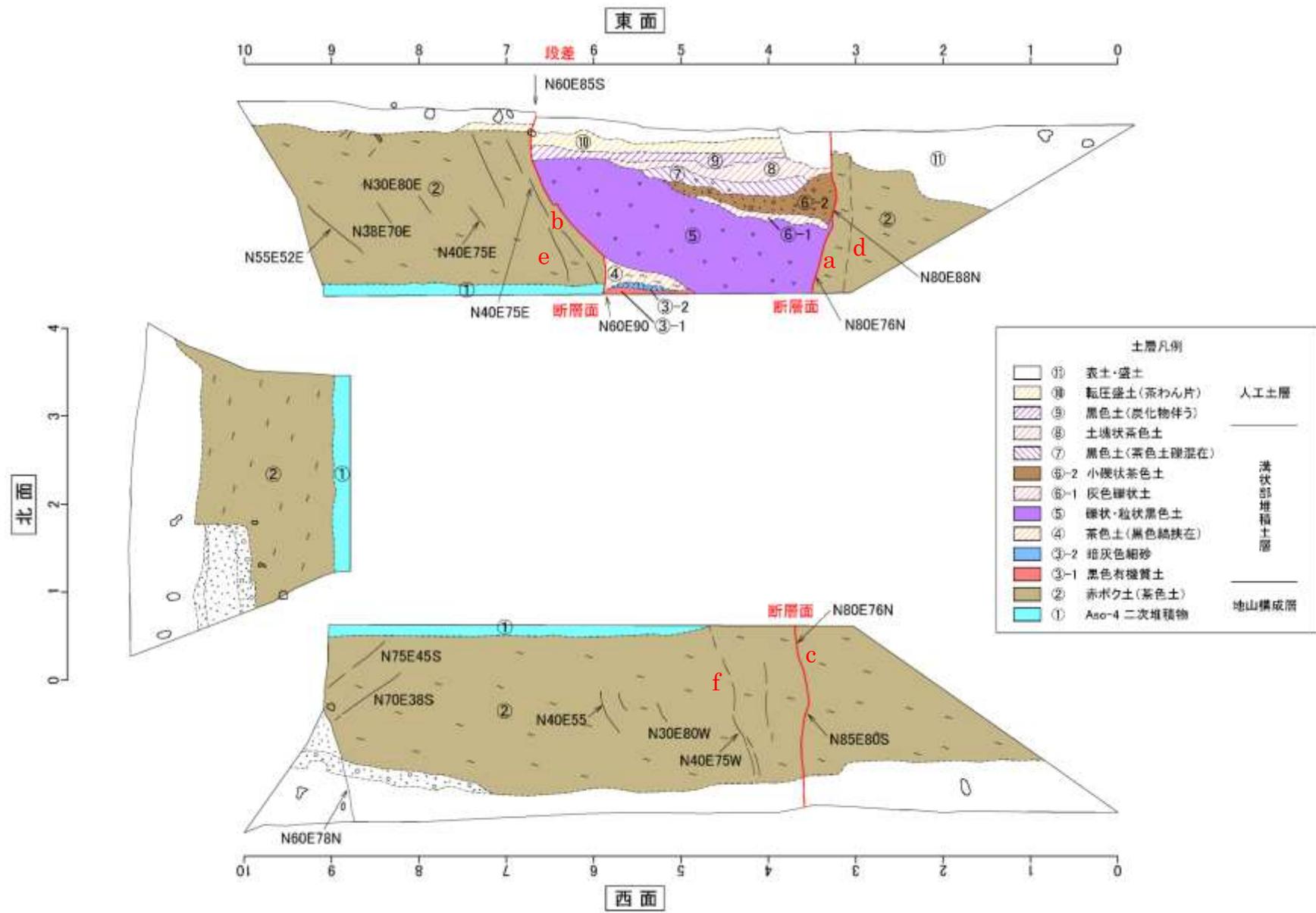


図 2-3 概略スケッチ図

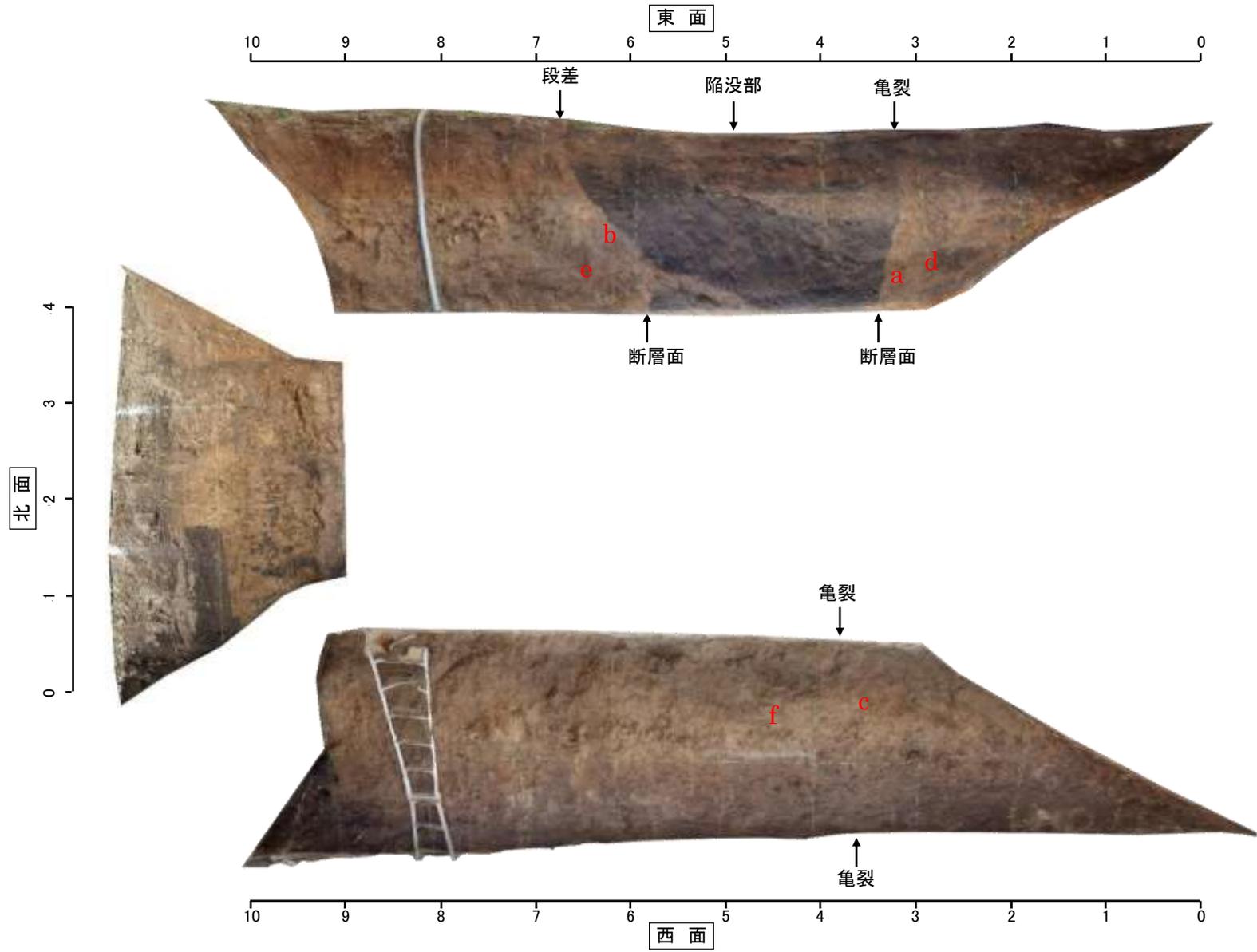


図 2-4 ピット壁面写真

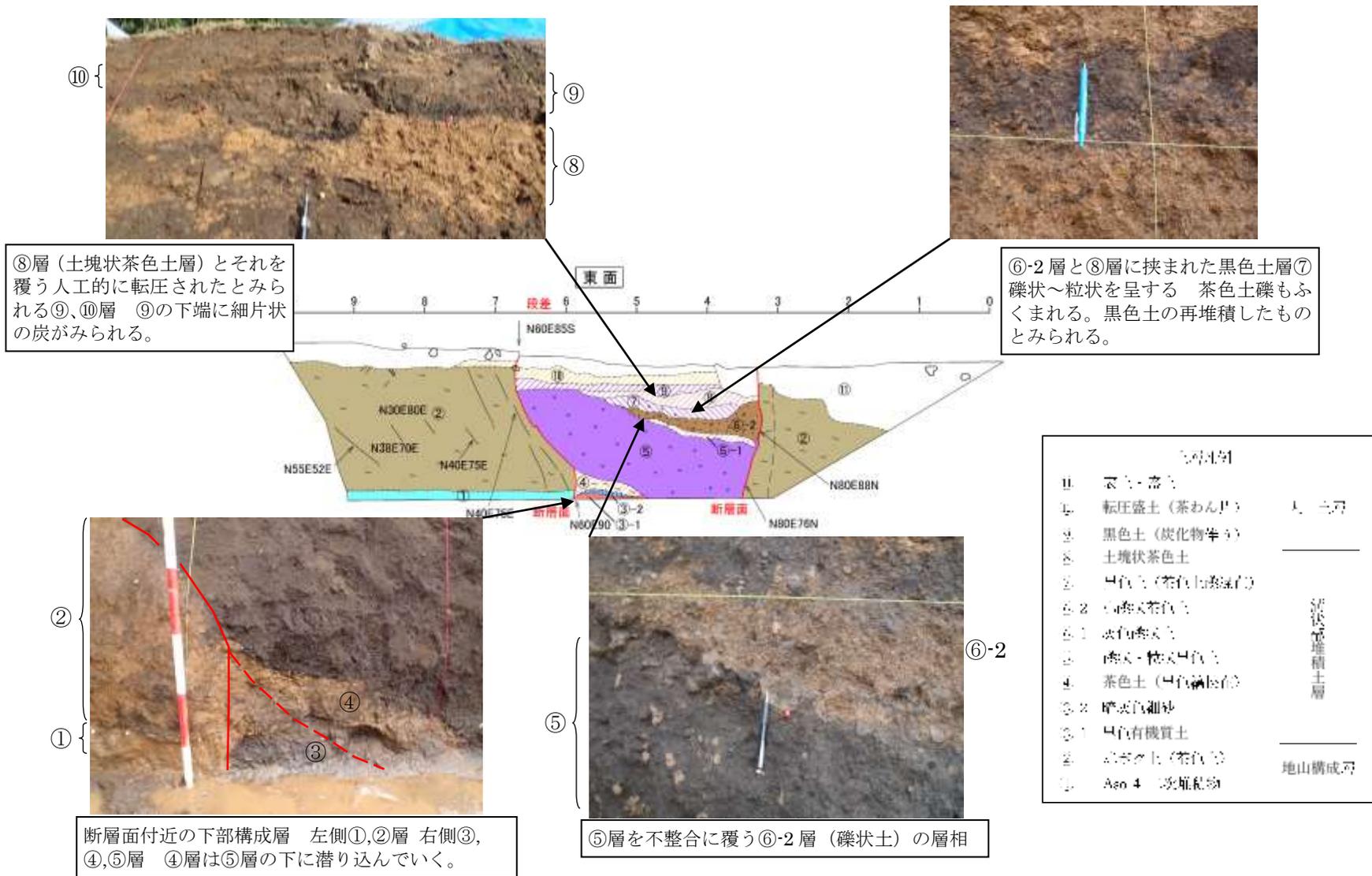


図 2-5 陥没部土層の代表写真

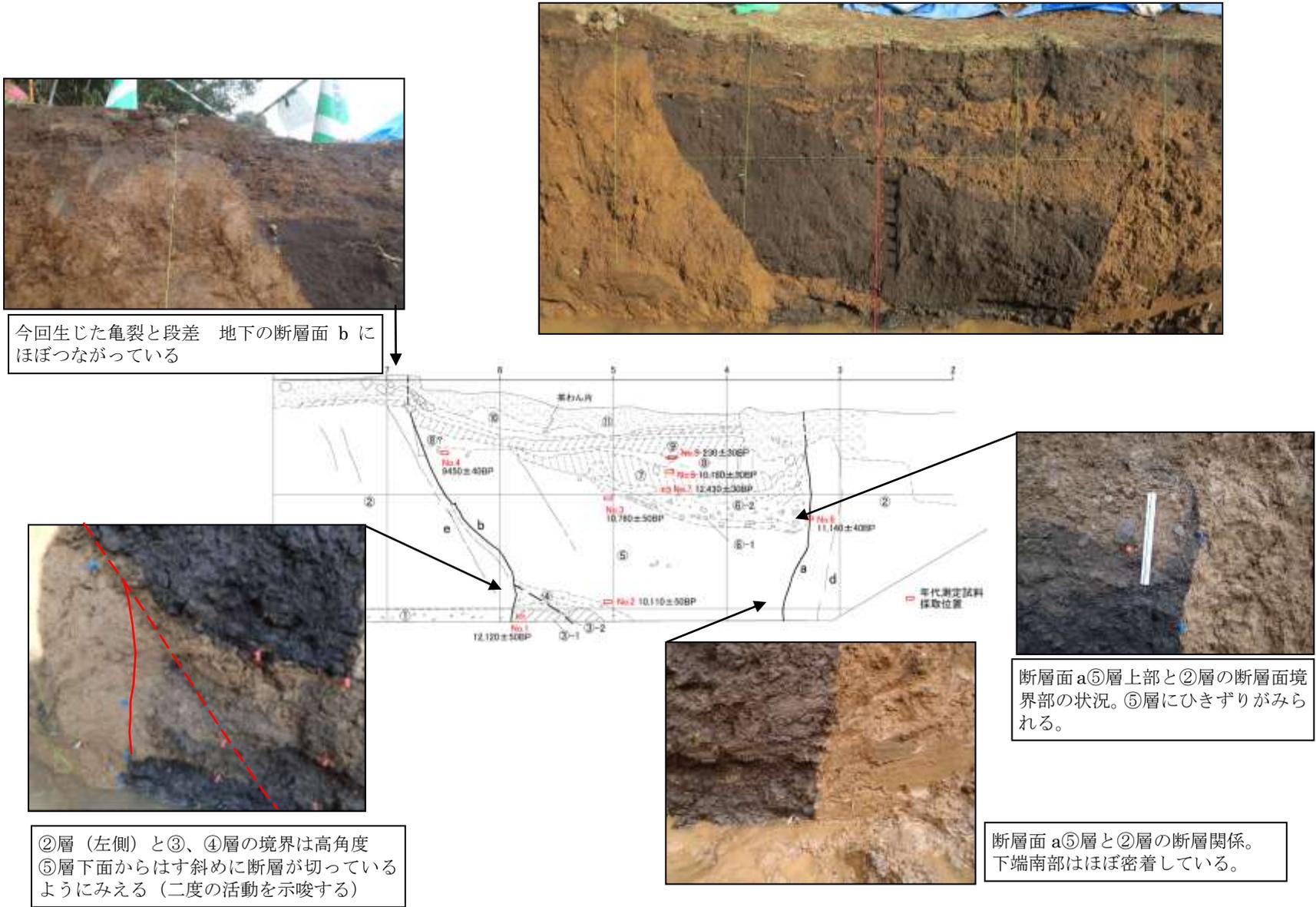


図 2-6 断層部の写真

#### 4) 年代測定結果

詳細スケッチ（図 2-7）に年代測定の試料採取位置を示す。

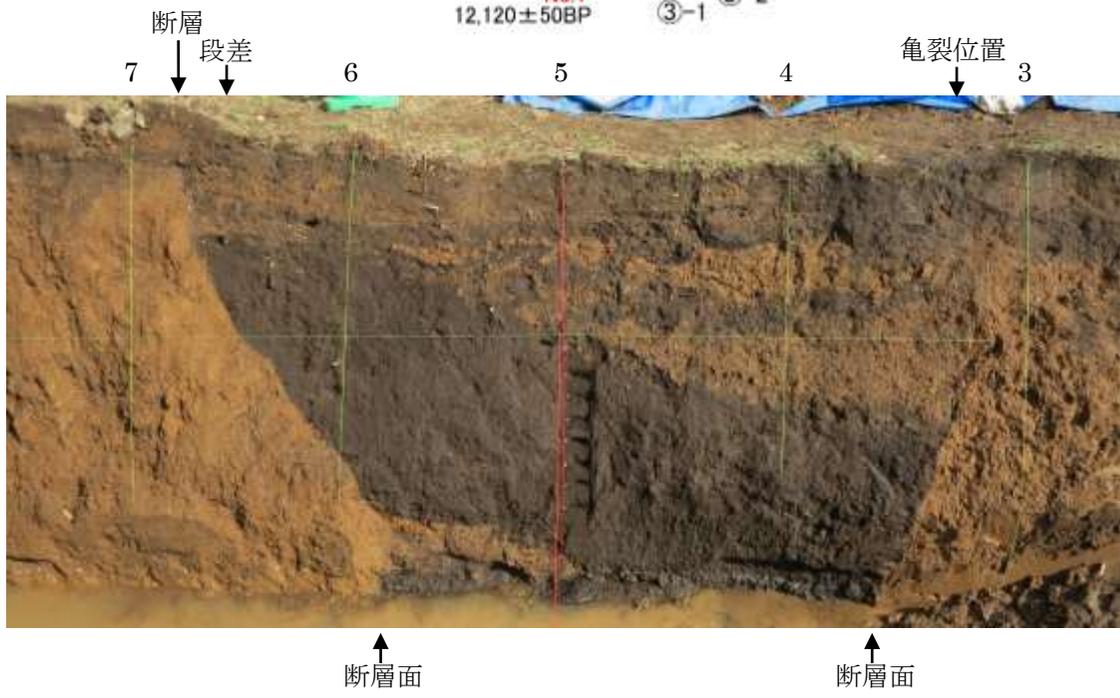
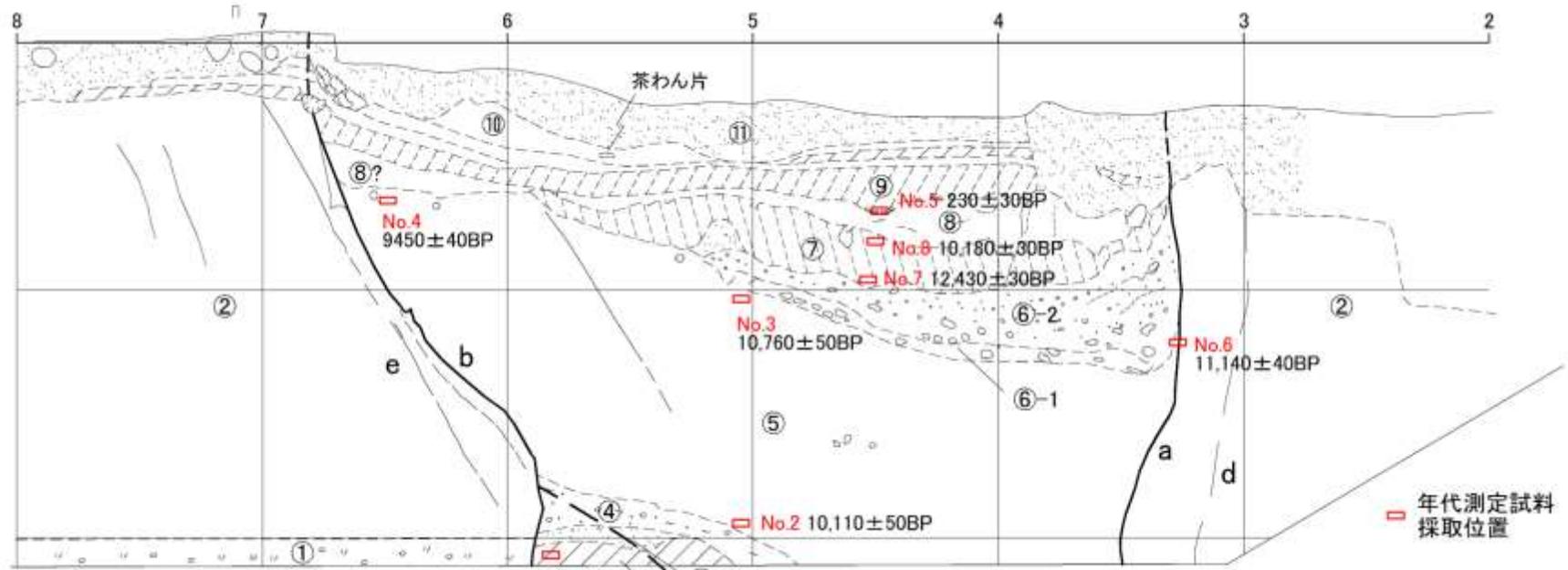
測定結果は、表 2-3 に示すとおりである。No.5 試料を除く黒色土より、約 15,000 年前以降の新しい年代が得られた。年代測定結果は、⑤層までは概ね陥没部の下位層から上位層になるに従い、若い年代値となる。一方これらを覆っている黒色土⑦層については、これら土層に比して古い年代値がえられた。これらについては、断層の活動時期や黒色土層の堆積時期・堆積状況を反映したものと考えられ、やや複雑な履歴を考える必要がある。これについては、次項で検討する。また、⑨層の年代値より上位の新しい人工改変の時期が、1640～1790 年以降であることも明らかとなった。

なお、南九州におけるクロボク土は、約 30,000 年前から形成されていたことが知られており（杉山他、2002）、本調査結果は概ね妥当な年代値と考えられる。

表 2-3 14C 年代測定結果

試料番号	14C 年代 (BP)	暦年較正值 (95%確率)	採取箇所・採取物
No.1	12,120±50	Cal BC 12,160-11,860 (Cal BP 14,110-13,810)	③-1 上部 有機質黒色土
No.2	10,110±50	Cal BC 10,020-9,455 (Cal BP 11,970-11,405)	⑤層の最下部 黒色土
No.3	10,760±50	Cal BC 10,775-10,705 (Cal BP 12,725-12,655)	⑤層最上部中央 黒色土
No.4	9,450±40	Cal BC 8,810-8,630 (Cal BP 10,760-10,580)	⑤層最上部北端
No.5	230±30	Cal AD 1,640-1680 Cal AD 1765-1800 (Cal AD 1,940-Post1,950)	⑨層下底面 炭化木
No.6	11,140±40	Cal BC 11,130-11,020 (Cal BP 13,080-12,970)	⑤層最上部南端断層 境界 黒色土
No.7	12,430±30	Cal BC 12,785-12,335 (Cal BP 14,735-14,285)	⑦層最下部 黒色土
No.8	10,180±30	Cal BC 10,055-9,810 (Cal BP 12,005-11,760)	⑦層最上部 黒色土

\*参考文献：杉山真二・渡邊真紀子・山元希里（2002）最終氷期以降の九州南部におけるクロボク土発達史・第四紀研究、41



地層凡例		
11	表土・腐土	
10	転圧盛土(茶わん片)	人 工物
9	黒色土(炭化物等)	
8	土塊状茶色土	
7	黄色土(茶色土浸透層)	
6-2	白褐色茶色土	河床堆積土層
6-1	灰褐色土	
5	褐色・物混黄色土	
4	茶色土(黄色浸透層)	
3-2	暗灰色細砂	
3-1	黄色有機質土	
2	赤褐色土(茶色)	地山構成層
1	Aso 4 凝縮粗砂	

図 2-7 陥没部詳細スケッチ

## 5) 年代測定結果の評価（イベントの検討）

黒色土が発達する地域では、草本が発達している時期には地中内への炭素が供給されるが、上部に土砂などが急に堆積するとその供給が断たれる。黒色土の上位の堆積物は、炭素供給を断つことを示す可能性があり、何らかの急激なイベントが生じたと考えられる。本ピット調査からもこのような堆積物がみられることから年代測定値および堆積状況から疑われるイベントを抽出した。

③-1層から得られた No.1 試料は、 $12120 \pm 40$  BP と最も古い値を示し、陥没構造内で最下位層となることから判断して妥当な値と考えられる。なお、この年代値は③-2層が③-1層を覆い黒色土中への炭素供給が閉鎖された時期の年代を示すと考えられる。

⑤層下部の No.2 試料の値が、No.3、No.6 試料よりやや若い値を示す結果となったのは、黒色土中への炭素閉鎖系が形成されていないか、もしくは人為的な攪乱によって⑤層がかき混ぜられた可能性が考えられる。しかし、④層以下を乱さず⑤層のみを人為的に攪乱することは困難と考えられ、⑤層が閉鎖されなかったことが、同じ程度の年代値（約 12000 年前）となった原因と考えられる。

一方、同じ⑤層最上部の No.4 試料（ $9450 \pm 40$  BP）の値は、No.3、No.6 試料の値より優位に若い。このことは、⑥-1層、⑥-2層が⑤層を覆うことによって約 12000 年前に一度閉鎖系が形成され、No.4 試料の場所は閉鎖系が形成されずその後も黒色土が形成され続けたことを示していると考えられる。No.4 試料が示す年代値は、約 10000 年前に⑧層の堆積によって閉鎖系が形成された時期と考えられる。

また、⑥層および⑤層を覆う黒色土⑦層は、⑤層上部で得られている年代よりも古いか、ほぼ同時期を示している。層相もランダムな砂状の堆積物であることから、周辺から供給され再堆積したものと考えられる。この⑦層が堆積した後に、⑤層の北端部が、⑧層に覆われる約 10000 年前のイベントが起こったと考えられる。

No.5 試料の  $230 \pm 30$  BP は⑨層の堆積開始の年代（概ね、西暦 1640 年～1800 年）を示す。従って、⑨層及びその上位層は、西暦 1640 年～1800 年より若い時期に形成された。

表 2-4 年代値から想定されるイベント

イベント	年代	イベントの内容
イベント 1	14000 年前	③-2層および④層が③-1層を覆う 埋積
イベント 2	12000～13000 年前	⑥-1、⑥-2層が⑤層（南側）の上位を急激に覆う 断層
イベント 3	10000 年前	⑧層による⑤層（北側）と⑦層の被覆 断層
イベント 4	西暦 1640-1800	⑨層の堆積（人為的改変）

## 6) ピット内断層の評価

ピット観察結果と年代測定結果などより、ピット内で確認された断層の活動履歴については、概ね次のようにまとめられる。

- ピット内の東壁面には断層に挟まれた陥没部がみられ、陥没部には 14,000 年～10,000 年前頃に形成された黒色土とそれらをくりかえして覆う茶色土が堆積している。陥没部の周辺部はこれらより古い時代のアカボク土とさらに古い Aso-4 二次堆積物が断層を介して接している。
- 陥没部の土層 (⑤,⑥,⑦層) には、断層境界面付近で土層の引きずりや、傾斜の変化など断層運動による痕跡が認められる。上位を覆う⑧層の堆積が約 10,000 年前とみられることから、14,000 年～10,000 年前の間に最低 2 回程度は活動したと推定される。
- 西暦 1640～1800 年頃以降に人工改変による盛土層が陥没部を含め覆っている (⑨,⑩,⑪層)。10,000 年前からこの間の堆積物はピット周辺では失われているとみられる。
- 今回の地震で、陥没部の境界となっている断層が再び活動し、これら被覆層を変位させて地表に亀裂を生じている。(一部 15cm 程度の段差を形成している。)

地表に出現した亀裂は、地下に明らかに続く断層であり、繰り返し活動したことが推定されることから、今回確認された断層は活断層と評価される。陥没部に分布する土層に対応するものが西壁面に確認できないため、ズレの大きさなどに関しては不明であるが、ピット内の分布形状から下盤の Aso-4 の二次堆積物の落ち込みはそれほど大きくないとみられる。(横ズレにより陥没部が分断され、その端部をみている可能性はある。)

一方、今回の調査ボーリング 2 点間で想定される活断層 A の鉛直ズレ量は、Aso-4 上面のズレ量で約 5.4m であるが、想定される位置周辺には複数の雁行する亀裂群があることから、これら全体として、このズレを示していることも考えられる。

以上より、今回確認されたピット内断層は、想定した活断層 A の動きの一部が現れたものと評価される。前回の活動がほぼ 10,000 年前位であるとみられることから、活断層 A の活動と概ね同期連動しているものと推定される。

### 3. すべり安定解析による安全性分析（側方流動）

①益城町市街地の表層には軟弱な粘性土が 10～15m 程度の層厚で分布している。市街地の地形は南側に緩やかに傾斜していることから、南北に切った断面を用いて、軟弱粘性土の地震時のすべり安定性を二次元安定解析により検討した。

②設計水平震度を漸増させたすべり安定検討<sup>※1</sup>を行った結果、 $K_h=0.5$  においてもすべり安全率は 1 を満足<sup>※2</sup>する結果となった。

※1：すべり円弧は広範囲の複合すべりを想定（すべり円弧の頭部は軟弱粘性土基底の勾配が変わる付近、末端部は秋津川で設定）

※2： $K_h=0.5$  のとき  $F_s=1.094$

③道路土工・盛土工指針(2012.4)では、実施に生じる地震動の大きさと安定計算に用いる震度の大きさの関係について、「工学的判断として最大加速度 800gal 程度のレベル 2 地震動に対応する水平震度は 0.2 程度でよい」としている。したがって、設計水平震度 0.5 は最大加速度 2,000gal 程度に相当し、熊本地震の最大加速度（1,157gal ※KiK-net 益城 4/16 本震観測記録）に対しては安定性を確保していると判断することができる。

特性値番号	飽和重量 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	湿潤重量 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	水平震度	鉛直震度	粘着力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	粘着力係数	内部摩擦角 (度)
1	24.00	24.00	0.500	0.000	100.00	0.00	0.00
2	15.43	15.43	0.500	0.000	23.92	0.00	0.00

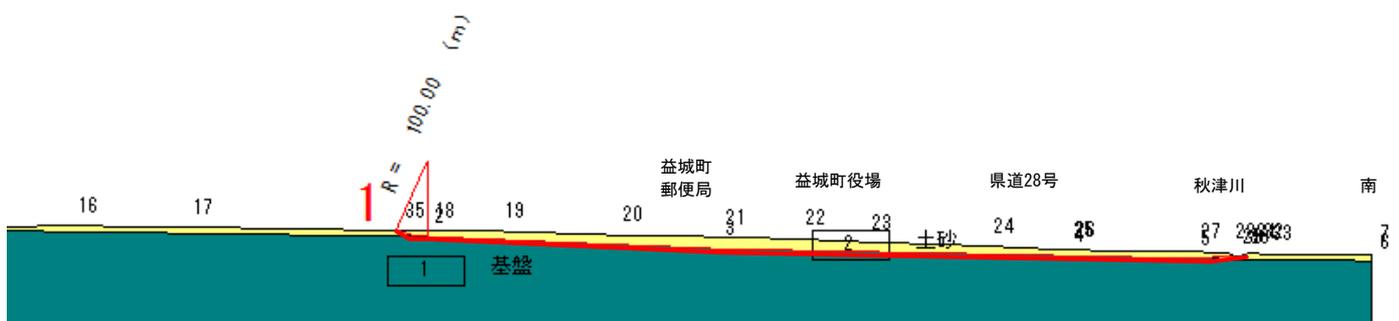


図 3-1 二次元安定計算のモデルとすべり円弧位置

#### 4. 建築物倒壊方向と強震動卓越方向の関係分析・評価結果

- ・倒壊方向が判別できた 217 戸の建築物の内、約 84%の 183 戸が東西方向に倒壊
- ・4/16 本震観測記録は東西方向（東北東－西南西方向）の成分が卓越しており、東西方向への倒壊の要因になったものと推定される

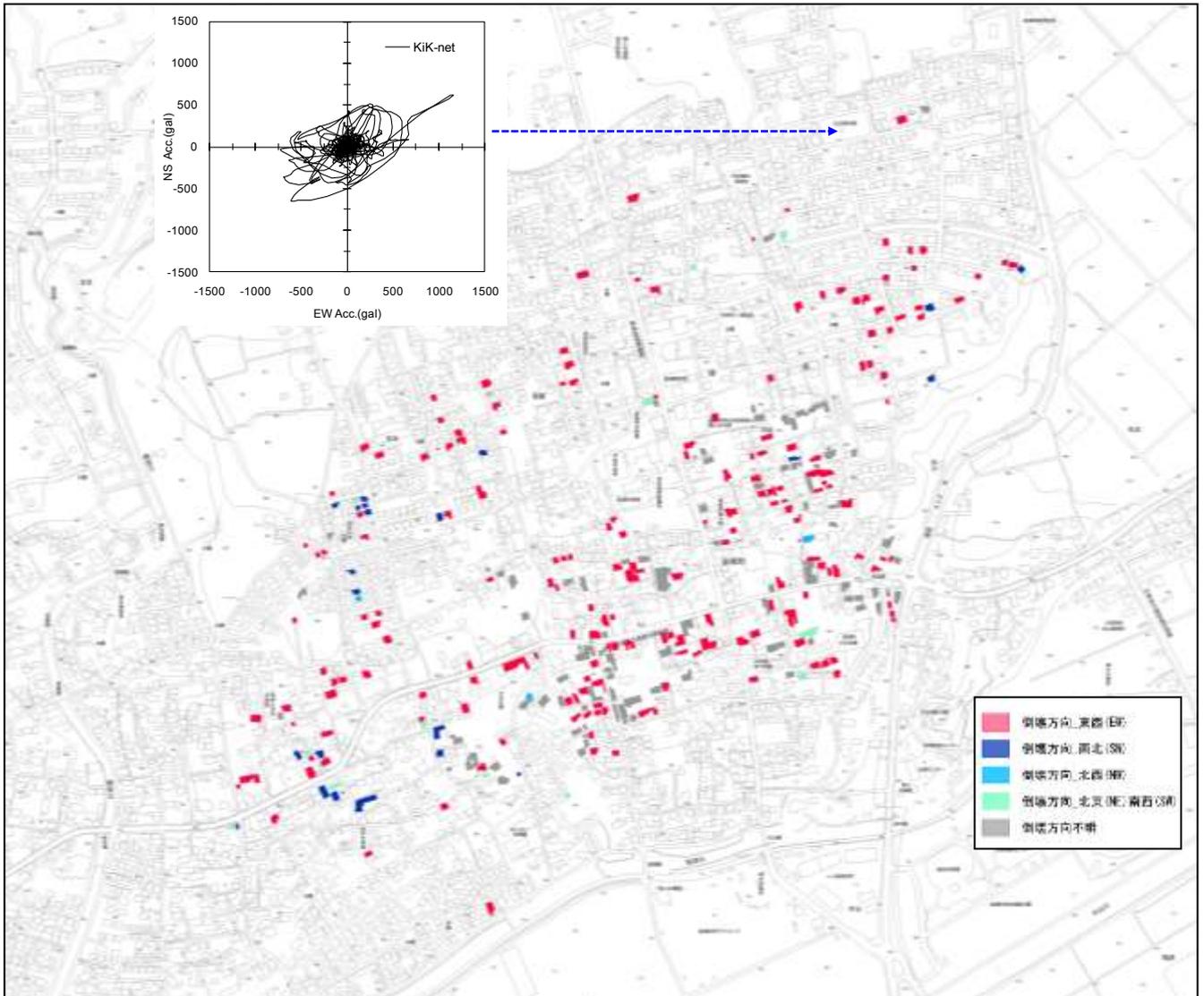


図 4-1 建築物倒壊方向の分布と本震観測記録

## 5. 活断層による地盤のズレによる被害事例

活断層による地盤のズレによる建築物被害事例について表 5-1 に整理した。断層変位は今回の地震に比べ大きい事例が多いが、福島県浜通り地震を除く 4 例で建築物の倒壊被害が確認された。台湾の集集地震では、鉄筋コンクリート造の建築物も被害を受けている。

表 5-1 活断層による地盤のズレによる被害事例のまとめ

事例	地震名	マグニチュード	断層タイプ (変位量)	建築物被害状況
1	米国・サンフェルナンド地震	M6.6	横ずれ断層 (水平 2m, 垂直 1.5m)	・地表地震断層上に建築物被害が集中 ・「活断層法」の制定に大きな影響 ・活断層による地盤のズレによって多くの建築物が破壊
2	トルコ・コジャエリ地震	M7.4	横ずれ断層 (水平 4m)	・断層変位が 4m と大きく、低層建築物ではねじられて倒壊した事例がみられた。 ・高層建築物では倒壊していない事例を確認。
3	福島県浜通り地震	M7.0	正断層 (垂直 20～60 cm)	・地表地震断層上の建築物は、柱が基礎石に固定されていなかった寺の山門で倒壊したが、その他では倒壊被害はみられなかった。
4	台湾・集集大地震	M7.8	逆断層 (最大水平 5m, 垂直 8m)	・活断層の上盤側で被害が集中 ・地表震断層上の建築物被害も確認され、鉄筋コンクリート造の構造物でも被害が見られた。
5	阪神・淡路大震災	M7.3	横ずれ断層 (水平 1.2m, 垂直 0.5m)	・木造建築で倒壊事例がみられた。

事例 1：サンフェルナンド地震（1971 年,米国カリフォルニア州南部,M6.6,横ずれ断層）

- ・地表地震断層の上では建築物の被害が 80%近くに達したのに対し、断層からわずかに離れた場所では被害は 30%にも達しなかったことから活断層による地盤のズレの危険性が再認識され、「活断層法」の制定に多大の影響を与えた。\*1
- ・断層が地表に現れた地点では、建築物は主として地表の変形によって破壊された。（最大変位:水平 2m,垂直 1.5m）\*2

\*1：詳細活断層図と安全な土地利用,中田高,帝国書院。

\*2：サンフェルナンド地震（1971 年 2 月）の震害について,土木学会耐震工学会委員会,土木学会論文報告集第 195 号,1971.11.

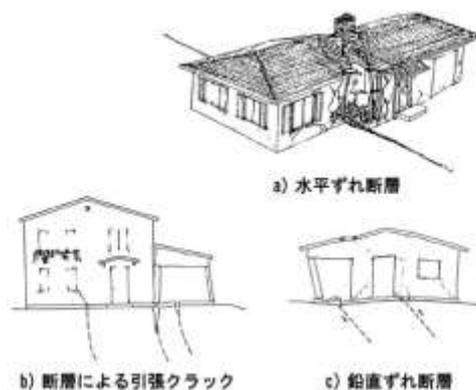


図 5-1 断層に跨った構造物の破壊

出典：断層変位による構造物の被害発生メカニズムと対策手法,八尾他,2012.

事例 2：コジャエリ地震（1999年,トルコ,M7.4,横ずれ断層,垂直成分ほとんどなし）

- ・写真 a～c は、地表地震断層（4m 程度のズレ）上の建築物であるが、高層建築物の写真 a は倒壊していないが、低層建築物の写真 b,c では倒壊しており、写真 b では活断層による地盤のズレにより建築物が倒壊している。
- ・次ページの写真はガソリンスタンド内を活断層が通り大きく変位しているが、地震後もガソリンスタンドとして機能した。

写真 a



写真 b



写真 c



出典：1999年トルコ・コジャエリ地震被害調査速報,日本技術開発(株)磯山.



北アナトリア断層直上のガソリンスタンドの被害状況

出典：断層変位による構造物の被害発生メカニズムと対策手法,八尾他,2012.

事例 3：福島県浜通り地震（2011年,M7.0,正断層）

- ・地表地震断層の上の建築物は、柱が基礎石に固定されていなかった寺の山門で倒壊の被害があったが、その他の9例は倒壊の被害がみられなかった（変位:垂直 20～60 cm）※3

※3:2011年福島県浜通り地震の地表地震断層近傍における建物被害調査,久田他,日本地震工学会論文集第12巻第4号(特集号),2012.

写真 1 木造農家(中央)と倉庫(手前) 写真 2 写真 1 の建物の側面と地表地



写真 3 写真 1 の建物の室内被害



写真 4 写真 1 の建物の裏側と地表地



写真 5 写真 1 の奥の木造倉庫



写真 6 木造建築(右端の断層で建物が傾斜)



写真 7 鉄骨造体育館と地表地震断層



写真 8 木造建築(左端が断層で地盤傾斜有)



写真 9 木造建築(直下の地表地震断層で傾斜)



写真 10 断層上と推定される木造家屋(左側沈降)



写真 11 断層に隣接する木造家屋(左側沈降)



写真 12 地表地震断層上の建徳寺本堂



写真 13 建徳寺本堂の裏側の被害



写真 14 地表地震断層直上の建徳寺山門の倒壊



写真 15 断層直上の木造家屋



事例 4：台湾集集大地震（1999年,M7.7,逆断層）

- ・活断層の上盤側で被害が集中していることが確認された。地表震断層上の建築物被害も確認され、鉄筋コンクリート造の構造物でも被害が見られた。

写真 d 断層変位により傾斜したビルディング



写真 e 地表断層により被害を受けた小学校



写真 h 地表断層のずれにより被害を受けた小中学校



写真 f 1階部分が倒壊した台湾省の図書館



写真 g 地表断層上の RC 構造物の傾動



写真 d～g：台湾大地震(集集大地震)被害調査報告(株東京企画コンサルタント,1999.  
写真 h：活断層による地盤のズレによる被害の例,2013.

事例 5：阪神淡路大震災（1995年,M7.3,横ずれ断層）

- ・淡路島で確認された地表地震断層の上では写真 j に示すような木造建築物の倒壊事例がみられた（垂直変位 0.4m）。\*4
- ・建築物の直近を断層が通っている写真 i では建築物の倒壊は見られなかった。（変位:水平 1.2m, 垂直 0.5m）\*4

\*4：野島断層【写真と解説】兵庫県南部地震の地震断層,中田高 岡田篤正,東京大学出版会.

写真 i 建物の直近を地表断層が通るが建物は倒壊していない



写真 j 地表断層上の木造家屋の倒壊

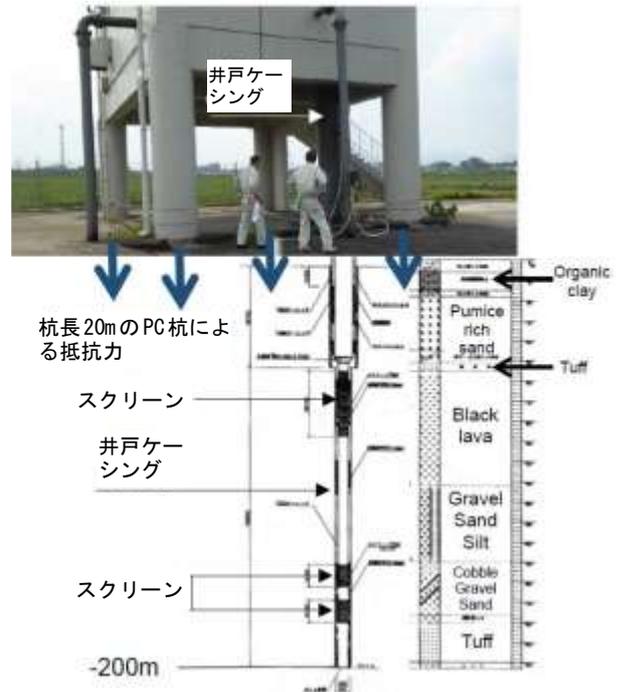


## 6. 杭基礎構造のポンプ建屋施設の被害事例

益城町市街地の南西に位置する杭基礎構造のポンプ建屋施設（熊本市東区）において傾斜が発生した被害事例が確認されている（図 6-1）。なお、益城町市街地内では、当該施設のように明瞭な傾斜が生じた杭基礎構造物は確認できていない。



(a) 傾斜した RC 造ポンプ建屋



(b) 秋田配水場の RC 造ポンプ建屋と近隣の柱状図

図 6-1 ポンプ建屋の被害状況<sup>※3</sup>

※3 小長井：2016 年熊本地震において活動した地震断層沿いで生じた地盤変動

## 7. 既往文献に基づく活断層に伴う変位に対する安全性

1999年トルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震により、活断層による地盤のズレが要因と考えられる大規模な建築物被害が生じた。この被害を受け、活断層による地盤のズレに対する構造的安全性に関する研究が幾つか行われている。(例えば、川島 2001、栗山 2000、宮島 2001、八尾 2012 等)

ここでは川島 2001 による解析的検討の事例を示す。

対象施設：断層変位を受ける橋梁の杭基礎（連成は考慮しない）

断層諸元：逆断層による斜め 45° の断層変位（ずれ量 0.1m ピッチで最大 2m）を作用

杭 諸 元：径 1.2m、長さ 15m、3×3=9 本配置、軸方向鉄筋 D22（20 本）

モデル化：杭・フーチング⇒梁、周辺地盤：地盤ばね

10cm 程度の活断層による地盤のズレが杭基礎に直接作用した場合に耐力超過が生じ、2m の変位では基礎としての性能を担保不可能な程度まで損傷が進むことが示されている。中高層建築物杭基礎にそのまま適用可能ではないものの、当該断層の将来的な活動で想定される上下変位（今回と同等として 10cm 程度）が生じる場合においても、建築物の安全性に大きな影響を与える可能性があることを示唆している。

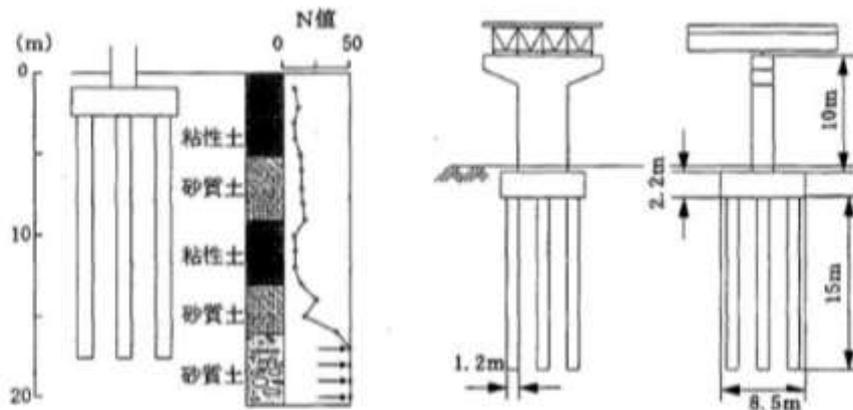


図-3 地盤条件と対象施設の断面

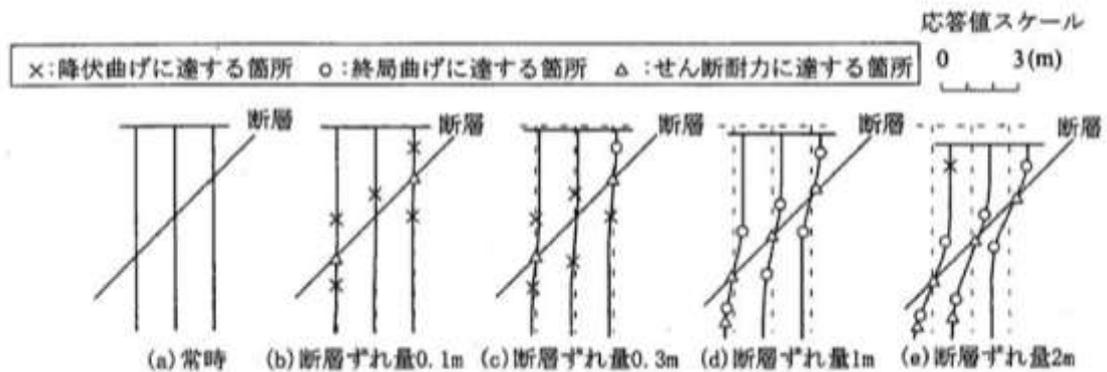


図-4 杭の変位と損傷の進展

### 図 7-1 杭基礎に対する断層変位の影響に関する評価事例

出典：下山田,川島：断層変位を受ける杭基礎構造の耐震性に関する検討、第5回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2002.1

## 8. 物理探査結果（低速度帯位置図）

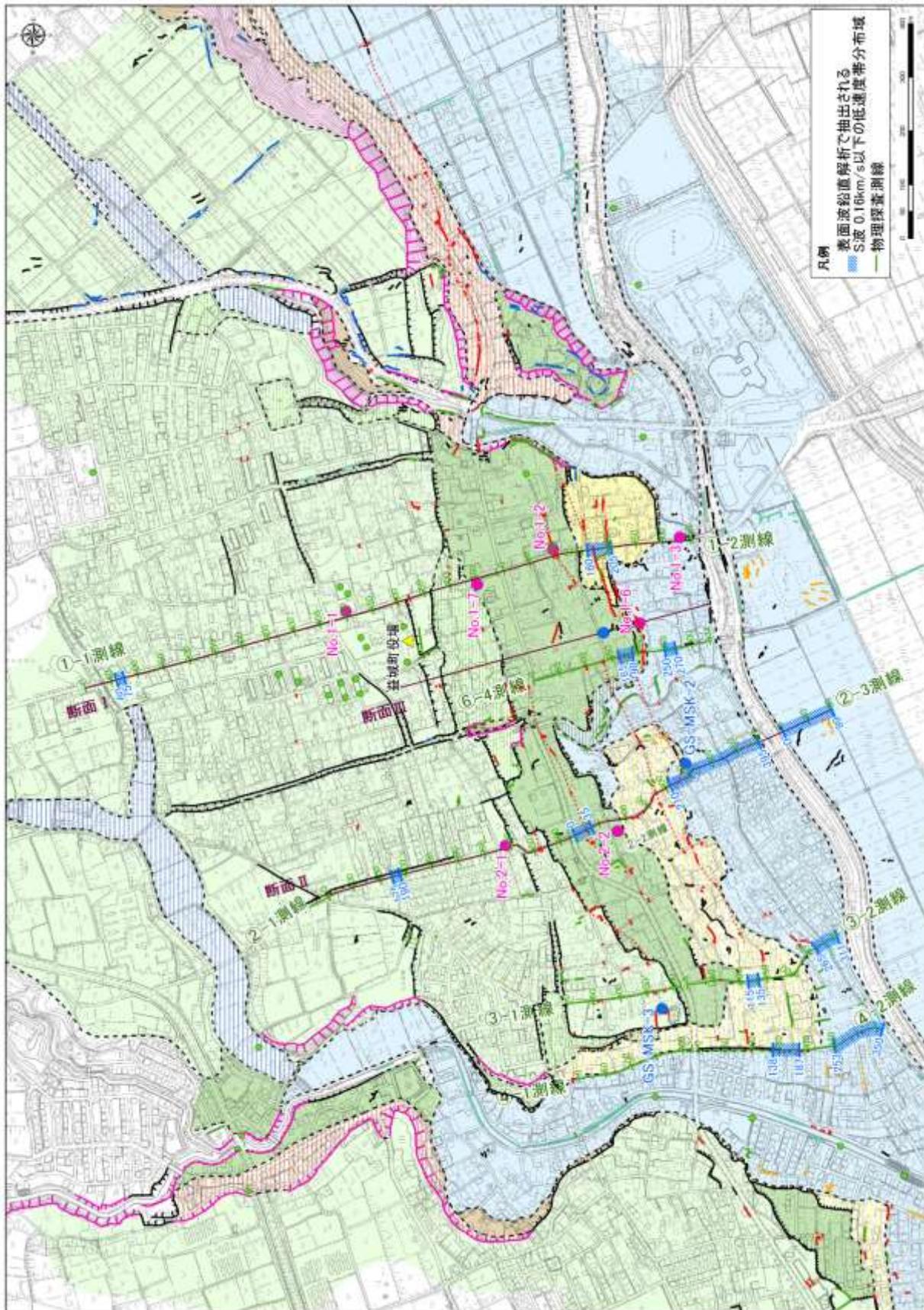
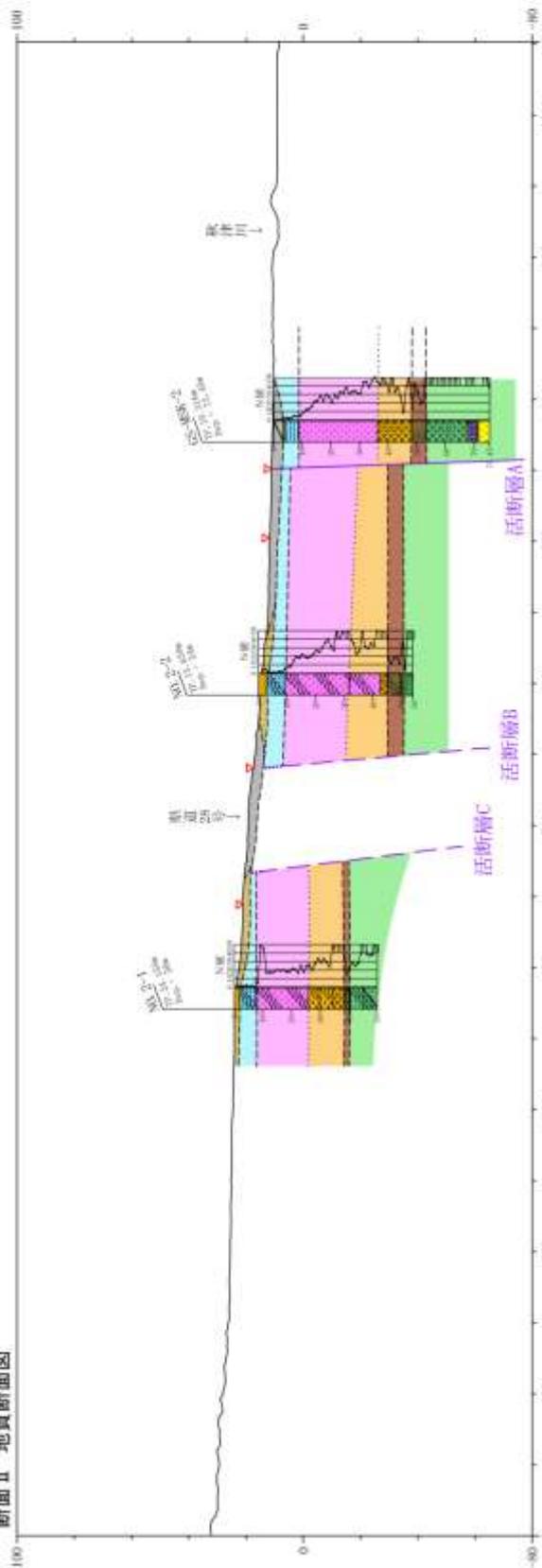


图 8-1 低速度帯範囲位置（物理探査測線）



断面II 地質断面図



測線②-1測線 鉛直方向解析断面図

測線②-2測線 鉛直方向解析断面図

測線②-3測線 鉛直方向解析断面図

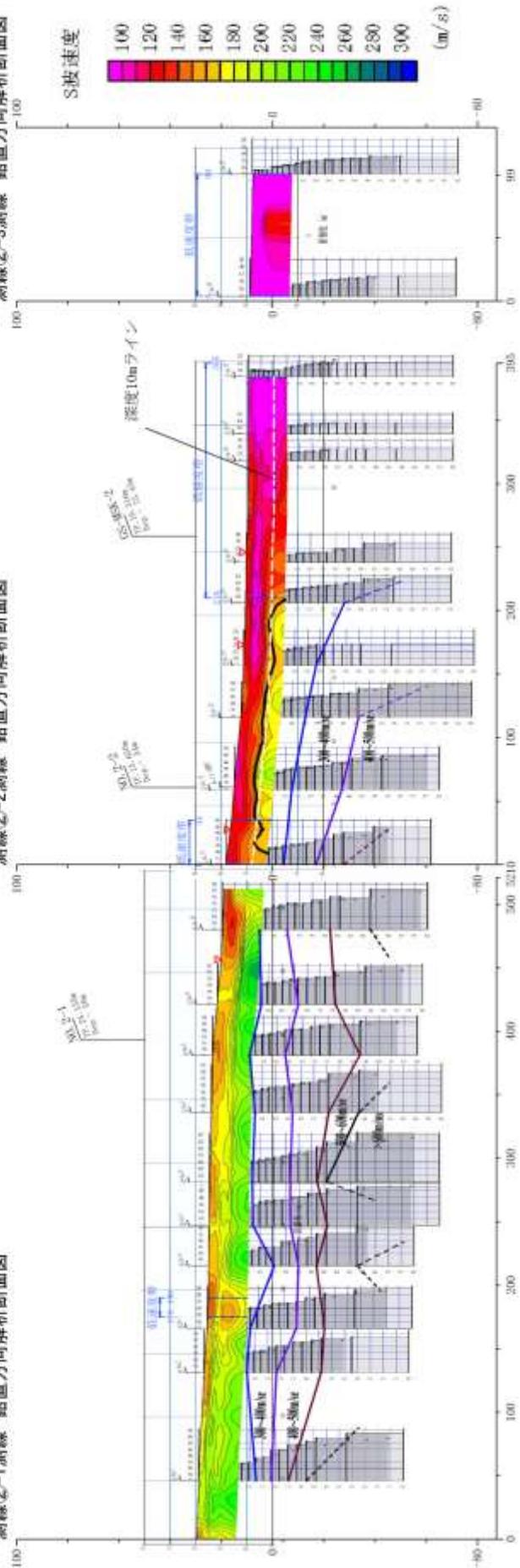


図 8-3 測線② 低速度帯位置図 (物理探査結果)

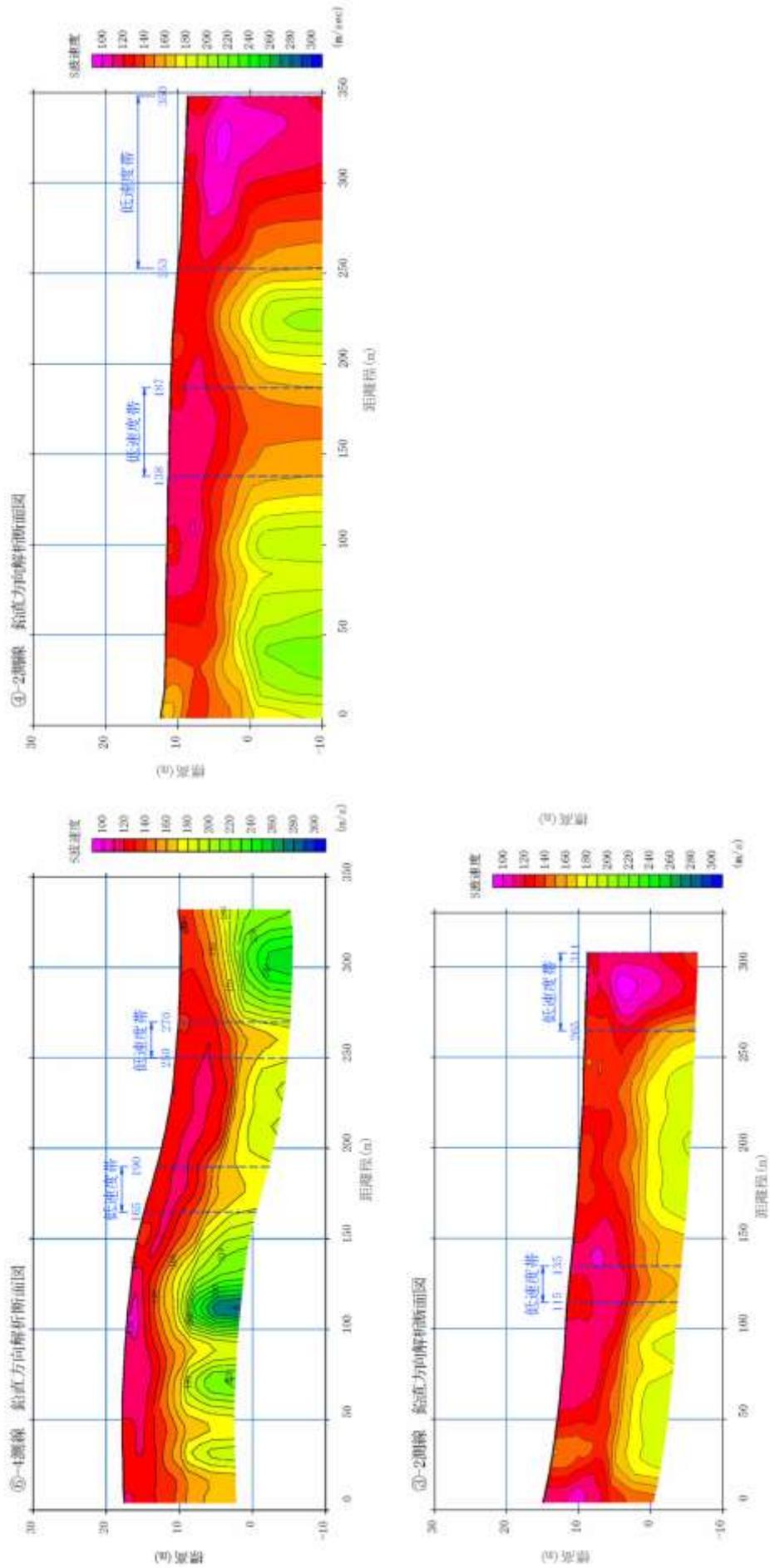


图 8-4 测线④③④县道 28 号南侧 低速度带位置图 (物理探查结果)

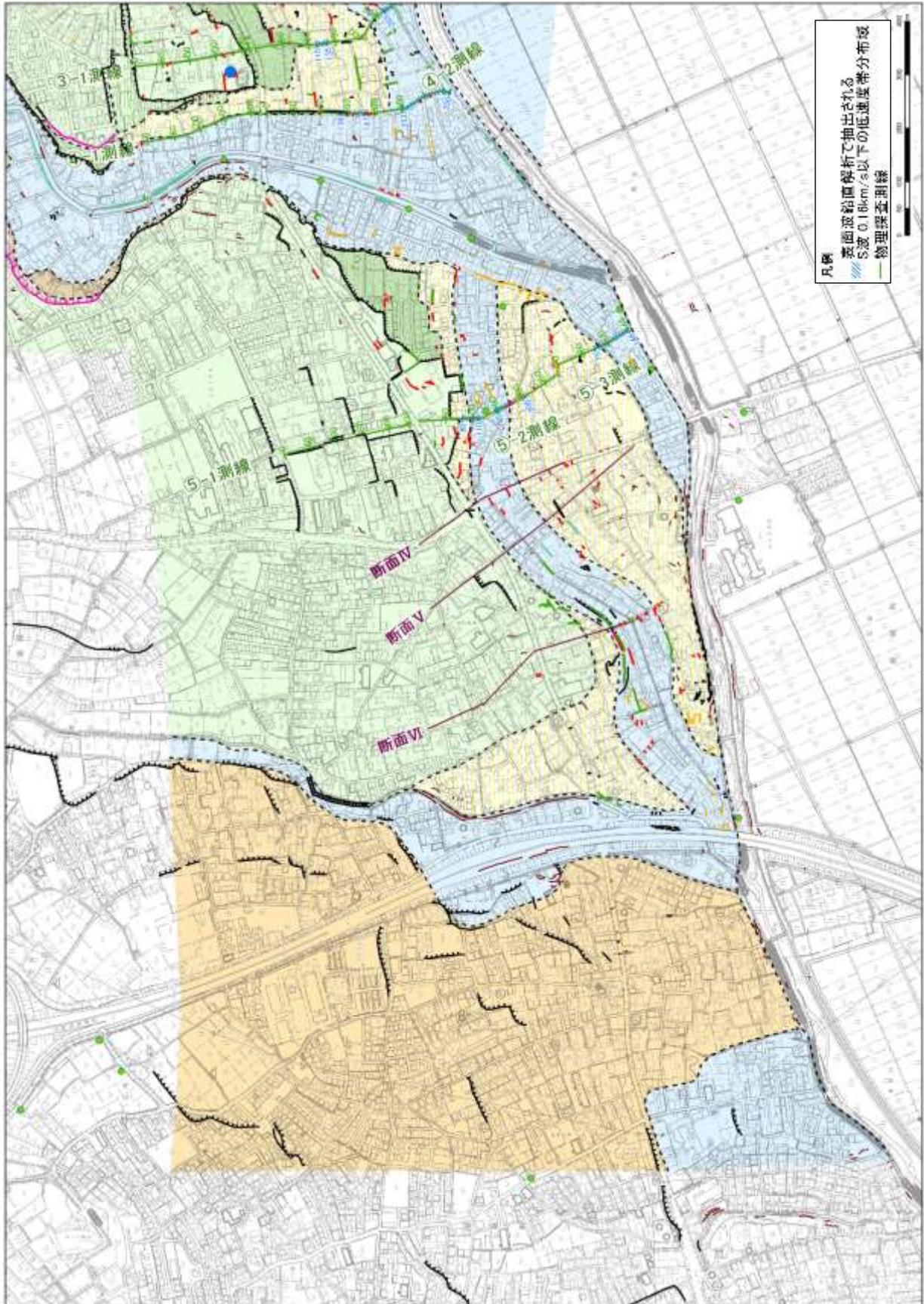


图 8-5 低速度帯範囲位置（物理調査測線）

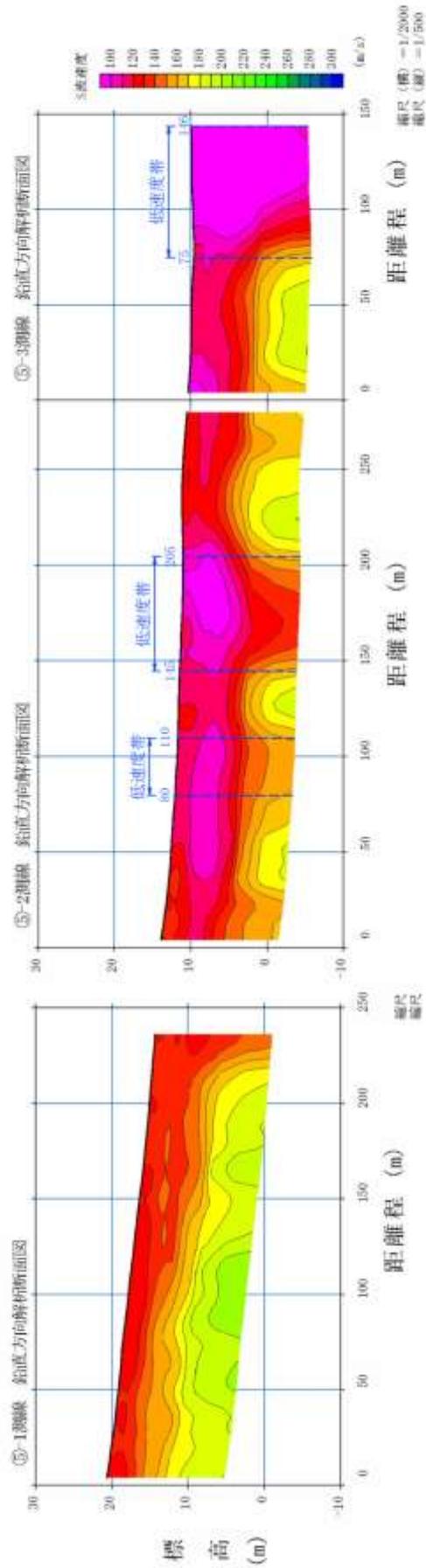


図 8-6 測線⑤ 低速度帯位置図 (物理探査結果)

## 9. 等価線形解析の解析方法

図 9-1、8-2 及び 8-3 (いずれも※1) に等価線形法による地震応答解析の概要を示す。

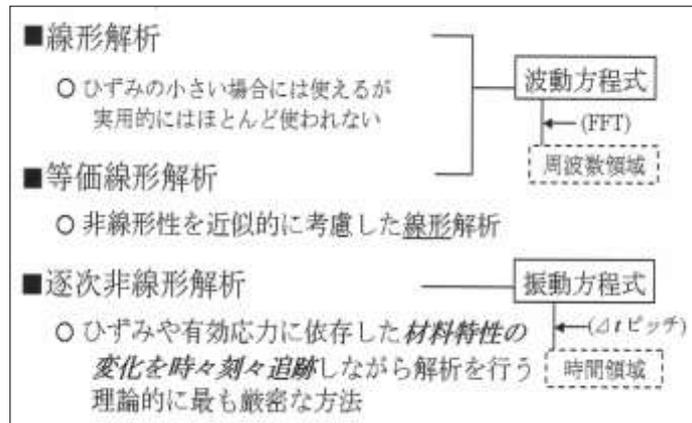


図 9-1 地盤の地震応答解析の分類

等価線形解析は、前述した  $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$  関係を直接用いて (フィッティングや工学的判断は不要)、ある程度非線形性を簡単に考慮できる手法であるので多く用いられている。一次元解析プログラムとしては SHAK<sup>53)</sup> が、二次元プログラムとしては (Super-)FLUSH<sup>54)</sup> が一般的に用いられている。空間の扱いに関しては、SHAKE は一次元波動論の厳密解が得られ (現象を厳密に説明できるという意味ではない)、地層分割のみでよいが、FLUSH は FEM を用いて離散化しており、境界条件もエネルギー伝達境界<sup>54)</sup>などを適宜設定する必要がある。すなわち SHAK<sup>53)</sup>では空間的には離散化せず、連続体に関する微分方程式を直接解くため、同じ材料特性を持つ層は一体として扱える。計算は線形解析であり、与えられた剛性  $G$  と減衰  $h$  による計算結果が、許容誤差内に収まるまで  $G$  と  $h$  の値を  $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$  の関係を満足しながら変化させて線形計算を何回か行う (イタレーション: 図 -4.6.2 参照)。結果が収斂 ( $i$  回目と  $i+1$  回目の答えの差が例えば 5% 以内) すれば、その最終の  $G$  と  $h$  を一貫して用いた線形計算を行い、その結果を答えとするものである。

図 9-2 等価線形法の概要

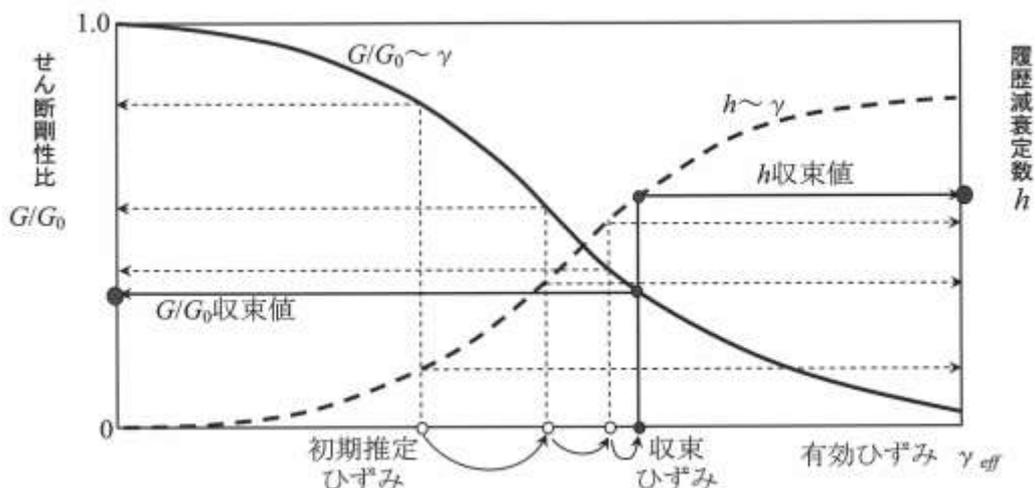


図 9-3 等価設計解析での  $G$  と  $h$  のイタレーション

※1: 「実務役立つ耐震設計入門 (社) 土木学会 H23.1」