

電源開発株式会社  
大間原子力発電所

意見聴取会指摘事項について  
(地盤関係)

平成16年11月  
原子力発電安全審査課

## 目 次

1. シームの分布と代表性について
2. シームの応力履歴を考慮した検討について
3. 安山岩溶岩(塊状)の規則性節理部と不規則性節理部の岩盤せん断強度の一括評価について
4. 水平方向と鉛直方向の初期地圧測定結果がほぼ同じとなる理由について
5. P S 検層及び超音波試験による  $V_p$ ,  $V_s$  と動的物性値の設定について
6. 淡灰色火山礫凝灰岩の解析用物性値について
7. 岩石クリープ試験のクリープ係数  $\alpha$  が岩盤クリープ試験に比べて大きい理由について
8. 簡易反発硬度試験 (エコーチップ硬さ試験) について

1. シームの分布と代表性について

1) シームの分布範囲，厚さ，形状について説明すること。

2) シーム S-10 の代表性について，粒度分布等の観点から説明すること。

1) シームの分布範囲，厚さ，形状について説明すること。

易国間層中の細粒凝灰岩層には，いくつかの層準にシームが挟まれるが，連続性が認められるシームは，11枚(S-11～S-1)であり，大間層中の酸性凝灰岩中に挟まれる連続性の認められるシームは，1枚(S-0m)であるとしている。各シームの性状を表-1.1に，シームの地質鉛直断面図における分布を図-1.1に示す。

図-1.2に敷地のボーリング孔での各シームの有無，深度及び厚さを調査した結果を示す。図-1.2によれば，特にS-10，S-8，S-7，S-6，S-1及びS-0mは分布範囲が広いことが特徴であるとしている。

また，図-1.2の等高線はシームを挟む細粒凝灰岩層及び酸性凝灰岩層の深さを示している。それによれば易国間層中の細粒凝灰岩層は最大傾斜方向である南北方向に全体として約 $5^{\circ}$ から約 $10^{\circ}$ の南傾斜をなし，東西方向ではほぼ水平となっており，それらの傾斜は原子炉建屋設置位置付近ではほぼ一様であるとしている。

各シームの厚さの頻度分布を図-1.3に示す。シームの厚さは数cm程度が多く，10cmを超えるようなことは少ないとしている。

表-1.1 シーム一覧表

シーム名	平均厚さ (cm)	色	構成粒子
S-11	1.5	黄褐色～淡黄褐色	主に粘土～シルトサイズ
S-10	3.8	黄褐色～淡黄褐色	主に粘土～シルトサイズ
S-9	2.1	黄褐色～黄灰色	主に粘土～シルトサイズ
S-8	2.9	黄褐色～黄灰色	主に粘土～シルトサイズ, 一部に岩片を含む
S-7	2.2	淡黄褐色～黄灰色	主に粘土～シルトサイズ, 一部に岩片を含む
S-6	2.2	淡黄褐色～暗黄褐色	主に粘土～シルトサイズ, 一部に岩片を含む
S-5	1.6	黄褐色～褐灰色	主に粘土～シルトサイズ, 一部に岩片を含む
S-4	1.9	黄灰色	主に粘土～シルトサイズ, 一部に岩片を含む
S-3	1.6	暗褐色～暗黄灰色	主に粘土～シルトサイズ
S-2	1.7	暗褐色～暗灰色	主に粘土～シルトサイズ
S-1	3.0	淡黄褐色～暗褐色	主に粘土～シルトサイズ, 岩片を含むものが多い
S-0m	4.4	灰色～暗灰色	主に粘土～シルトサイズ, 一部に岩片を含む

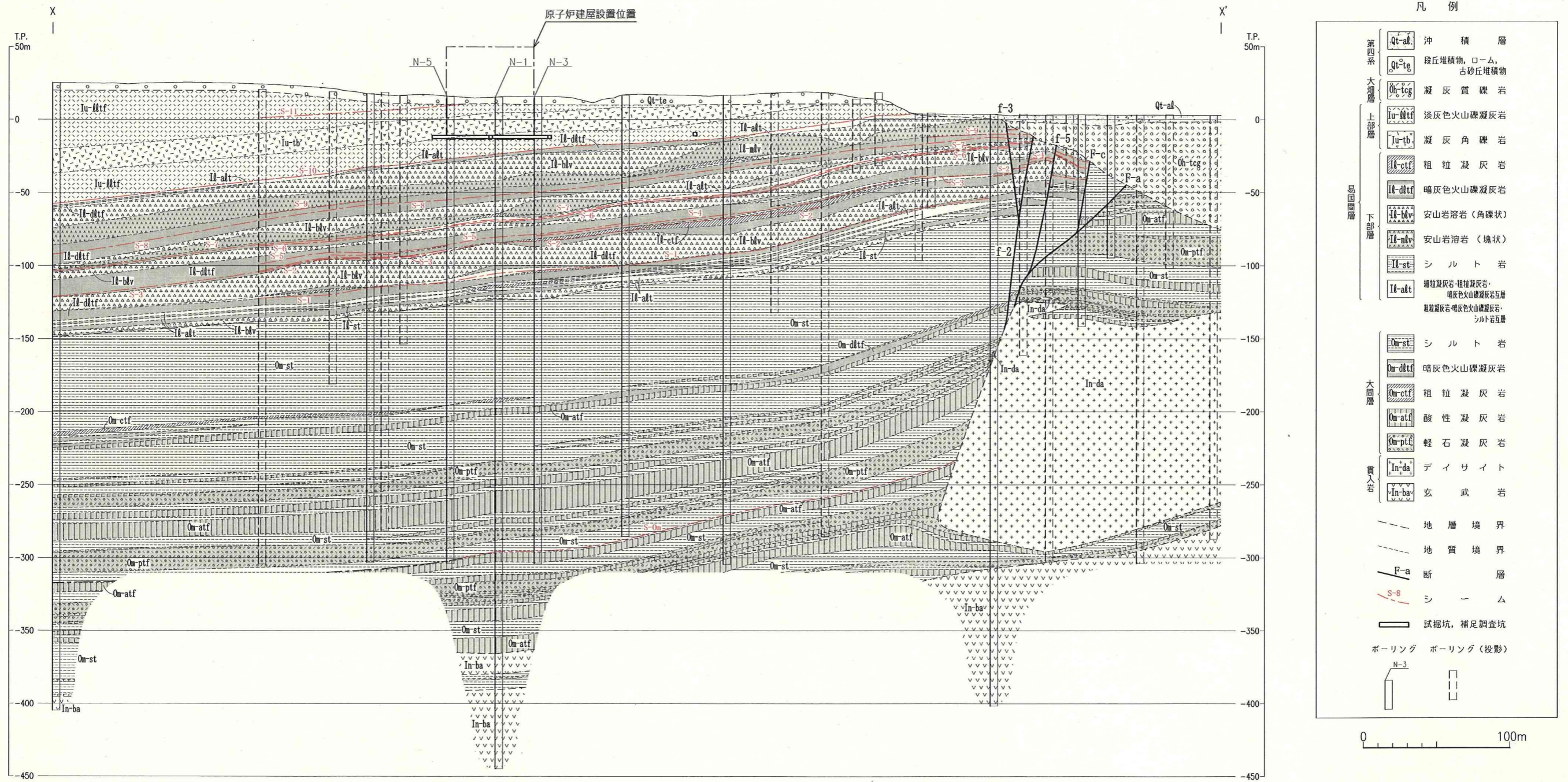
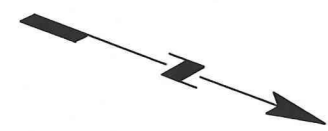


図-1.1 地質鉛直断面図のシームの分布



凡 例

⊗ シームが認められない孔

シームが認められる孔

● 0cm<層厚<2cm

● 2cm≤層厚<4cm

● 4cm≤層厚<6cm

● 6cm≤層厚<10cm

● 10cm≤層厚

● シームの層厚が不明の孔

○ シームの層準まで到達していない孔

● 浸食によりシームを挟む  
細粒凝灰岩が分布しない孔

— シームを挟む細粒凝灰岩の  
等高線

○ 浸食によりシームを挟む  
細粒凝灰岩が分布しない範囲

— 断 層

— 敷 地 境 界

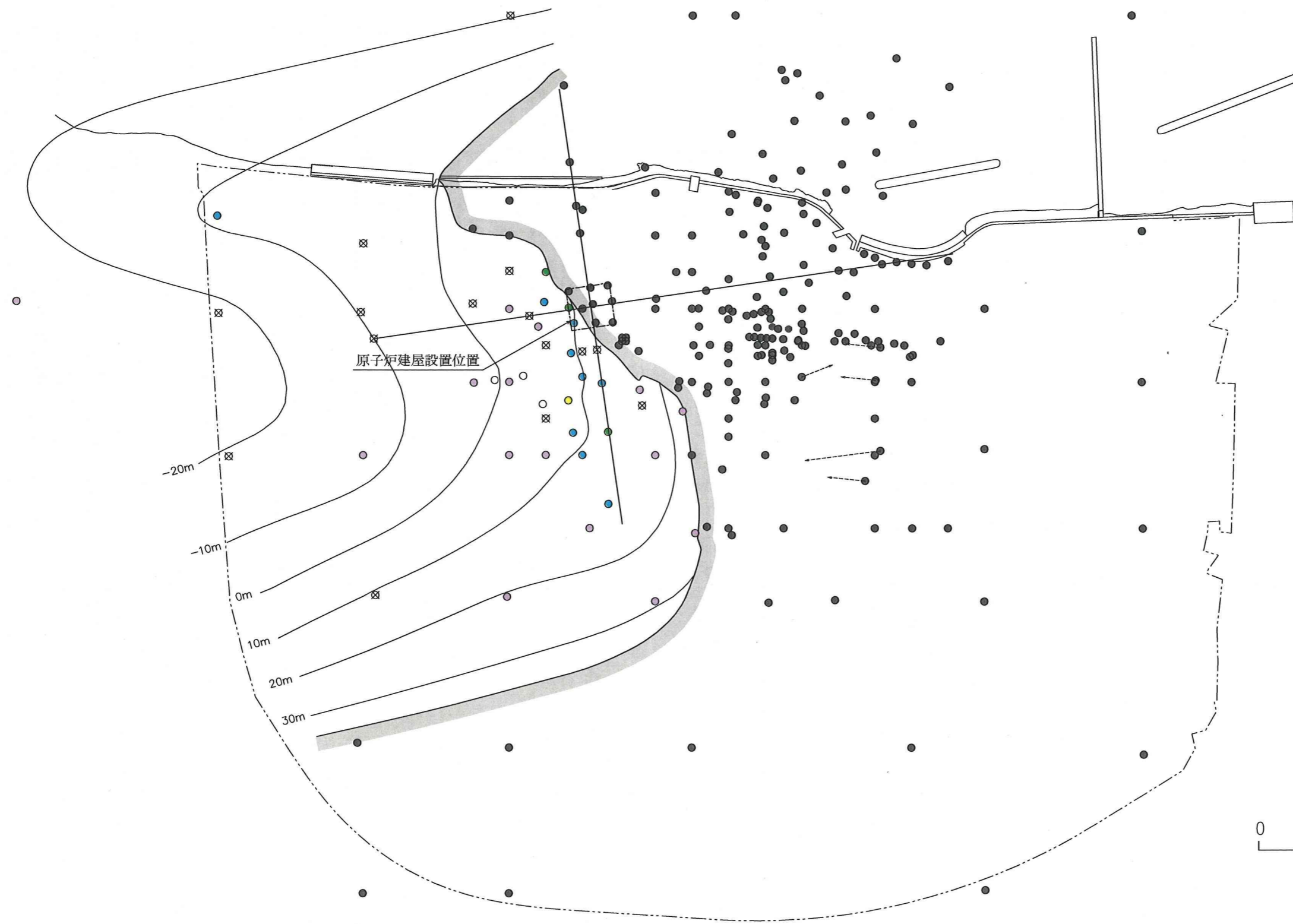


図-1.2(1) シームの分布図 (S-11)

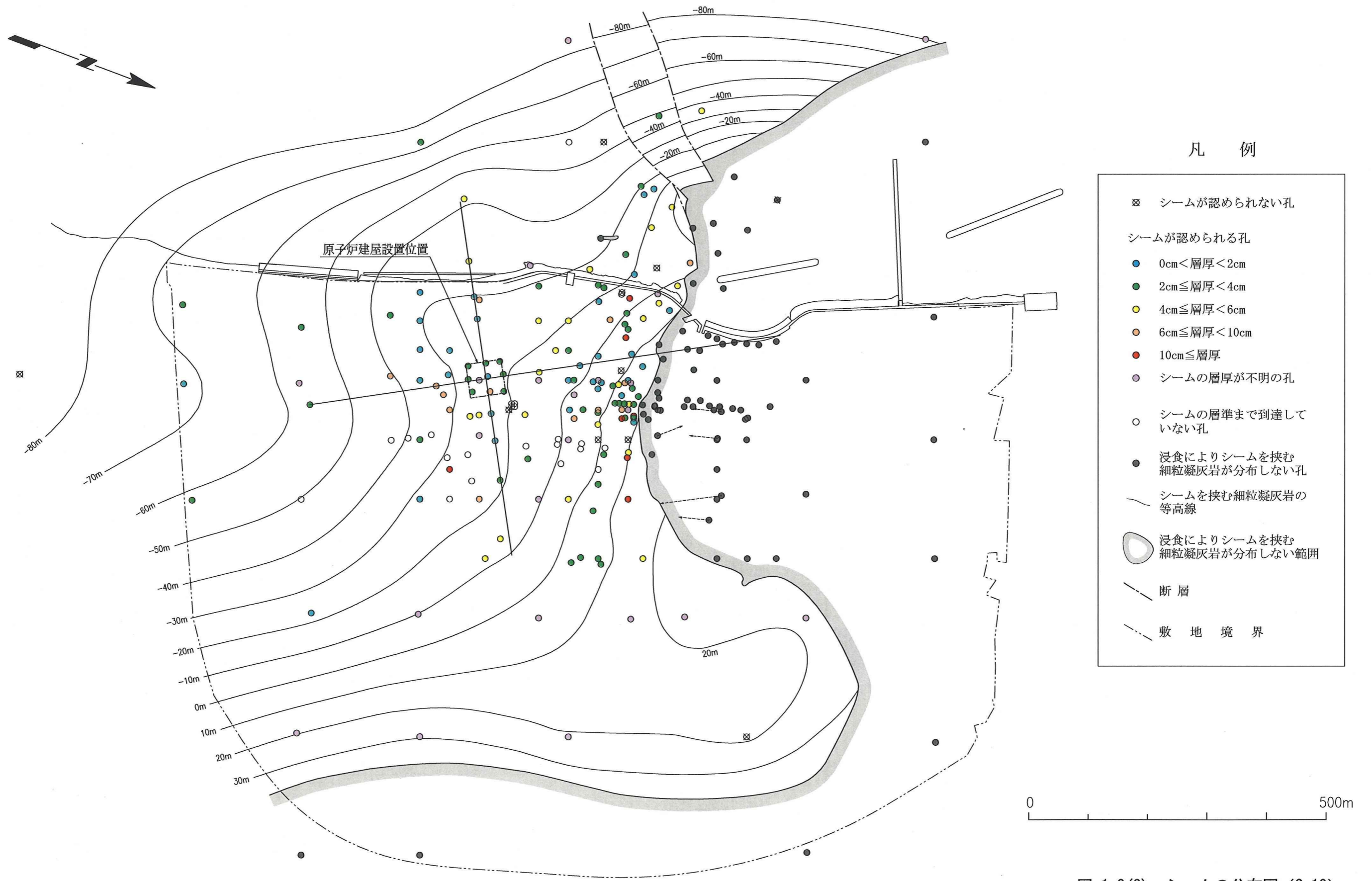
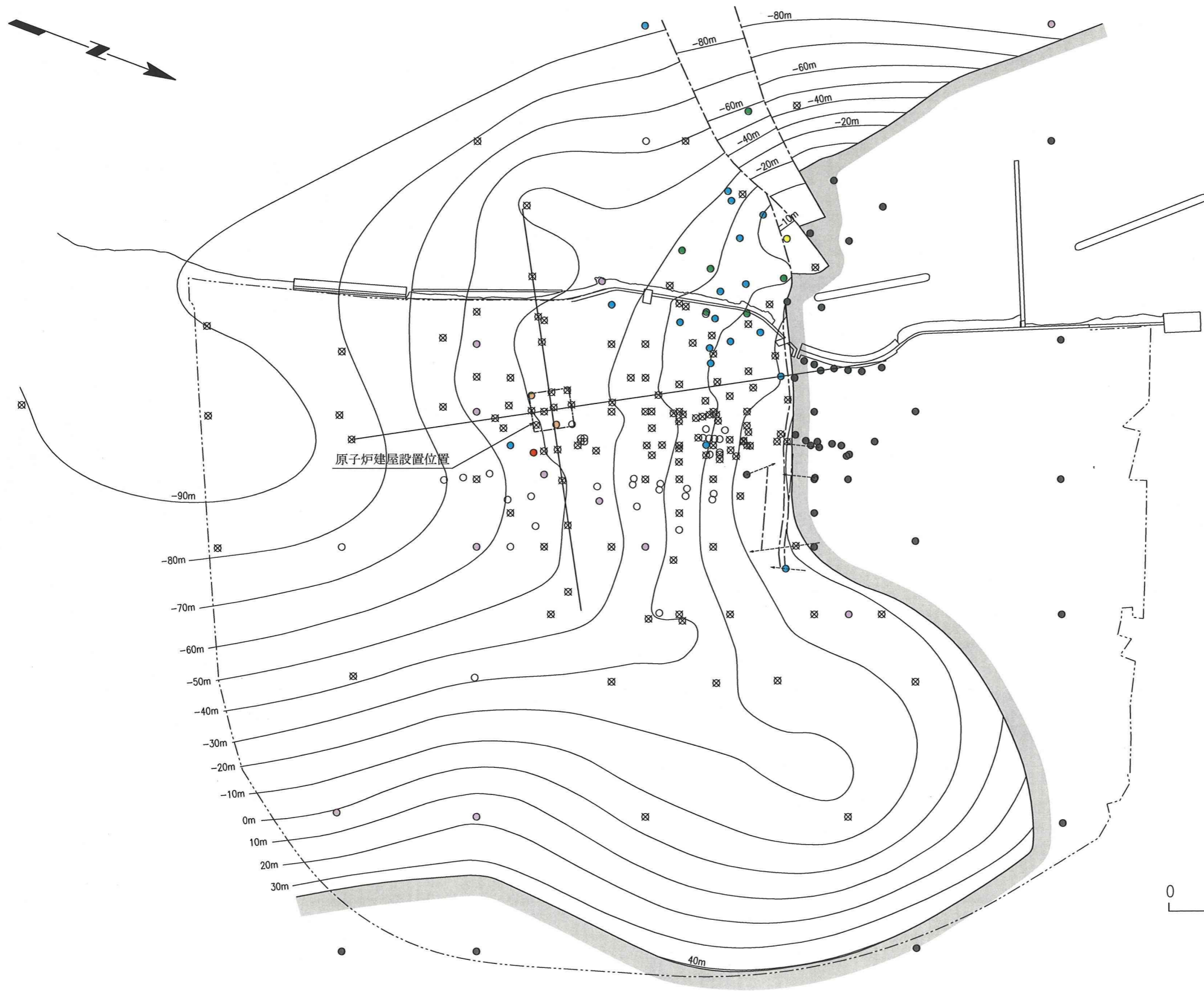


図-1.2(2) シームの分布図 (S-10)



凡 例

- ⊗ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm<層厚<2cm
  - 2cm≤層厚<4cm
  - 4cm≤層厚<6cm
  - 6cm≤層厚<10cm
  - 10cm≤層厚
  - シームの層厚が不明の孔
- シームの層準まで到達していない孔
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない範囲
- - 断 層
- - 敷 地 境 界

図-1.2(3) シームの分布図 (S-9)

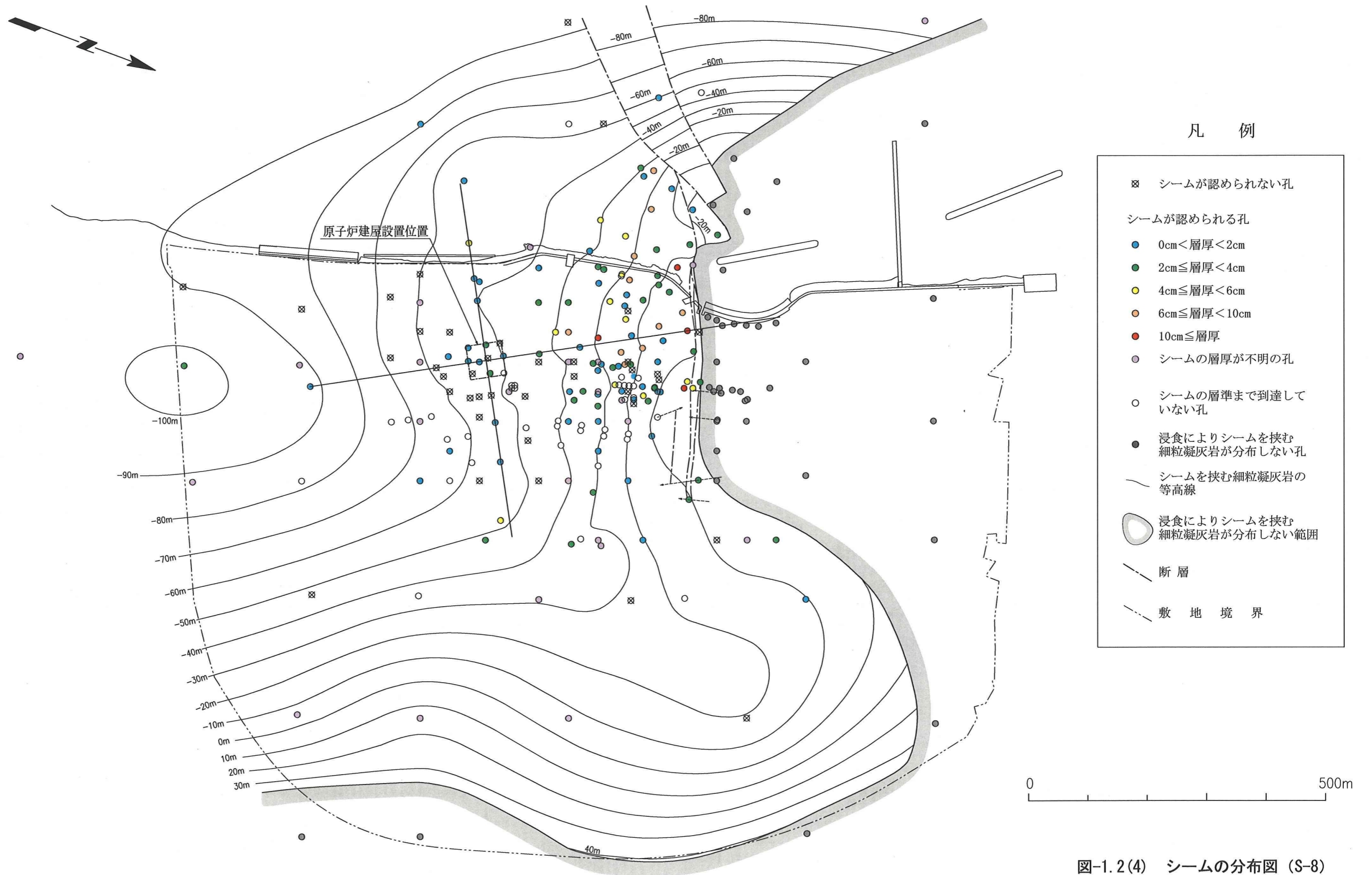
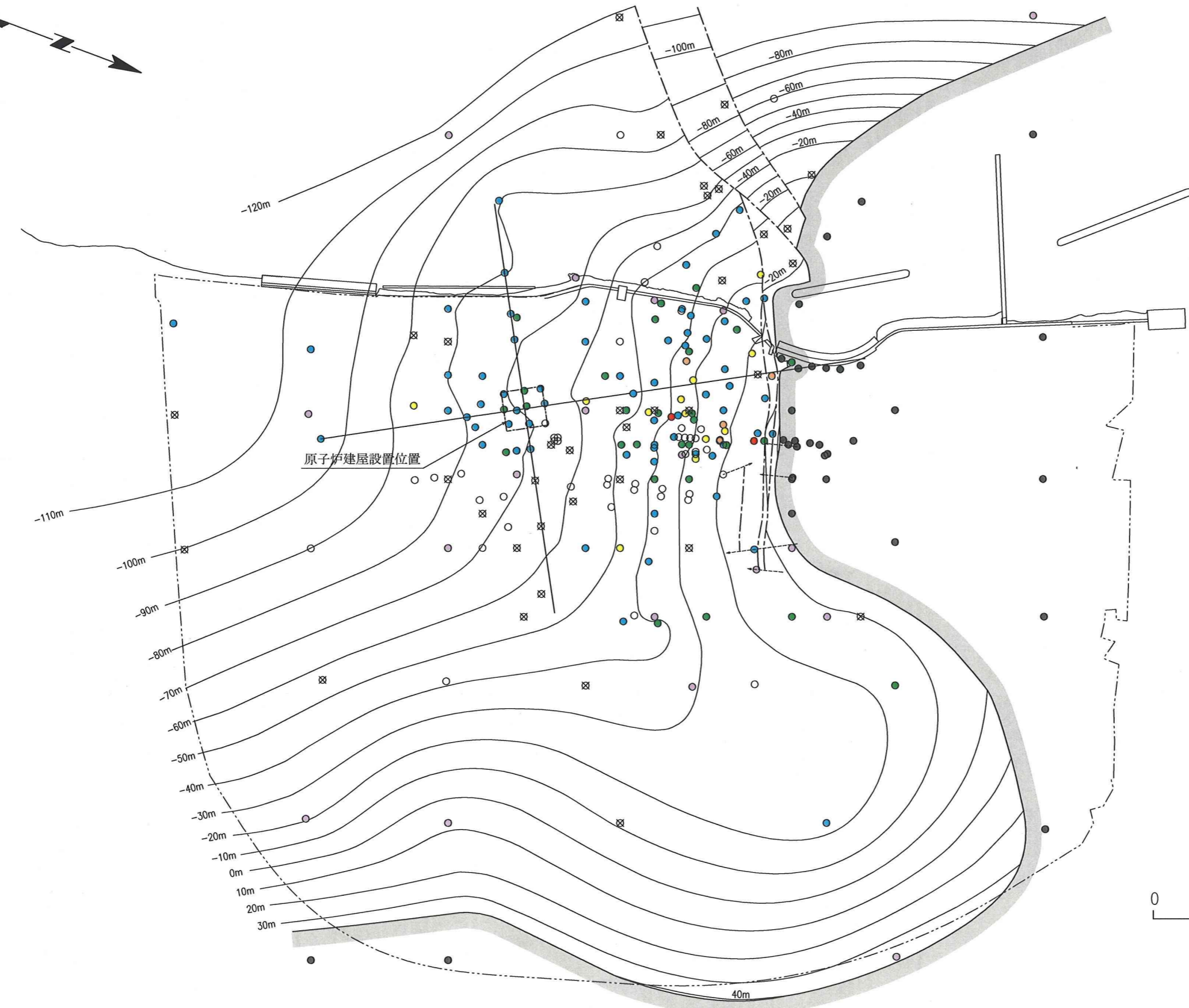
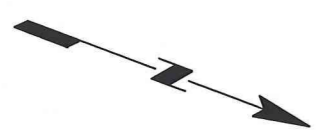


図-1.2(4) シームの分布図 (S-8)

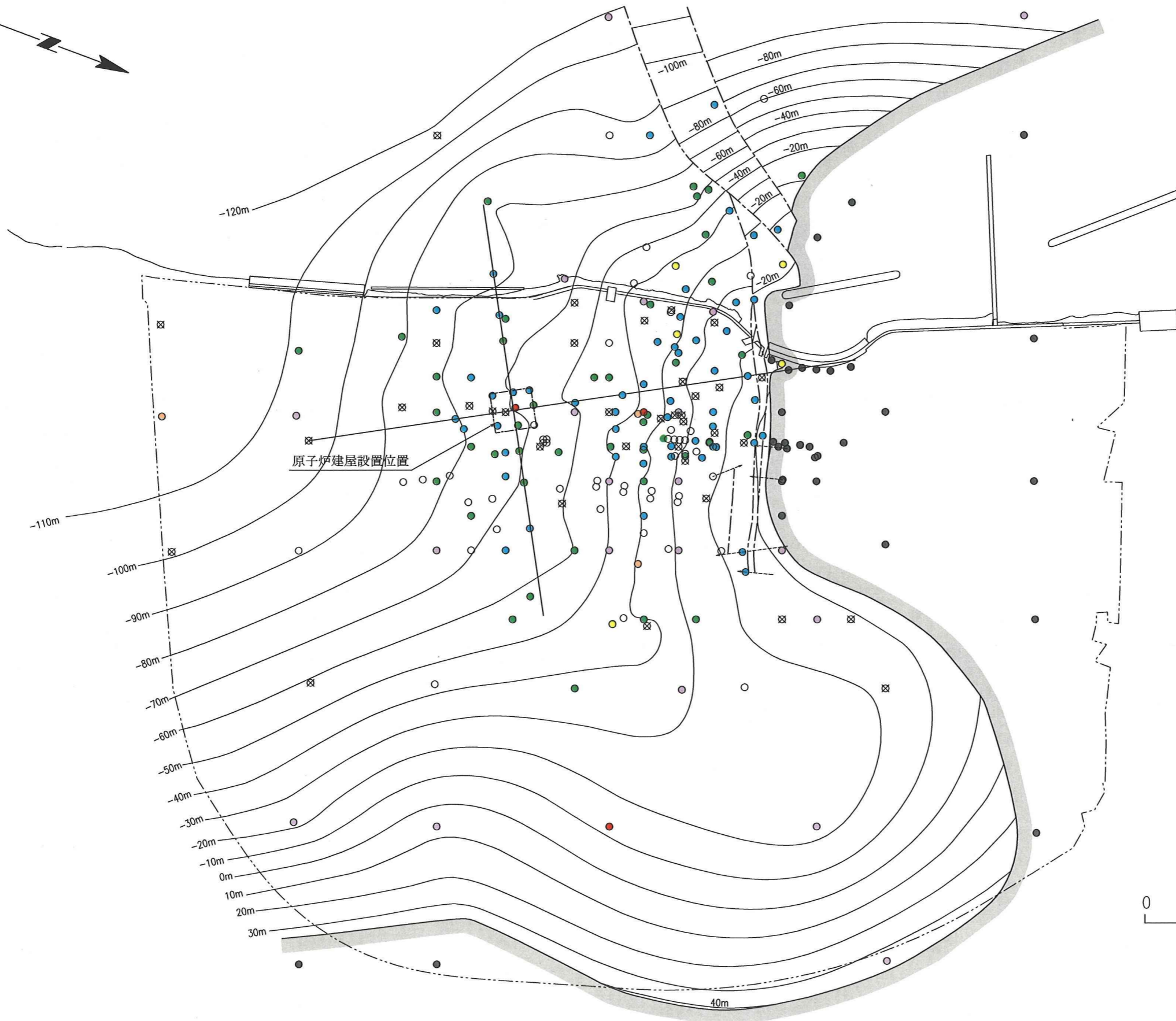
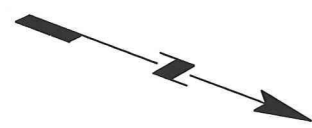


凡 例

- ☒ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm<層厚<2cm
  - 2cm≤層厚<4cm
  - 4cm≤層厚<6cm
  - 6cm≤層厚<10cm
  - 10cm≤層厚
  - シームの層厚が不明の孔
- シームの層準まで到達していない孔
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない範囲
- - - 断 層
- - - 敷 地 境 界



図-1.2(5) シームの分布図 (S-7)

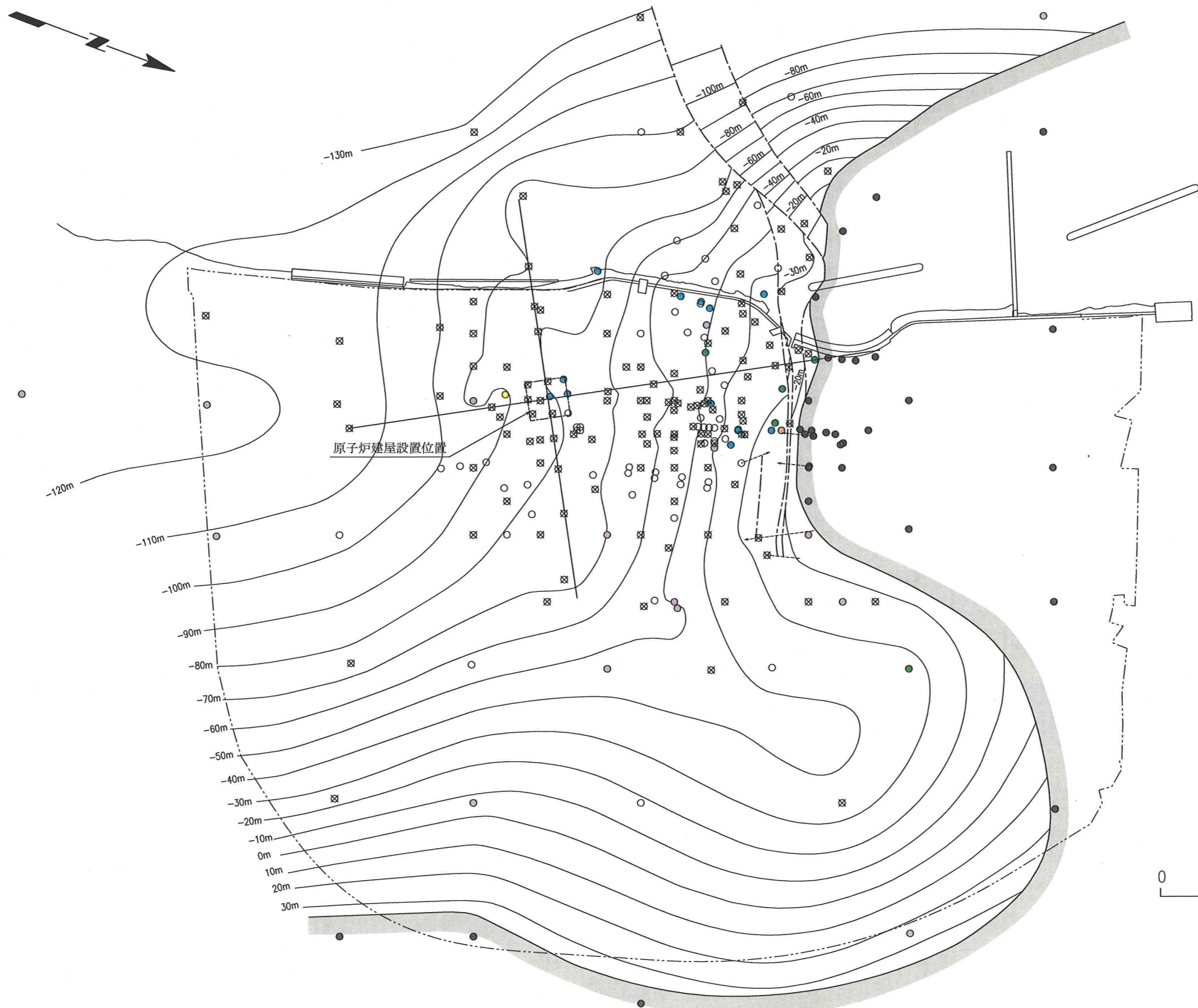


凡 例

- ☒ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm < 層厚 < 2cm
  - 2cm ≤ 層厚 < 4cm
  - 4cm ≤ 層厚 < 6cm
  - 6cm ≤ 層厚 < 10cm
  - 10cm ≤ 層厚
  - シームの層厚が不明の孔
- シームの層準まで到達していない孔
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない範囲
- - 断層
- - 敷地境界



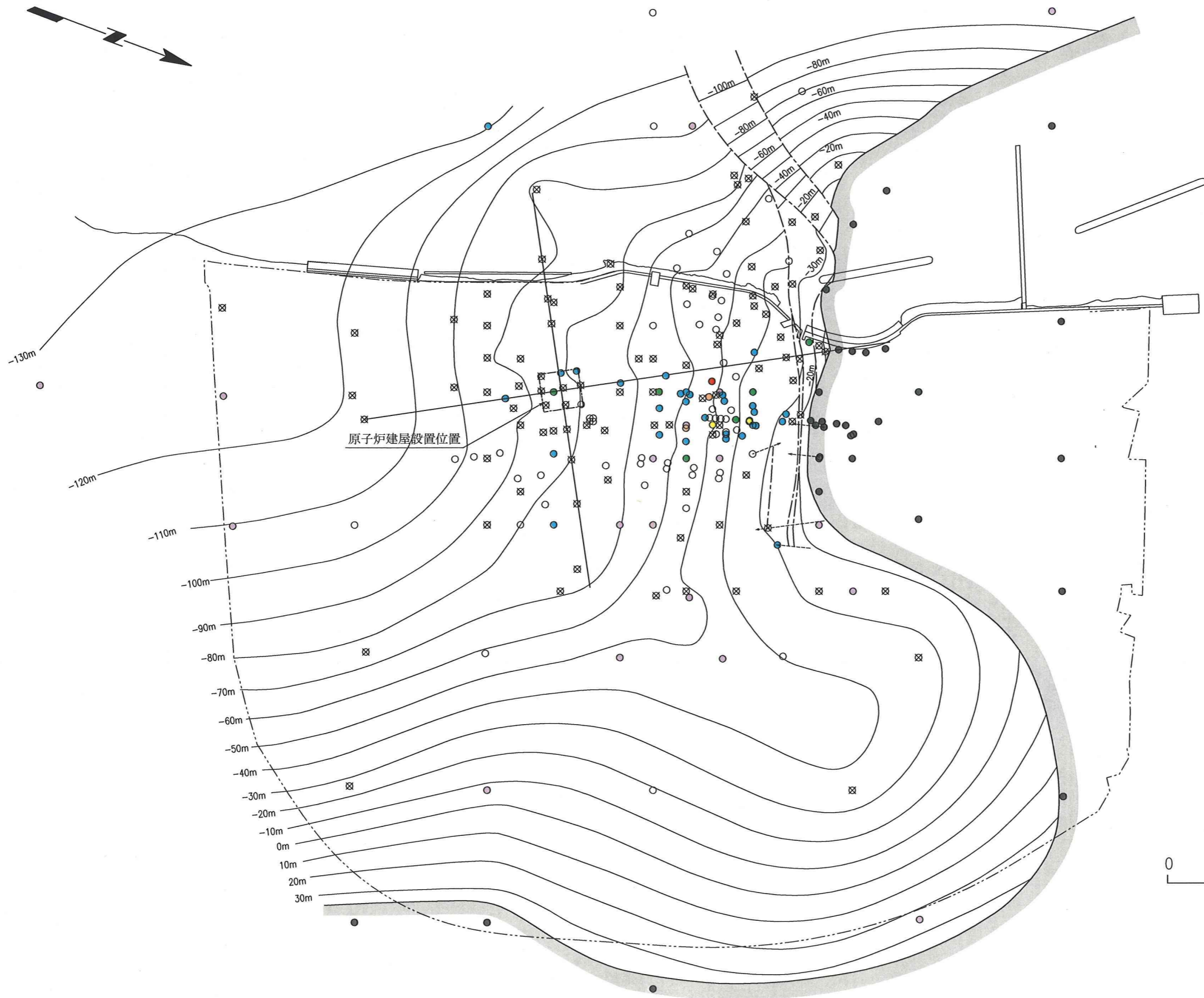
図-1.2(6) シームの分布図 (S-6)



凡 例

- ☒ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm < 層厚 < 2cm
  - 2cm ≤ 層厚 < 4cm
  - 4cm ≤ 層厚 < 6cm
  - 6cm ≤ 層厚 < 10cm
  - 10cm ≤ 層厚
  - シームの層厚が不明の孔
- シームの層準まで到達していない孔
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない範囲
- 断層
- 敷地境界

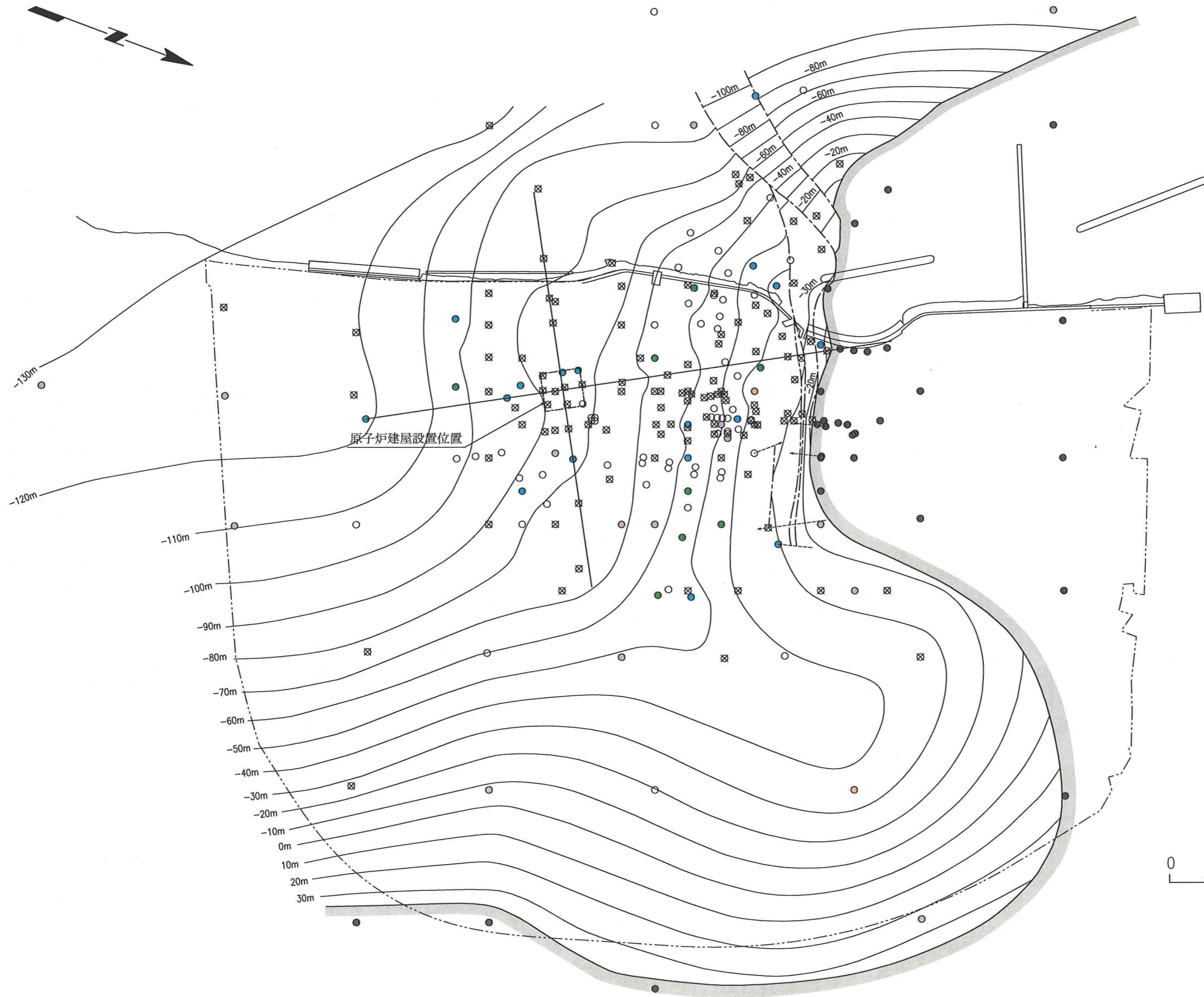
図-1.2(7) シームの分布図 (S-5)



凡 例

- ⊗ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm < 層厚 < 2cm
  - 2cm ≤ 層厚 < 4cm
  - 4cm ≤ 層厚 < 6cm
  - 6cm ≤ 層厚 < 10cm
  - 10cm ≤ 層厚
  - シームの層厚が不明の孔
- シームの層準まで到達していない孔
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない範囲
- 断層
- - - 敷地境界

図-1.2(8) シームの分布図 (S-4)

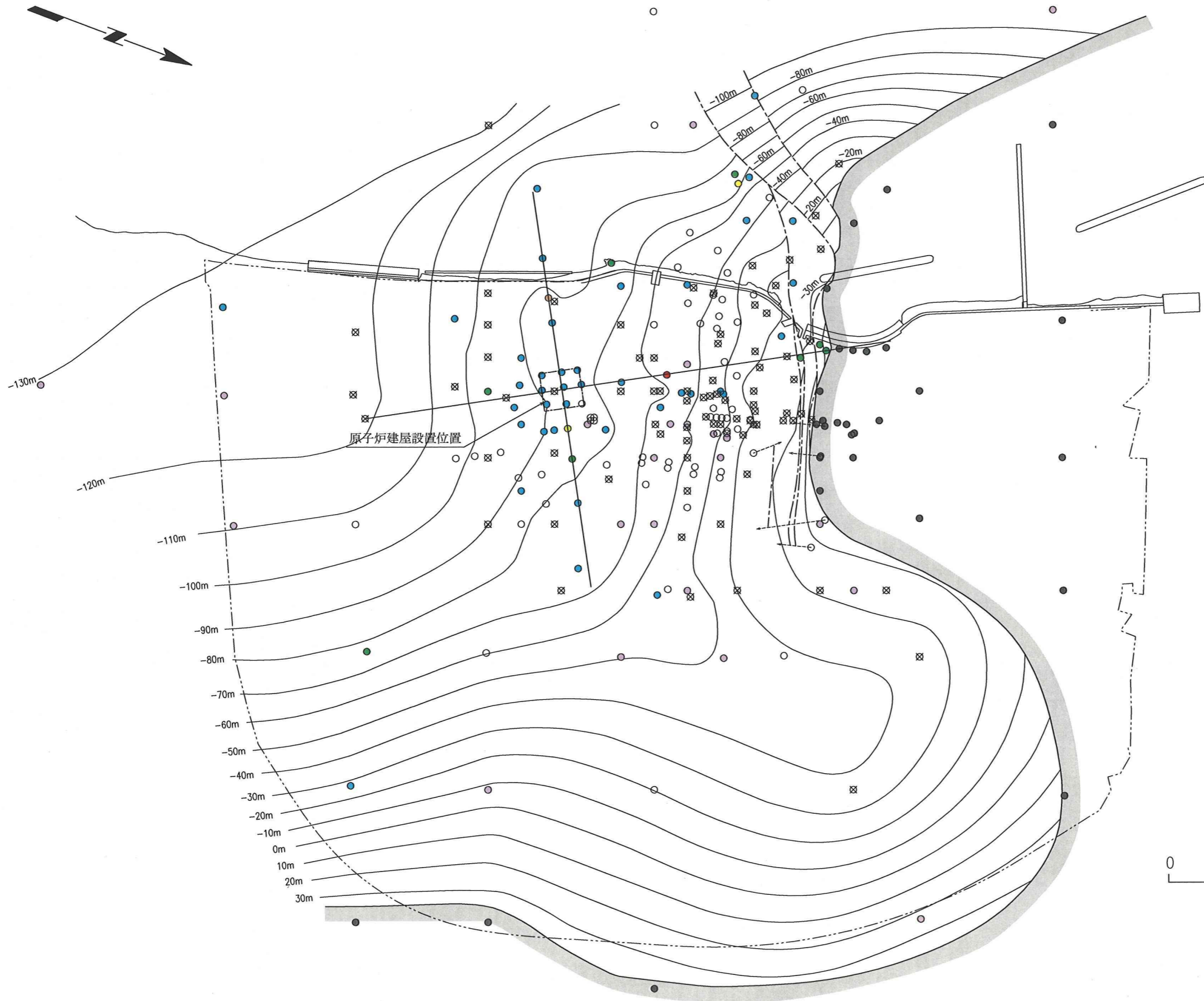


凡 例

- ☒ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm<層厚<2cm
  - 2cm≤層厚<4cm
  - 4cm≤層厚<6cm
  - 6cm≤層厚<10cm
  - 10cm≤層厚
  - シームの層厚が不明の孔
- シームの層準まで到達していない孔
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない範囲
- 断層
- 敷地境界



図-1.2(9) シームの分布図 (S-3)



凡 例

- ⊗ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm<層厚<2cm
  - 2cm≤層厚<4cm
  - 4cm≤層厚<6cm
  - 6cm≤層厚<10cm
  - 10cm≤層厚
  - シームの層厚が不明の孔
- シームの層準まで到達していない孔
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 浸食によりシームを挟む細粒凝灰岩が分布しない範囲
- 断層
- 敷地境界

図-1.2(10) シームの分布図 (S-2)

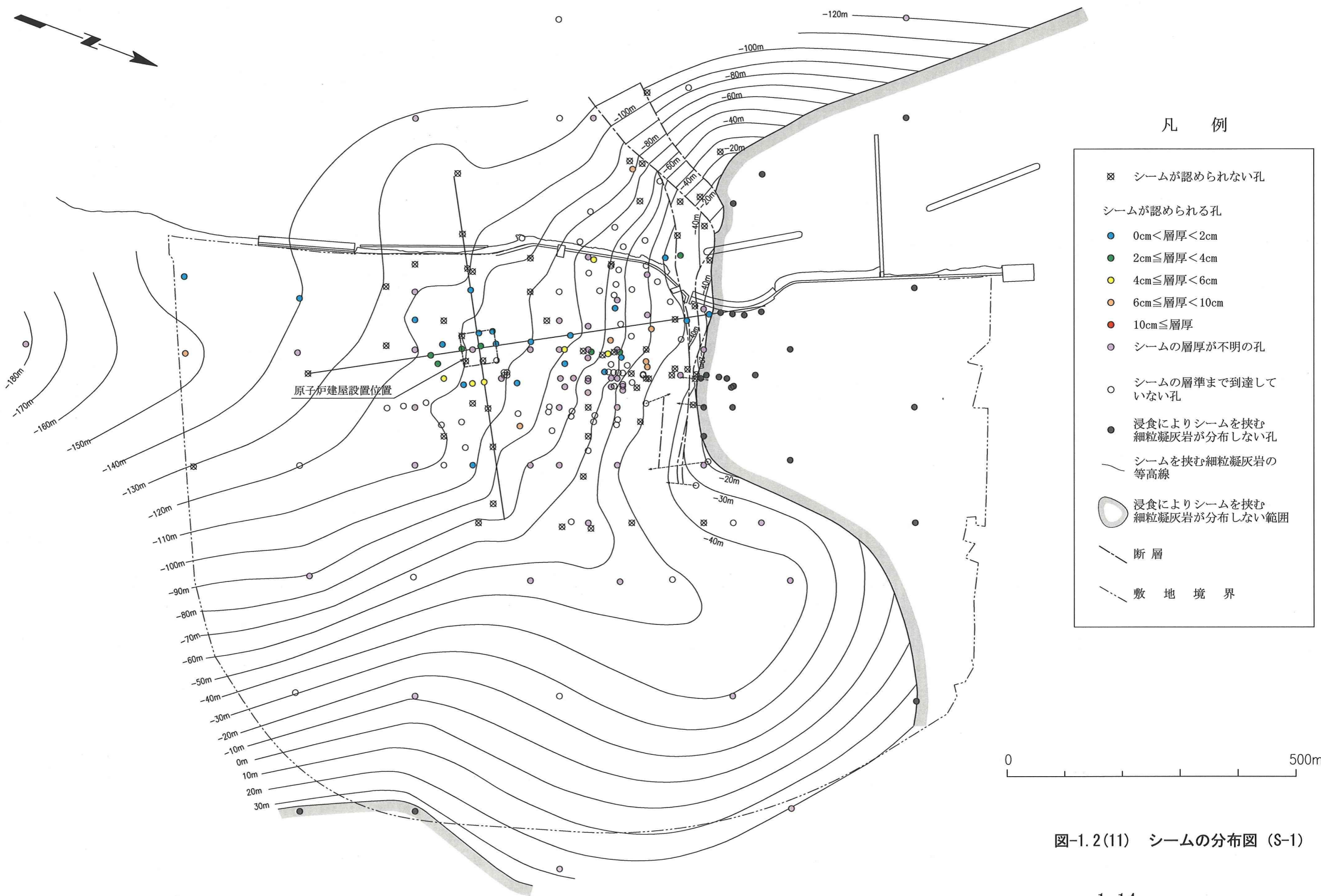
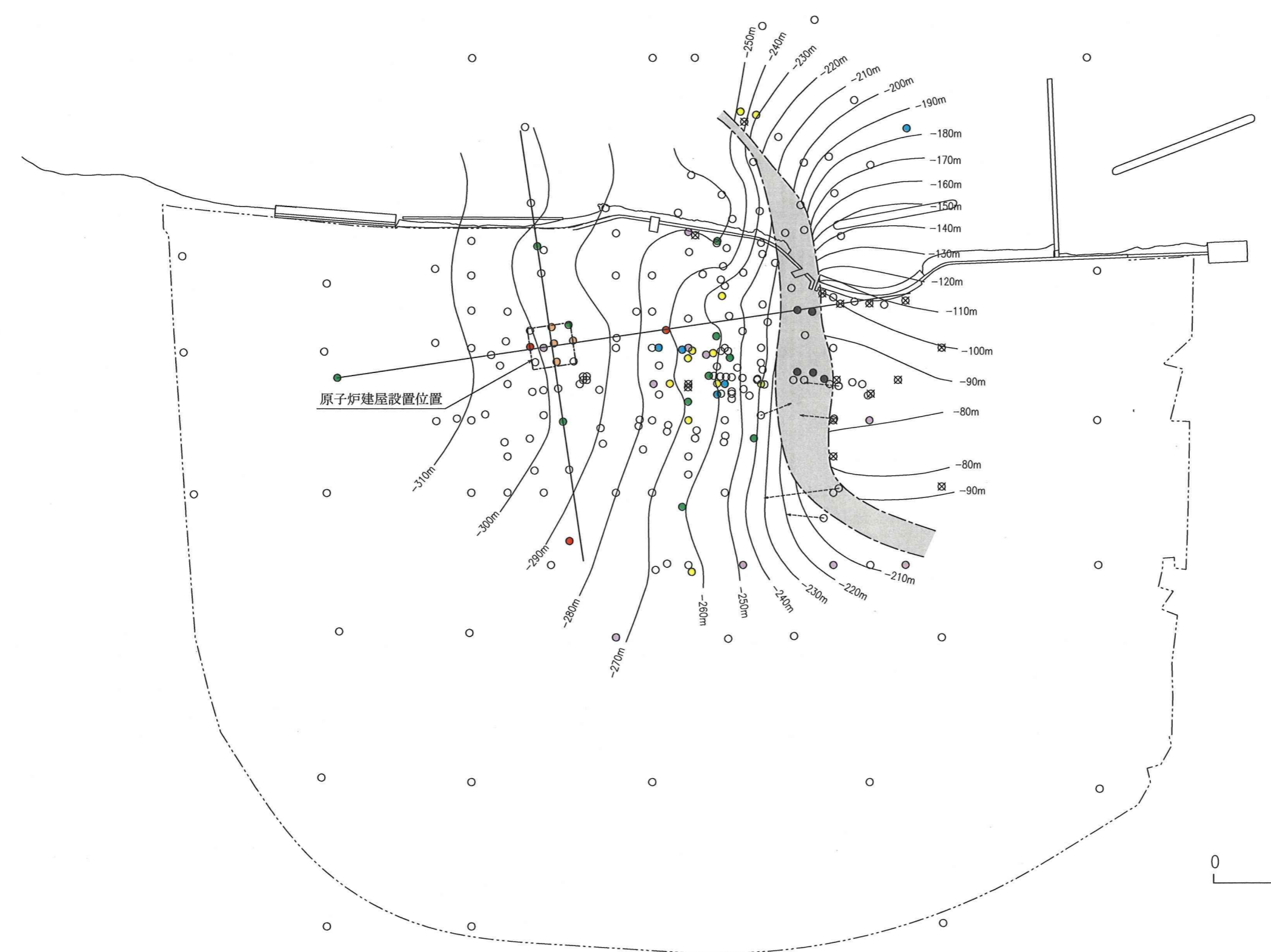
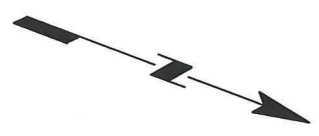


図-1.2(11) シームの分布図 (S-1)



凡例

- ☒ シームが認められない孔
- シームが認められる孔
  - 0cm < 層厚 < 2cm
  - 2cm ≤ 層厚 < 4cm
  - 4cm ≤ 層厚 < 6cm
  - 6cm ≤ 層厚 < 10cm
  - 10cm ≤ 層厚
  - シームの層厚が不明の孔
  - シームの層準まで到達していない孔
- 断層または貫入岩の影響によりシームを挟む酸性凝灰岩が分布しない孔
- シームを挟む細粒凝灰岩の等高線
- 断層または貫入岩の影響により酸性凝灰岩が分布しない範囲
- - - 敷地境界

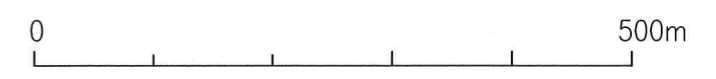


図-1.2(12) シームの分布図 (S-0m)

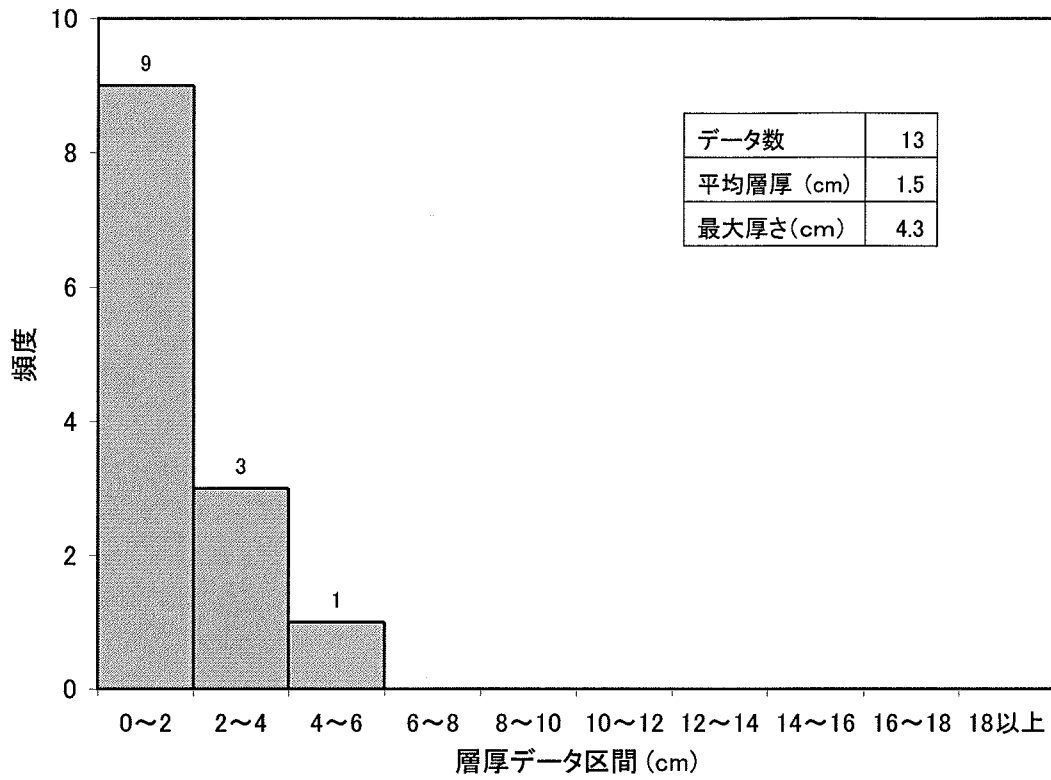


図-1.3(1) シームの層厚分布(S-11)

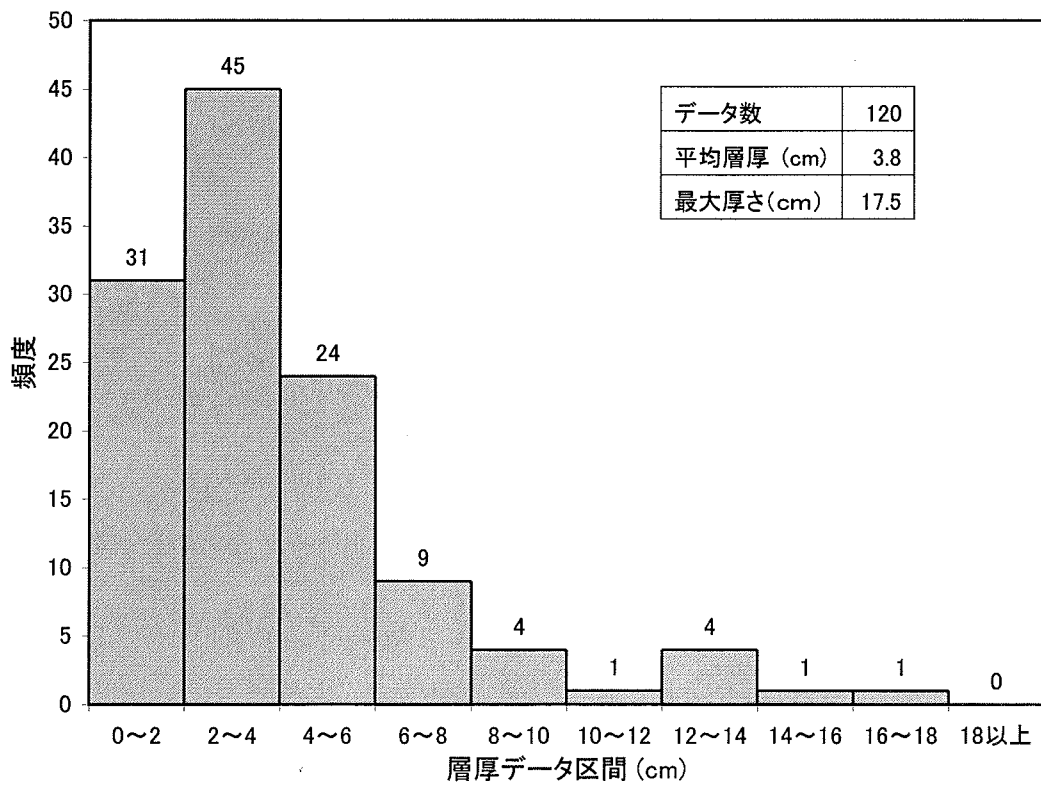


図-1.3(2) シームの層厚分布(S-10)

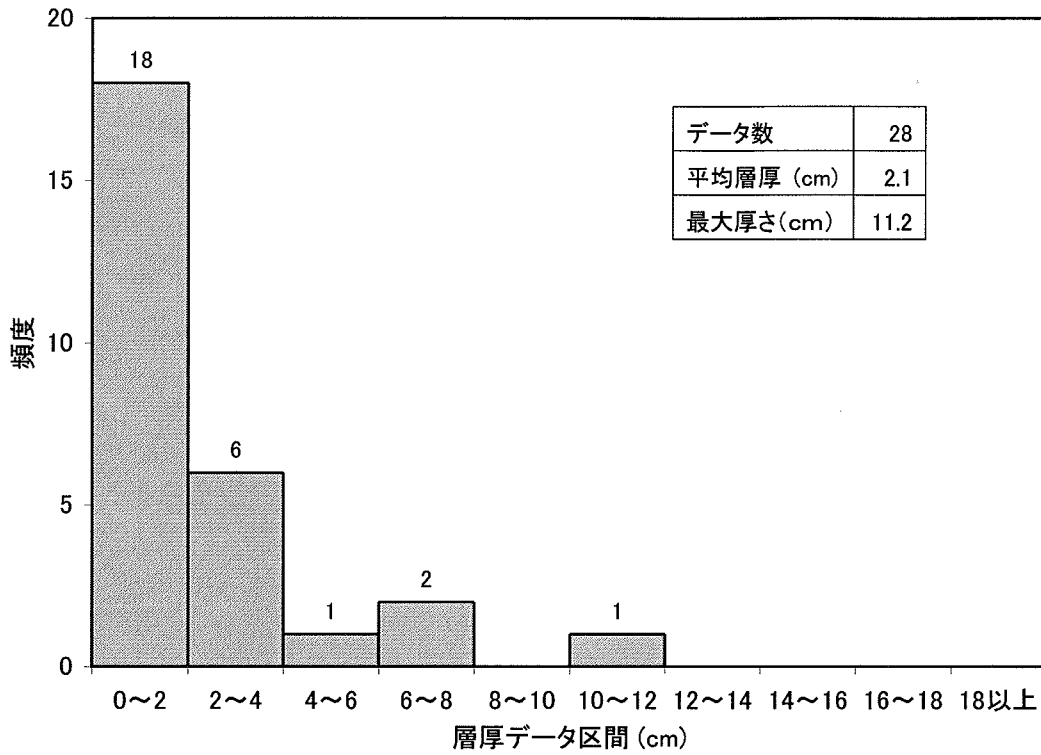


図-1.3(3) シームの層厚分布(S-9)

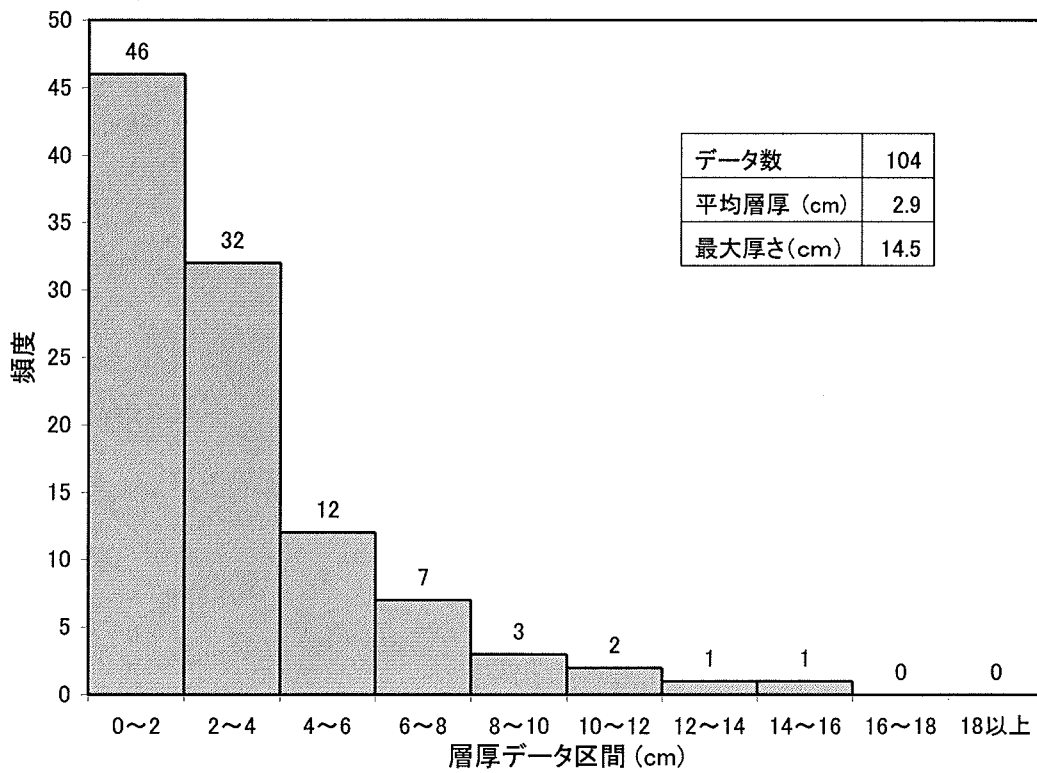


図-1.3(4) シームの層厚分布(S-8)

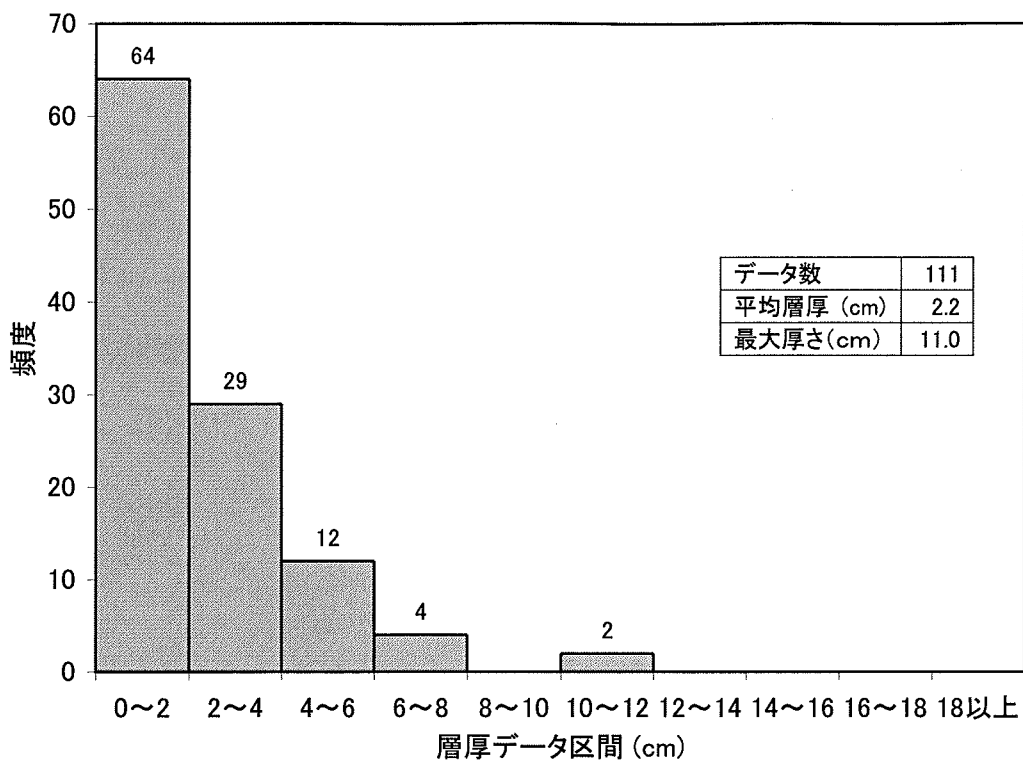


図-1.3(5) シームの層厚分布(S-7)

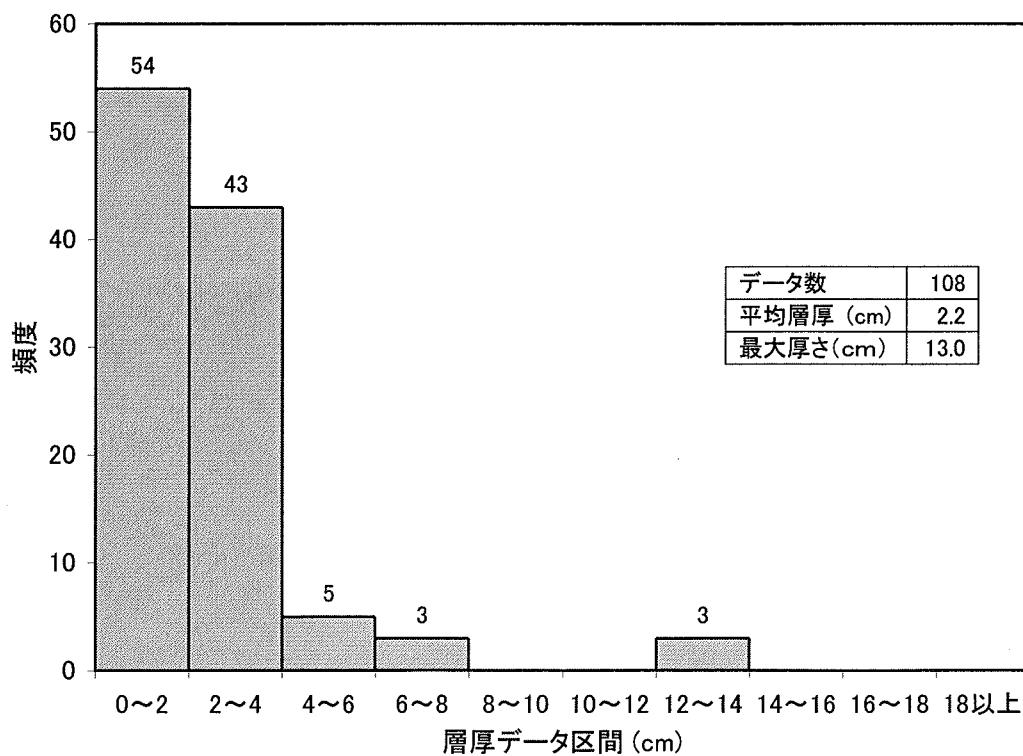


図-1.3(6) シームの層厚分布(S-6)

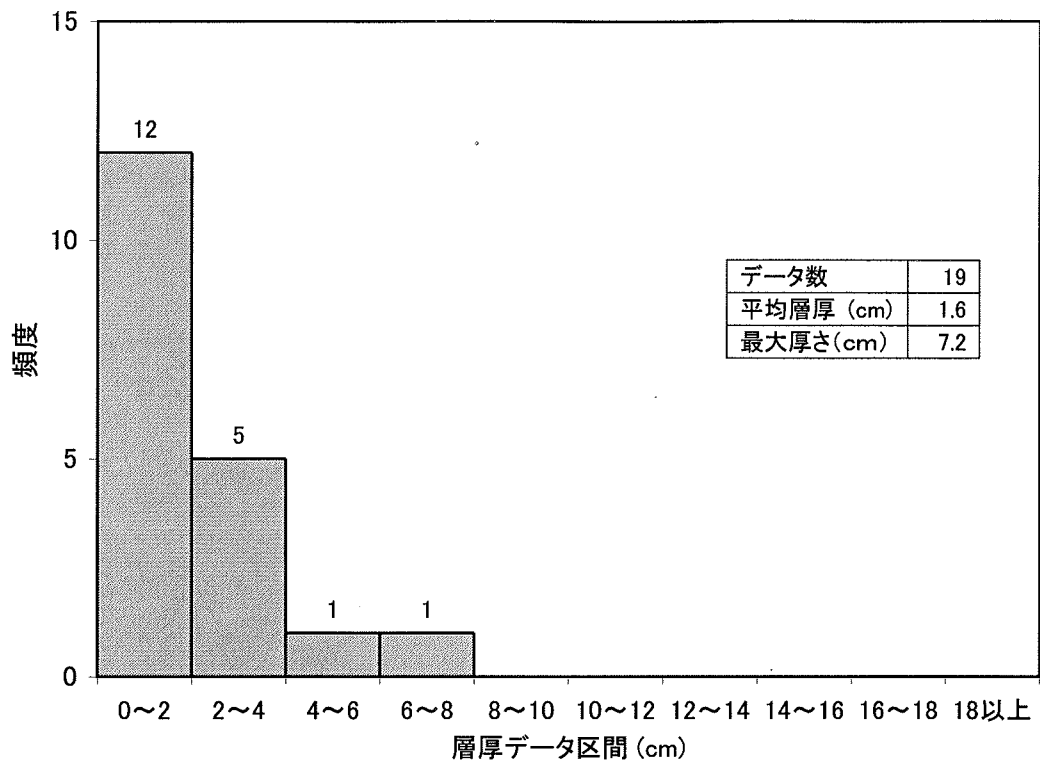


図-1.3(7) シームの層厚分布(S-5)

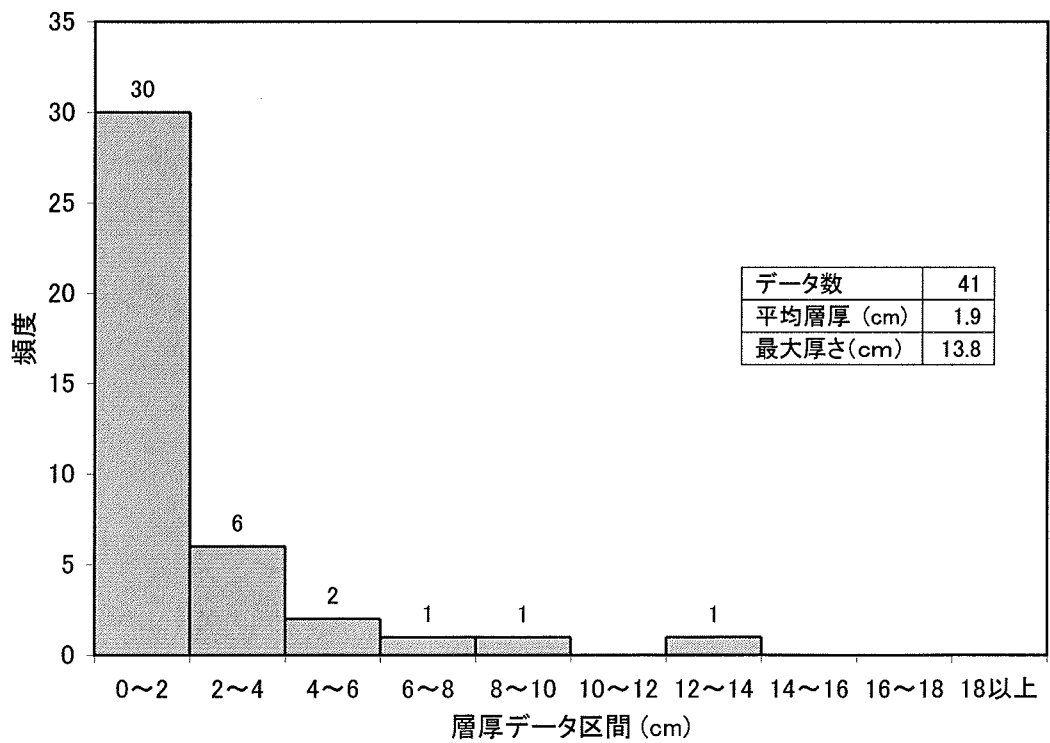


図-1.3(8) シームの層厚分布(S-4)

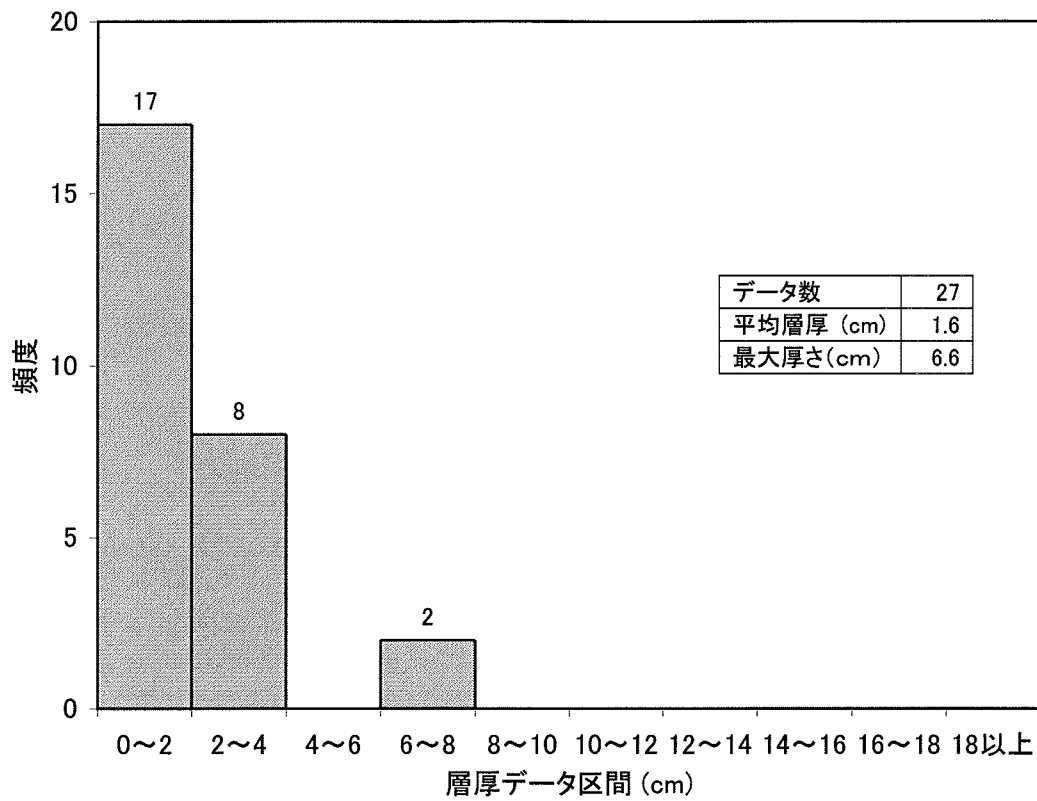


図-1.3(9) シームの層厚分布(S-3)

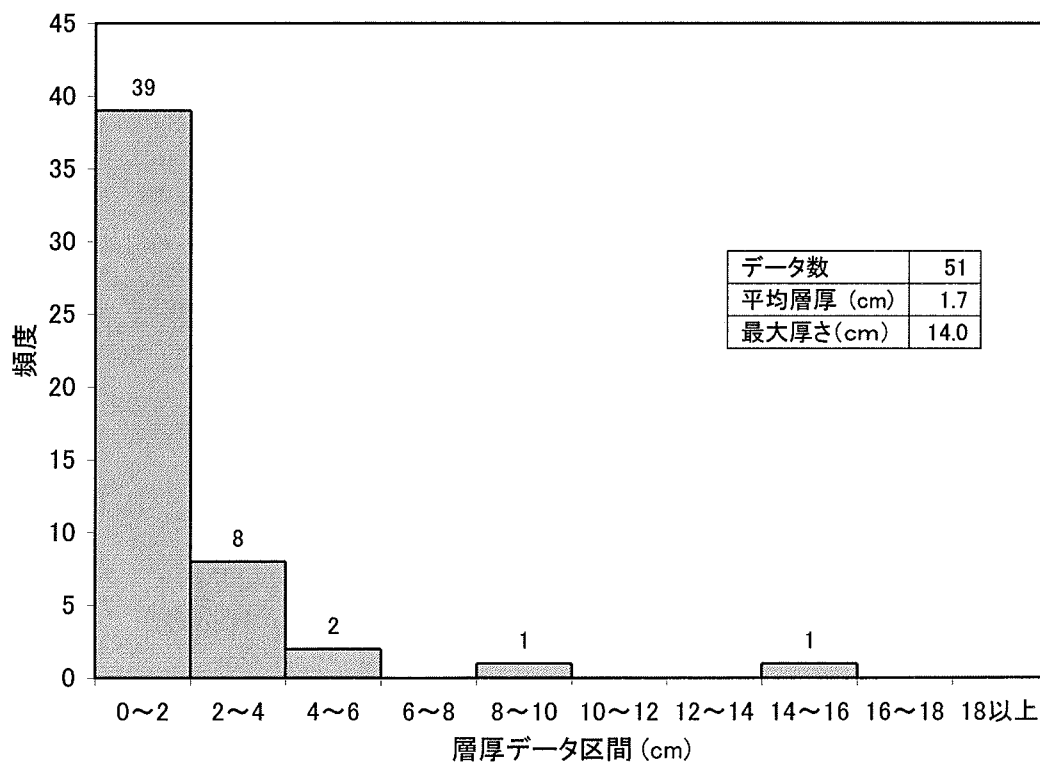


図-1.3(10) シームの層厚分布(S-2)

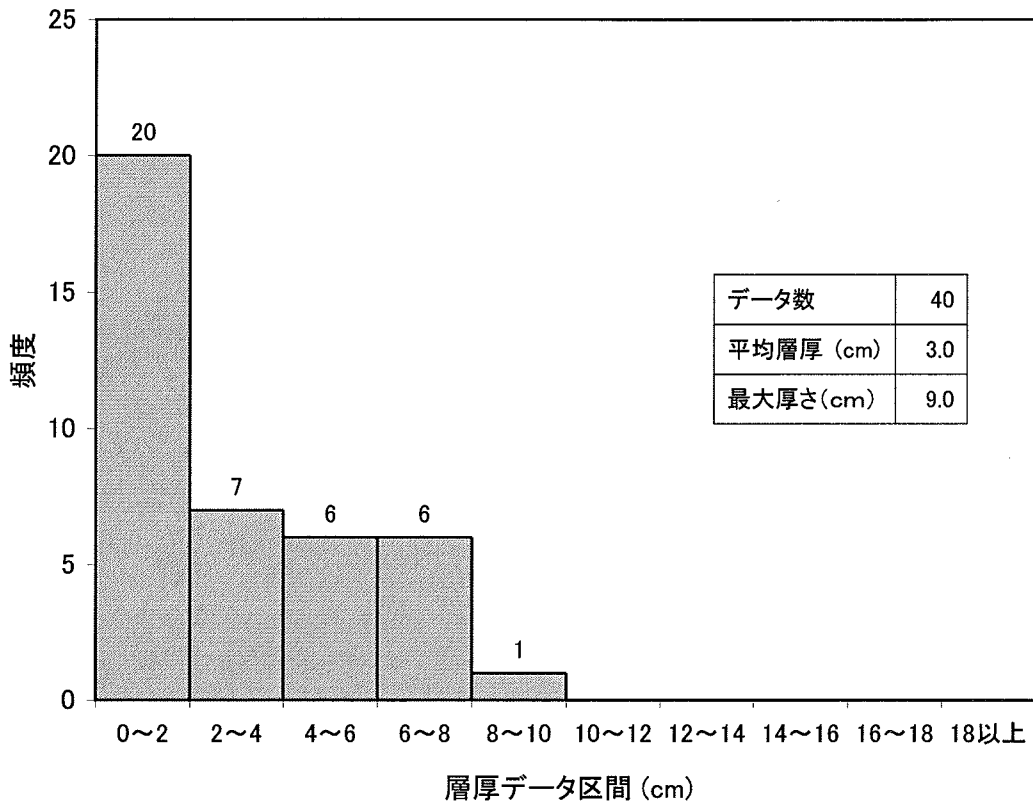


図-1.3(11) シームの層厚分布(S-1)

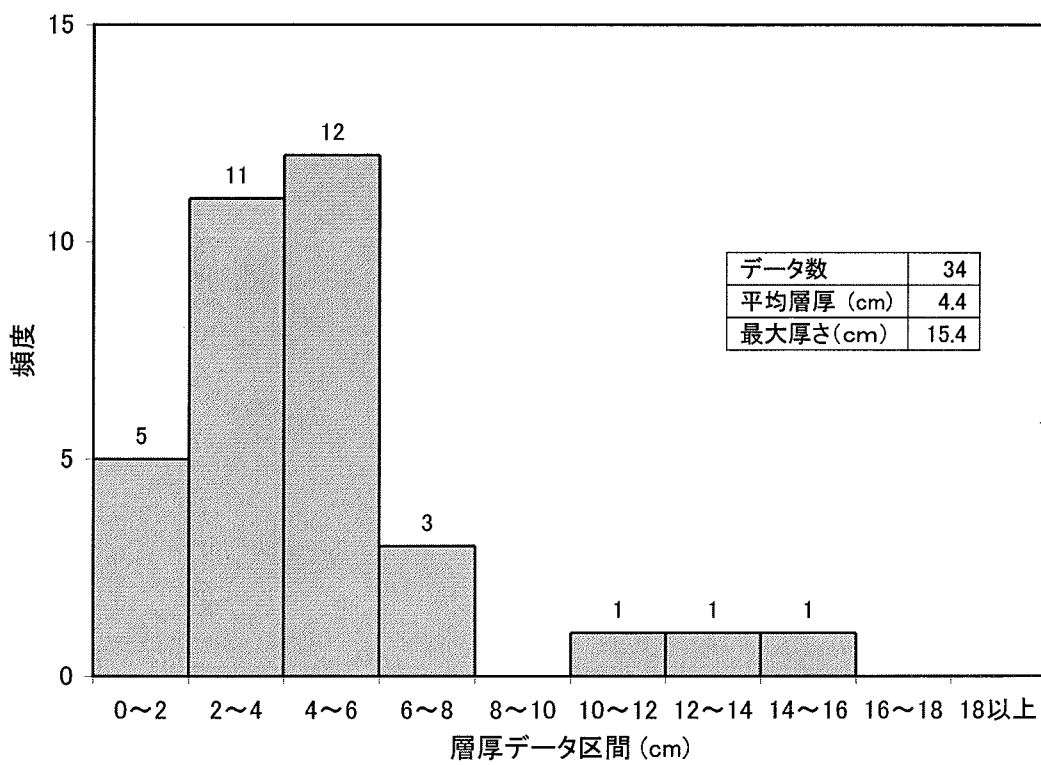


図-1.3(12) シームの層厚分布(S-0m)

2) シーム S-10 の代表性について、粒度分布等の観点から説明すること。

試掘坑内で確認できるシームは、S-10、S-8 及び S-7 である。

これらのシームの物理的性質を把握するために土粒子密度、含水比、湿潤密度及び粒度試験を、力学的性質を把握するために単純せん断試験を実施している。このうち、単純せん断試験は、試験に必要となる厚さ 2 cm の供試体を確保できないシーム S-7 を除いて、シーム S-10、S-8 から不攪乱試料を採取し、実施している。試料採取位置を図-1.4 に示す。

なお、図-1.5 に示すとおり、不攪乱試料の採取に際しては、その方法を工夫している。

次に、シームの物性値について、12 枚のシームのうち、シーム S-10、S-8 の試験結果で代表させることについて、以下のように検討している。

社団法人土木学会(1985)「『原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法』報告書 第3編 地盤調査・試験法」によれば、不攪乱試料の採取の困難な弱層については、採取が可能な類似の弱層の力学試験結果によって評価することができるとされており、この場合の類似性の判断は、自然含水比、飽和度、塑性指数、密度、粒度、組成分析等の物理試験によるとされている。

シーム S-10 及び S-8 以外の不攪乱試料の採取が困難なシームについては、試掘坑内より試料採取が可能なシーム S-7 を除き、ボー

リングコアから試料を採取し、土粒子の密度、粒度試験及びX線分析を行い、類似性の確認を行っている。

土粒子の密度試験結果を図-1.6 に示す。同図によると、土粒子密度は、大間層のシーム S-0m では  $2.59 \text{ g/cm}^3$  であり、易国間層のシーム S-11～S-1 では  $2.65\sim 2.70\text{g/cm}^3$  である。

粒度試験結果を図-1.7 に示す。同図によると、細粒分（シルト分と粘土分の合計）はいずれのシームも 60%以上であり、特にシーム S-10、S-8 及び S-7 は粘土分が多い。

また、X線分析の結果を表-1.2 に示す。同表によると、いずれのシームも主としてスメクタイトから構成されている。

以上の分析結果によれば、シーム S-10 及び S-8 は細粒分が多いことから、シーム S-10 及び S-8 の物理的・力学的性質を用いて、シームの解析用物性値として設定することは適切であるとしている。

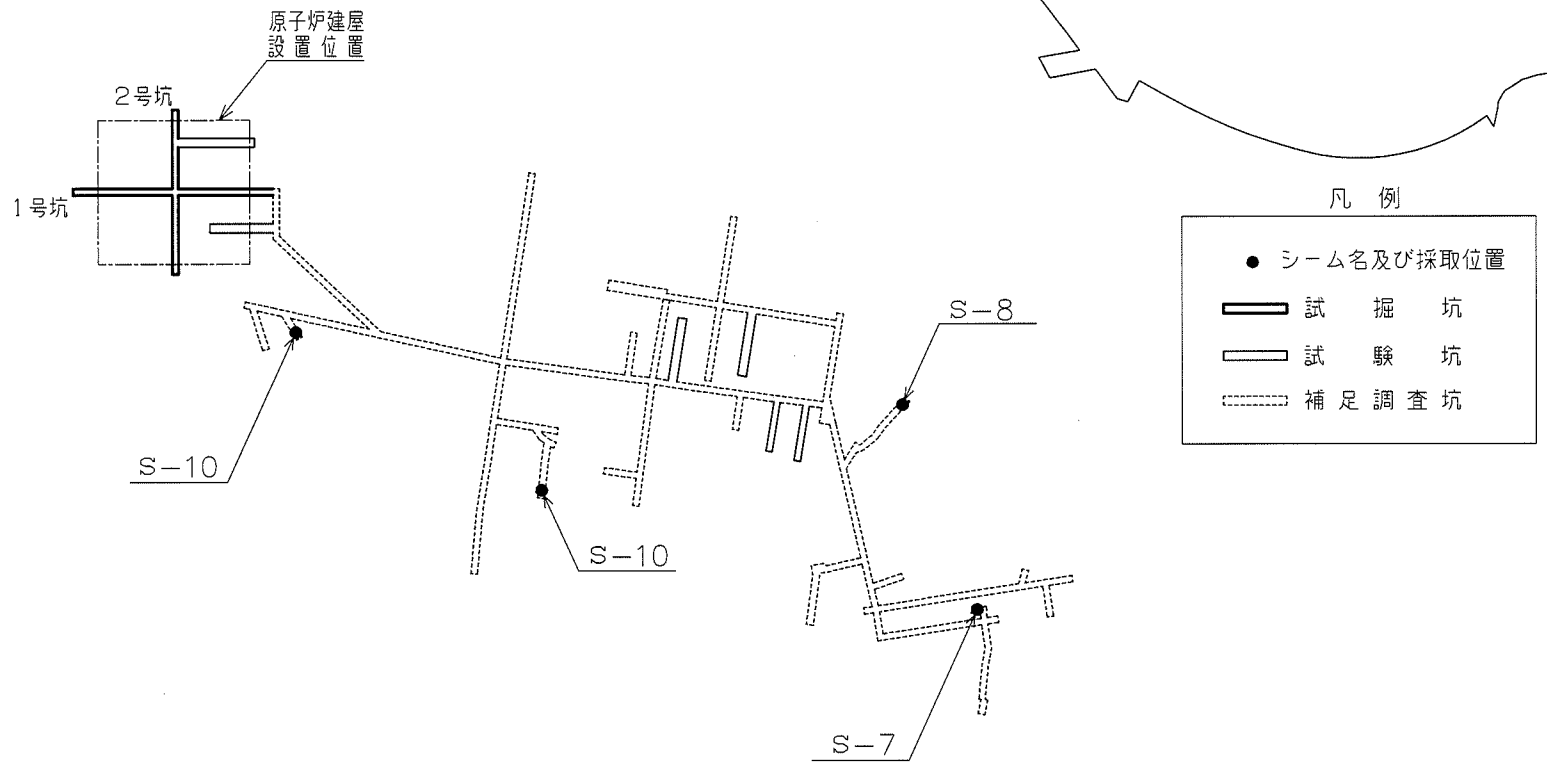


図-1.4 試料採取位置図

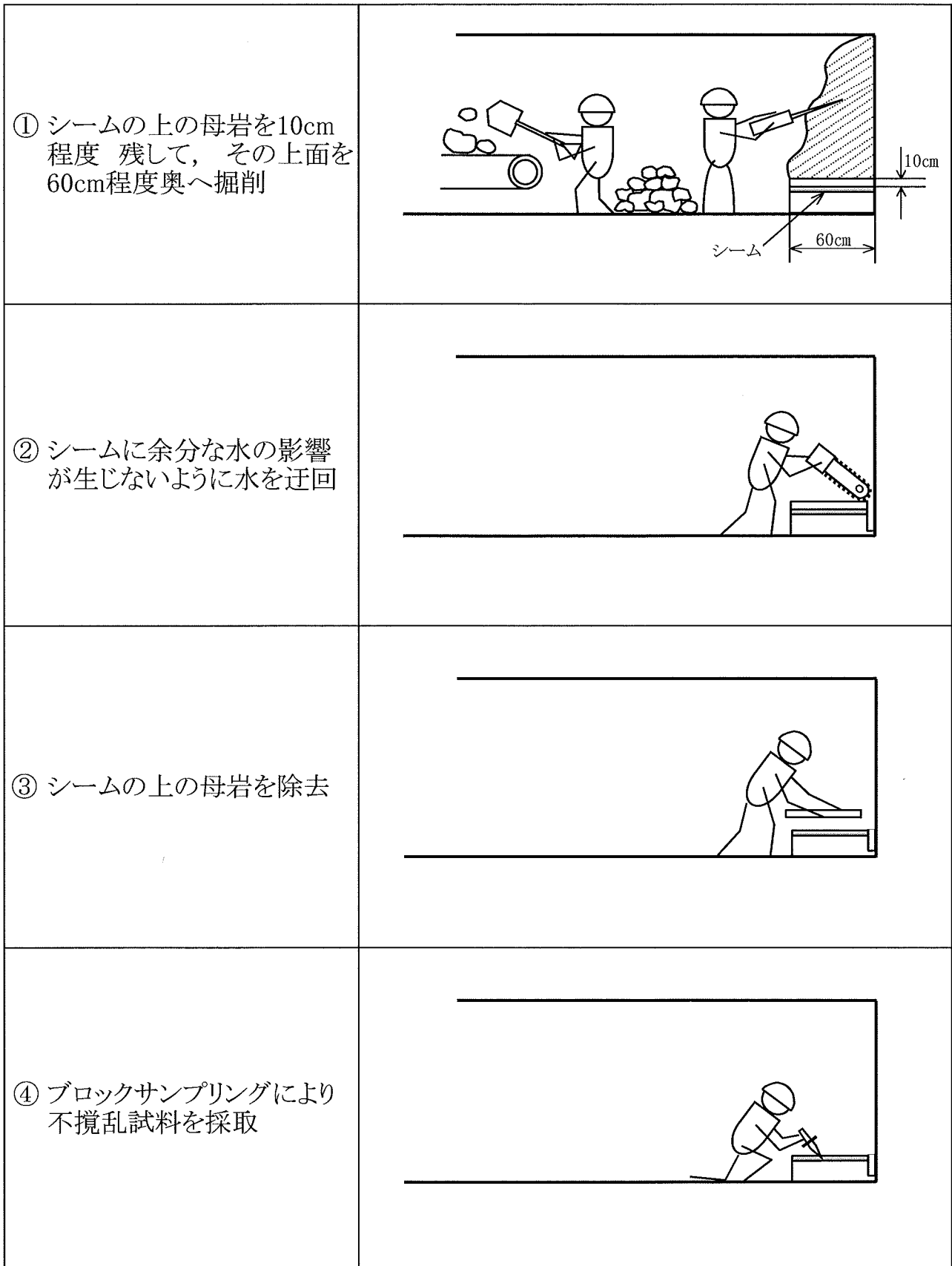


図-1.5 試料採取手順

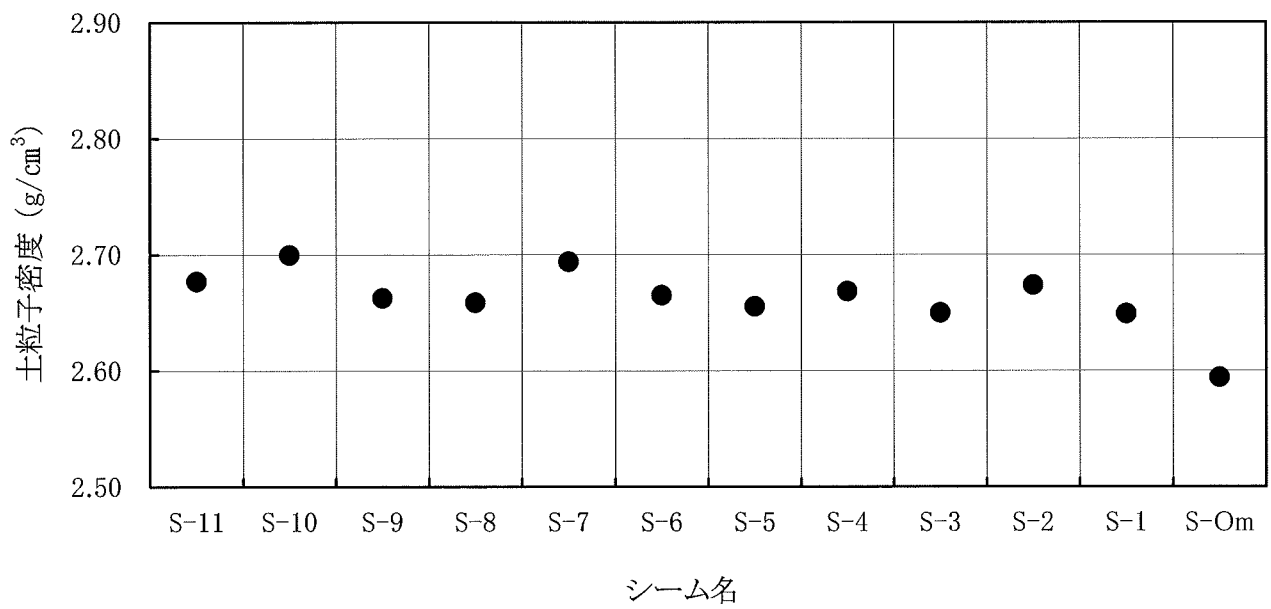


図-1.6 土粒子密度試験結果

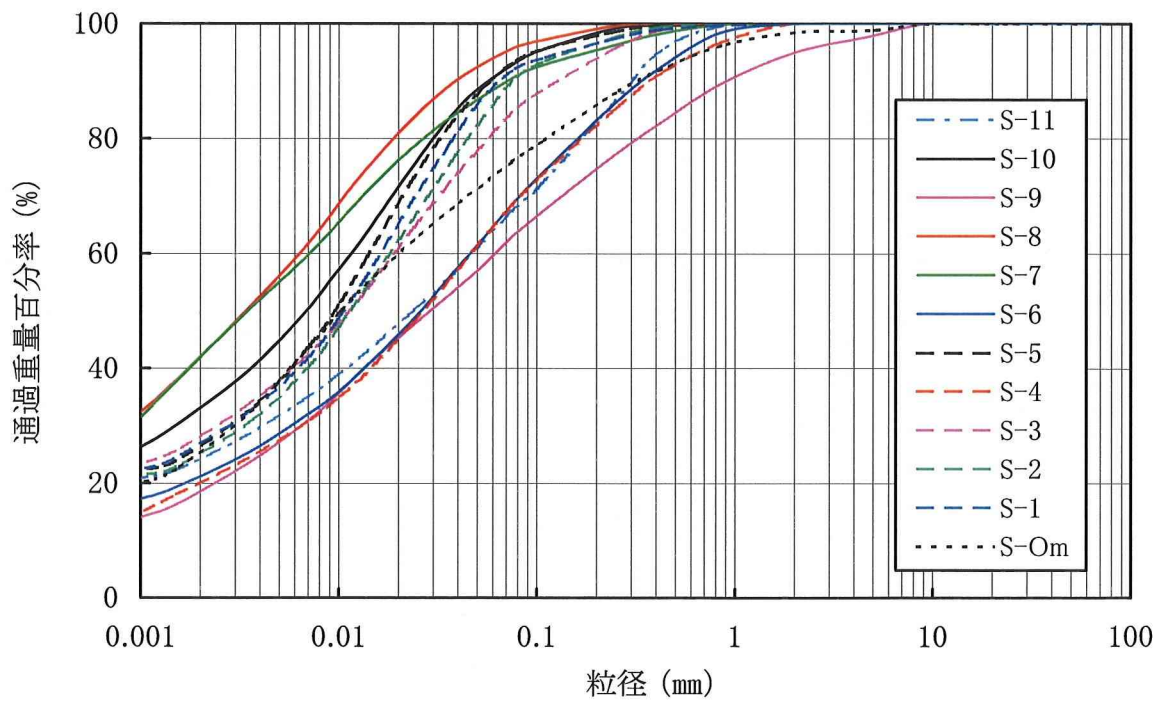
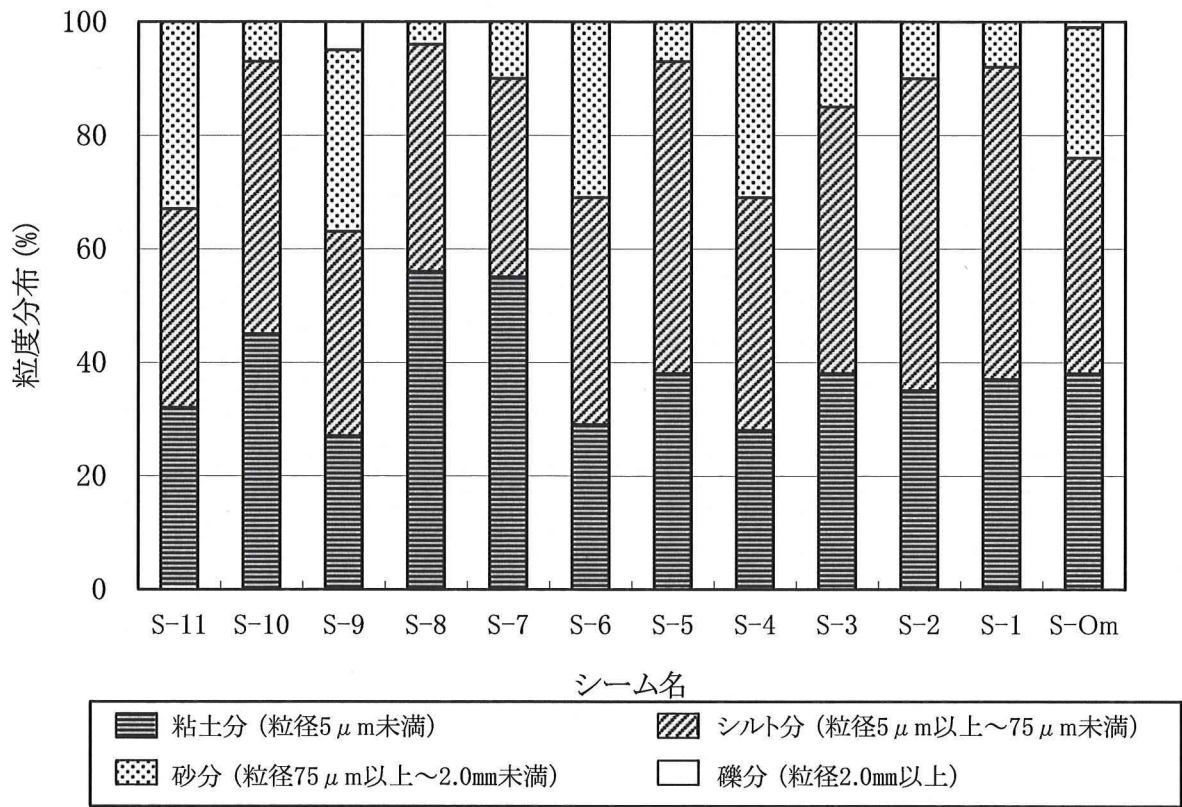


図-1.7 粒度試験結果

表-1.2 X線分析結果一覧表

鉱物名 シーム名	石英	斜長石	スメクタイト	イライト	緑泥石	黄鉄鉱	沸石	鱗珪石
S-11 (ホーリング)	○	○	○					
S-10 (補足調査坑)	○	○	○	○				
S-9 (ホーリング)	○	○	○	+				
S-8 (補足調査坑)	○	○	○	○				
S-8 (ホーリング)	○	○	○	○				
S-7 (補足調査坑)	○	○	○	+	+			
S-7 (ホーリング)	○	○	○	○				
S-6 (ホーリング)	○	○	○					
S-5 (ホーリング)	○	○	○	+				
S-4 (ホーリング)	○	○	○	+				
S-3 (ホーリング)	○	○	○	+				
S-2 (ホーリング)	○	○	○	+		○		
S-1 (ホーリング)	○	○	○	+	○	○		
S-0m (ホーリング)	○	○	○	+	+	○	+	+

○存在  
+微量

## 2. シームの応力履歴を考慮した検討について

- 1) シーム S-10 は、R/B の建設に伴う掘削・除荷、及びその後の建屋構築により再載荷される。簡単に試験実施が可能であれば、シームの応力履歴を考慮した検討を行うこと。

原子炉建屋直下の S-10 シームの応力は原子炉建屋構築の過程において、地山状態（初期）から基礎の掘削（除荷）、建屋の構築・埋戻し（再載荷）により変化する。

シームの解析用強度特性は、補足調査坑内からブロックサンプリングし、地山状態に比べて応力が完全に解放された状態の試料を用いた試験から求めており、応力履歴の影響を既に受けていると考えられる。

ここでは、上記の応力履歴を一度受けた試料を用いて建屋構築の過程における応力履歴を再現した試験法がシームの強度特性に与える相対的な影響を調べる目的で、S-10 シームを対象とし、除荷・再載荷を精密に再現できる三軸圧縮試験（CU条件）を実施している。

試験は、直接、原子炉建屋構築後を模擬した圧密圧力の三軸圧縮試験と応力履歴を考慮した三軸圧縮試験を行い、試験結果を比較・検討するとしている。

応力履歴を考慮した三軸圧縮試験は、建屋構築の過程を模擬するため、図-2.1 に示すように段階的に圧密・除荷・再載荷を行った後、非排水条件でせん断を行っている。また、応力履歴を考慮した三軸圧縮試験と比較するため、建屋構築後を模擬した  $0.6\text{N}/\text{mm}^2$  で圧密し、非排水条件でせん断を行う三軸圧縮試験を実施している。

なお、試験に用いたブロック試料は、平成 14 年 4 月に図-2.2 に示す位置で採取してから 2 年以上経過したものであるが、真空パックで保存しているため、採取時に比べて含水比はほとんど変化していないと考えられる。三軸圧縮試験用供試体の残試料を用いて、土粒

子の密度試験及び含水比試験を行った結果、飽和度はほぼ 100%の値が得られている。

試験条件は以下のとおりである。なお、圧密時間は 3 t 法により判断している。

#### ①三軸圧縮試験

- ・JGS 0522-2000「土の圧密非排水（CU）三軸圧縮試験方法」に準拠して行う。
- ・供試体寸法：直径 20mm，高さ 40mm
- ・試験数量：4 供試体
- ・排水条件：圧密非排水
- ・圧密圧力：0.6N/mm<sup>2</sup>（圧密時間 1 h）

#### ②応力履歴を考慮した三軸圧縮試験

- ・JGS 0522-2000「土の圧密非排水（CU）三軸圧縮試験方法」に準拠して行う。
- ・供試体寸法：直径 20mm，高さ 40mm
- ・試験数量：4 供試体
- ・排水条件：圧密非排水
- ・初期圧密過程の圧密圧力：0.3N/mm<sup>2</sup>（圧密時間 1 h）
- ・除荷過程の圧密圧力：0.1N/mm<sup>2</sup>（圧密時間 18.5～22.4 h）
- ・再圧密過程の圧密圧力：0.6N/mm<sup>2</sup>（圧密時間 169 h）

試験結果の比較を図-2.3 に示す。応力履歴を考慮した三軸圧縮試験の強度は、通常の状態による三軸圧縮試験の強度に比べて平均で0.7倍程度になっている。これは、除荷過程において吸水・膨張した影響によるものと推定されるが、応力履歴による影響を受けるシームの範囲は、建屋直下の限られた範囲であるとしている。

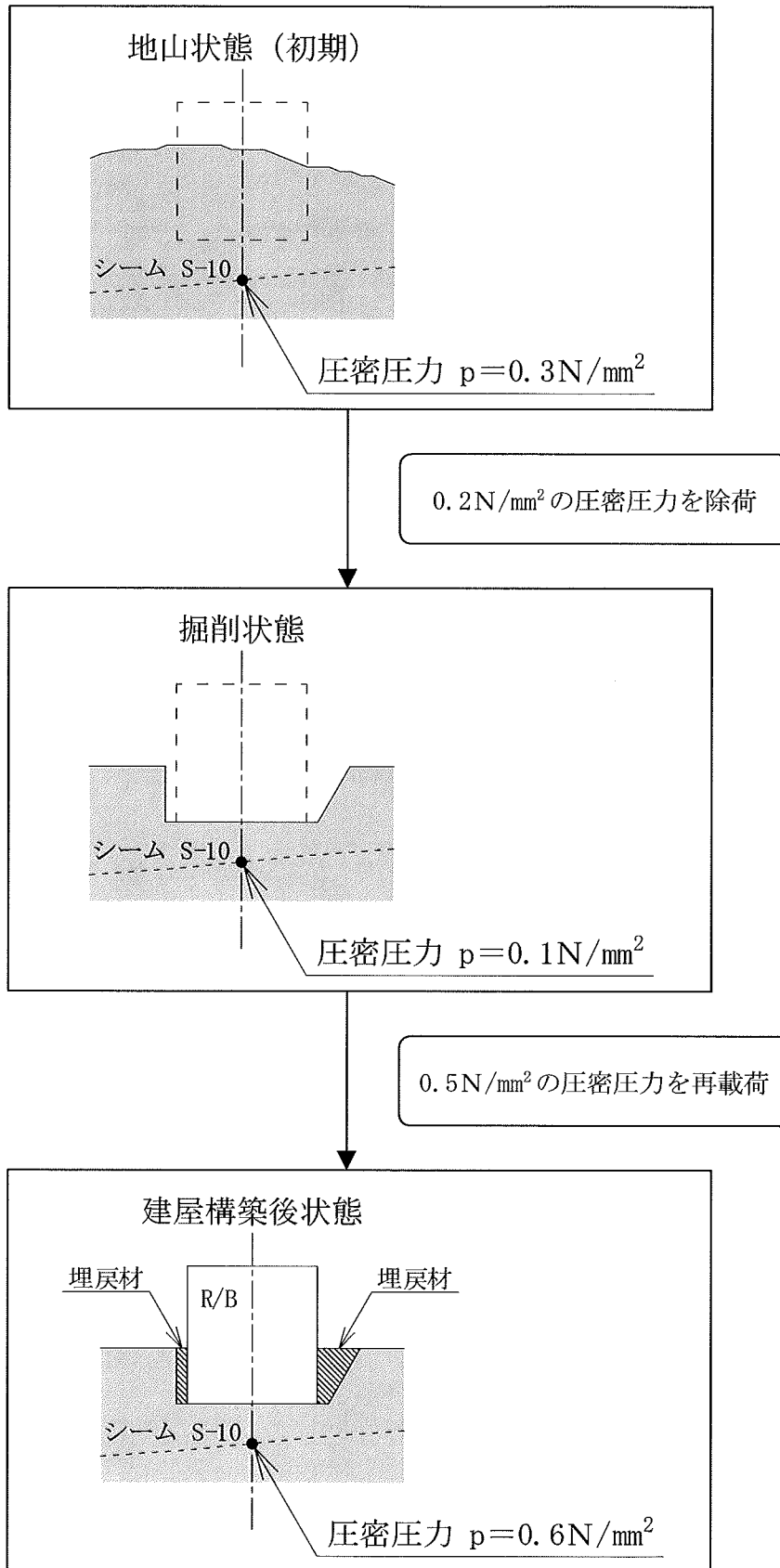


図-2.1 応力履歴を考慮した三軸圧縮試験における圧密過程

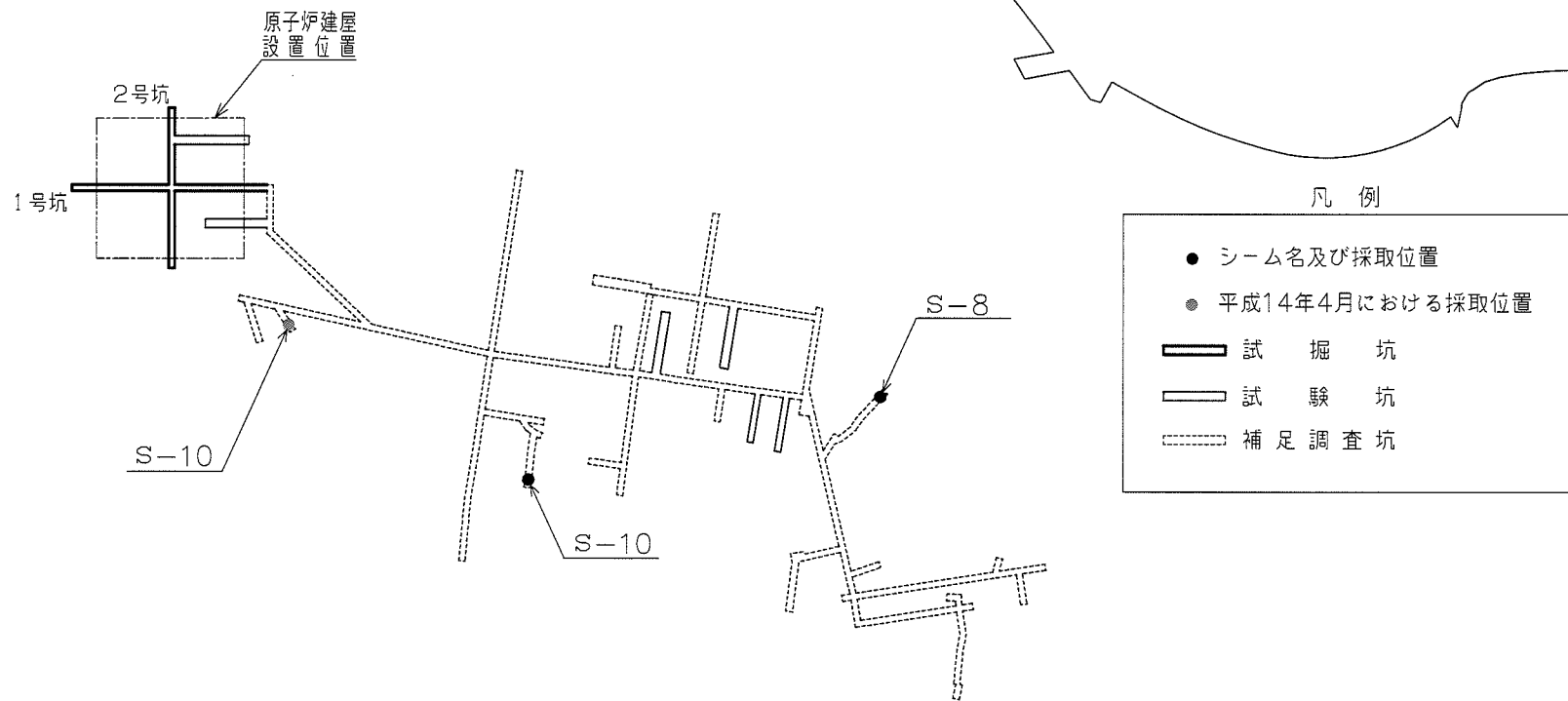


図-2.2 試料採取位置図

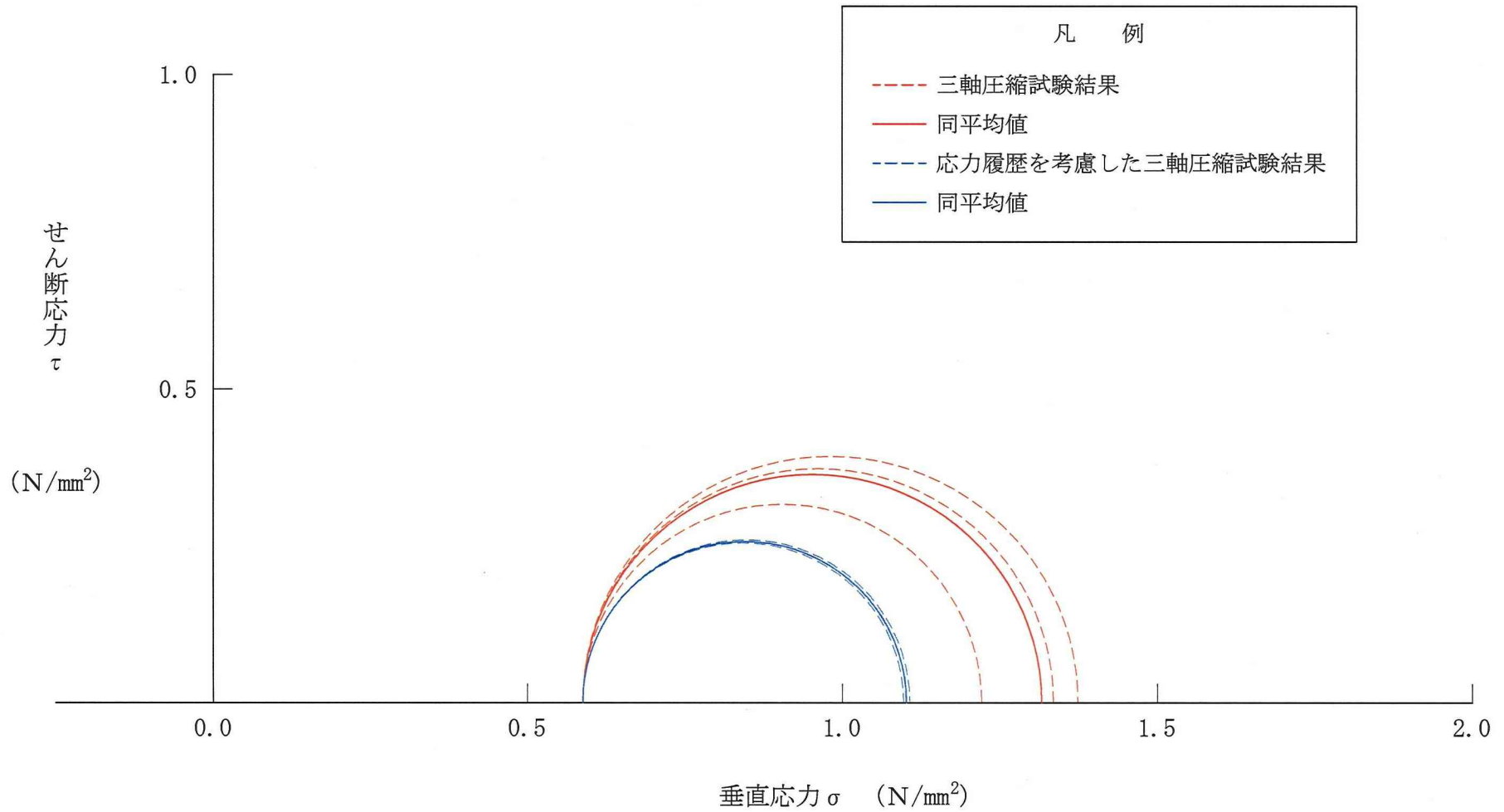


図-2.3 S-10シームの三軸圧縮試験結果

3. 安山岩溶岩(塊状)の規則性節理部と不規則性節理部の岩盤せん断強度の一括評価について

- 1) 安山岩溶岩(塊状)を規則性節理部と不規則性節理部とに区分しているが、岩盤せん断試験結果によると、これらの強度を一括して評価して良いのではないか。

岩盤区分では、安山岩溶岩（塊状）を堅硬で節理の方向及び間隔に規則性が認められる安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）と、規則性が認められない安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）とに地質的な性状から細区分している。

このように安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）と安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）とを区分する場合と、区分しない場合の岩盤せん断試験（ブロックせん断試験）結果を比較・検討する。

図-3.1 に示すように、ブロックせん断試験の破壊時のせん断応力と垂直応力の関係は、以下のとおりである。

安山岩溶岩（塊状）

$$\tau = 1.12 + \sigma \tan 46^\circ \quad (\text{N/mm}^2)$$

安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）

$$\tau = 1.53 + \sigma \tan 29^\circ \quad (\text{N/mm}^2)$$

安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）

$$\tau = 1.32 + \sigma \tan 45^\circ \quad (\text{N/mm}^2)$$

上記の関係によると、安山岩溶岩（塊状）の強度定数は、安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）とあまり変わらない値となっている。

しかしながら、支持力試験については、表-3.1 に示すように上限降伏値の平均値が安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）で  $10.4 \text{ N/mm}^2$  以上、安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）で  $13.7 \text{ N/mm}^2$  以上と両者に差が認められる。

また、安山岩溶岩（塊状）を2つに区分した場合の岩石試験の結果を表-3.2に示す。同表によれば、一般的に岩盤区分の指標として使われている一軸圧縮強度の平均値は、安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）で  $20.40 \text{ N/mm}^2$ 、安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）で  $44.33 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度の平均値は、安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）で  $3.27 \text{ N/mm}^2$ 、安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）で  $5.49 \text{ N/mm}^2$  であり差が大きい。

以上のことから、安山岩溶岩（塊状）は地質的な性状、力学的な特性から判断して、岩盤区分として細分する必要がある、地盤安定性評価のための物性として区分して評価することは適切であるとしている。

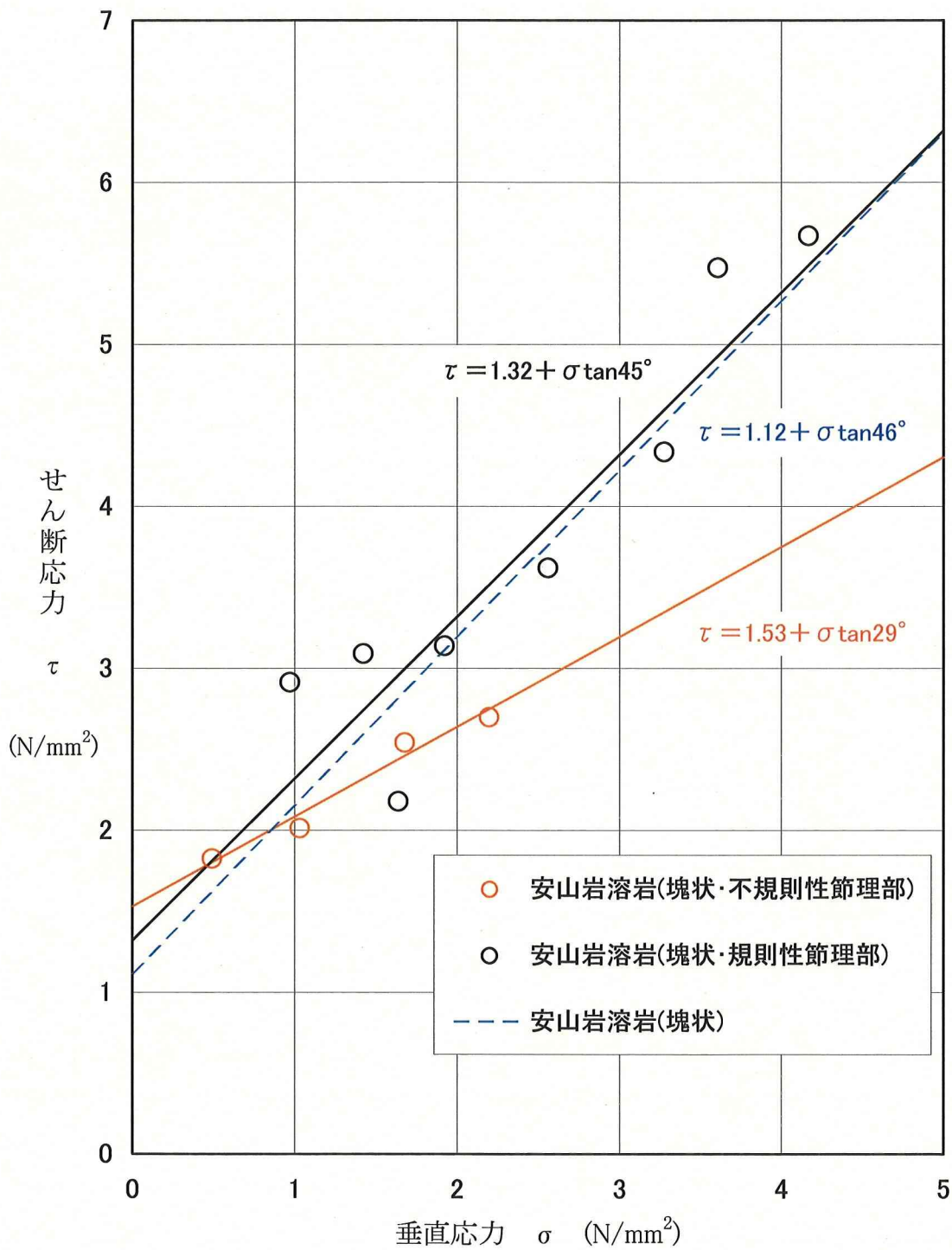


図-3.1 ブロックせん断試験結果

表-3.1 支持力試験結果

岩盤区分	試験箇所	試験位置	上限降伏値 (N/mm <sup>2</sup> )	極限支持力 (N/mm <sup>2</sup> )
安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部) mlv(I)	A坑	S-1	7.3	13.7以上
		S-2	13.7以上	13.7以上
		S-3	10.3	13.7以上
		S-4	10.4	13.7以上
		平均	10.4以上	13.7以上
安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部) mlv(R)	C坑	S-5	13.7以上	13.7以上
		S-6	13.7以上	13.7以上
		S-7	13.7以上	13.7以上
		平均	13.7以上	13.7以上
安山岩溶岩 (角礫状) blv	D坑	S-8	6.7	13.7以上
		S-9	9.3	13.7以上
		S-10	9.2	13.7以上
		平均	8.4	13.7以上

表-3.2 岩石試験結果

岩盤区分		一軸圧縮強度			静弾性係数			静ポアソン比			引張強度		
		試験 個数	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差 (N/mm <sup>2</sup> )	試験 個数	平均値 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	試験 個数	平均値	標準偏差	試験 個数	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差 (N/mm <sup>2</sup> )
火山 砕屑 岩	細粒凝灰岩	15	2.03	0.40	15	0.52	0.15	15	0.44	0.03	10	0.18	0.04
	粗粒凝灰岩	15	8.82	0.79	15	2.22	0.25	15	0.46	0.01	10	1.51	0.31
	淡灰色火山礫凝灰岩	15	3.02	0.55	15	1.02	0.28	15	0.45	0.02	10	0.21	0.05
	暗灰色火山礫凝灰岩	15	6.95	1.56	15	2.08	0.44	15	0.46	0.02	10	0.58	0.11
	凝灰角礫岩	15	2.70	0.23	15	0.67	0.19	15	0.48	0.01	10	0.15	0.04
	酸性凝灰岩	15	6.17	1.44	15	1.26	0.32	15	0.45	0.02	10	0.79	0.19
	軽石凝灰岩	15	3.40	0.49	15	0.76	0.28	15	0.47	0.03	10	0.33	0.06
	火山砕屑岩 (クリンカー質部)	10	1.89	0.43	10	0.17	0.15	10	0.49	0.01	10	0.01	0.01
堆積 岩	シルト岩	15	5.32	1.70	15	0.59	0.20	15	0.43	0.06	10	0.87	0.22
	シルト岩 (硬質部)	15	8.88	0.69	15	0.91	0.16	15	0.46	0.02	10	1.35	0.38
溶岩・貫入 岩	安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	15	44.33	11.38	15	7.98	1.15	15	0.24	0.03	10	5.49	0.99
	安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	15	20.40	5.30	15	5.68	1.17	15	0.30	0.02	10	3.27	0.86
	安山岩溶岩 (角礫状)	15	5.26	1.26	15	1.69	0.54	15	0.48	0.01	10	0.38	0.10
	デイサイト	15	78.36	12.36	15	13.24	1.37	15	0.27	0.02	10	6.20	1.01
	玄武岩 (角礫状)	15	4.78	1.78	15	1.77	0.67	15	0.32	0.03	10	0.91	0.18

4. 水平方向と鉛直方向の初期地圧測定結果がほぼ同じとなる理由について

- 1) 初期地圧測定結果において、水平方向と鉛直方向がほぼ同じ値となっている理由について説明すること。

原子炉建屋基礎地盤は、軟岩である易国間層の火山碎屑岩、安山岩溶岩（角礫状）及び大間層のシルト岩、火山碎屑岩等、並びに硬岩である易国間層の安山岩溶岩（塊状）で主に構成されている。

初期地圧の測定（応力解放法）は軟岩である安山岩溶岩（角礫状）に掘削された補足調査坑で実施されており、その結果は図-4.1 に示すとおり、水平面内の最大主応力  $\sigma_1$  は  $0.63\text{N/mm}^2$ 、最小主応力  $\sigma_2$  が  $0.48\text{N/mm}^2$  であり、鉛直直交 2 断面の最大主応力  $\sigma_1$  は  $0.55\sim 0.59\text{N/mm}^2$ 、最小主応力  $\sigma_2$  は  $0.51\sim 0.54\text{N/mm}^2$  となっている。また、初期地圧測定位置における土被り深さは約 30m であり、上載岩盤の密度より算定した土被り深さ相当応力  $\sigma_v$  は  $0.53\text{N/mm}^2$  としている。

これらの結果から、水平面内の主応力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  と、土被り深さ相当応力  $\sigma_v$  との比は、最大主応力で  $\sigma_1/\sigma_v = 0.63/0.53 = 1.19$ 、最小主応力で  $\sigma_2/\sigma_v = 0.48/0.53 = 0.91$  となる。したがって、原子炉建屋基礎地盤における岩盤の初期地圧は、等方的な状態であり、ほぼ土被り深さに相当する応力が発生しているものと考えられるとしている。

一方、全国各地で実施されてきた初期地圧測定結果を整理し、我が国の岩盤内の初期応力状態の一般的な傾向を取り纏めた論文としては、KANAGAWA et al (1986)<sup>(1)</sup>、斎藤・他 (1988)<sup>(2)</sup>、YOKOYAMA et al (2003)<sup>(3)</sup> がある。また、櫻井彰雄編著「エネルギー技術者のための地盤・耐震学 (1999)」<sup>(4)</sup> には、岩盤の種類による傾向を把握するため、結晶質岩、堆積岩及び軟質な泥岩・砂岩による初期地圧の傾向について整理がなされている。

KANAGAWA et al (1986) は、各機関によって求められた岩種や土被り深さの異なる 23 地点の初期地圧を整理している。このうち、大間地点と土被り深さや密度等が比較的類似している Site No. 17 (泥岩)の初期地圧は、表-4.1 に示すように水平面内の最大主応力が  $0.49 \text{ N/mm}^2$ 、最小主応力が  $0.45 \text{ N/mm}^2$ 、鉛直方向応力が  $0.55 \text{ N/mm}^2$  であり、大間地点とほぼ同程度の値を示している。また、水平面内の最大主応力と鉛直方向応力との比 (水平応力/鉛直応力) は、土被り深さの大きい花崗岩など一部の地点を除き、概ね 1 前後となっている。また、斎藤・他 (1988) においても、図-4.2 に示すように深度が 500m 以浅では、水平方向応力と鉛直方向応力との比は、多くの場合 1 前後を示すことを明らかにしている。

これらの論文や文献によると、岩盤内に生じる初期応力のうち鉛直方向応力は、ほぼ岩盤の土被り重量に相当することが示されている。また、櫻井彰雄編著「エネルギー技術者のための地盤・耐震学 (1999)」では、軟質な岩盤の水平応力は、図-4.3 に示すように最大主応力と最小主応力との差が小さく、かつ水平方向応力と鉛直方向応力との比も 1 前後であり、等方的な応力状態にあることが指摘されている。さらに、その理由として、軟岩の挙動は岩盤の亀裂の影響が少ないことと、構成する岩盤のポアソン比が大きいこと等を挙げている。

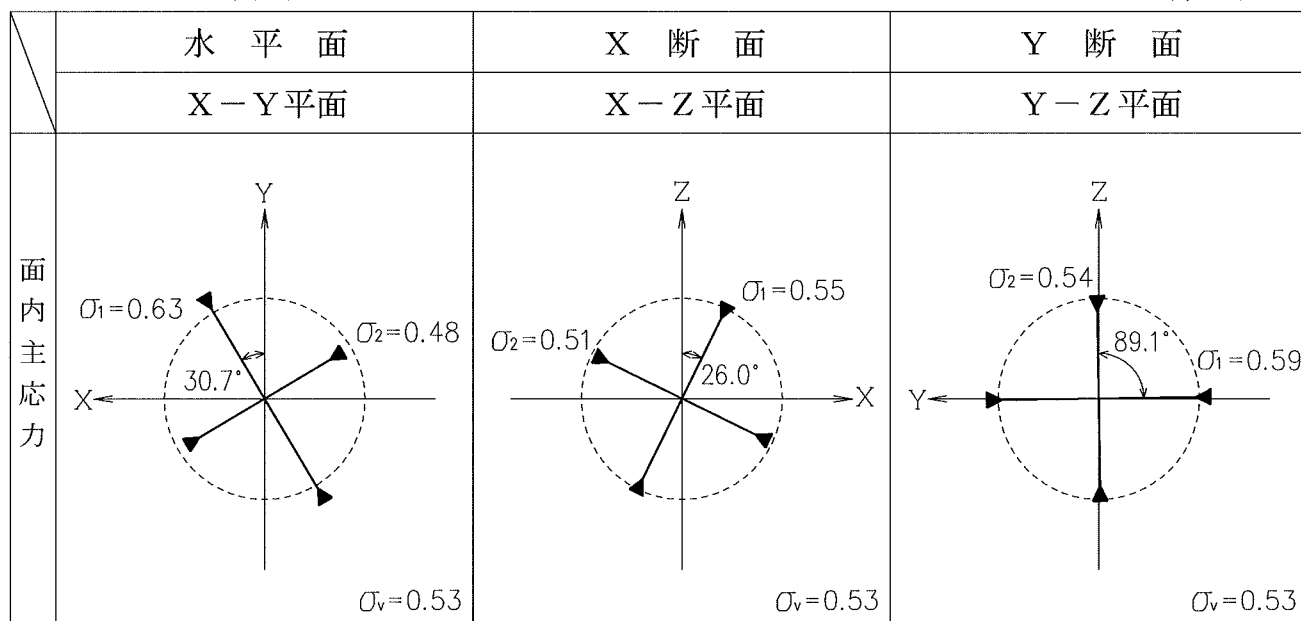
以上の文献調査より、補足調査坑内で実施した初期地圧測定において、水平方向主応力と鉛直方向主応力が等方的であり、ほぼ土被り深さに相当する応力状態となった測定結果は、妥当であるとしている。

## 参考文献

- (1) T. KANAGAWA, S. HIBINO, T. ISHIDA, M. HAYASHI, Y. KITAHARA (1986),  
In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands :  
Over-coring Results from a Multi-element Gauge Used at 23  
Sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23,  
No. 1
- (2) 斎藤敏明, 石田毅, 寺田孚, 田中豊 (1988), 実測結果に基づく  
わが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討, 土木学会論文集,  
第 394 号
- (3) T. YOKOYAMA, K. OGAWA, T. KANAGAWA, M. TANAKA, T. ISHIDA (2003),  
Regional in-situ stress states in Japan based on  
measurements, Rock Stress
- (4) 櫻井彰雄 編著 (1999), エネルギー技術者のための地盤・耐震  
学, 丸善株式会社, (付属 CD-ROM に収録されている PDF ファイ  
ル, 「8. 初期応力測定」のうち「8.2.5 測定データに基づく我  
が国の初期応力状態」, p7~p8 および図 8.2.9~図 8.2.13)

水平面内及び鉛直直交2断面内の主応力

単位  $N/mm^2$



※図中の破線は土被り深さ相当応力を示す

$\sigma_v$  : 土被り深さ相当応力  
 $\sigma_1$  : 面内最大主応力  
 $\sigma_2$  : 面内最小主応力

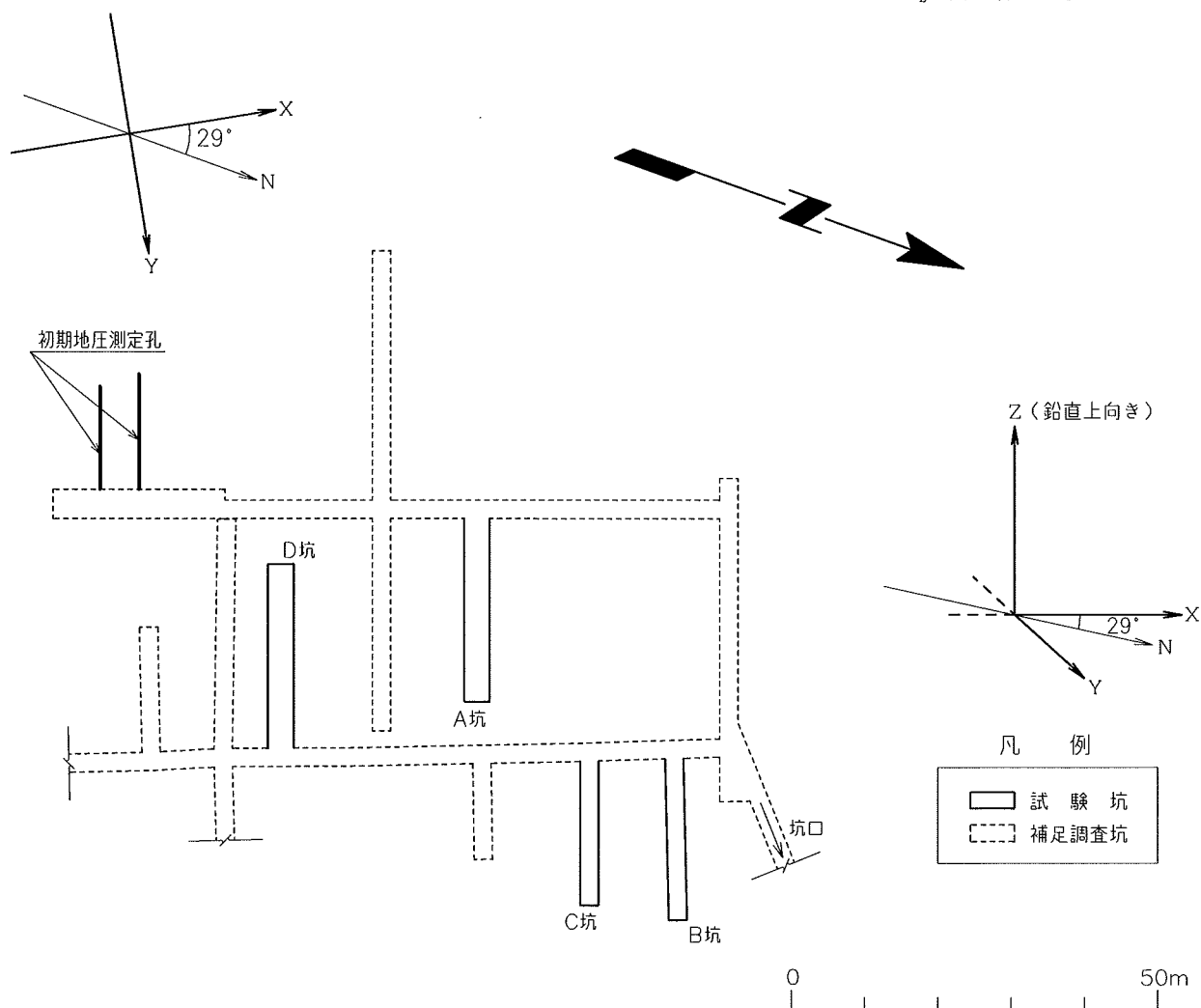


図-4.1 初期地圧測定位置及び結果図 (安山岩溶岩(角礫状))

表-4.1 オーバーコアリング法を用いた日本における初期地圧測定結果 (KANAGAWA et al (1986)<sup>(1)</sup>の一部引用)

Table 1. Results of *in situ* stress measurements in Japan using the over-coring method

Site no.	Kind of rock	Density (t/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Elevation (m)	Depth (m)	Principal stress						Horizontal stress		Direction of $\sigma_{Hmax}$	Vertical stress component	
						$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		$\sigma_{Hmax}^a$ (MPa)	$\sigma_{Hmin}^a$ (MPa)		$\sigma_v^a$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Hmax}}{\sigma_v}$
						Magnitude <sup>a</sup> (MPa)	Orientation <sup>b</sup> (degree)	Magnitude <sup>a</sup> (MPa)	Orientation <sup>b</sup> (degree)	Magnitude <sup>a</sup> (MPa)	Orientation <sup>b</sup> (degree)					
1	Granite	2.5	18	1054	250	-10.8	260/10	-6.4	145/70	0	355/20	-10.6	-0.6	N82°E	-6.0	1.77
2	Shale	2.6	8	386	214	—	—	—	—	—	—	-9.0	-4.6	N66°E	-7.3	1.24
3	Granite	2.5	20	320	280	-9.6	269/64	-7.5	73/25	-4.9	166/6	-7.9	-4.9	N77°E	-9.2	0.86
4	Black schist	2.6	10	580	270	-11.1	164/38	-5.4	38/37	-3.7	282/30	-8.7	-4.4	N9°W	-7.2	1.22
5	Granite	2.5	24	185	370	-23.4	165/29	-13.2	56/29	-7.2	282/46	-20.2	-11.1	N57°W	-12.5	1.61
6	Mudstone	1.7	0.8	-40	70	-1.24	2/46	-1.08	115/20	-1.07	221/37	-1.16	-1.09	N1°E	-1.17	0.99
7	Green schist	2.5	5	5	30	-0.89	117/41	-0.66	349/35	-0.46	235/29	-0.77	-0.53	N48°W	-0.71	1.10
8	Rhyolite	2.5	12	260	165	-4.2	297/65	-3.3	194/63	-2.5	64/38	-4.0	-3.0	N53°W	-2.9	1.37
9	Granite	2.5	30	130	510	-15.8	232/13	-11.1	16/74	-6.3	140/9	-15.5	-6.4	N51°E	-11.2	1.39
10	Schalstein	2.5	7	140	210	-6.2	223/8	-4.8	128/34	-4.7	324/55	-6.2	-4.8	N44°E	-4.8	1.29
11	Siliceous sandstone	2.5	26	540	420	-15.7	263/25	-10.6	21/45	-7.8	155/34	-14.7	-8.8	N78°E	-10.6	1.39
12	Breccia	2.5	27	540	395	-12.1	313/25	-8.5	109/63	-7.6	218/10	-11.4	-7.6	N48°W	-9.1	1.24
13	Conglomerate	2.5	14	601	270	-8.2	196/10	-5.5	310/66	-4.9	102/22	-8.1	-5.0	N16°E	-5.5	1.48
14	Conglomerate	2.5	2.6	-16	22	-1.06	242/28	-0.72	151/3	-0.41	55/62	-0.92	-0.71	N65°E	-0.55	1.68
15	Quartz diorite	2.5	—	550	15	—	—	—	—	—	—	-7.4	-2.6	N9°E	-2.8	2.62
16	Rhyolite	2.6	16	460	335	-9.0	280/6	-6.2	15/37	-4.6	183/52	-8.9	-5.6	N81°W	-5.2	1.72
17	Mudstone	2.0	1.2	-20	30	—	—	—	—	—	—	-0.49	-0.45	N35°W	-0.55	0.89
18	Granite	2.5	12	-47	71	-5.5	85/7	-4.6	352/27	-4.1	189/62	-5.5	-4.5	N87°E	-4.2	1.30
19	Rhyolite	2.6	10	663	192	-5.1	168/71	-4.3	347/20	-1.7	77/0	-4.4	-1.7	N13°W	-5.0	0.88
20	Tuff breccia	2.6	7	664	241	-5.0	217/54	-3.7	31/36	-2.9	124/2	-4.1	-2.9	N35°E	-4.6	0.89
21	Porphyrite	2.5	20	358	285	-10.4	253/31	-7.0	163/1	-4.1	71/59	-8.7	-7.0	N74°E	-5.8	1.51
22	Porphyrite	2.5	20	358	285	-8.9	260/44	-5.9	164/7	-3.0	67/45	-6.4	-5.6	N69°W	-6.0	1.07
23	Slate	2.5	11	674	316	-12.1	20/5	-7.9	286/46	-5.5	116/44	-12.1	-6.7	N22°E	-6.9	1.76

<sup>a</sup>Negative sign indicates compression.

<sup>b</sup>Stereographic representation (south = 0°) of principal stress plane (trend plunge).

※応力の表示は圧縮を負としている。

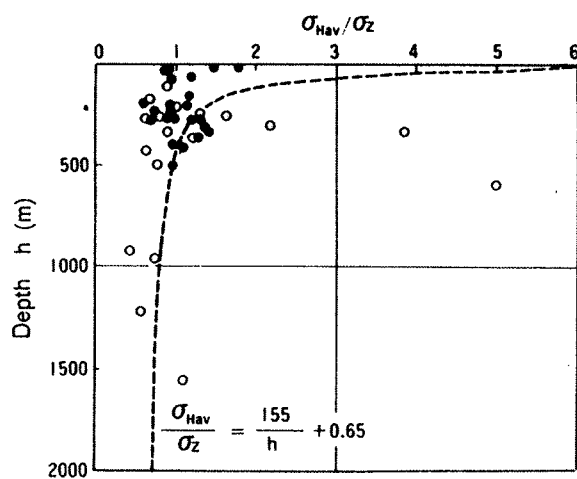
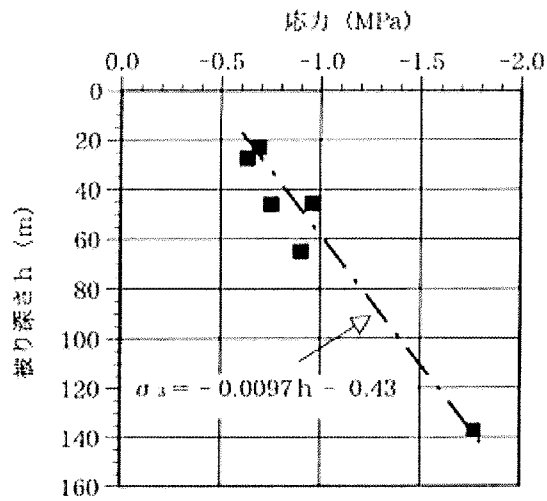


Fig.4 Relation between the ratios of average horizontal stresses to vertical normal stresses and depths.

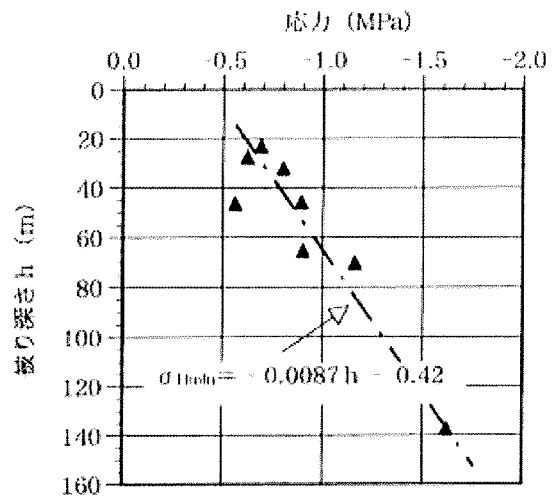
図-4.2  $\sigma_{Hav}/\sigma_z$ と測定深度の関係 (斎藤・他(1988)<sup>(2)</sup>の一部引用)

$\sigma_{Hav}$  : 初期地圧の水平方向成分の平均値

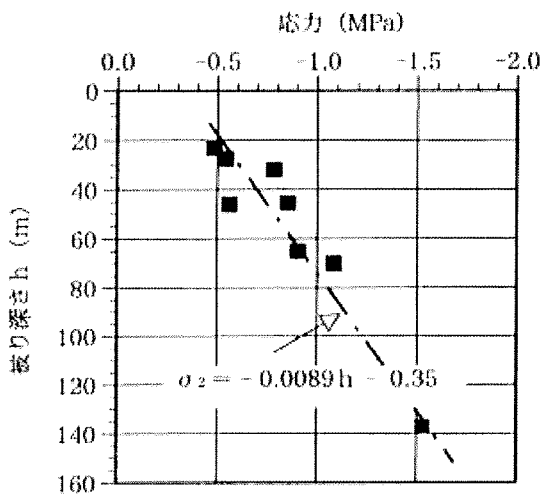
$\sigma_z$  : 初期地圧の鉛直方向成分



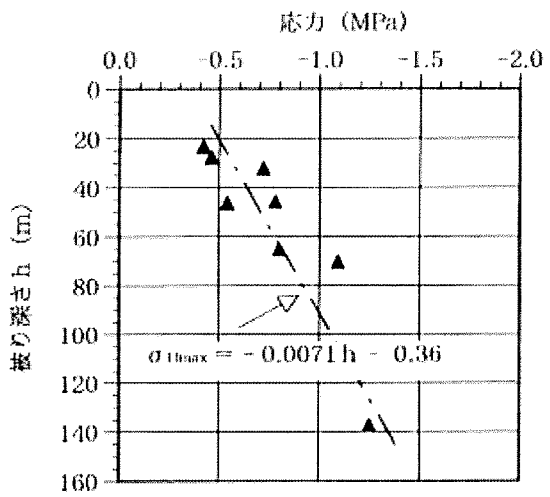
(1) 最大圧縮主応力  $\sigma_3$



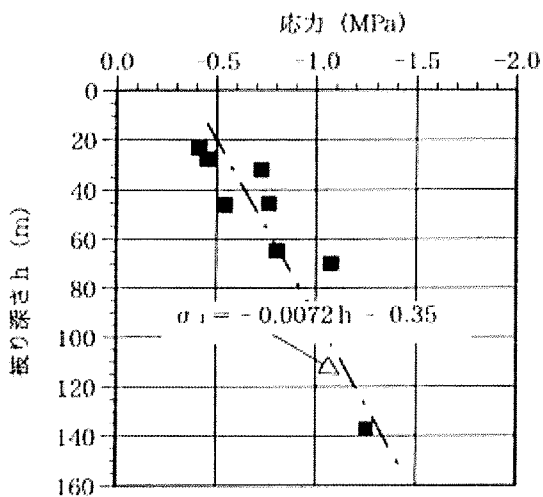
(4) 水平最大圧縮応力  $\sigma_{1(\theta)}$



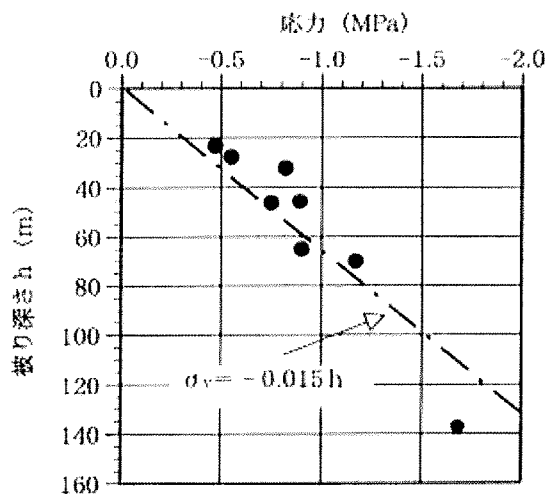
(2) 中間圧縮主応力  $\sigma_2$



(5) 水平最小圧縮応力  $\sigma_{1(\theta)}$



(3) 最小圧縮主応力  $\sigma_1$



(6) 鉛直応力  $\sigma_v$

図 8.2.13 軟質な泥岩・砂岩等における各応力成分とかぶり深さの関係

図-4.3 軟質な泥岩・砂岩等における各応力成分とかぶり深さの関係  
(櫻井彰雄編著(1999)<sup>(4)</sup>の一部引用)

5. P S 検層及び超音波試験による  $V_p$ ,  $V_s$  と動的物性値の設定について

- 1) ボーリング孔内の P S 検層, 及びボーリングコア供試体を用いた超音波試験による, それぞれの  $V_p$ ,  $V_s$  を比較すると共に, 動的解析に用いる物性値の考え方を説明すること。

## 5.1 岩石の超音波伝播速度測定結果とP S検層の対比

申請者は、原子炉建屋設置位置付近における炉心の5本を含む合計22本のボーリング孔で実施したP S検層の結果より、速度層区分について以下のとおり検討している。

P S検層の速度層区分と各岩盤区分の弾性波速度との関係を検討するため、炉心ボーリングのP S検層結果と、図-5.1に示す位置の試料採取用ボーリングのコアから採取した岩石の超音波伝播速度測定結果との比較を図-5.2に示す。

図-5.2より、軟岩の岩石試験の値は、P S検層の結果とほぼ一致している。これは大間地点の軟岩は亀裂が少ないためであるとしている。越智・他(1993)<sup>(1)</sup>、船戸・他(1987)<sup>(2)</sup>によれば、軟岩においてP S検層結果と岩石の超音波伝播速度測定結果とはほぼ一致するという結果が得られている。

また、軟岩の中に薄い層として挟まれている硬岩の安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）については、同図より、岩石試験の値はP S検層の値より大きく、両者は一致していない。これは、超音波伝播速度測定のコアが亀裂を含まない部分を選んでいることと、P S検層が硬岩中の岩盤に存在する亀裂の影響を受けるためであるとしている。このような関係は、硬岩における岩盤中の割れ目の発達程度を地山の弾性波速度と岩片の超音波速度から求めたキレツ係数で表示し、岩区分を行うために使われている。（土質工学会編「岩の工学的性質と設計・施工への応用」<sup>(3)</sup>）

## 5.2 動的解析に用いる物性値の考え方

動的解析に用いる物性値としては、動せん断弾性係数 $G_d$ 、動ポアソン比 $\nu_d$ 、減衰定数 $h$ がある。岩盤の動的変形特性( $G_d$ 、 $\nu_d$ )は、P S 検層の結果に基づく速度層断面図を作成し、各速度層毎に解析用物性値を算出することにより設定している。なお、減衰定数は、岩盤の慣用値として一般的に設定される値を用いている。

P S 検層による速度層断面図の速度層区分及び解析用物性値(動的変形特性)の具体的な設定方法は、以下のとおりである。

### (1) P S 検層による速度層断面図の速度層区分

岩盤分類図に22本のボーリング孔のP S 検層結果を合わせて表示したものを図-5.3に、速度層断面図を図-5.4に示す。図-5.3によれば、P S 検層の境界は、岩盤区分と良い対応を示すことから、赤線で示す①～⑤及び北①～北④の合計9つの速度層に区分している。速度層区分の決定方法を表-5.1に示す。

なお、各速度層の弾性波速度は、各速度層区分に含まれるボーリングの弾性波速度を分布長により重み付けした平均値により設定している。

### (2) 解析用物性値(動的変形特性)

解析用物性値(動的変形特性)については、動せん断弾性係数 $G_d$ を各岩盤区分の密度 $\gamma$ と各速度層のP S 検層結果を整理した弾性波速度 $V_s$ (図-5.4)から、岩盤区分毎に次式により求めている。なお、

動ポアソン比  $\nu_d$  は各速度層の弾性波速度  $V_p$ ,  $V_s$  (図-5.4) より, 次式により求めている。

$$\text{動せん断弾性係数} \quad G_d = \gamma \cdot V_s^2 \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\text{動ポアソン比} \quad \nu_d = \frac{(V_p^2/V_s^2) - 2}{2(V_p^2/V_s^2 - 1)}$$

ここに,  $\gamma$  : 密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

$V_p$  : P波速度 ( $\text{m/s}$ )

$V_s$  : S波速度 ( $\text{m/s}$ )

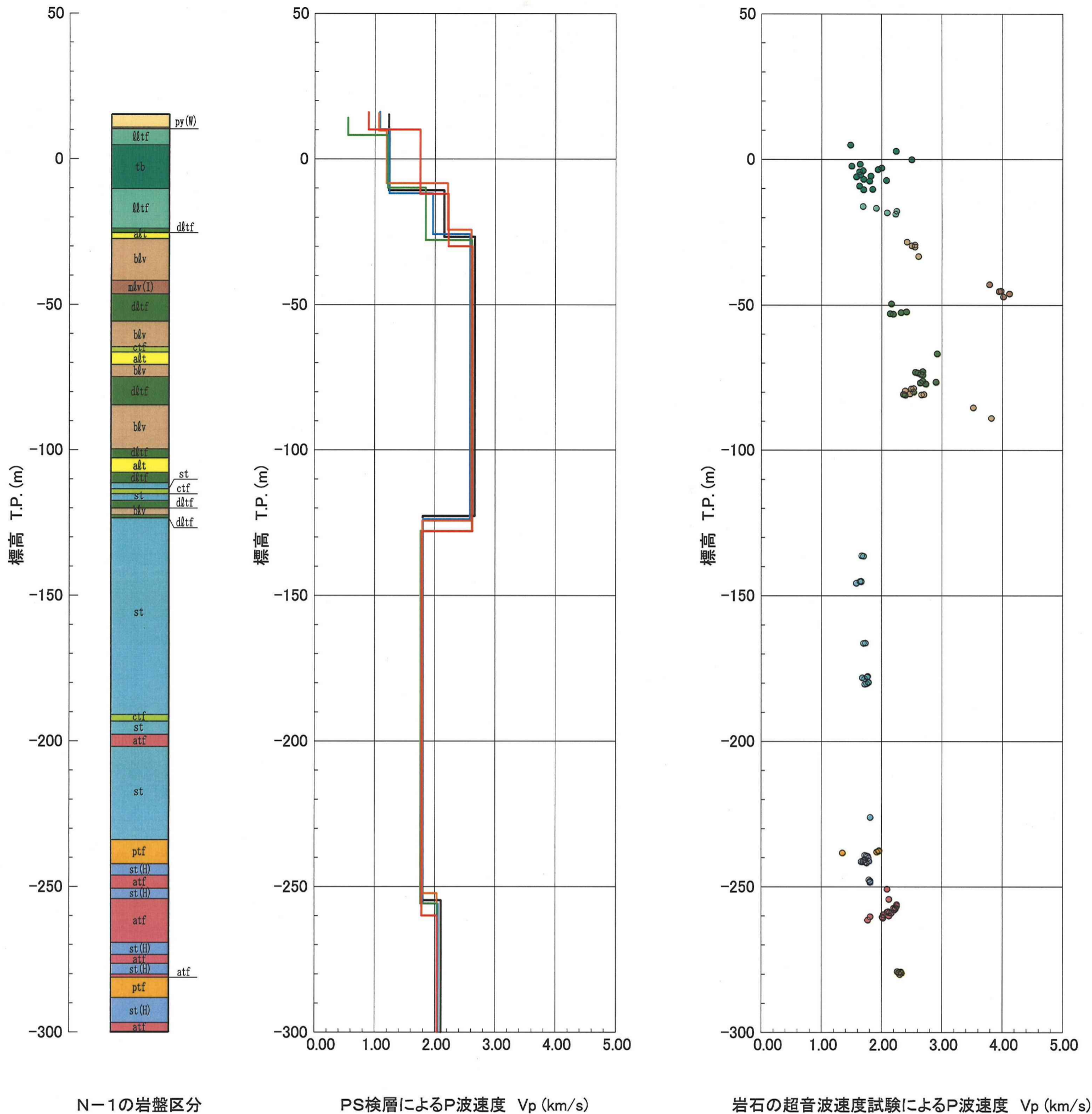
上記に基づいて設定した解析用物性値 (動的変形特性) を表-5.2 に示す。なお, 速度層①及び速度層北①の動せん断弾性係数  $G_d$  はひずみ依存性を考慮するため, 室内試験 (動的三軸試験) 結果から設定した値を用いている。

## 参考文献

- (1) 越智健三, 金有性, 龍岡文夫 (1993), ひずみ依存性と測定誤差を考慮した堆積軟岩の変形特性の検討, 土木学会論文集, 第 463 号
- (2) 船戸明雄, 莊司泰敬, 大橋武一郎 (1987), 拘束圧下での岩石の超音波速度測定, 第 7 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- (3) 土質工学会編 (1974), 岩の工学的性質と設計・施工への応用, 土質工学会



図-5.1 岩石の超音波伝播速度測定に用いた試料採取ボーリング坑位置図



N-1の岩盤区分

PS検層によるP波速度 Vp (km/s)

岩石の超音波速度試験によるP波速度 Vp (km/s)

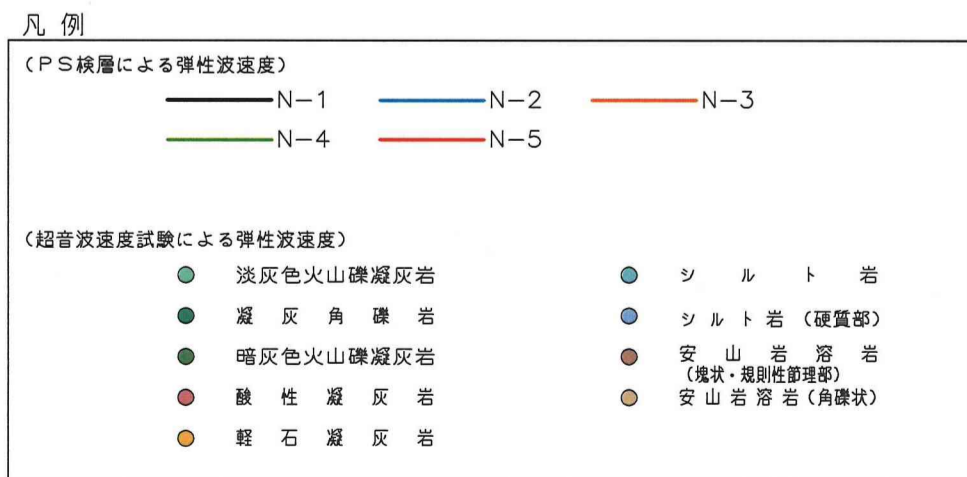
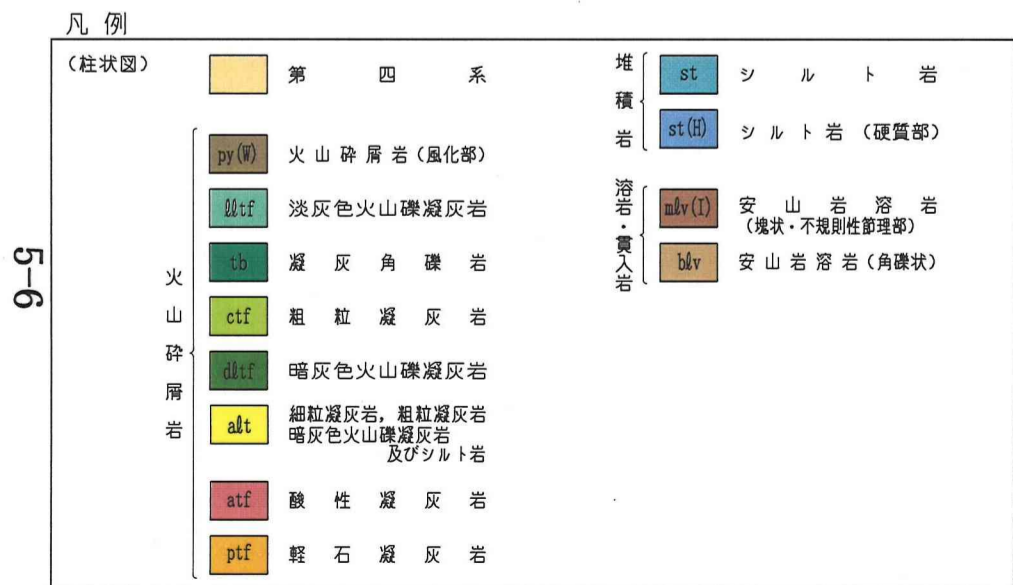
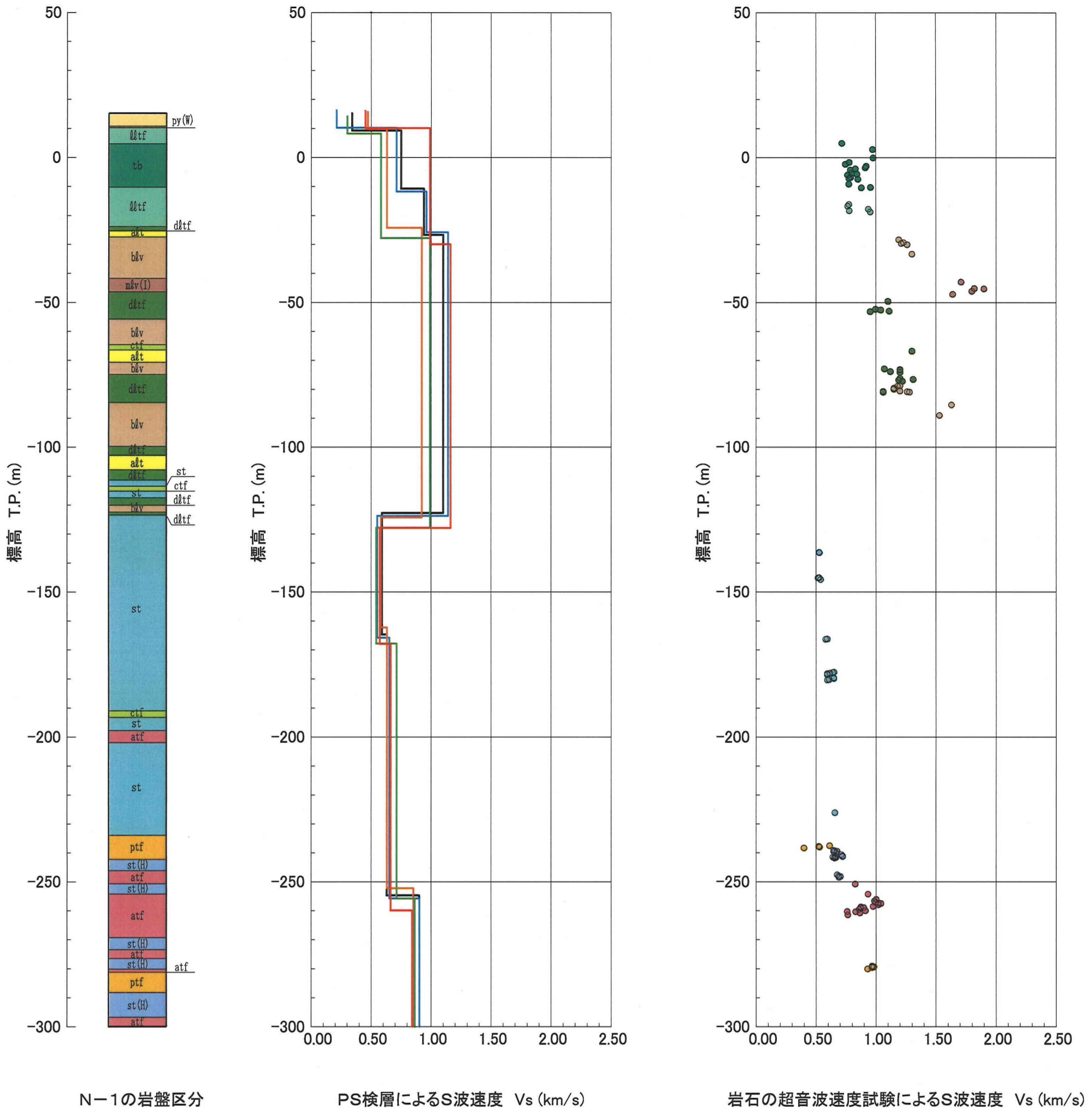


図-5.2(1) PS検層結果と岩石の超音波速度試験結果の比較 (P波速度)



N-1の岩盤区分

PS検層によるS波速度 Vs (km/s)

岩石の超音波速度試験によるS波速度 Vs (km/s)

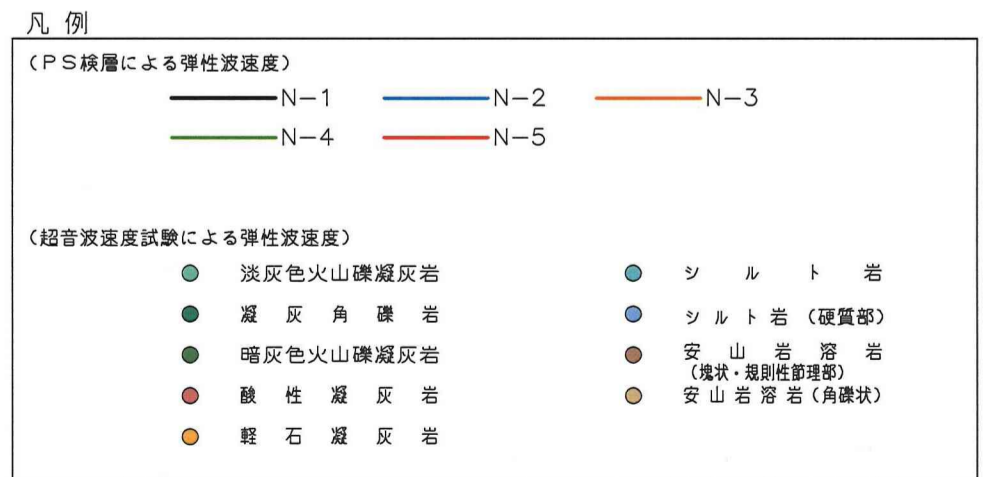
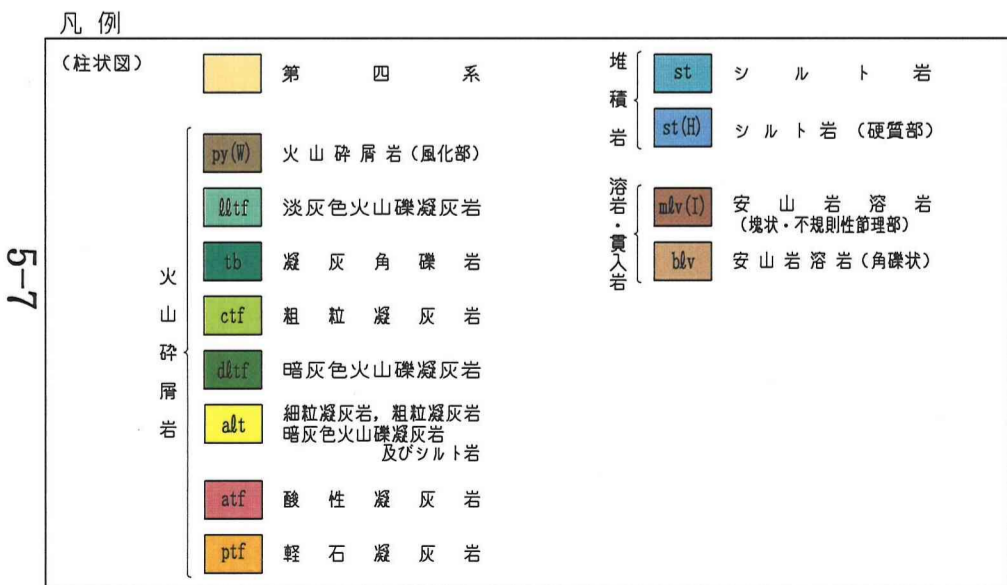


図-5.2(2) PS検層結果と岩石の超音波速度試験結果の比較 (S波速度)

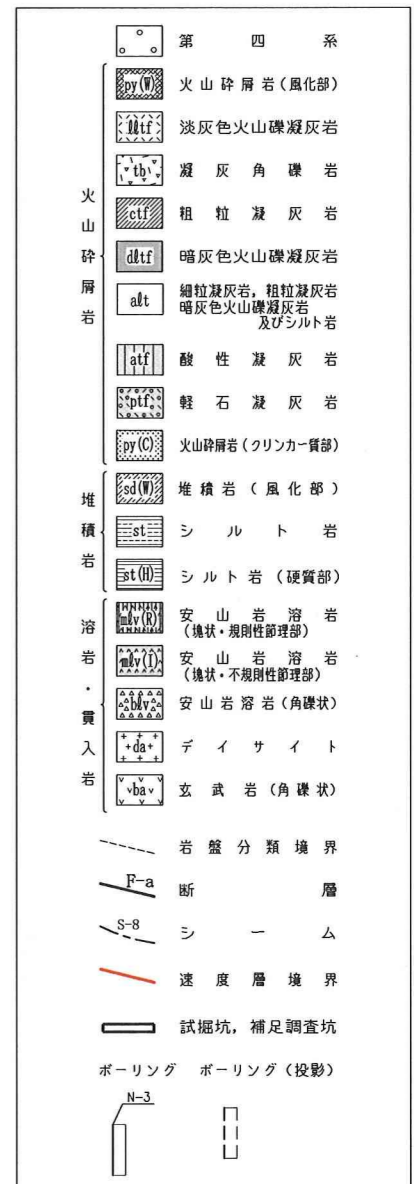
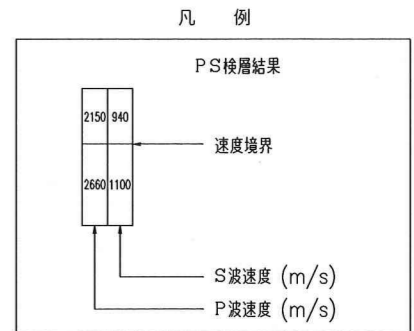
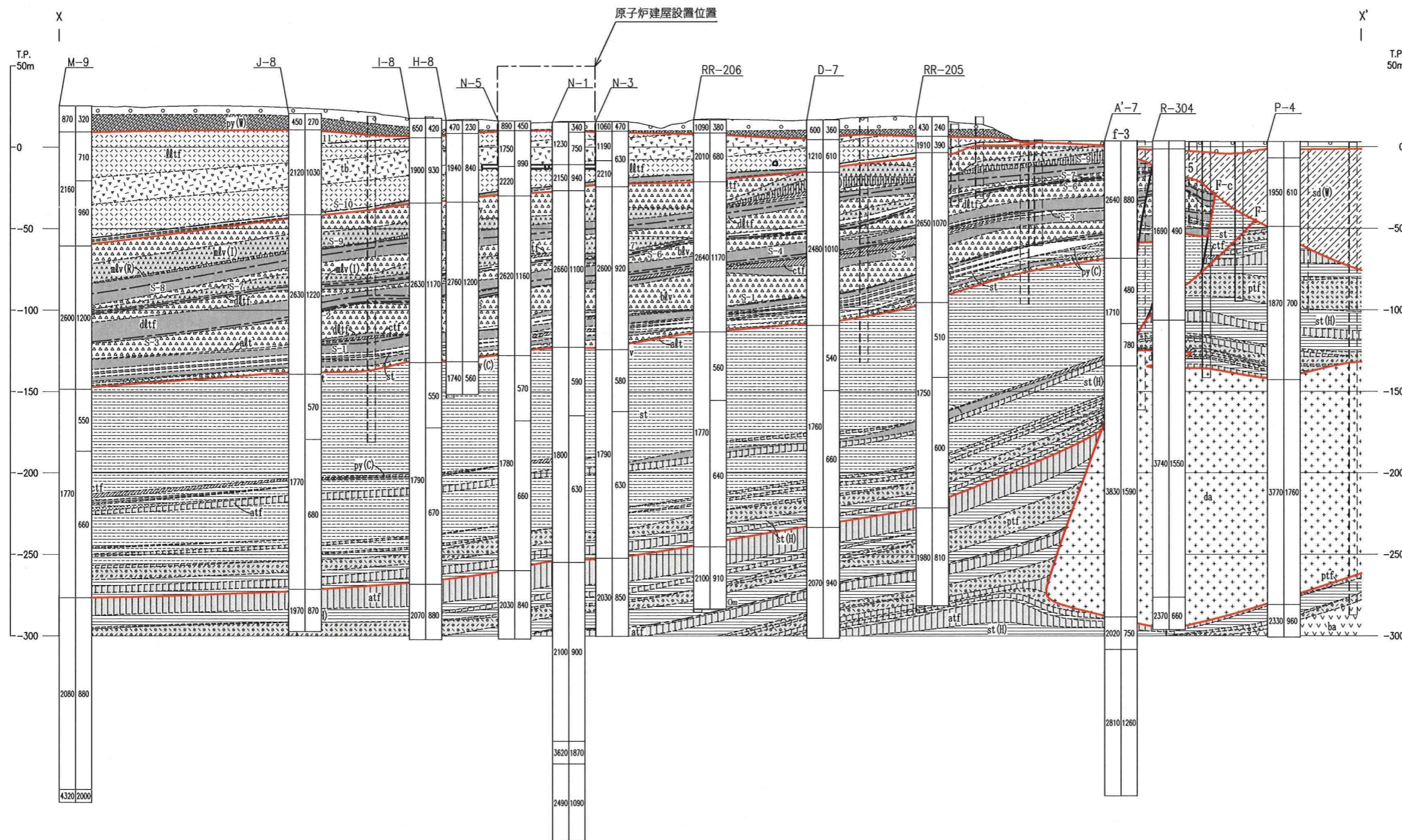


図-5.3(1) 解析断面上のボーリング孔におけるPS検層結果 (X-X' 断面)

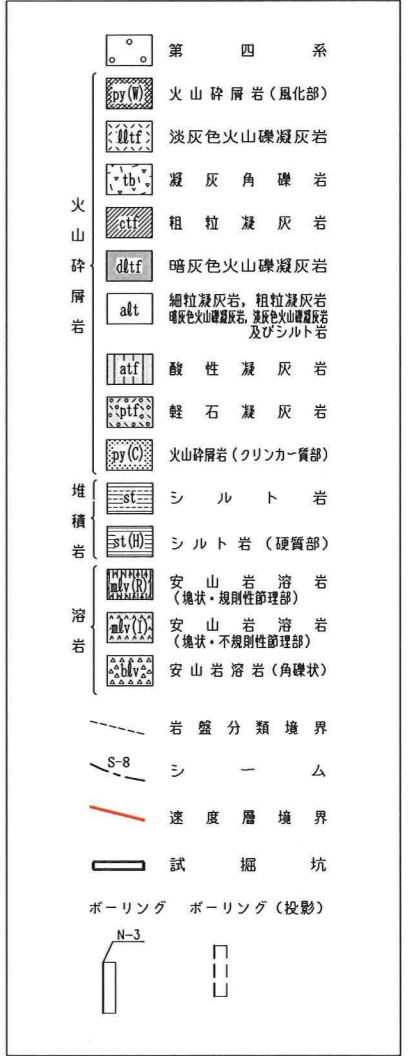
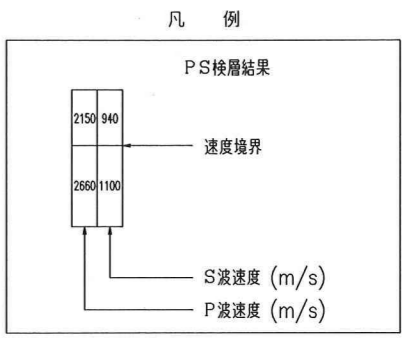
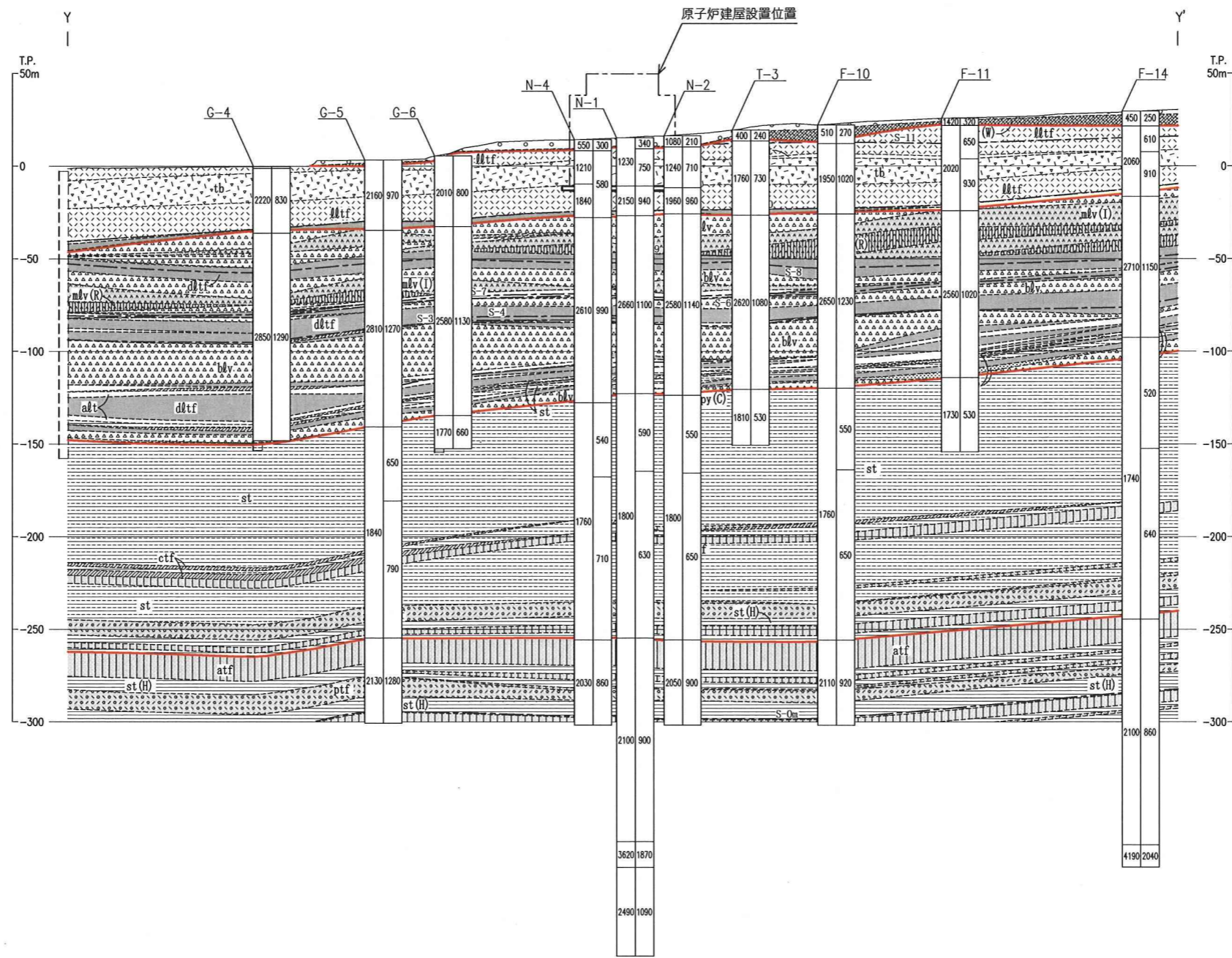


図-5.3(2) 解析断面上のボーリング孔におけるPS検層結果(Y-Y'断面)

速度層区分	P波速度 Vp (km/s)	S波速度 Vs (km/s)
①	0.84	0.36
②	1.91	0.83
③	2.63	1.12
④	1.81	0.64
⑤	2.08	0.90
北①	1.86	0.57
北②	1.69	0.49
北③	1.86	0.67
北④	3.77	1.63

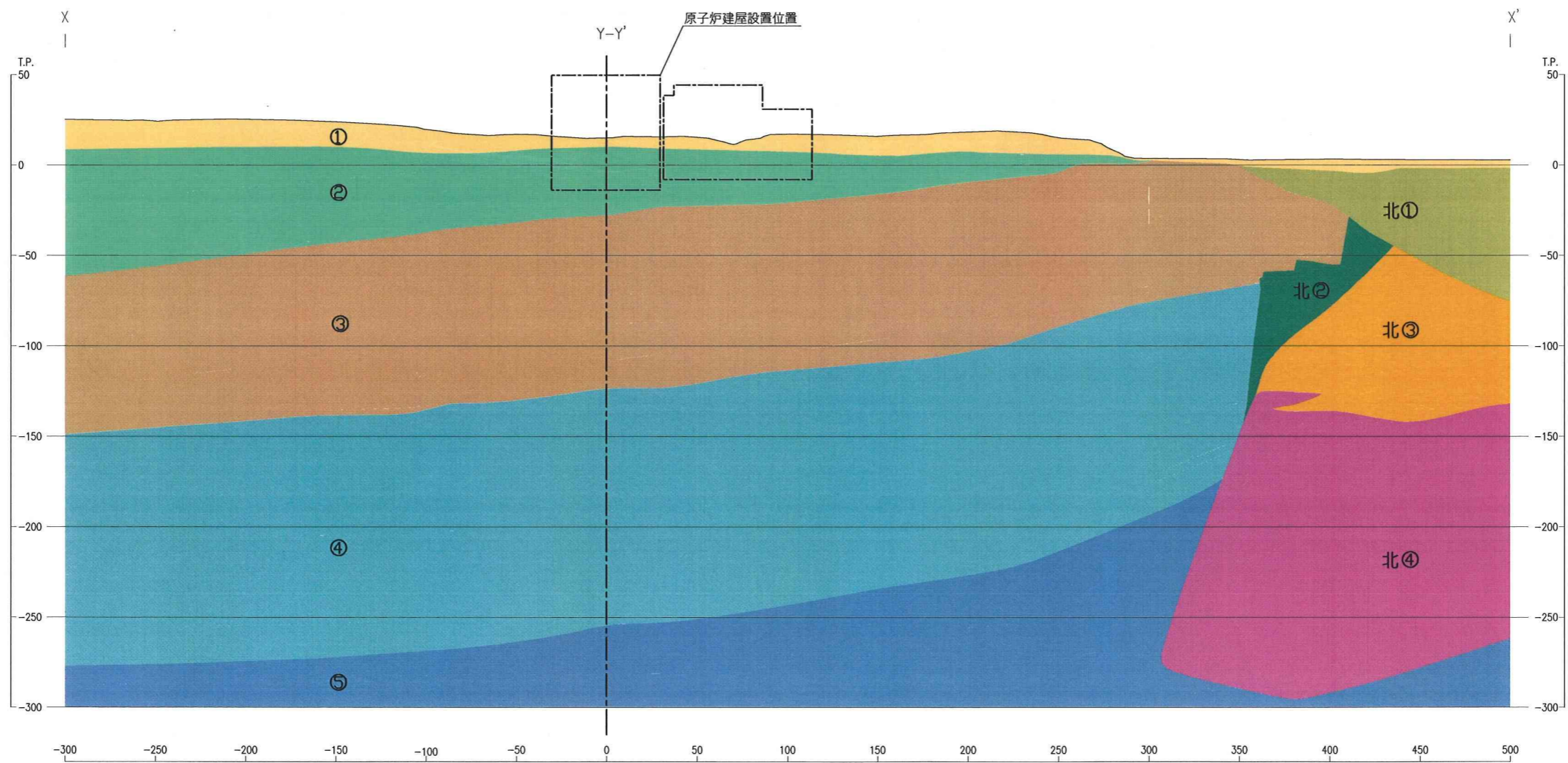


図-5.4(1) PS検層による速度層断面図(X-X'断面)

速度層区分	P波速度 V <sub>p</sub> (km/s)	S波速度 V <sub>s</sub> (km/s)
①	0.84	0.36
②	1.91	0.83
③	2.63	1.12
④	1.81	0.64
⑤	2.08	0.90

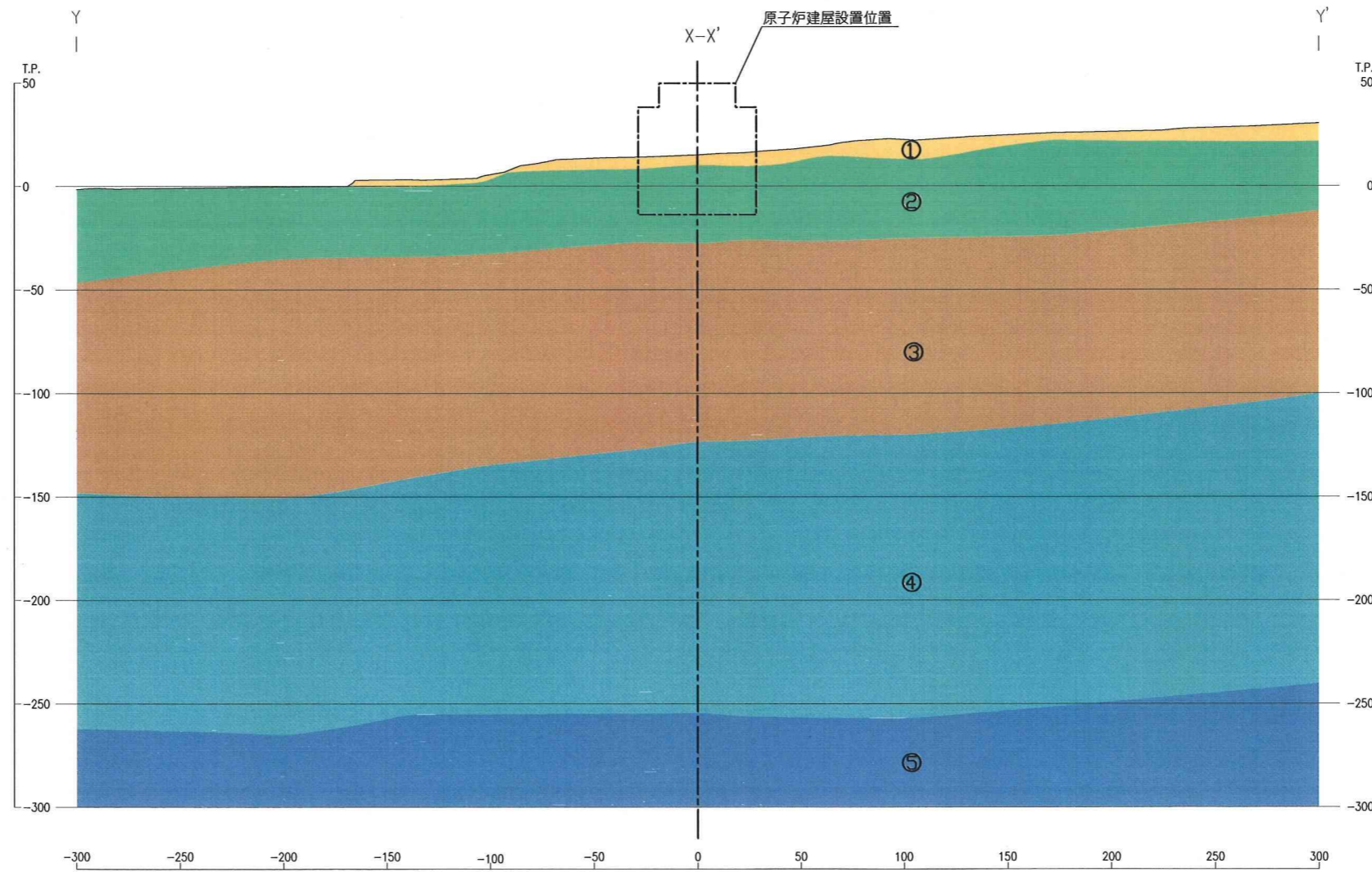


図-5.4(2) P S 検層による速度層断面図(Y-Y' 断面)

表-5.1 速度層区分の決定方法

速度層	説明
①	遅い速度を示す地表付近の第四系と火山砕屑岩（風化部）は、P S 検層の結果から $V_p=840\text{m/s}$ , $V_s=360\text{m/s}$ としている。
②	易国間層の上部は、淡灰色火山礫凝灰岩及び凝灰角礫岩から構成され、N-1 ~ N-5, M-9, F-11 及び F-14 においては P S 検層の結果が地層境界で2層に区分されているが、易国間層上部全体では速度境界は見られない。このことから、易国間層上部は区分せずに、 $V_p=1,910\text{m/s}$ , $V_s=830\text{m/s}$ としている。
③	易国間層の下部は、暗灰色火山礫凝灰岩等の火山砕屑岩、安山岩溶岩等で構成されているが、P S 検層の結果、速度境界はないことから、 $V_p=2,630\text{m/s}$ , $V_s=1,120\text{m/s}$ としている。
④	シルト岩を主体とする大間層の上部は、P S 検層のS波速度では2層に区分されているが、この区分に対応する岩盤区分の境界は認められず、ほぼ同等の値であることから区分せずに、 $V_p=1,810\text{m/s}$ , $V_s=640\text{m/s}$ としている。
⑤	シルト岩（硬質部）及び酸性凝灰岩等の火山砕屑岩からなる大間層の下部は、大間層の上部より速く、 $V_p=2,080\text{m/s}$ , $V_s=900\text{m/s}$ としている。
北①	北側に分布する堆積岩（風化部）は、 $V_p=1,860\text{m/s}$ , $V_s=570\text{m/s}$ としている。
北②	デイサイトより上に分布する大間層のシルト岩は、 $V_p=1,690\text{m/s}$ , $V_s=490\text{m/s}$ としている。
北③	デイサイトより上に分布する大間層のシルト岩（硬質部）及び酸性凝灰岩等の火山砕屑岩は、 $V_p=1,860\text{m/s}$ , $V_s=670\text{m/s}$ としている。
北④	デイサイトは、 $V_p=3,770\text{m/s}$ , $V_s=1,630\text{m/s}$ としている。

表-5.2 解析用物性値 (動的変形特性)

速度層区分	岩盤区分	密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	P波速度 $V_p$ (km/s)	S波速度 $V_s$ (km/s)	動せん断弾性係数 $G_d$ ( $\times 10^9$ N/mm <sup>2</sup> )	動ポアソン比 $\nu_d$
②	細粒凝灰岩	1.59	1.91	0.83	1.10	0.38
	淡灰色火山礫凝灰岩	1.83			1.26	
	暗灰色火山礫凝灰岩	1.95			1.34	
	凝灰角礫岩	2.05			1.41	
③	細粒凝灰岩	1.59	2.63	1.12	1.99	0.39
	粗粒凝灰岩	1.91			2.40	
	暗灰色火山礫凝灰岩	1.95			2.45	
	火山砕屑岩 (クリンカー質部)	1.94			2.43	
	シルト岩	1.48			1.86	
	安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	2.40			3.01	
	安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	2.36			2.96	
	安山岩溶岩 (角礫状)	2.18			2.73	
④	粗粒凝灰岩	1.91	1.81	0.64	0.78	0.43
	暗灰色火山礫凝灰岩	1.95			0.80	
	酸性凝灰岩	1.69			0.69	
	軽石凝灰岩	1.65			0.68	
	火山砕屑岩 (クリンカー質部)	1.94			0.79	
	シルト岩	1.48			0.61	
	シルト岩 (硬質部)	1.52			0.62	
⑤	酸性凝灰岩	1.69	2.08	0.90	1.37	0.38
	軽石凝灰岩	1.65			1.34	
	シルト岩 (硬質部)	1.52			1.23	
	玄武岩 (角礫状)	2.13			1.73	
北②	粗粒凝灰岩	1.91	1.69	0.49	0.46	0.45
	酸性凝灰岩	1.69			0.41	
	シルト岩	1.48			0.36	
	シルト岩 (硬質部)	1.52			0.36	
北③	酸性凝灰岩	1.69	1.86	0.67	0.76	0.43
	軽石凝灰岩	1.65			0.74	
	シルト岩	1.48			0.66	
	シルト岩 (硬質部)	1.52			0.68	
	デイサイト	2.39			1.07	
北④	デイサイト	2.39	3.77	1.63	6.35	0.39

## 6. 淡灰色火山礫凝灰岩の解析用物性値について

- 1) 淡灰色火山礫凝灰岩の解析用物性値の設定方法について，説明すること。

申請者は、淡灰色火山礫凝灰岩等の解析用物性値について以下のように設定している。

本地点の岩盤は、社団法人日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-1987) (以下「JEAG」という。)によると、工学的には硬岩、軟岩及び風化岩に分類される。

JEAG では、硬岩は節理が発達している場合が多いので原位置岩盤試験を主体とした評価を行い、軟岩は節理が少なく一般に岩石試験の結果と岩盤試験の結果との一致度が高いため調査試験は主として室内試験によるとされている。また、風化岩は、硬岩で行われる各種試験法や土質試験法を岩の硬軟により使い分けるとされている。

これらのことから、本地点では、JEAG の考え方を参考に各岩盤区分について風化、硬さ、節理の状況によって硬岩、軟岩等に分類し、それぞれに応じた試験結果により解析用物性値(強度・静的変形特性)を設定している。解析用物性値設定のフローを、図-6.1 に示す。

同図によると、火山砕屑岩(風化部)と堆積岩(風化部)の風化岩は、土質試験により評価している。安山岩溶岩(塊状・規則性節理部)、安山岩溶岩(塊状・不規則性節理部)については、節理の発達している硬岩であることから岩盤試験により評価している。原子炉建屋基礎底面地盤である淡灰色火山礫凝灰岩並びに細粒凝灰岩、粗粒凝灰岩、暗灰色火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩、酸性凝灰岩、軽石凝灰岩、火山砕屑岩(クリンカー質部)、シルト岩、シルト岩(硬質部)、安山岩溶岩(角礫状)及び玄武岩(角礫状)の12種類は、節理の少ない軟岩であることから、岩石試験により評価している。

また、デイサイトについては、節理の発達した硬岩に区分されるが、試掘坑内に分布しないため、岩盤試験を実施している安山岩溶岩（塊状）のうち地盤安定解析を行う上で図-3.1 に示すように安全側の値となる安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）の岩盤試験結果を解析用物性値として用いている。なお、硬岩の一軸圧縮強度は、安山岩溶岩（塊状・規則性節理部）で  $44.33\text{N/mm}^2$ 、安山岩溶岩（塊状・不規則性節理部）で  $20.40\text{N/mm}^2$ 、デイサイトで  $78.36\text{N/mm}^2$  である。

岩盤区分		
	岩盤区分	記号
火山 碎屑 岩	細粒凝灰岩	ftf
	粗粒凝灰岩	ctf
	淡灰色火山礫凝灰岩	lltf
	暗灰色火山礫凝灰岩	dltf
	凝灰角礫岩	tb
	酸性凝灰岩	atf
	軽石凝灰岩	ptf
	火山碎屑岩 (クリンカー質部)	py(C)
	火山碎屑岩 (風化部)	py(W)
	堆積 岩	シルト岩
シルト岩 (硬質部)		st(H)
堆積岩 (風化部)		sd(W)
溶岩 ・貫入 岩	安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	mlv(R)
	安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	mlv(I)
	安山岩溶岩 (角礫状)	blv
	デイサイト	da
	玄武岩 (角礫状)	ba

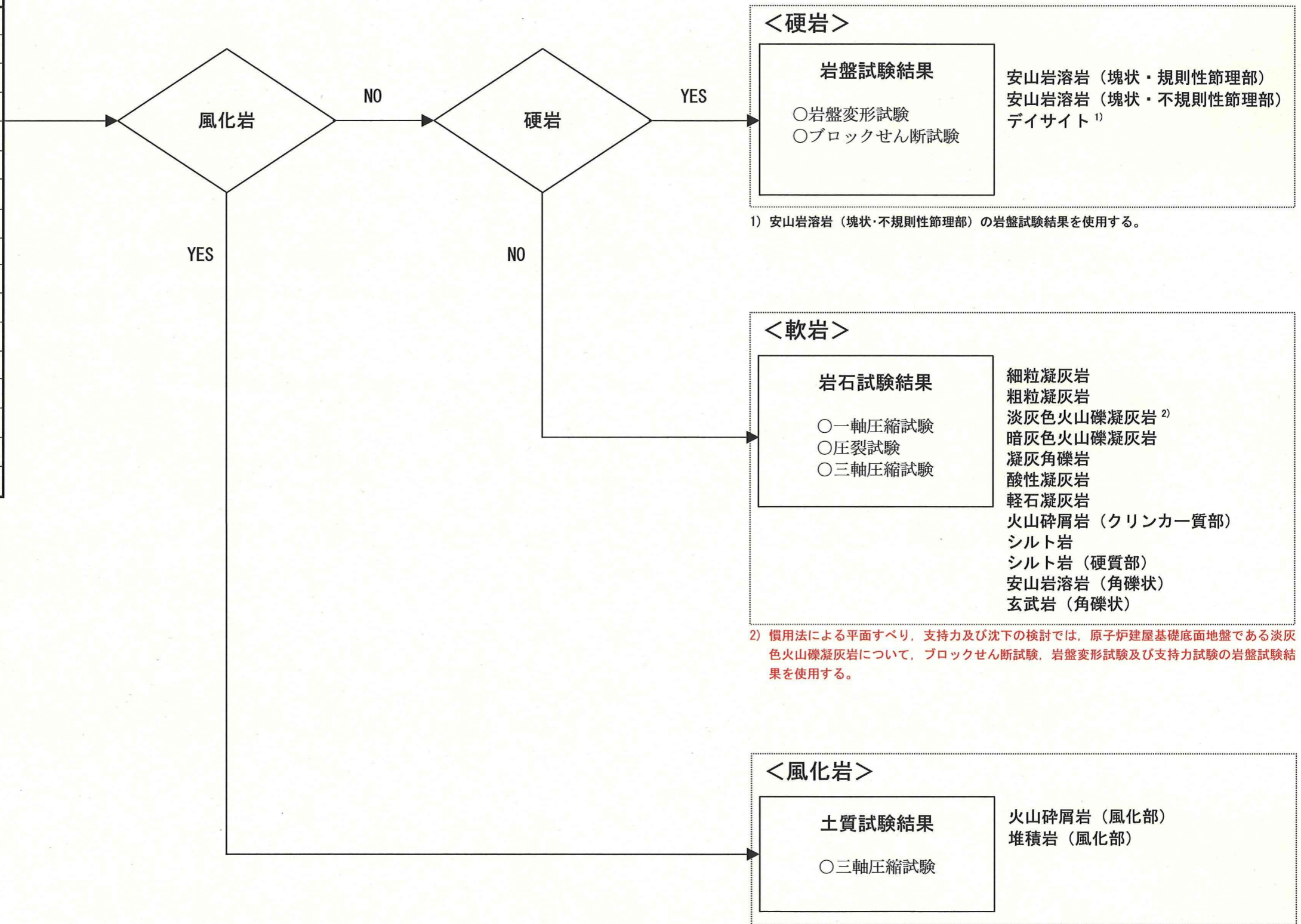


図-6.1 解析用物性値のフロー図

7. 岩石クリープ試験のクリープ係数  $\alpha$  が岩盤クリープ試験に比べて大きい理由について

1) 淡灰色火山礫凝灰岩のクリープ係数  $\alpha$  について、岩石クリープ試験結果が岩盤クリープ試験結果に比べて大きい理由を説明すること。

原子炉建屋の沈下に対する安全性を検討する目的から、原子炉建屋基礎底面地盤である淡灰色火山礫凝灰岩を対象に、試験坑E坑の図-7.1に示す位置において、8日間の岩盤クリープ試験を実施している。試験は、載荷板直径60cm、原子炉建屋の常時荷重 $0.61\text{N/mm}^2$ を上回る載荷荷重 $0.7\text{N/mm}^2$ の条件で行っている。

この岩盤クリープ試験は均質な岩盤（明瞭な割れ目及び筋状組織を含まない岩盤）を対象に実施しており、岩盤クリープ試験前の試験面のスケッチを図-7.2に示す。図-7.2によれば岩盤クリープ試験の試験面は硬質で大きな礫を含まず地質的に特異でないことが分るとしている。

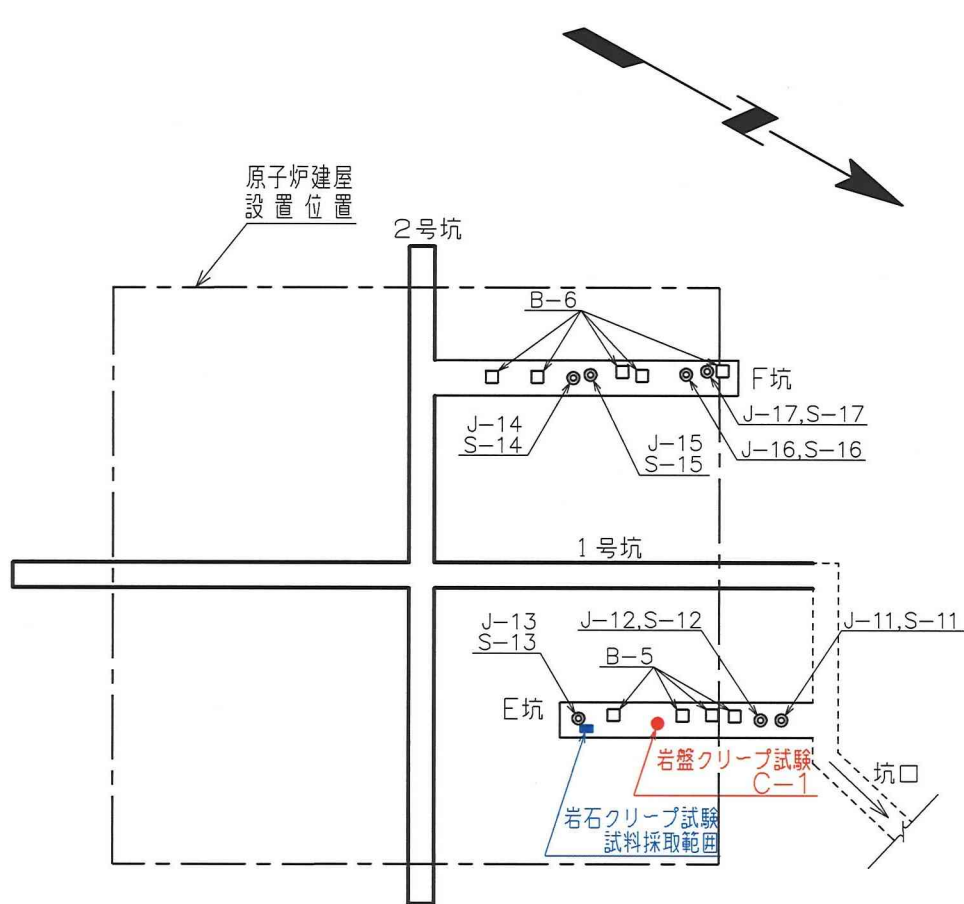
また、試験坑E坑より図-7.1に示す位置で採取した試料を用いて淡灰色火山礫凝灰岩を対象に60日間の三軸クリープ試験（岩石クリープ試験）を実施している。試験は、圧密排水条件（CD条件）及び $0.7\text{N/mm}^2$ の軸差応力を載荷する方法で行っている。図-7.1に示すように岩石クリープ試験の試料は岩盤クリープ試験の近傍で採取している。

申請者は、岩盤クリープ試験によるクリープ係数と岩石クリープ試験によるクリープ係数との差を試験期間の違いによるものと考え、両者を同じ試験期間のデータを用いて比較している。60日間の岩石クリープ試験結果のうち8日間のデータを用いて、5要素のレオロジーモデル（5要素モデル）で近似しクリープ係数 $\alpha$ を算出している。表-7.1によれば岩石クリープ試験の8日間のクリープ係数 $\alpha = 0.09$ となり表-7.2に示す岩盤クリープ試験のクリープ係数 $\alpha = 0.08$

とほぼ一致し、試験による違いはないとしている。

これは、岩盤クリープ試験は、明瞭な割れ目及び筋状組織を含まない代表的な均質岩盤で試験を行ったため、岩石試験とほぼ等しいクリープ係数 $\alpha$ が得られたものと考えられるとしている。

なお、沈下に対する安全性の検討では、図-7.3に示すように60日間の岩石クリープ試験の結果を5要素モデルで近似したクリープ係数 $\alpha = 0.14$ を用いるとしている。



岩盤変形試験

試験位置	試験箇所	岩盤区分
J-11	E坑	淡灰色火山礫凝灰岩
J-12		
J-13		
J-14	F坑	
J-15		
J-16		
J-17		

支持力試験

試験位置	試験箇所	岩盤区分
S-11	E坑	淡灰色火山礫凝灰岩
S-12		
S-13		
S-14	F坑	
S-15		
S-16		
S-17		

ブロックせん断試験

試験位置	試験箇所	岩盤区分
B-5	E坑	淡灰色火山礫凝灰岩
B-6	F坑	

岩盤クリープ試験

試験位置	試験箇所	岩盤区分
C-1	E坑	淡灰色火山礫凝灰岩

凡 例

- ◎ 岩盤変形・支持力試験
- ブロックせん断試験
- 岩盤クリープ試験
- 岩石クリープ試験試料採取範囲
- ▭ 試掘坑
- ▭ 試験坑
- [ ] 補足調査坑



図-7.1 クリープ試験位置図

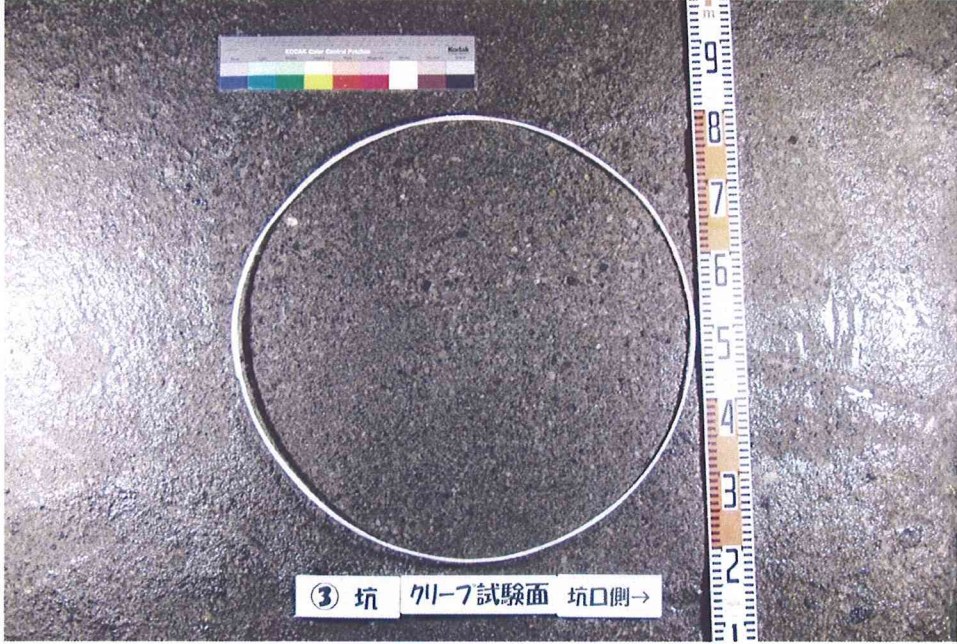
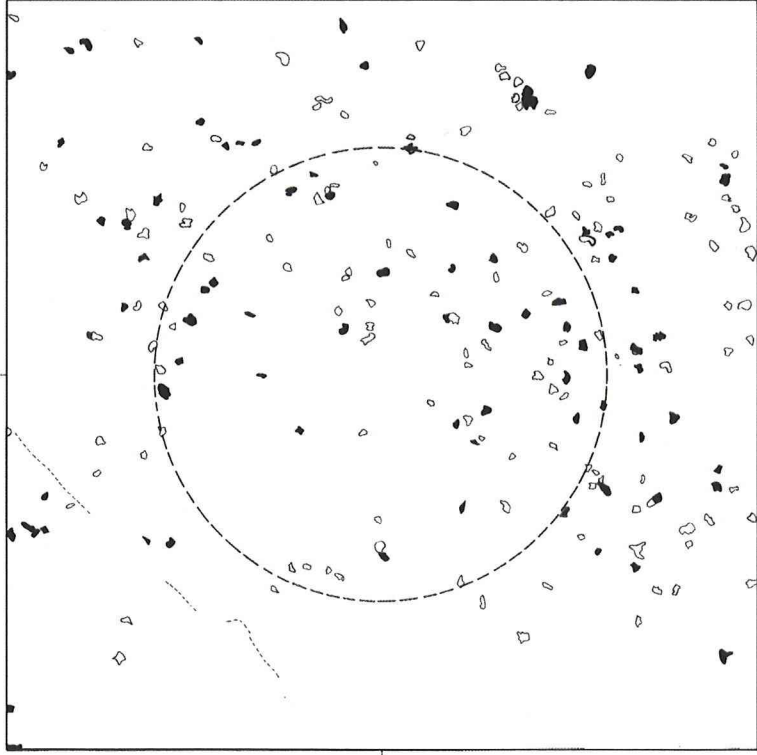





















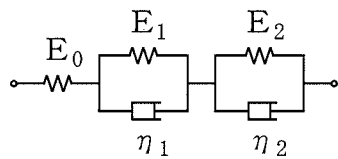
試験位置	C-1																	
写真																		
スケッチ	 <p style="text-align: right;">10cm</p> <table border="1" data-bbox="354 1688 1417 1957"> <tr> <td rowspan="4">凡 例</td> <td></td> <td>割れ目 (明瞭)</td> <td></td> <td>緻密で硬質な礫</td> </tr> <tr> <td></td> <td>割れ目 (不明瞭)</td> <td></td> <td>多孔質な礫</td> </tr> <tr> <td></td> <td>筋状組織 (明瞭)</td> <td></td> <td>岩盤クリープ試験面</td> </tr> <tr> <td></td> <td>筋状組織 (不明瞭)</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	凡 例		割れ目 (明瞭)		緻密で硬質な礫		割れ目 (不明瞭)		多孔質な礫		筋状組織 (明瞭)		岩盤クリープ試験面		筋状組織 (不明瞭)		
凡 例			割れ目 (明瞭)		緻密で硬質な礫													
			割れ目 (不明瞭)		多孔質な礫													
			筋状組織 (明瞭)		岩盤クリープ試験面													
		筋状組織 (不明瞭)																
備考	均 質																	

図-7.2 岩盤クリープ試験の試験面状況

表-7.1 岩石クリープ試験結果

岩盤区分	軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	側圧 $\sigma_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性ひずみ $\varepsilon_e$ (%)	最終ひずみ $\varepsilon$ (%)	クリープ係数				
					$\alpha$ ( $\alpha_1 + \alpha_2$ )	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$ (1/day)	$\beta_2$ (1/day)
淡灰色火山礫凝灰岩 lltf 8日間データ	0.7	0.1	0.111	0.118	0.06	0.03	0.03	7.3	0.24
	0.7	0.2	0.107	0.118	0.10	0.04	0.06	4.8	0.25
	0.7	0.5	0.107	0.116	0.08	0.03	0.05	8.6	0.38
	0.7	0.8	0.096	0.107	0.11	0.04	0.07	11	0.41
	平均			0.105	0.114	0.09	0.04	0.05	7.9
淡灰色火山礫凝灰岩 lltf 60日間データ	0.7	0.1	0.111	0.123	0.11	0.03	0.08	3.1	0.034
	0.7	0.2	0.107	0.121	0.13	0.05	0.08	2.9	0.072
	0.7	0.5	0.107	0.120	0.12	0.04	0.08	5.4	0.083
	0.7	0.8	0.096	0.113	0.18	0.06	0.12	3.9	0.058
	平均			0.105	0.120	0.14	0.05	0.09	3.8

5要素モデル



$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_e + \varepsilon_c \\ &= \varepsilon_e \{1 + \alpha_1(1 - e^{-\beta_1 t}) + \alpha_2(1 - e^{-\beta_2 t})\}\end{aligned}$$

ここに、

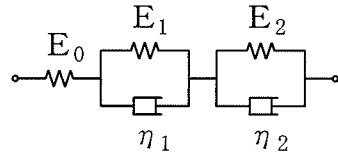
$$\alpha_1 = E_0 / E_1, \quad \alpha_2 = E_0 / E_2$$

$$\beta_1 = E_1 / \eta_1, \quad \beta_2 = E_2 / \eta_2$$

表-7.2 岩盤クリープ試験結果

岩盤区分	試験箇所	試験位置	荷重 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性沈下量 W <sub>e</sub> (×10 <sup>-3</sup> mm)	最終沈下量 W (×10 <sup>-3</sup> mm)	クリープ係数				
						α (α <sub>1</sub> +α <sub>2</sub> )	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	β <sub>1</sub> (1/day)	β <sub>2</sub> (1/day)
淡灰色火山礫凝灰岩 lltf	E坑	C-1	0.7	135	146	0.08	0.02	0.06	16	0.20

5要素モデル



$$\begin{aligned}
 W &= W_e + W_c \\
 &= W_e \{1 + \alpha_1(1 - e^{-\beta_1 t}) + \alpha_2(1 - e^{-\beta_2 t})\}
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\alpha_1 = E_0/E_1, \quad \alpha_2 = E_0/E_2$$

$$\beta_1 = E_1/\eta_1, \quad \beta_2 = E_2/\eta_2$$

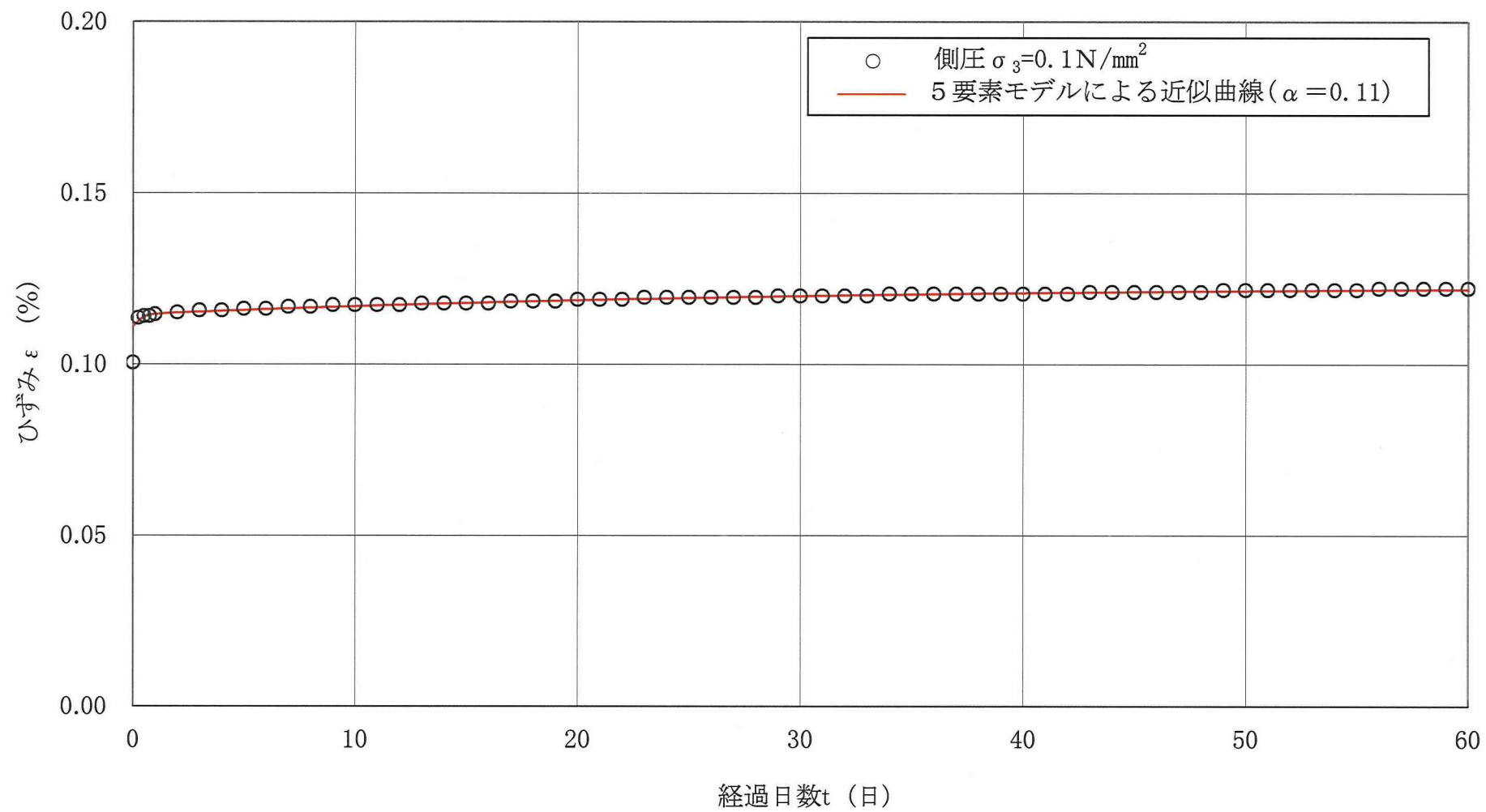


図-7.3(1) 岩石クリープ試験結果(60日間)と5要素モデルによる近似曲線 ( $\sigma_3=0.1 \text{ N/mm}^2$ )

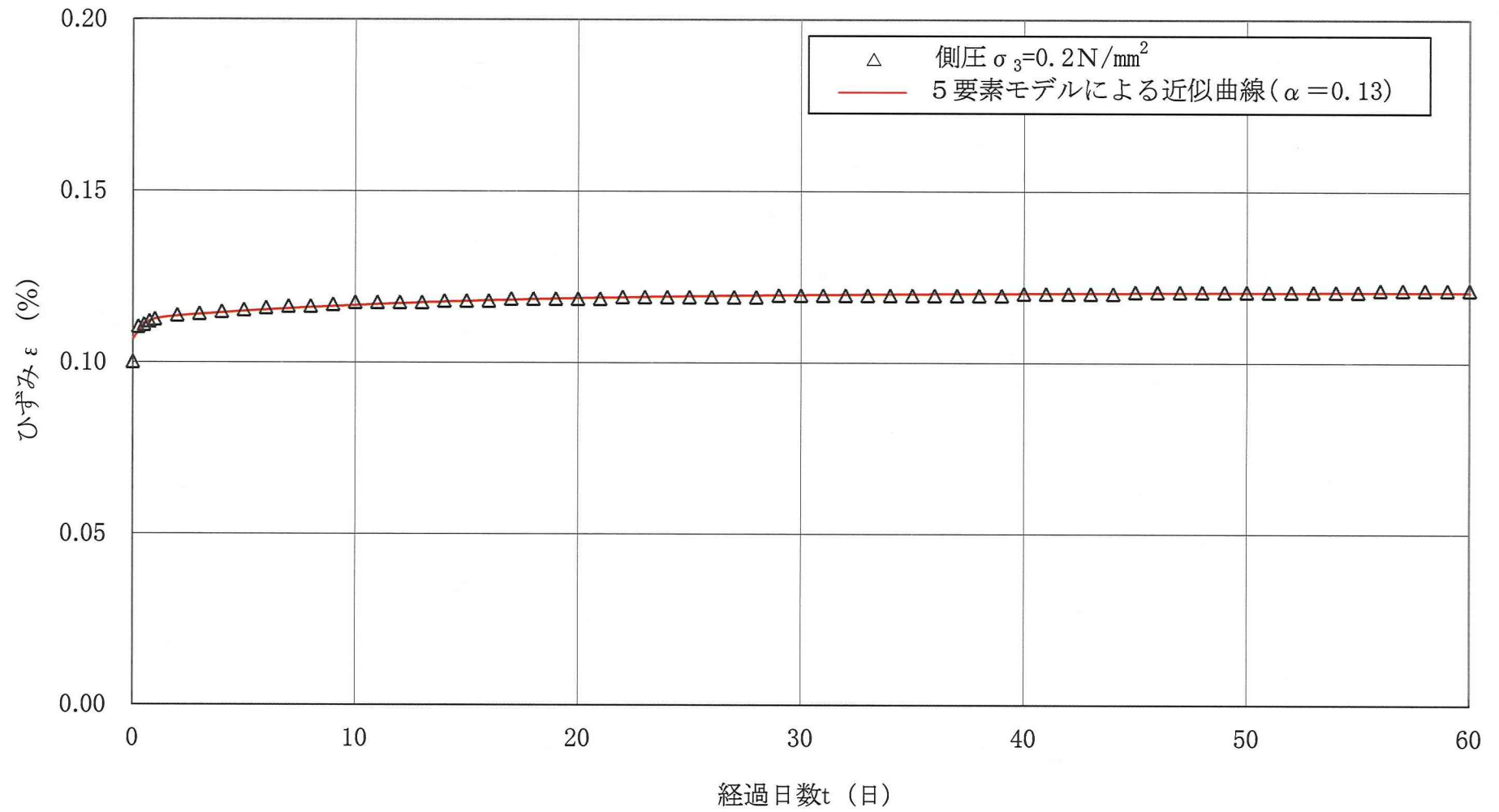


図-7.3(2) 岩石クリープ試験結果(60日間)と5要素モデルによる近似曲線 ( $\sigma_3 = 0.2 \text{ N/mm}^2$ )

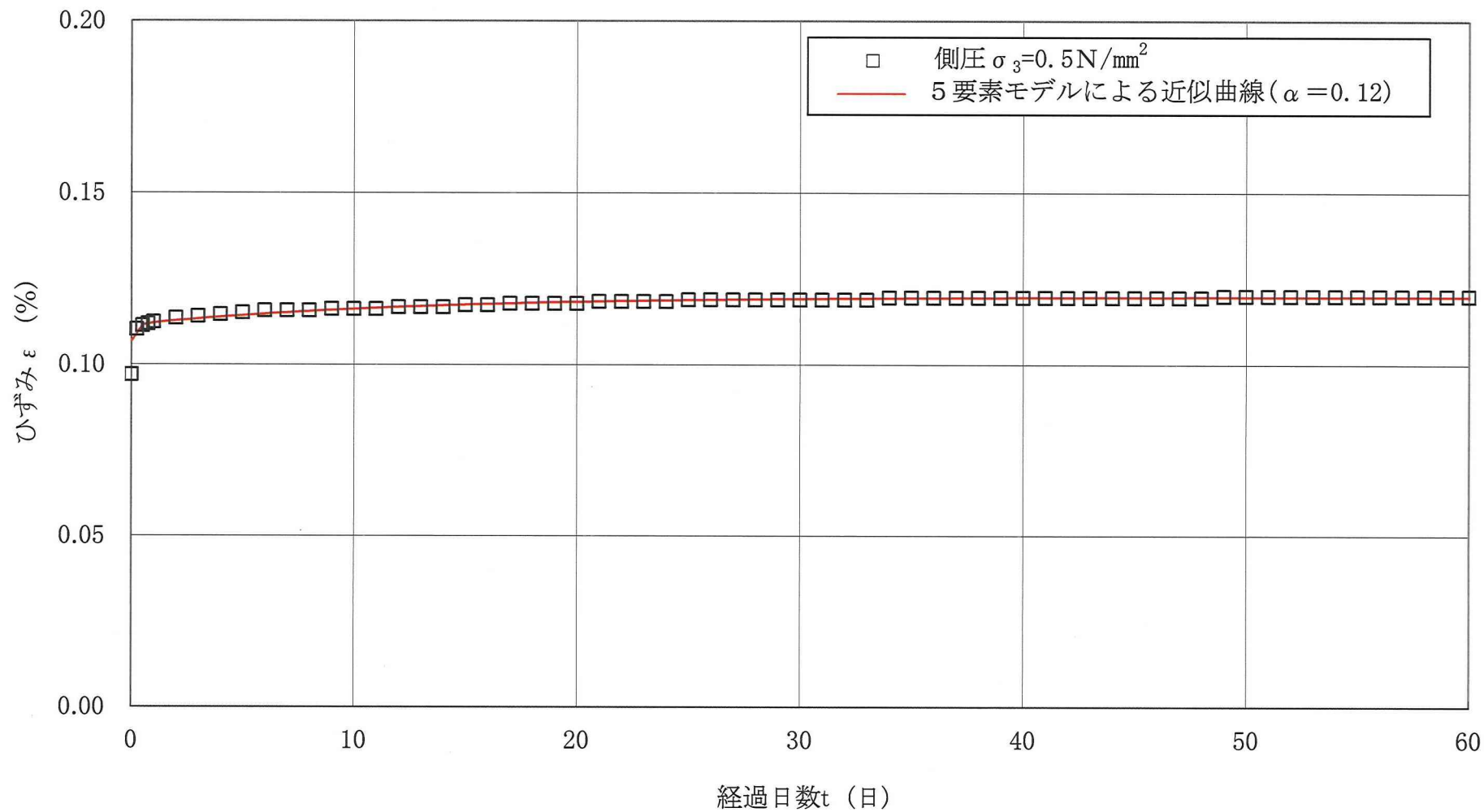


図-7.3(3) 岩石クリープ試験結果(60日間)と5要素モデルによる近似曲線 ( $\sigma_3 = 0.5 \text{ N/mm}^2$ )

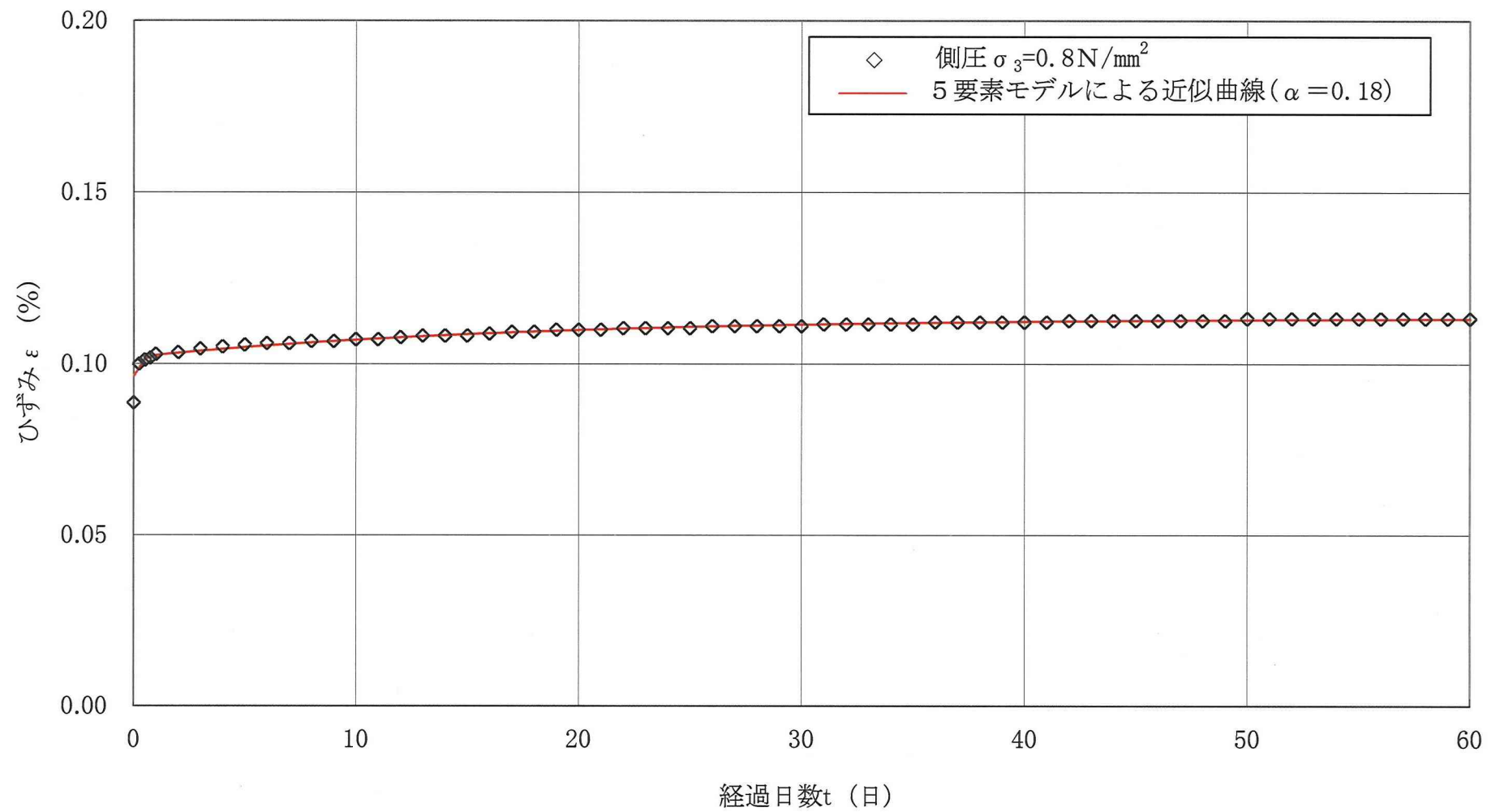


図-7.3(4) 岩石クリープ試験結果(60日間)と5要素モデルによる近似曲線 ( $\sigma_3 = 0.8 \text{ N/mm}^2$ )

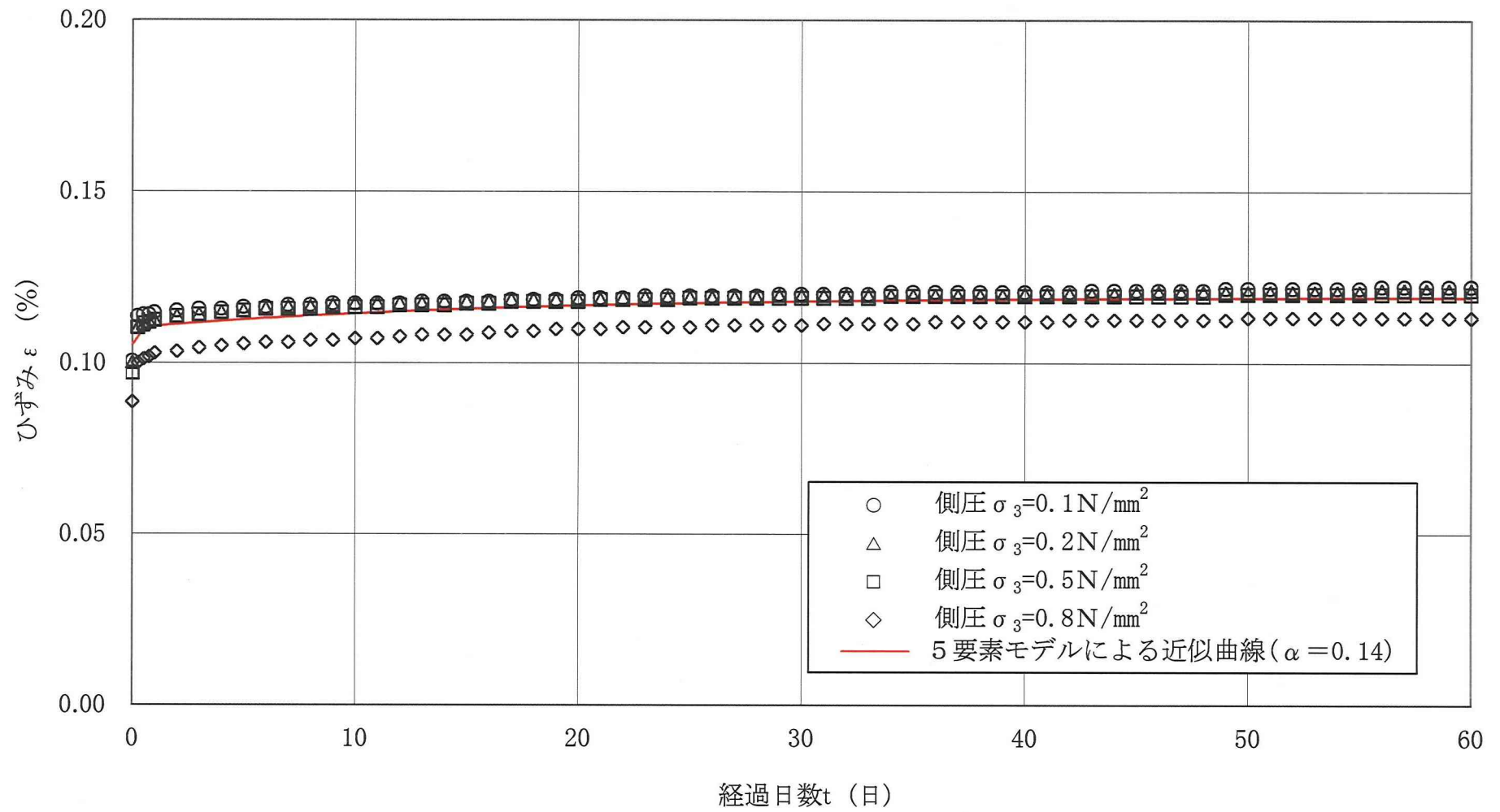


図-7.3(5) 岩石クリープ試験結果(60日間)と5要素モデルによる近似曲線(平均)

## 8. 簡易反発硬度試験（エコーチップ硬度試験）について

- 1) エコーチップ硬度試験の概要及び試験方法を説明し，エコーチップ反発度とシュミットロックハンマ反発度との試験結果を比較すること。

申請者は、淡灰色火山礫凝灰岩の岩石物性の場所的なバラツキを検討するため、敷地内で実施した 26 孔のボーリングコアを対象にエコーチップ硬さ試験機による反発度を測定している。エコーチップ硬さ試験機の概要及び試験方法は以下のとおりである。

エコーチップ硬さ試験機は金属の硬度を簡易的に計測するために開発されたが、参考文献に示すように岩石にも適用されている。計測原理は、球形のテストチップを岩石表面に衝突させ、その初速度と反発速度を計測し、エコーチップ反発度を求めるものである。

このエコーチップ硬さ試験機を用いて、図-8.1 に示す 26 孔のボーリングコアを対象に、原子炉建屋基礎底面地盤となる淡灰色火山礫凝灰岩の層準（図-8.2）中を 1 m 間隔で測定している。試験はボーリングコア 1 箇所当たり 5 回連続打撃し、エコーチップ反発度がほぼ一定となる 3 回目～5 回目までの平均値を 1 箇所の測定値としている。図-8.2 に示す淡灰色火山礫凝灰岩の層準中における各ボーリング孔の測定値の平均値をエコーチップ反発度として図-8.1 に示している。なお、原子炉建屋設置位置内では、炉心ボーリングである N-1、N-3、N-4 及び N-5 の 4 孔、試料採取用ボーリング Q-1 及び Q-2 並びに試験坑 E 坑の試料採取ボーリングコアでエコーチップ反発度を測定している。

申請者は、エコーチップ反発度と地盤物性との相関を調べるため、岩盤の力学的特性を推定する手法として利用頻度の高いシュミットロックハンマ反発度測定によるシュミットロックハンマ反発度とエ

コーチップ反発度の比較を行っている。

シュミットロックハンマ反発度測定は試験坑E坑の側壁において淡灰色火山礫凝灰岩を対象として、図-8.3 に示すように支保間(1.2 m間隔)で1箇所あたり測定点数9点の試験を行っている。このE坑の側壁で実施しているシュミットロックハンマ反発度測定の21箇所において、図-8.3 に示すようにシュミットロックハンマ反発度測定位置9点の間の12点でエコーチップ反発度測定を追加して実施したとしている。

試験結果の整理方法としては、シュミットロックハンマ反発度は9点の平均値、エコーチップ反発度は12点の平均値を1箇所当たりの測定値としている。21箇所のシュミットロックハンマ反発度とエコーチップ反発度との関係を図-8.4 に示す。

図-8.4 によれば、淡灰色火山礫凝灰岩においてシュミットロックハンマ反発度とエコーチップ反発度との関係には相関があるとしている。

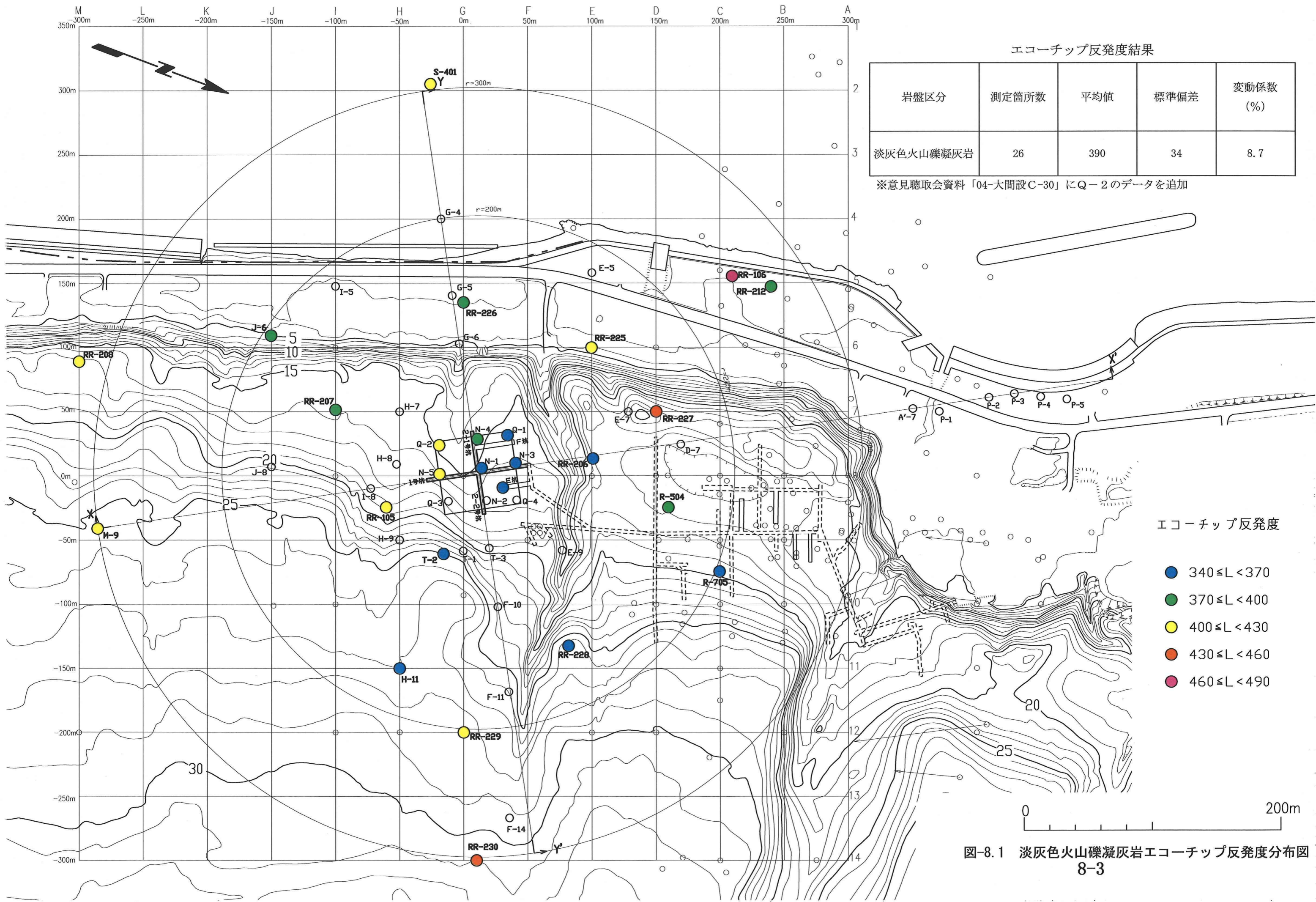
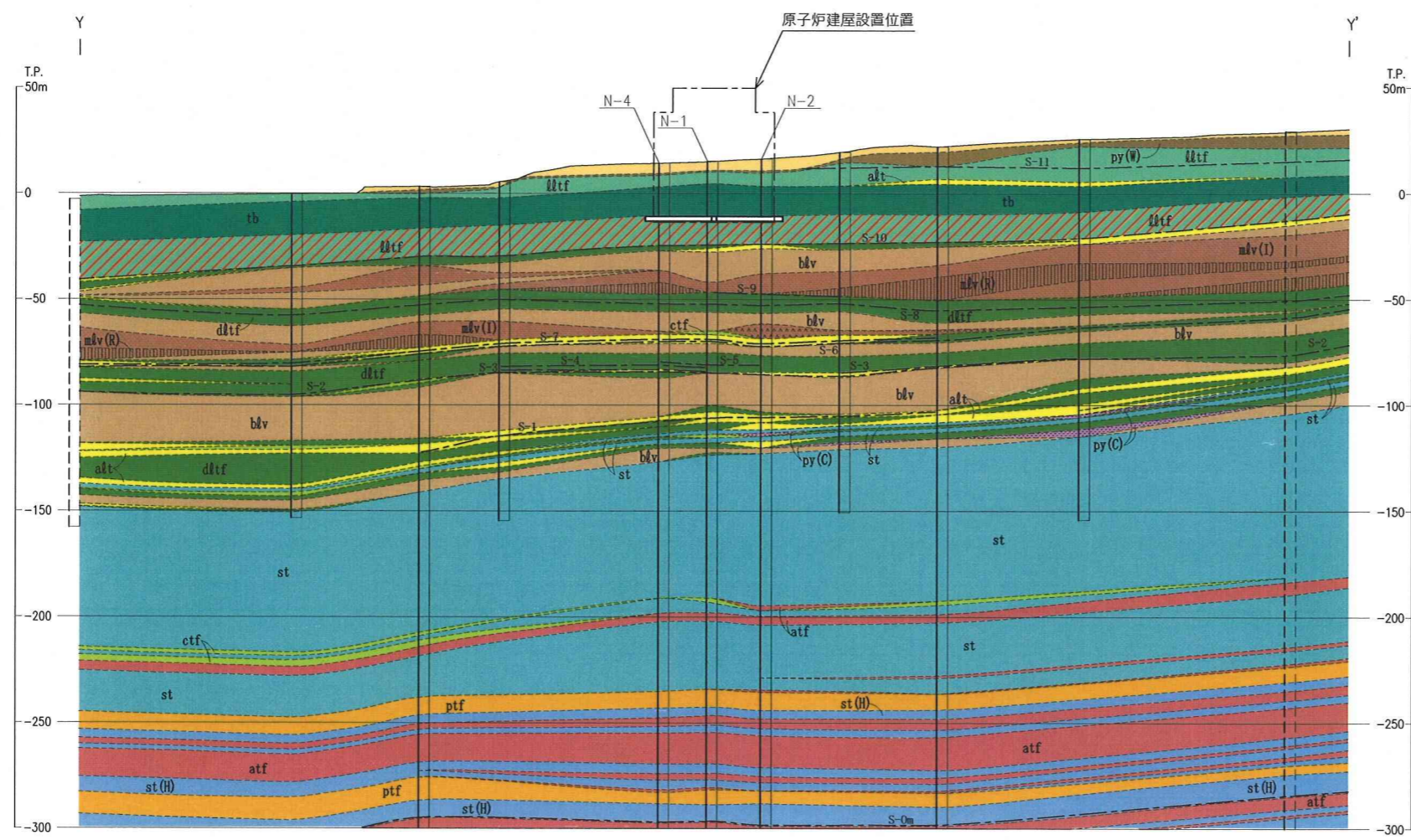


図-8.1 淡灰色火山礫凝灰岩エコーチップ反発度分布図  
8-3





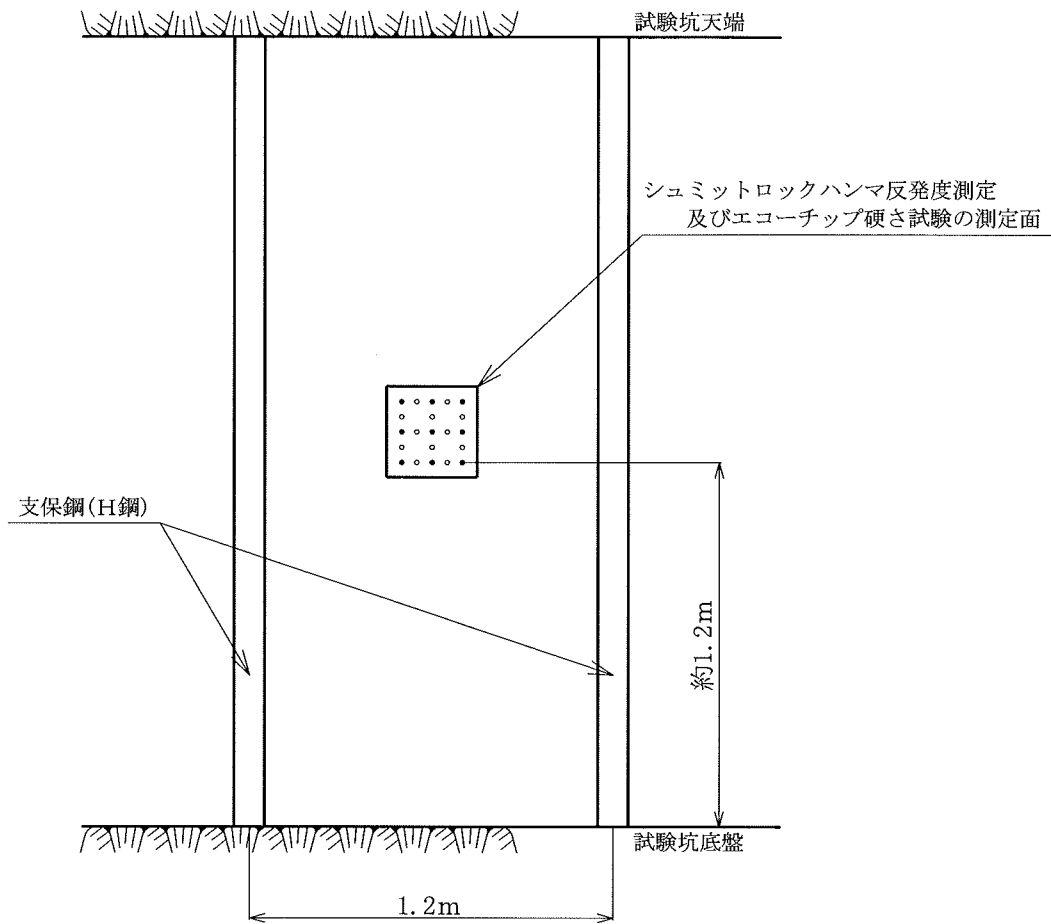
エコーチップ硬さ試験を実施した淡灰色火山礫凝灰岩の層準

凡 例

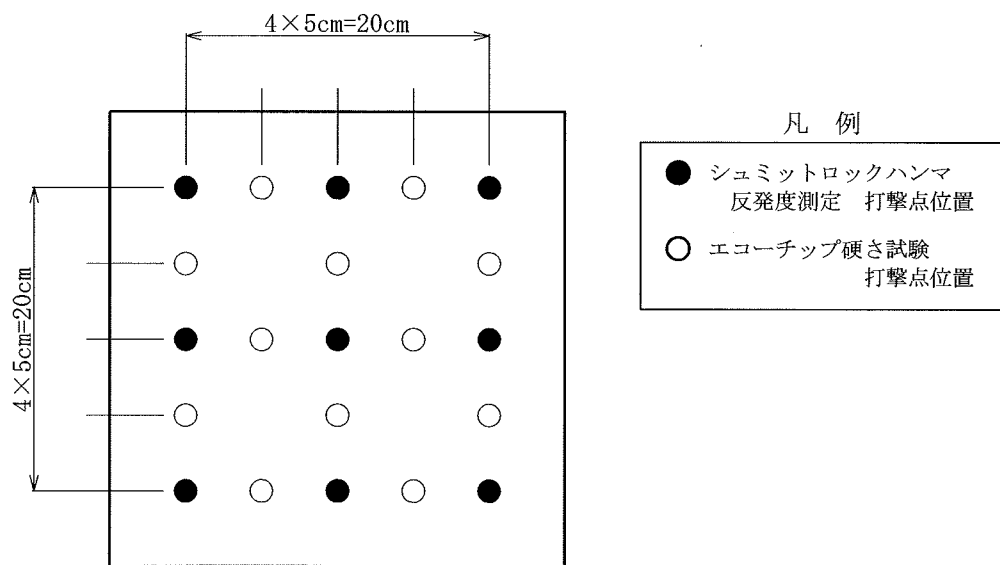


0 100m

図-8.2(2) 岩盤分類図 (Y-Y' 断面)



(a) 試験坑E坑側壁



(b) 測定面拡大図

図-8.3 シュミットロックハンマ反発度測定及び  
エコーチップ硬さ試験の測定位置図

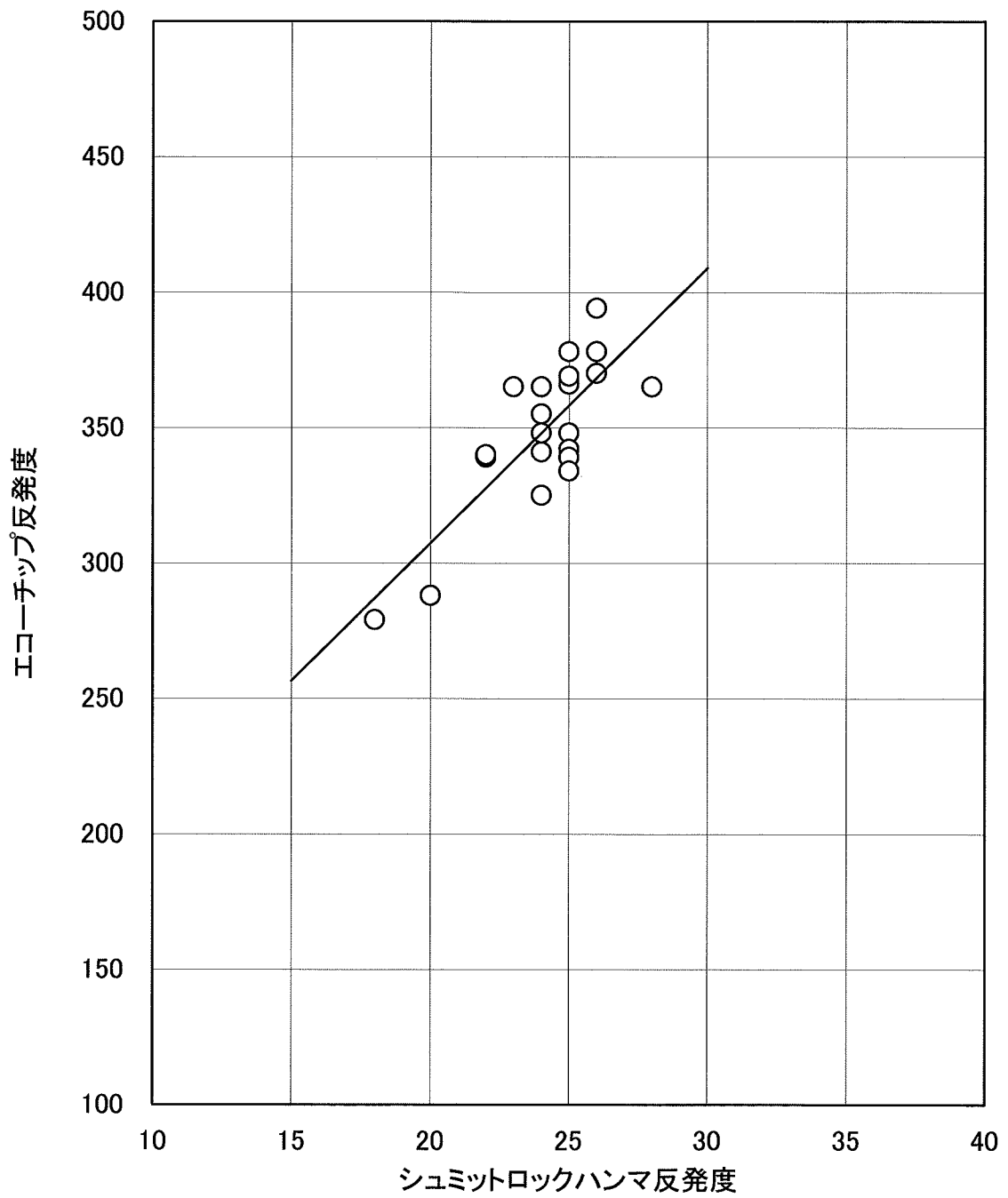


図-8.4 シュミットロックハンマ反発度と  
エコーチップ反発度の関係 (淡灰色火山礫凝灰岩)

## 文献(1)

## 簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の開発 —試験条件の影響と基本特性に関する調査—

川崎 了\*・吉田昌登\*\*・谷本親伯\*\*・舂屋 直\*\*\*

### 要 旨

金属材料の弾性的性質や強度の把握を目的として開発された試験機の中に、スイス製のエコーチップ硬さ試験機がある。本試験機の特徴としては、対象とする供試体が小さくて済むことや、試験時間が短時間であること、小型で軽量であることから携帯性に優れていること、などが挙げられる。よって、本試験機を実際の岩盤構造物や複雑な形状をした石造文化遺産に対して用いれば、計測方向に関係なく迅速な作業が現場で可能になるものと期待される。

本試験機を用いた岩質材料の物性評価手法を新たに開発するために、本論文ではとくに、①試験条件が与える影響調査(岩石の寸法・形状や表面粗度などに関する検討)、②新鮮な岩石を用いた基本特性調査(物理・力学特性との相関などに関する検討)の2項目に関して実施した結果を報告する。

**Key words** : エコーチップ硬さ試験機 Equotip hardness tester, 反発硬度 rebound hardness, 岩質材料 rock material, 物性評価 property evaluation

### 1. はじめに

最近、鉄道トンネルにおけるコンクリート塊の落下事故が相次いでおり、例えばJR西日本の山陽新幹線の福岡トンネルおよび北九州トンネル、JR北海道の礼文浜トンネルにおける崩落事故は記憶に新しい。日本は高度経済成長期において鉄道トンネルを含む種々の土木構造物を数多く建設してきたが、その中でも初期に建設した土木構造物は約40年もの歳月が経過している。また、現在とはとくに地球環境問題が注目される時代であることから、既設構造物の長寿命化および健全度調査の技術開発が新たに重要な課題として挙げられるようになった。さらに、今日の日本は戦後最大の経済的な不況下にあることから、例えば岩盤斜面やトンネル・地下空洞などの岩盤構造物の健全度調査・

試験費用および維持・補修技術に関しては、新たな技術開発に加えてコスト面でも安価であることが社会から強く要請されている。

一方、人類の文化遺産に目を向けてみると、文化遺産の保存・修復の重要性および緊急性に関しては、これまでにユネスコなどでも長年にわたり議論されてきた。また、世界的な文化遺産の多くは自然がもたらす長期的な劣化作用に加え、最近の酸性雨などの気象環境の変化によって劣化が加速的に進行しており、存続の危機にさらされている。これらのことから、世界的な文化遺産の保全および修復に関する人々の関心が高まりつつある。その中でも、石造の文化遺産の保全のための調査・試験法に関しては、現段階では適切な調査・試験法が存在しないことから、既存の土木工学あるいは資源工学の分野における調査・試験技術を転用した応急処置的な対応が行われているのが現状である。

以上のような問題を解決するためには、従来の土木工学あるいは資源工学の分野における岩盤構造物を対象とした調査・試験技術ではなく、ほかの分野からの調査・試験に関する技術移転や、全く新しい調査・試験技術の開発が必要である。とりわけ、対象とする岩盤構造物に対して現場にて直接試験の実施が可能であり、しかも簡便かつ低コストで計測できる手法であることが望ましい。ところで、金

\*大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 Department of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University(会員)

E-mail : kawasaki@ga.eng.osaka-u.ac.jp

\*\*大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 Department of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University

\*\*\*ハイテック(株) Hytec Co., Ltd.(会員)

属材料の弾性的性質や強度などの把握を目的として開発された試験機の中に、スイス製のエコーチップ硬さ試験機<sup>1)</sup>(PROCEQ S.A.社製)がある。この試験機(D型)は、打撃エネルギーが11Nmmと小さく、同社が製造しているシュミットハンマー(NR型)の約200分の1である。また、これらの両試験機の間には反発硬度の算出原理に関する若干の差が見られるが、エコーチップ硬さ試験機はシュミットハンマーの小型版と大略考えて差し支えない。

エコーチップ硬さ試験機の特徴としては、対象とする材料(供試体)が小さくて済むことや、計測原理が単純でデジタル収録方式であるために短時間(1回あたり数秒)で多数の測定が可能であること、本試験機のインパクト装置部が、直径20mm、長さ147mmのほぼ円筒形であり、小型で軽量であることから携帯性に優れていること、などが挙げられる。例えば、実際の岩盤構造物の表面や、複雑な形状をした石造の文化遺産の表面に対しても、計測方向に関係なく迅速な作業の実施が現場において可能になるものと期待される。したがって、エコーチップ硬さ試験機は岩質材料への適用性が高く、有効な試験機の1つであると考えられる。

図-1に、筆者らが現在進めているエコーチップ硬さ試験機を用いた岩質材料の物性評価手法の開発に関する研究のフローおよび本論文の位置付けを示す。本研究によりエコーチップ硬さ試験機を用いた簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法が新たに開発されれば、既設の岩盤構造物および石造の文化遺産に関する健全度の調査・試験が技術面とコスト面の両方において向上することにつながる。

る。また、単に自然の岩盤あるいは岩石材料のみならず、比較的硬質な洪積粘土などの自然の土質材料や、コンクリートなどの人工の土木材料などを対象とした調査・試験法としても、研究成果の転用が大きく期待される。本論文では、図-1においてとくに、①試験条件が与える影響調査(岩石の寸法・形状や表面粗度などに関する検討)、②新鮮な岩石を用いた基本特性調査(物理・力学特性との相関などに関する検討)の2項目について実施した結果について報告する。

## 2. エコーチップ硬さ試験機の概要

図-2に、代表的なエコーチップ硬さ試験機(D型)の概要を示す。本試験機は、特殊なバネの力によりタングステンカーバイト製の球状テストチップ(直径3mm)を有するインパクトボディで供試体の表面を打撃し、反発する際のそれぞれの速度を計測して、得られた速度値から硬さの指標 $L$ を求めるものである。インパクトボディには磁石が内蔵されており、打撃時あるいは反発時にインパクトボディがガイドチューブ下部の外周に取り付けられたコイルの中を通過することにより、コイル中に誘導電圧が生じる。この電圧は、インパクトボディがコイル中を通過する速度と比例関係にあり、自動的に硬さの指標 $L$ の値をデジタル表示する。

この硬さの指標 $L$ は、インパクトボディの反発速度を打撃速度で割った商を1,000倍した数値と定義されていることから、 $L=0\sim 1,000$ の範囲の整数を示し得る。一般的

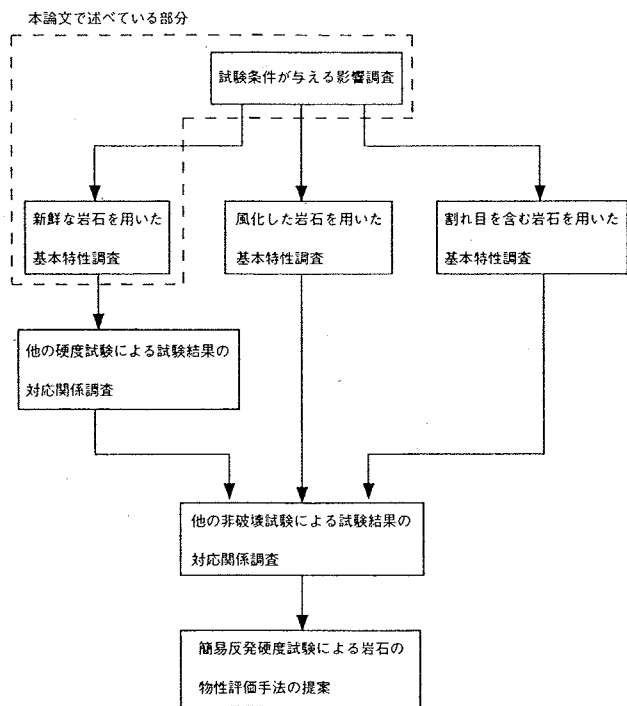


図-1 エコーチップ硬さ試験機を用いた岩質材料の物性評価手法の開発に関する研究フローおよび本論文の位置付け

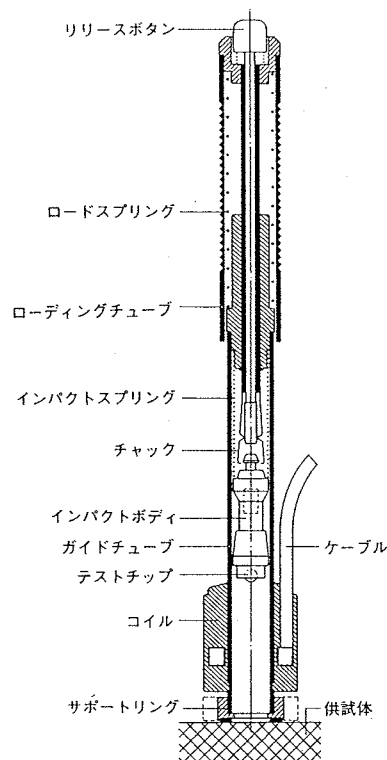


図-2 エコーチップ硬さ試験機(D型)の概要

には、供試体が硬ければそれだけ反発速度が増し、 $L$ の値も比例して大きくなる。本試験機の主な機能としては、データ記憶(最大 5,000 回)、データ転送(RS-232C)、打撃方向の設定、平均値の設定、測定ナンバーの設定、換算値の設定、 $L$  値の表示範囲の設定、許容範囲(上限, 下限)の設定、日付時間の設定などが可能な点である。

なお、本試験機は ASTM の規格品( ASTM Designation : A956-96)である。

### 3. 既往の研究

一口に硬さと言っても、硬さを測定する試験方法が異なれば別の硬さとして取り扱われている。一般に、硬さの種類としては、①押し込み硬さ(例えば、ピッカース硬さ、ロックウェル硬さ、プリネル硬さ、ヌーブ硬さ)、②引っかき硬さ(例えば、モース硬さ)、③動的硬さ(例えば、ショア硬さ)、などが代表的である。これらの硬さを取り扱った研究事例については既往の文献に譲るものとし、ここでは触れない。なお、本論文で対象とするエコーチップ硬さ試験の硬さは、上記の③動的硬さに分類される。

ところで、エコーチップ硬さ試験は、わが国では主に金属材料の分野において現場における硬さ試験として導入され、平成 10 年 3 月末日までに 2,178 台が販売<sup>2)</sup>されている。硬さ試験を行うことによって供試体の機械的性質(硬さ、強さ、延性、靱性など)を簡単に得ることができるため、本試験機はとくに、複雑な形状部品、重くて大きな供試体、固定された機器設備などの硬さ試験のほかに、材料判別、連続全数検査などに広く用いられている。一方、金属材料以外の分野では、例えばインパクトプリンター印字部の衝突現象をモデル化した際の、印字用紙、プラスチックおよびウレタンゴムの反発硬さ測定<sup>3)</sup>や、西洋ナシ(ラ・フランス)の収穫適期と食用適期を判定するための果実硬さ測定<sup>4)</sup>などに使用されている。

以下では、エコーチップ硬さ試験機を用いた既往の研究事例の中でも、とくに岩質材料を対象とした事例に限定し

て述べる。岩質材料を対象としたエコーチップ硬さ試験の研究事例に関しては、国外では 2 例<sup>5)6)</sup>、国内においては 4 例<sup>7)~10)</sup>ほど報告されている。なお、本論文内容の一部を研究の初期に速報として発表した筆者らの研究事例<sup>11)</sup>については、ここでは含めていない。これらの文献の中で、研究の対象としている試験条件および物理・力学特性について整理したものをまとめて表-1 に示す。いずれも、自然の岩石を対象とした研究事例であり、エコーチップ硬さ試験機を用いて得られた硬さの指標  $L$  値と一軸圧縮強度  $qu$  あるいはヤング率  $E$  などの力学定数との間に高い相関関係があることなどが報告されている。なお、同表中の○印は、当該論文中で対象としていることを示す。また、同表中の最上段に記載されている項目は、エコーチップ硬さ試験の実施に際して試験結果を左右すると考えられる要因および物理・力学特性であり、それらの説明は以下に示すとおりである。

- 「供試体」：試験に用いた試料の材質または種類
- 「厚 さ」：供試体の高さ
- 「幅」：供試体の直径または辺の長さ
- 「粗 度」：供試体の試験面における表面の凹凸
- 「下 敷」：試験時に供試体を置く土台あるいは場所
- 「回 数」：供試体の同じ試験位置における打撃回数
- 「方 向」：試験時の打撃角度
- 「 $qu$ 」：一軸圧縮強度
- 「 $E$ 」：ヤング率
- 「 $\rho$ 」：密度

なお、同表中の  $E$  に関しては、 $E_{50}$  すなわち  $qu/2$  の圧縮応力を  $qu/2$  の時の圧縮ひずみで割って算出した変形係数を使用している研究事例を含めている。同表より、論文ごとに異なる試験条件および物理・力学特性に着目した研究が実施されていることがわかる。すなわち、試験条件を統一した系統的な研究が行われていないことが示されている。一方、既往の研究事例では、任意の方向に面した岩盤壁面や複雑な表面形状を有する石造の文化遺産の調査・試

表-1 研究の対象としている試験条件および物理・力学特性

	供試体	厚さ	幅	粗度	下敷	回数	方向	qu	E	$\rho$	備考
Hack et al. <sup>5)</sup>	花崗岩, 石灰岩, 砂岩	○		○				○	○	○	ボールリバウンドテストとの相関
Verwaal et al. <sup>6)</sup>	石灰岩, 砂岩, その他の岩石	○	○	○				○			
阿南 <sup>7)</sup>	輝緑安山岩					○					個人差による誤差および材料区分の判別
橋本ほか <sup>8)</sup>	安山岩溶岩, 角礫状安山岩, 凝灰角礫岩	○	○					○	○		試験面の濡れ具合の違い
橋本ほか <sup>9)</sup>	安山岩溶岩, 角礫状安山岩, 凝灰角礫岩							○	○		摩率との相関
大川ほか <sup>10)</sup>	石膏, モルタル, 安山岩, アクリル, 泥岩, 砂岩			○	○	○		○	○		支持方法および供試体の曲率の影響
本論文	真鍮, アルミニウム, アクリル, 石膏, 砂岩, 花崗岩, 凝灰岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	超音波速度 Vs, Vp との相関

験を想定した、試験時の打撃角度に関する検討が行われていないことが知られる。

以上のことから、本研究ではとくに試験条件を統一した系統的な研究を行う点に着目するとともに、試験条件に関して既往の研究事例で対象としてきた要因以外に新たに「方向」を加え、試験条件の影響と基本特性の調査を実施することとした。

#### 4. 試験条件が $L$ 値に与える影響に関する検討

##### 4.1 概要

エコーチップ硬さ試験による自然の岩石を対象とした適用性検討を実施する前に、物性が比較的均質で物理特性や力学特性が把握しやすい材料で構成される供試体を中心とした、供試体条件および試験方法に関する基礎的な検討を実施した。検討対象とした項目は、供試体条件の違いによる影響を想定した、厚さ、幅、粗度、下敷の4つと、さらに試験方法の違いによる影響を想定した、回数、方向の2つを加えた合計6つである。使用した供試体の材質は、岩石材料として石膏、白浜砂岩、来待砂岩、稲田花崗岩の4種類、金属材料としてアルミニウム、真鍮<sup>ちゅう</sup>の2種類、そしてプラスチック材料としてアクリルの1種類である。供試体形状の種類としては、一般のボーリングコアを想定した円柱形と、岩石ブロックを想定した立方体形の2種類であり、岩石材料では円柱形を、そして金属材料とプラスチック材料では立方体形を、それぞれ用いて試験に供した。

##### 4.2 供試体条件の違いによる影響

###### 4.2.1 円柱供試体を用いた厚さおよび下敷に関する検討

エコーチップ硬さ試験では、硬さの指標  $L$  に影響を与えない供試体条件である供試体の大きさ(厚さ、幅)と下敷の関係について調査しておく必要がある。すなわち、供試体がエコーチップ硬さ試験機の打撃エネルギーに比して十分に大きければ、下敷の材質(例えば、硬さ)に依存しない  $L$  値が得られるが、供試体の大きさ(厚さ、幅)が極端に小さくなれば、下敷の影響を受けて供試体の大きさ(厚さ、幅)に応じた  $L$  値が得られるものと推定される。さらに、供試体の表面の粗度に関しても、 $L$  値に影響を及ぼすことが予想される。

ここでは、供試体条件の中でもとくに厚さに注目し、供試体の厚さと  $L$  値との関係を調べるために石膏で作製した円柱供試体の側面および上端面に対してエコーチップ硬さ試験を実施した。なお、供試体の幅および粗度に関する検討は、供試体の厚さに関する検討結果と合わせて、それぞれ 4.2.2 項および 4.2.3 項において後述する。

一連の室内試験において供試体として使用した石膏は、20℃の水道水と石膏(吉野石膏(株)製、ニューハイストーン歯科用硬質石膏)の重量配合比が0.24の値となるように配合した。なお、作製した石膏供試体の一軸圧縮強度  $qu$

は、 $qu \approx 20\text{MPa}$  である。一方、既往の文献<sup>6),8)</sup>によると、供試体の厚さが5 cm 以上あれば  $L$  値は下敷の影響を受けないものと考えられることから、同文献で得られた下敷に関する検討結果の妥当性を確認すると同時に、今回作製した石膏供試体の均質性を調べる目的で、以下のような手順により試験を実施した。

- ①直径(幅)5 cm×高さ(厚さ)12cm の円柱供試体を石膏で作製し、供試体の側面上を中央から片側の端面に向かって軸方向に1 cm 間隔でエコーチップ硬さ試験を実施する。なお、試験は1つの円周上で試験位置を変えて5回実施する。
- ②エコーチップ硬さ試験を実施した片側の供試体端面を岩石カッターで1 cm 切断し、耐水研磨紙の400番(研磨材の平均粒径 $\approx 40\mu\text{m}$ )、1,200番(研磨材の平均粒径 $\approx 13\mu\text{m}$ )を順に用いて切断面を研磨する。
- ③供試体の高さ(厚さ)をノギスで測定し、その後に超音波パルス法によるP波速度  $V_p$  を測定する。
- ④切断した片側の端面の  $L$  値を、異なる2種類の下敷、すなわち、プラスチック製の机( $L$  値 $\approx 290$ )と、エコーチップ硬さ試験機に付属している金属製の基準テストブロック( $L$  値 $\approx 760$ )を用いて測定する。

最初に、石膏供試体の均質性について述べる。図-3は、石膏の円柱供試体の側面上における  $L$  値と測定位置の関係を示している。なお、同図の横軸は、供試体側面上の中央を0 cm としたときのエコーチップ硬さ試験機による測定位置を示す。また、同図中の試験データ(●印)は、円柱供試体の側面円周上で測定された5回の  $L$  値の平均値である。同図より、 $L$  値に多少のばらつきが見られるが、測定位置を供試体側面上の中央から端面まで1 cm 間隔で移動させた場合でも、試験位置による  $L$  値の変化が全データの平均値である  $L \approx 320$  に対して  $\Delta L \approx \pm 10$  と比較的小さいことから、本研究で使用した石膏供試体が均質に作製されていたものと推定される。

石膏供試体が均質に作製されていたことを示す同様の傾

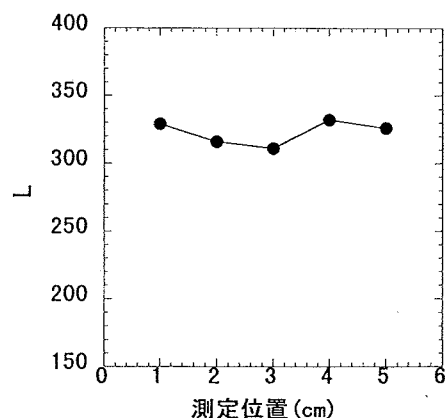


図-3 石膏供試体における側面の  $L$  値と測定位置の関係

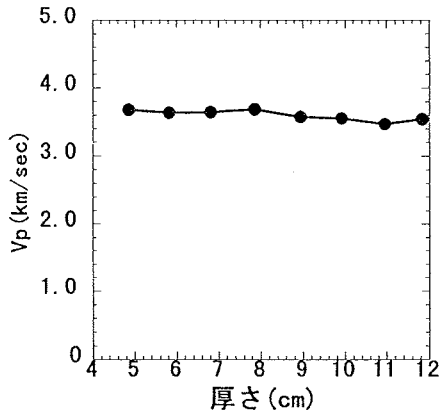


図-4 石膏供試体におけるVpと厚さの関係

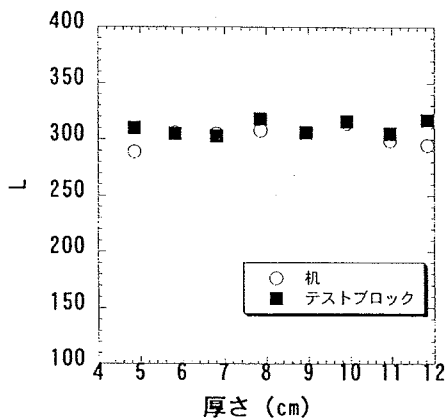


図-5 石膏供試体における上端面のL値と厚さの関係

向は、Vpによっても把握することができる。図-4は、石膏の円柱供試体を用いたVpと供試体の厚さの関係である。この図からも明らかなように、供試体の厚さが5~12cmの範囲では、Vpの値が厚さに関係なくほぼ一定値をとることから、石膏供試体が均質に作製されていたことが知られる。

石膏供試体が均質であるとの上記の結果を踏まえ、今度は異なる下敷材料を用いたときのL値と供試体の厚さの関係について述べる。図-5は、上述した2種類の耐水研磨紙で研磨した供試体の上端面におけるL値と供試体の厚さとの関係を示している。この図は、異なる2種類の下敷、すなわちプラスチック製の机(L値≒290)と金属製の基準テストブロック(L値≒760)を用いて測定した結果であるが、石膏で作製した円柱供試体の厚さが5cm以上あればL値はほぼ一定値を示し、下敷の材質に影響を受けないことが同図中に示されている。また、このL値と下敷の関係は、供試体の厚さが5cm以上あればL値は下敷の影響を受けないとする既往の文献<sup>9,10)</sup>の結論と調和的である。

以上の結果を踏まえて、石膏以外の岩質材料として自然の岩石である白浜砂岩を供試体に加え、L値が下敷材料の影響を受けない円柱供試体の最小の厚さについて検討することを試みる。測定方法は、前述の石膏供試体とおおむね

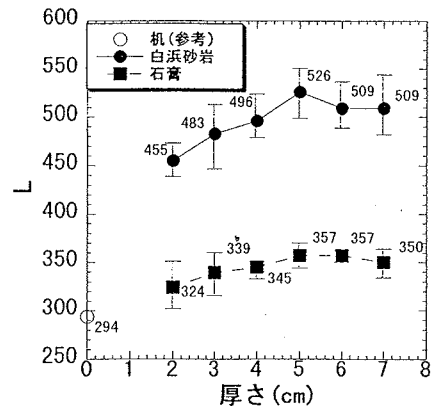


図-6 石膏および白浜砂岩におけるL値と厚さの関係

同様であるが、今回の検討では試験面(上端面)を石膏では400番(研磨材の平均粒径≒40μm)、800番(研磨材の平均粒径≒20μm)、1,200番(研磨材の平均粒径≒13μm)の順に、一方の白浜砂岩では800番(研磨材の平均粒径≒20μm)、1,200番(研磨材の平均粒径≒13μm)の順に耐水研磨紙を用いて研磨した後、無作為に10回の測定を実施して得られた値の平均値をL値とした。なお、下敷にはプラスチック製の机(L値≒290)を使用した。測定結果を図-6に示す。ここで、同図中の●印および■印の横にある数値は、それぞれL値を10回測定したときの平均値を示し、また、両印に重ねられた縦線は、L値の10回分の測定データが分布する範囲を示している。さらに、厚さが0cmに相当する縦軸の下部には、プラスチック製の机を測定したときのL値(=294)をプロットしている。この図より、均質な人工岩石である石膏供試体の方が自然の岩石の中でも比較的均質な白浜砂岩よりもL値のデータのばらつきが小さいこと、また、石膏供試体の場合には供試体の厚さが3cm以下になるとL値のばらつきが急激に大きくなっていること、さらに、供試体の厚さが4cm以上あれば、両供試体のL値はおおむね安定した一定値を得ることができるが、厚さが4cm以下になると下敷の影響を受けてL値が小さくなり、下敷のL値に近くなって行く傾向にあること、などがわかる。

#### 4.2.2 立方体供試体を用いた厚さ、幅、下敷に関する検討

ここでは、供試体の厚さ、幅、下敷の違いがL値に与える影響について調査するために、立方体形の供試体を用いたエコーチップ硬さ試験を実施した結果について述べる。検討に用いた供試体は、材質がアルミニウム、真鍮、アクリルの3種類、そして形状が立方体形の1種類であり、さらに厚さ(一辺)が1cm、2cm、3cm、4cm、5cmの5種類である。なお、今回は立方体形の供試体を使用していることから、供試体の厚さと幅とは同じ値となる。

測定は、立方体供試体の6つの面の中から任意に1つの測定面を選定し、供試体を金属製の基準テストブロック(L値≒760)の上に置いて1回のみ実施した。ここで、測

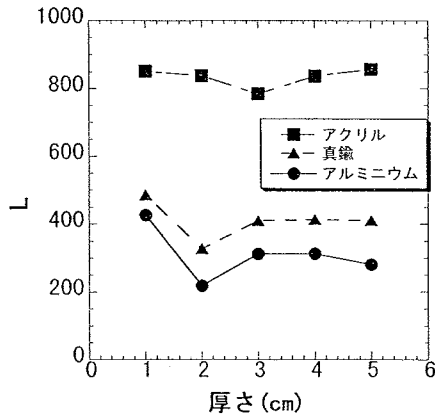


図-7 アルミニウム、真鍮、アクリルにおけるL値と厚さの関係

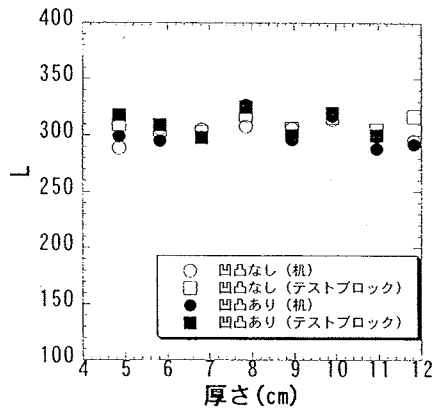


図-8 石膏供試体の上端面における凹凸の有無に着目したL値と厚さの関係

定回数を1回とした理由は、使用した供試体の材質が非常に均質であり、さらに測定位置を変えた事前の予備試験の結果によれば、供試体の種類に関係なくL値の再現性が高かったためである。図-7に、材質がアルミニウム、真鍮、アクリルの3種類で、厚さ(幅)が5種類の立方体供試体を金属製の基準テストブロック上に置いてエコーチップ硬さ試験を実施した結果を示す。同図より、アルミニウムおよび真鍮の両供試体に関しては、供試体の厚さ(幅)が3cm以上あれば、L値はおおむね一定の値を呈するが、厚さ(幅)が3cm以下になるとL値が一定値を示さなくなる傾向が見られる。

#### 4.2.3 粗度に関する検討

ここでは、測定対象となる供試体表面の粗度の違いがL値に与える影響について考察する目的で、4.2.1項で述べたように石膏で作製した円柱供試体の上端面に対して、研磨紙の40番(研磨材の平均粒径 $\approx 400\mu\text{m}$ )で人工的に凹凸をつけた場合のL値の変化について述べる。図-8は、プラスチック製の机(L値 $\approx 290$ )または金属製の基準テストブロック(L値 $\approx 760$ )を下敷として、石膏供試体の上端面における凹凸の有無に着目した場合のL値と厚さの関係を示している。同図より、研磨した上端面のL値と研磨紙の40番を用いて凹凸を施した上端面のL値との間には、

明瞭な差は見られないことが知られる。今回のエコーチップ硬さ試験を実施する際に、上端面にはインパクトボディ先端にある球状テストチップによる傷が付いていたことを考慮すれば、石膏のように試験時において端面に容易に傷が付くような比較的軟質な供試体材料の場合には、研磨紙の40番(研磨材の平均粒径 $\approx 400\mu\text{m}$ )程度の粗度はL値に影響を及ぼさないとと言える。また、この結果は粗度に関する既往の研究<sup>9),10)</sup>の結論と調和的である。

次に、自然の岩石供試体を用いて、より大きな粗度がL値に与える影響について検討を実施した。この検討では、前述の石膏供試体での検討内容をさらに発展させ、粗度に関して定量的な評価と考察を行った。供試体に用いた稲田花崗岩と来待砂岩の2種類の岩石は、直径5cmのボーリングコアを用いた厚さ5~6cm程度の円柱形であり、上端面は粗いが下端面は平面研削盤により整形されており、両供試体の表面粗度は等しくない。粗度の測定方法は、次に示すとおりである。

- ①粗度が大きい上端面の凹凸を、3次元非接触式レーザー変位計<sup>12)</sup>を用いて定量的に測定する。
- ②レーザー変位計が対象とした上端面の測定範囲において、L値を無作為に10回測定する。

以上の方法により、稲田花崗岩と来待砂岩の供試体上端面に関する凹凸の分布状況を測定した結果を図-9に示す。なお、同図中の凡例は、凹凸の程度を1mm単位で区分けして表示したものであり、例えば「5-6」は凹凸の差が5~6mmの範囲にある領域を示す。また、縦横の格子はレーザー変位計(焦点距離:  $40\text{mm} \pm 5\text{mm}$ , 分解能:  $4\mu\text{m}$ )のレーザー光の走査線(0.3mm間隔)を意味している。同図に描かれている供試体上端面の凹凸の最大値に関しては、測定された凹凸の最小値を基準値(0mm)とすれば、稲田花崗岩で6.78mm、来待砂岩で5.78mmと測定され、前者の方が凹凸が1.00mm大きい結果となった。

この図-9で示された上端面の範囲において、エコーチップ硬さ試験を実施した結果を図-10に示す。ここに、同図中の縦軸は、粗度が大きい上端面で得られたL値を $L_0$ 値すなわち平面研削盤により端面整形を施した上下端面(上端面についてはエコーチップ硬さ試験を実施した後)のL値の平均値 $L_0$ (稲田花崗岩:  $L_0=918$ , 来待砂岩:  $L_0=468$ )で割って正規化している。また、図中の数値は、L値の最大値(Max), 平均値(Mean), 最小値(Min)であり、さらに●印と■印の上に重ねられた縦線は、 $L/L_0$ 値の10回分の測定データが分布する範囲を示している。 $L/L_0$ 値の分布範囲および平均値について図-10を見ると、 $L_0$ 値の大きい稲田花崗岩の方が $L_0$ 値の小さい来待砂岩よりも $L/L_0$ 値の分布範囲および平均値がともに小さいことがわかる。換言すれば、試験を実施した両供試体の端面がほぼ同程度の凹凸を有していると仮定すれば、L値は供試体が硬質で

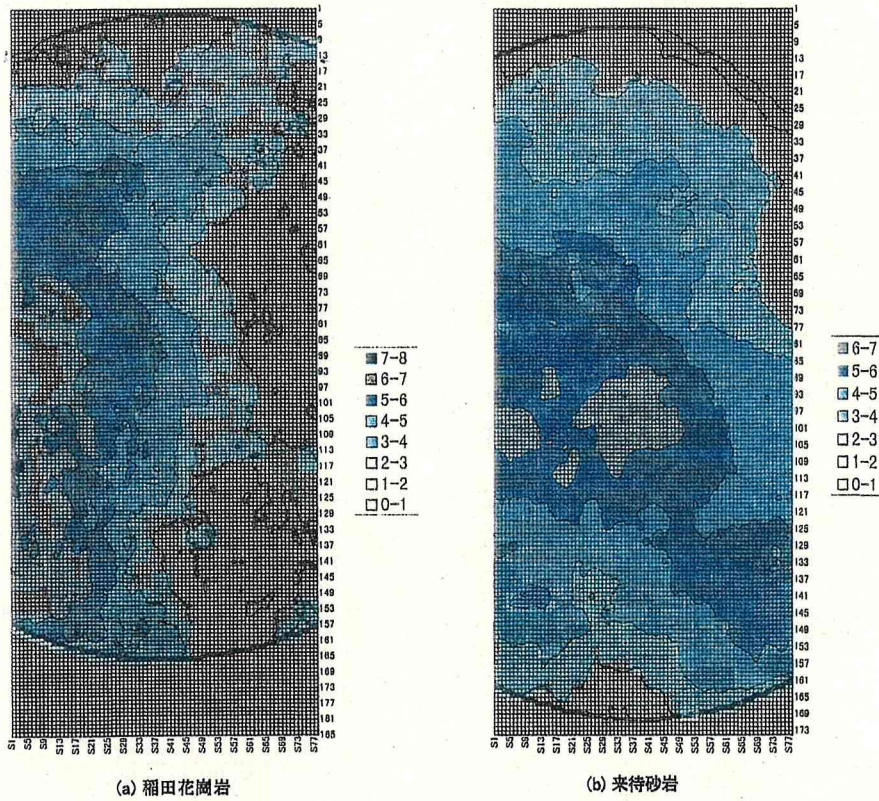


図-9 稲田花崗岩および来待砂岩における供試体上端面の凹凸の測定結果

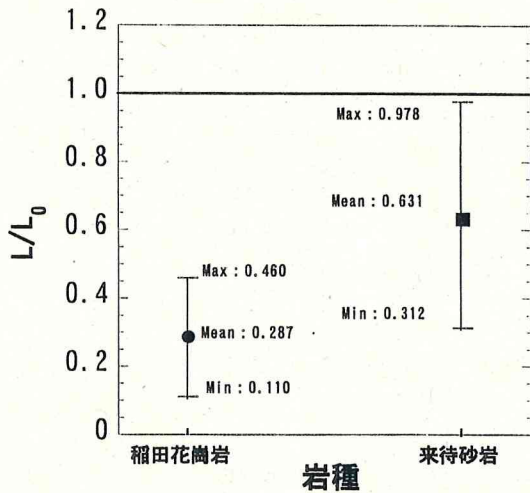


図-10 稲田花崗岩および来待砂岩における供試体端面の凹凸が  $L/L_0$  値に与える影響

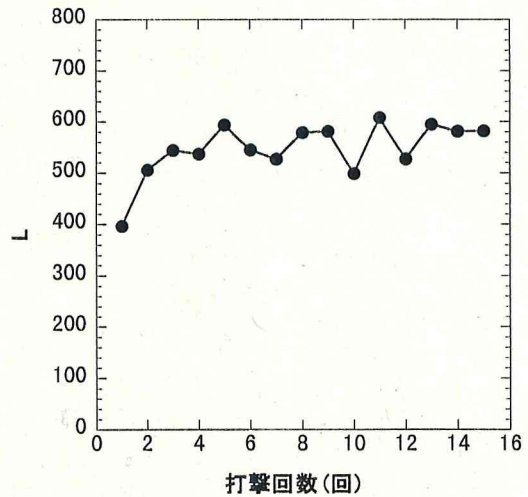


図-11 石膏供試体における  $L$  値と打撃回数(回)の関係

ある方が試験面の凹凸の影響を受けやすいと言える。

なお、凹凸が数 mm 以上と比較的大きい岩石を対象とする場合には、携帯用の電動研磨機などによる研磨や、石膏などを用いた薄い層厚のキャッピングを施すことによって、エコーチップ硬さ試験の実施は十分可能であると考えている。今後、さらなる検討を加え、別の機会に報告したい。

### 4.3 試験方法の違いによる影響

#### 4.3.1 回数に関する検討

エコーチップ硬さ試験を同一測定点で繰り返し実施した場合を想定し、打撃回数と  $L$  値の関係について調査した。すなわち、直径(幅) 5 cm × 高さ(厚さ) 5 cm の石膏によ

る円柱供試体を作製し、刺身包丁を用いて丁寧に整形した供試体上端面の中心部において測定点を固定した状態で連続的に 20 回の測定を実施した。その結果を図-11 に示す。同図より、測定値に多少のばらつきが見られるが、全体的には打撃回数を重ねるに連れて  $L$  値が大きくなる傾向が見られること、打撃回数が 3 ~ 4 回以降になると  $L$  値の増加傾向は小さくなって収束傾向にあること、などがわかる。今回は供試体として石膏を使用した。同様の傾向は自然の岩石を対象とした橋本ら<sup>9)</sup>の検討結果と調和的である。すなわち、北陸地方に分布する新第三紀中新世の安山岩溶岩( $qu=147.9\text{MPa}$ )、角礫状安山岩( $qu=14.9\text{MPa}$ )、

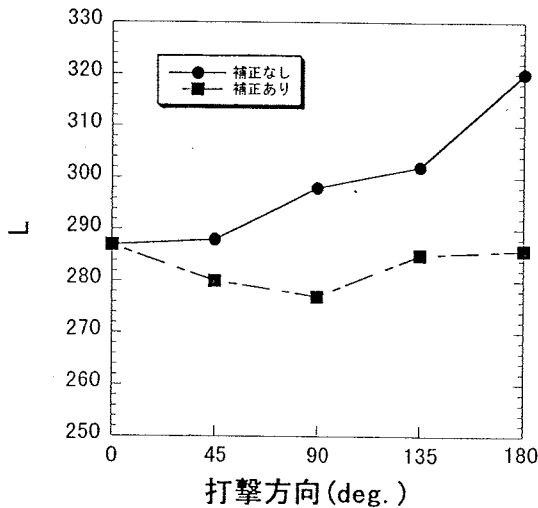


図-12 アルミニウムにおけるL値と打撃方向の関係

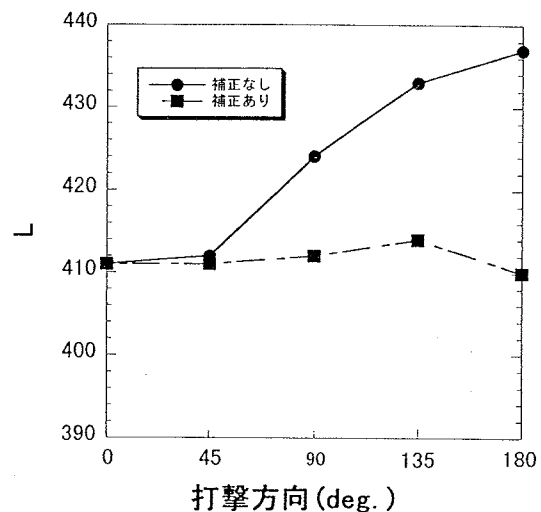


図-13 真鍮におけるL値と打撃方向の関係

凝灰角礫岩( $qu=16.4\text{MPa}$ )のボーリングコア(直径50mm)を用いて同様の検討が実施され、安山岩溶岩では1回目まで、角礫状安山岩と凝灰角礫岩では3回目までのL値が小さいこと、一方、安山岩溶岩では2回目以降、角礫状安山岩と凝灰角礫岩では4回目以降においてL値がほぼ一定となること、などの結果が報告されている。

以上のように、同一測定点におけるL値の測定結果が打撃回数に伴って増加する傾向にある理由は、インパクトボディ先端の球状テストチップが直径3mmと比較的小さく、岩石材料によっては打撃面にめり込む現象が生じるためと推定される。同一測定点におけるくり返し測定は、インパクトボディをチャックに固定する動作時に測定点が動いてしまう場合が比較的多く、また、打撃回数とL値の関係については岩石材料の種類によって異なることから、現時点では1測定点で1回のL値測定を実施するのが適当と考える。

### 4.3.2 方向に関する検討

任意の方向に面している岩盤盤面や複雑な表面形状を有する石造の文化遺産の調査・試験を想定し、エコーチップ硬さ試験の打撃方向を変えることによってL値がどのように変化するか調査を実施した。これは、本試験機ではバネの力によってインパクトボディが供試体を打撃する原理となっていることから、重力方向と打撃方向が異なる場合に正しいL値が測定されない可能性があるためである。今回の検討に使用した供試体は、厚さ(一辺)が5cmの立方体形であるアルミニウムと真鍮であり、これまで主に検討してきた打撃方向である鉛直下向き( $0^\circ$ )から、その逆向きである鉛直上向き( $180^\circ$ )までを $45^\circ$ 刻みで打撃方向を変化させた場合におけるL値の変化を調査した。なお、測定回数は各打撃方向で1回ずつとした。

アルミニウムおよび真鍮の立方体供試体を用いて得られた測定結果を、それぞれ図-12および図-13に示す。こ

で、同図中に記された「補正なし」「補正あり」は、エコーチップ硬さ試験機に標準装備されているL値の打撃方向に関する補正機能の有無を意味している。両図より、アルミニウムおよび真鍮供試体の種類に関係なく、「補正なし」の場合には、打撃方向が鉛直下向き( $0^\circ$ )から鉛直上向き( $180^\circ$ )に近付くに連れてL値が大きくなる傾向が見られ、最大時( $180^\circ$ )には約10%過大なL値が測定されること、一方、「補正あり」の場合には、L値は打撃方向の違いにほとんど影響されず、ほぼ一定のL値が測定されていること、などが知られる。

以上のことから、さまざまな打撃方向に対してエコーチップ硬さ試験を実施する際には、鉛直下向き( $0^\circ$ )の初期設定条件で測定を実施した後に、打撃方向に関するL値の補正を行う必要があると考える。

## 5. 新鮮な岩石を用いた物理・力学特性との関係調査

### 5.1 概要

4章の検討結果を踏まえ、ここでは自然の岩石を対象としたL値と岩石物性との関係について調査した結果を述べる。すなわち、新鮮な(未風化の)岩石供試体および実際の地盤調査により採取したボーリングコアを対象として、L値と代表的な物理・力学特性との相関関係について調査する。

### 5.2 均質性に関する検討

自然の岩石を対象として、ここではエコーチップ硬さ試験機による岩石供試体の均質性の評価に対する適用性について検討を試みる。試験に用いた岩石は、白浜砂岩、多胡砂岩、来待砂岩、白河凝灰岩、田下凝灰岩、稲田花崗岩の6種類である。供試体の形状は、直径5cm×高さ10cmの円柱形であり、両端面の整形については平面研削盤を用いて仕上げを施した。室内要素試験により得られた各供試体の気乾状態における物性値は、表-2に示すとおりであ

表-2 試験に用いた岩石の物性値

	白浜砂岩	多胡砂岩	来待砂岩	白河凝灰岩	田下凝灰岩	稲田花崗岩
Vp (km/sec)	2.13	3.08	2.50	1.72	1.22	4.26
Vs (km/sec)	1.50	1.78	1.79	1.20	1.03	2.78
E (MPa)	10,900	17,500	13,900	6,460	1,130	47,600
qu (MPa)	48.0	15.1	33.7	28.1	13.7	188.0
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.31	2.11	2.14	2.11	1.87	2.62

表-3 供試体の両端面で測定されたL値

	上端面	下端面	平均
白浜砂岩	542	535	538.5
多胡砂岩	297	293	295.0
来待砂岩	485	450	467.5
白河凝灰岩	483	493	488.0
田下凝灰岩	337	439	388.0
稲田花崗岩	917	919	918.0

表-4 供試体の側面上で測定されたL値

	測点0	測点1	測点2	測点3	測点4	平均	標準偏差
白浜砂岩	521	506	530	521	503	516.2	±10.1
多胡砂岩	249	181	169	186	222	201.4	±30.5
来待砂岩	449	451	455	416	422	438.6	±16.1
白河凝灰岩	584	387	462	527	493	490.6	±64.3
田下凝灰岩	441	394	263	306	317	344.2	±65.0
稲田花崗岩	828	797	827	831	840	824.6	±14.4

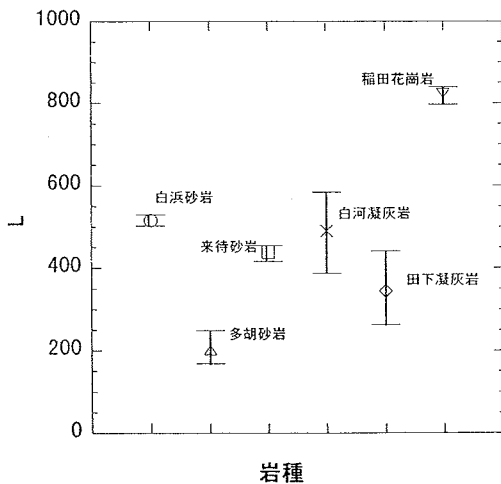


図-14 側面におけるL値と岩種の関係

る。なお、同表中のEは、超音波パルス法によるVp、Vsより求めたものである。一方、均質性に関する試験方法の概要は、次に示すとおりである。

- ①金属製の基準テストブロック(L値≒760)の上に各供試体を横にしておき、供試体の側面上を中央部から片側の端面に向かって軸方向に1cm間隔でL値を測定する。
- ②同テストブロックの上に各供試体を縦にしておき、供試体の両端面の中心部において各1回ずつL値を測定する。

各供試体の端面および側面で得られたL値の測定結果を、表-3および表-4にそれぞれ示す。また、側面上の5回の測定結果の、最大値、平均値、最小値をプロットしたものを図-14に示す。なお、平均値は同図中の記号の位置

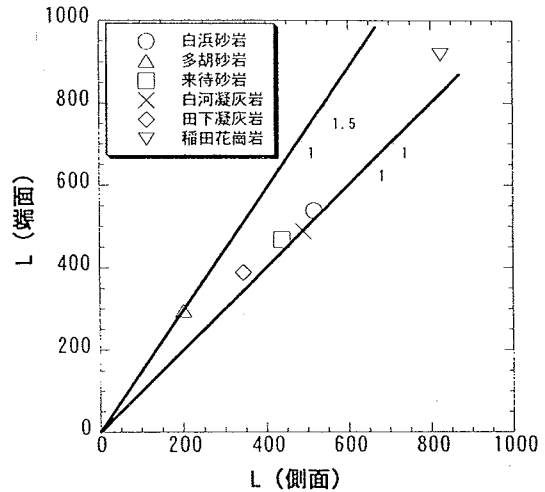


図-15 端面および側面におけるL値の関係

で表現している。同図より明らかなように、岩石を構成する粒子が比較的小さい白浜砂岩や来待砂岩では測定されたL値の分布範囲が小さく値のばらつきが小さい。これを数値的に見れば、表-4より標準偏差で±10.1(白浜砂岩)、±16.1(来待砂岩)となっている。また、粒子が比較的大きく岩石の強度が大きい稲田花崗岩についても同様の傾向が見られ、標準偏差で±14.4と小さい結果が得られた。逆に、構成する粒子が前述の白浜砂岩や来待砂岩よりも比較的大きく供試体表面が粗い岩石である多胡砂岩、白河凝灰岩、田下凝灰岩に関しては、それぞれ標準偏差が±30.5、±64.3、±65.0と大きく、L値としては2~3割程度の範囲でばらつく結果が得られた。以上のことから、構成粒子が大きく強度が小さい岩石において、L値の標準偏差が大きくなるものと考えられる。

次に、端面と側面のL値の関係について検討を試みる。大川ら<sup>10)</sup>は、岩石供試体の端面と側面で得たL値の関係について泥岩、砂岩などの8種類の供試体を用いた比較検討を行い、端面のL値が側面のL値の約0.9~1.0倍の範囲に収まることを報告している。そこで、供試体として用いた上記の6種類の岩石について同様の検討を行った。なお、本検討で用いたL値は、端面では前述した上下両端面において1回ずつ測定して得られたL値の平均値を、側面では前述の5回のL値の平均値をそれぞれ採用した。このようにして得られた関係を図-15に示す。同図からわかるように、今回の検討に使用した6種類の岩石供試体の

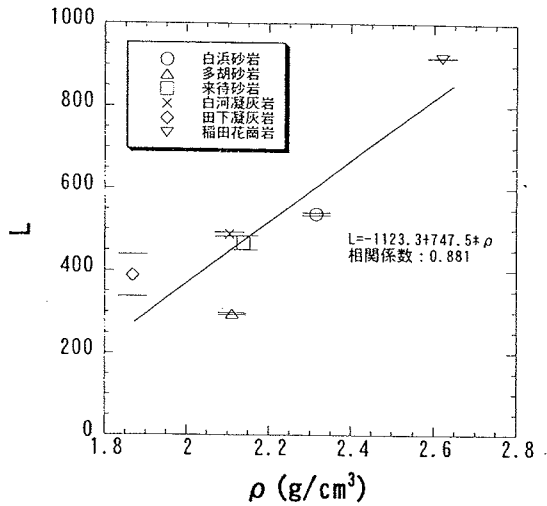


図-16 L 値と  $\rho$  の関係

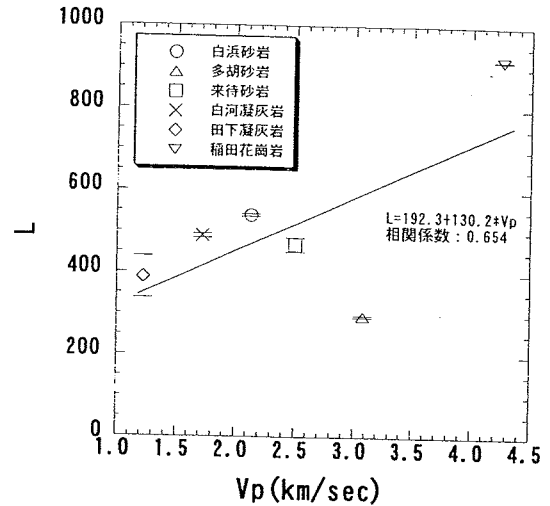


図-18 L 値と  $V_p$  の関係

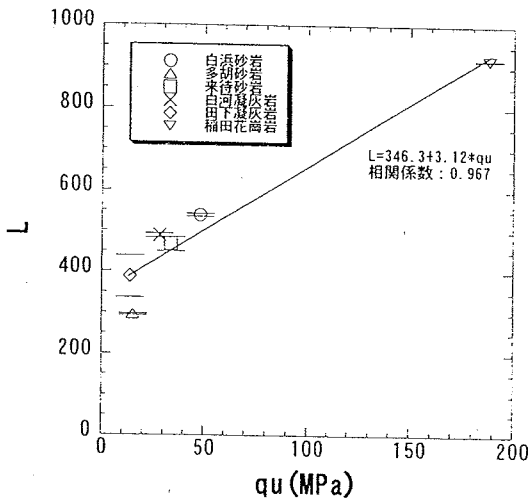


図-17 L 値と  $q_u$  の関係

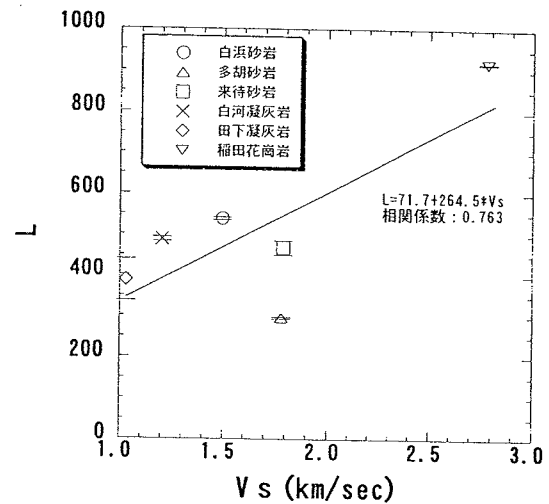


図-19 L 値と  $V_s$  の関係

場合には、端面の  $L$  値は側面の  $L$  値の約 1.0~1.5 倍の範囲に収まる結果となった。このように、端面と側面の  $L$  値が異なる主な理由としては、岩石供試体が有する力学特性の異方性などが考えられるが、側面の  $L$  値のばらつきが大きい多胡砂岩や田下凝灰岩において端面と側面の  $L$  値の間に比較的大きな差が見られることから、供試体側面の表面粗度が大きいことも理由として想定される。今後の検討課題としたい。

### 5.3 物理・力学特性との関係

$L$  値と  $\rho$ ,  $q_u$ ,  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $E$  との関係を、それぞれ順に図-16~20 に示す。これらの図より、岩種による違いを無視すれば、 $L$  値と  $\rho$ ,  $q_u$ ,  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $E$  との間には、いずれも正の相関関係が存在することがわかる。とくに、同図中の  $L \sim \rho$  関係(図-16)および  $L \sim q_u$  関係(図-17)に関しては、ほかの 3 つの関係よりも相関係数が比較的大きく、より強い相関関係が存在していることが知られる。また、ここで見られた相関関係は、既往の研究事例<sup>9),6),8)~10)</sup>の中で報告されている関係と調和的である。

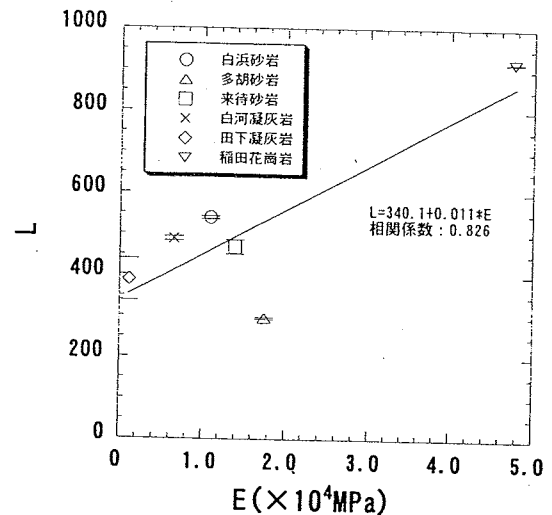


図-20 L 値と  $E$  の関係

### 5.4 実務で得られたボーリングコアを用いた一軸圧縮強度との関係

和歌山県田辺市内より採取されたボーリングコアを対象として、エコーチップ硬さ試験を実施した。そして、得ら

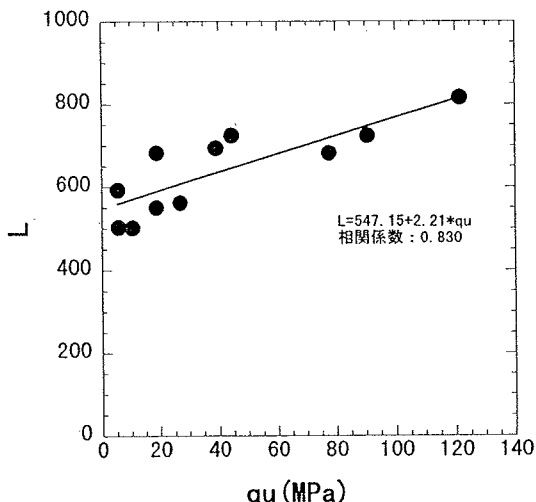


図-21 頁岩(和歌山県田辺市産)における  $L$  値と  $qu$  の関係

れた  $L$  値と  $qu$  との比較を行った。使用した頁岩供試体は、直径 5 cm × 高さ 10 cm の円柱形であり、両端面は平面研削盤を用いて整形を行った。図-21 に、端面の  $L$  値と  $qu$  の関係を示す。なお、対象とした頁岩は割れ目が多くて不均質であったことから、 $L$  値の算出方法は供試体の上下両端面において各 10 回ずつの測定を実施して得られた  $L$  値の平均値を用いた。同図より、 $L$  値と  $qu$  の間に比較的強い正の相関関係が存在することがわかる。また、今回対象とした頁岩のように、割れ目が多くて供試体整形が容易でない岩石の  $qu$  を推定しなければならない場合には、供試体整形を必要とせず、時間的、作業的および経済的に優れているエコーチップ硬さ試験を例えばボーリングコアの側面に対して実施することにより  $L$  値を測定し、求めた  $L$  値から間接的に頁岩の  $qu$  を算出する方法が有効であると考えられる。

一方、 $L$  値と物理・力学特性の相関関係については、基本的に調査地点ごと、あるいは岩種ごとに異なった相関関係が存在するものと考えるのが自然と思われる。この点を明らかにする意味でも、さらなるデータの蓄積が今後の課題である。

## 6. ま と め

本研究で得られた主な知見をまとめると、以下に示す通りである。

- ① 供試体の大きさに関しては、厚さおよび幅が 4 cm 以上あれば、 $L$  値は下敷材料の影響を受けないことがわかった。
- ② 供試体の表面粗度については、石膏のような比較的軟質な供試体材料の場合、研磨紙の 40 番(研磨材の平均粒径  $\approx 400 \mu\text{m}$ )程度の粗度は  $L$  値に影響を及ぼさないこと、また、供試体の端面が同程度の凹凸を有している場合、 $L$  値は硬質な供試体ほど試験面の凹凸の影響を受けやす

いことがわかった。

- ③ 石膏供試体を用いた打撃回数に関する検討の結果、回数を重ねるに連れて  $L$  値が大きくなる傾向が見られること、また、打撃回数が 3 ~ 4 回以降になると  $L$  値の増加傾向は小さくなって収束傾向にあること、がわかった。
- ④  $L$  値と  $\rho$ ,  $qu$ ,  $Vp$ ,  $Vs$ ,  $E$  との間には、いずれも正の相関関係が存在することがわかった。とくに、 $L \sim \rho$  関係と  $L \sim qu$  関係の相関係数が比較的大きく、より強い相関関係が存在する。
- ⑤ 以上の①~④で得られた知見は、既往の研究事例の中で報告されている結論と概ね調和的であることがわかった。
- ⑥ 一方、新たな知見である打撃方向に関しては、さまざまな打撃方向に対してエコーチップ硬さ試験を実施する際には、鉛直下向きの初期設定条件で測定を実施した後に打撃方向に関する  $L$  値の補正を行う必要があることを指摘した。

謝辞 本研究の遂行に際し、基礎地盤コンサルタンツ(株)の松村真一郎および(株)ダイヤコンサルタントの小泉和広の両氏より、岩石供試体の端面整形と力学試験に関してご協力を得た。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金奨励研究(A)(課題番号: 12780107, 研究代表者: 川崎 了)の補助を受けて行われた。末筆ながらここに記して、感謝の意を表する次第である。

## 引 用 文 献

- 1) PROCEQ S. A.(1977): Equotip Operations Instructions, 5th Ed., PROCEQ S. A., Zurich, Switzerland.
- 2) 富士物産(株)社内資料(1998).
- 3) 関 純一・菱山光正・西畑三樹男(1983): 薄板, 紙の反発硬さとその応用, 材料試験技術, Vol.28, No.2, pp.47-52.
- 4) 山形県園芸試験所(1987): 昭和 62 年度ラ・フランス流通改善促進対策事業試験成績, pp.24-25.
- 5) HACK, H. R. G. K., HINGIRA, J. and VERWAAL, W.(1993): Determination of discontinuity strength by Equotip and ball rebound tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, No.2, pp.151-155.
- 6) VERWAAL, W. and MULDER, A.(1993): Estimating rock strength with Equotip hardness tester, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, No.6, pp.659-662.
- 7) 阿南修司(1997): 反発硬度試験の岩石材料への適用, 日本応用地質学会中国四国支部研究発表会発表論文集, pp.15-18.
- 8) 橋本 徹・片川秀基・平野秀次・村上弘行(1998): エコーチップ硬さ試験機による岩石材料の物性評価の試み, 第 33 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1231-1232.
- 9) 橋本 徹・片川秀基・村上弘行(1998): 岩石の力学的性質に対する礫分の影響について, 第 53 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 3 部門(A), pp.676-677.
- 10) 大川哲志・大岡政雄・船戸明雄(1999): 岩石材料への反発硬度試験の適用性について, 第 29 回岩盤力学に関するシンポ

ジウム講演論文集, pp.256-260.

- 11) 吉田昌登・川崎 了・谷本親伯・舩屋 直(2000): エコーチップ反発硬度試験の岩石材料への適用性, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.308-312.
- 12) 谷本親伯・岸田 潔(1993): 3次元非接触式プロファイラー

と最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.57-67.

(2000年2月4日受付, 2000年7月19日受理)

*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, Vol.41, No.4, pp.230-241, 2000

## The Development of Property Evaluation Method for Rock Materials Based on the Simple Rebound Hardness Test

—Investigations on the Effects of Test Conditions and Fundamental Properties—

Satoru KAWASAKI, Masato YOSHIDA,  
Chikaosa TANIMOTO and Tadashi MASUYA

### Abstract

The Equotip hardness tester made in Switzerland is one of the testers developed so as to understand elastic properties and strengths of metallic materials. It is picked up as the characteristics of the tester that a small sample is needed for the test, sampling time is short, and the tester is convenient for portable use. In case of applying the tester to an actual rock structure and a lithic cultural heritage whose shape is complex, it is therefore expected that the tester is able to measure rapidly toward all test directions in the field.

For the purpose of newly developing an evaluation method for rock materials using the tester, this paper reports on especially two objects such as ① investigations on the effects of test conditions (considerations on the size, shape and roughness of rock samples), and ② investigations on fundamental properties of unweathered rock samples (considerations on the relationships to physical and mechanical properties).

**Key words** : Equotip hardness tester, rebound hardness, rock material, property evaluation

## 文献(2)

## 岩石試料への反発硬度試験機の適用性について

### APPLICATION OF HARDNESS TESTER TO ROCK SPECIMENS

大川 哲志\*・大岡 政雄\*・船戸 明雄\*

Satoshi OKAWA, Masao OHOKA, Akio FUNATO

The Equotip Hardness Tester is developed to evaluate the hardness of metallic materials. We found that there was a good correlation between the equotip rebound values and the mechanical properties of rocks, but the rebound value was influenced by some measurement conditions. We tried to examine the influences of measurement conditions on the rebound value, and obtained the following results ;

- The rebound value depended partially on the way of supporting the specimen.
- The rebound value was increased according with the deformation of the hitting point by hitting the same point continuously,.
- The roughness and the curvature of the testing surface caused no major influence to the rebound value.

#### 1. はじめに

ISRM 指針<sup>1)</sup>では岩石の硬度の試験法として、シュミット反発硬度試験とショア硬度試験が挙げられている。シュミットハンマーは、コンクリートの圧縮強度を測定するために考案された装置であるが、原位置岩盤の力学特性を推定するために利用されることも多い。しかし岩石試料に適用する場合には、大きな打撃エネルギーによって試料を破壊する恐れもあり、適用例は多くはない。一方、金属の硬さ試験機として知られているショア硬度試験機は、打撃エネルギーが小さいので小さな岩石片にも適用できるが、測定法が簡便とは言い難く利用頻度は高くはない。

シュミットハンマーやショア硬度試験機と同じ反発硬度試験機のひとつに、金属材料の硬さ試験機として近年開発されたエコーチップと呼ばれる携帯型の簡易な反発硬度試験機がある。橋本ら<sup>2)</sup>は、エコーチップの反発度と岩石の力学特性の間に良好な相関があるとし、この装置が岩石材料に対する簡易な非破壊試験法として有効であることを示唆している。著者らも岩石の力学特性とこの反発度の関係に着目してこれまでに様々な岩石についてデータを蓄積してきた。図-1, 図-2 は既存の試験結果に加えて筆者らが得たデータをプロットしたものである。同図の直線は既存のデータによる回帰直線であるが、筆者らのデータは概ねこの近傍にプロットされているものの、岩種によって異なる傾向を示していることがうかがえる。図-1, 図-2 に示される結果には、このような岩種による影響の他に、測定条件による影響も含まれていると考えられる。岩種による影響を明らかにすることは今後の課題であるが、そのためにはまず測定条件によるデータのばらつきに関する検討が必要と考え、以下の実験検討を行った。

\* 応用地質 (株) コアラボ

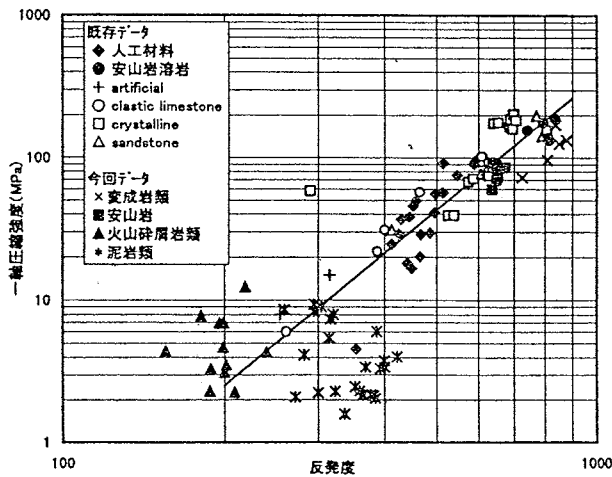


図-1 一軸圧縮強度と反発度の関係  
(橋本ら<sup>2)</sup>に加筆)

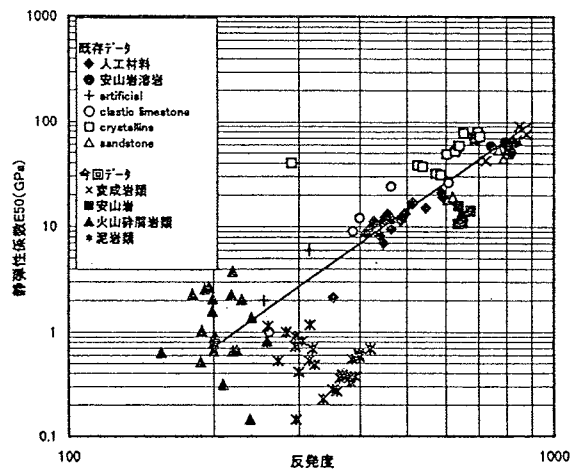


図-2 静弾性係数と反発度の関係  
(橋本ら<sup>2)</sup>に加筆)

## 2. 試験機の特徴と影響要因

エコーチップによる反発度は、ばねの力でインパクトボディーを試験体に打ち付けた時の打撃速度に対する反発速度の比として計測される。

この試験機はシュミットハンマーやショアー硬度試験機に比べて、以下の利点を有している。

- 打撃エネルギーが 11 Nmm と小さく岩石供試体に適用できる
- 反発値がデジタル値で自動収録され多量のデータを容易に整理できる
- 測定法が簡便で個人差が少ない
- 装置が小型軽量でポータブルである

しかし、その反面、反発度に影響を及ぼす以下のような要因が考えられる。

- ① 供試体の大きさ    ④試験面の粗度
- ② 供試体の支持方法   ⑤試験面の曲率
- ③ 連続打撃

このうち、①供試体の大きさについては、橋本ら<sup>2)</sup>や Verwaal et al<sup>3)</sup>が、供試体の直径が 50~60mm 以上、高さが 50mm 以上であれば反発度に及ぼす供試体の大きさの影響はほとんどないと報告している。そこで、以下の検討においては、力学試験に一般に用いられる直径 50mm、高さ 100mm の形状の供試体を試験対象として用いた。

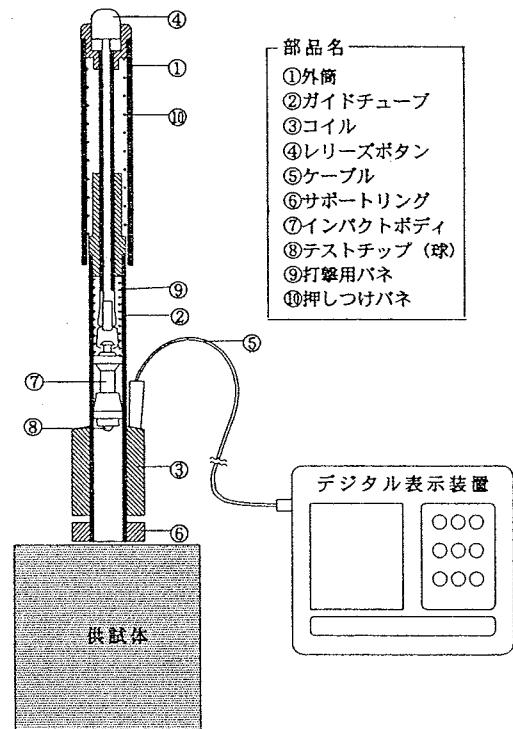


図-3 エコーチップの概要図

## 3. 検討方法と結果

### 3.1 供試体の支持方法の影響

重量が2 kgf 以下の供試体に適用する場合には、頑丈な支持台に固着する方法が推奨されている。しかし、原位置において簡易に測定する場合には、そのような条件が満たされないことも考えられる。そこで支持方法による影響を検討するため、供試体をスポンジ、作業机、鉄塊(テストアンビル)の上に置いた場合と、鉄塊に固着した場合の4種類の条件で比較測定を行った。用いた供試体は、石膏、モルタル、安山岩の3種類とし、端面を#400 のカーボラダムで研磨して試験面とした。図-4には各供試体の端面で場所を変えて10点打撃した時の反発度の平均値と標準偏差を鉄塊固着の場合を1として正規化して示す。

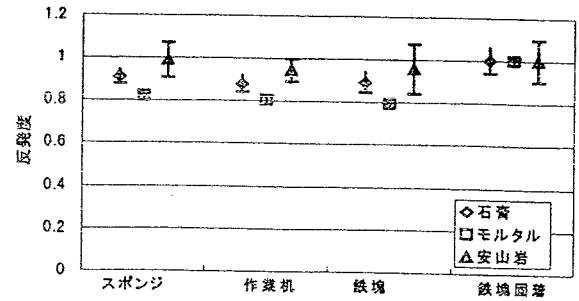


図-4 支持方法による反発度の違い

同図によれば、鉄塊固着に比べて他の条件では反発度が1~20%程度低下しているが、その低下率は供試体の種類によって異なっている。一方、固着しない場合には、どのような台に供試体を置いても反発度にはほとんど差はないことがうかがえる。

### 3.2 連続打撃の影響

石膏、モルタル、安山岩の円柱供試体のほか、テストアンビル、アクリル板の5種類の材料について連続打撃時の反発度と、打撃点の窪み量を測定した。支持方法は、鉄塊固着とした。各供試体について8点の測点を定め、それぞれの測点で1, 2, ..., 8回の連続打撃を行った。

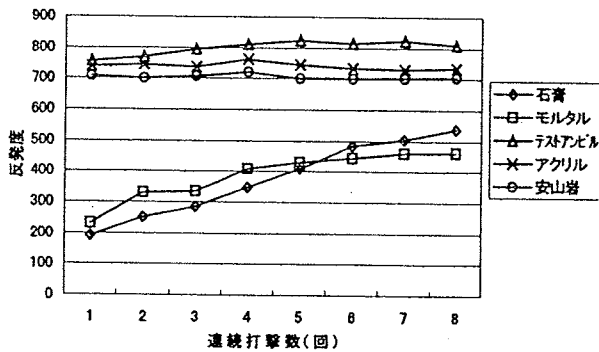


図-5 連続打撃による反発度の変化

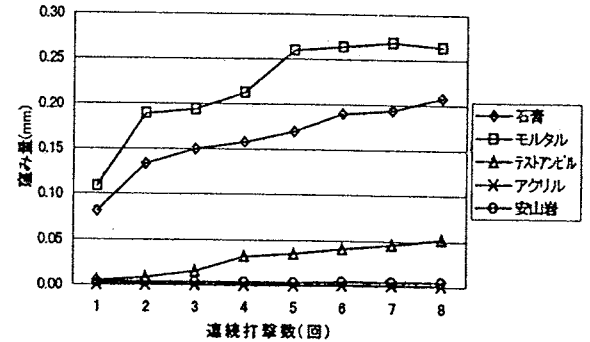


図-6 連続打撃による窪み量の変化

図-5に示すように、石膏、モルタルでは連続打撃数の増加に伴い反発度が増加しているが、アクリルと安山岩では反発度はほとんど一定である。このような差は図-6の窪み量にも表れており、連続打撃数の増加に伴い反発度が大きくなる材料では窪み量も増加しているが、反発度が一定の材料では打撃による窪み量はほとんど零となっている。

橋本ら<sup>2)</sup>は安山岩や凝灰角礫岩について連続打撃数2~4回以降反発度が一定になることを示し、4回以降10回までの最大と最小を除く5点の平均として反発度を整理している。しかし、ここに示したように反発度が一定になる打撃回数は材料によって異なる場合もある。また、石膏やモルタルでは、1回目の反発度に比べて6~8回目の反発度は2倍程度に増加しており、どちらの値を用いるかは十分に検討する必要がある。

### 3.3 試験面の粗度の影響

モルタルについては円柱供試体の端面を#400のカーボランダム、#240の紙ヤスリおよびワイヤーブラシで研磨して3種類の異なる粗度の試験面を作成した。安山岩については、ダイヤモンドカッター切削と#400カーボランダム研磨の2種類の粗度の試験面を作成した。図-7に試験面の粗度を測定した結果を示す。これらの供試体を鉄塊に固着し、同一箇所を8回連続打撃した時の反発度を表-2、図-8に示す。モルタルのワイヤーブラシ研磨面においては、3~4打目まではやや反発度が小さい傾向が認められる。また、紙ヤスリ研磨やダイヤモンドカッター切断面程度の粗さであれば、反発度はその影響を受けないと判断される

表-2 粗度による反発度の違い

		モルタル			安山岩	
		カーボランダム	紙ヤスリ	ワイヤーブラシ	カーボランダム	ダイヤモンドカッター
反発度	1回目	216	228	180	713	711
	8回目	476	490	488	733	715
最大凹凸差 (mm)		0.042	0.095	0.184	0.062	0.127
標準偏差		0.010	0.024	0.058	0.019	0.032

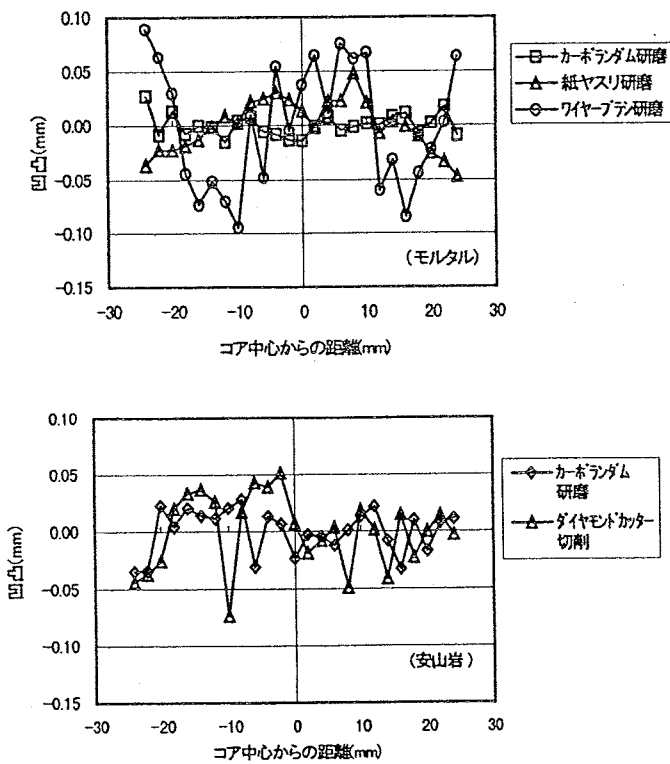


図-7 試験面の凹凸測定結果

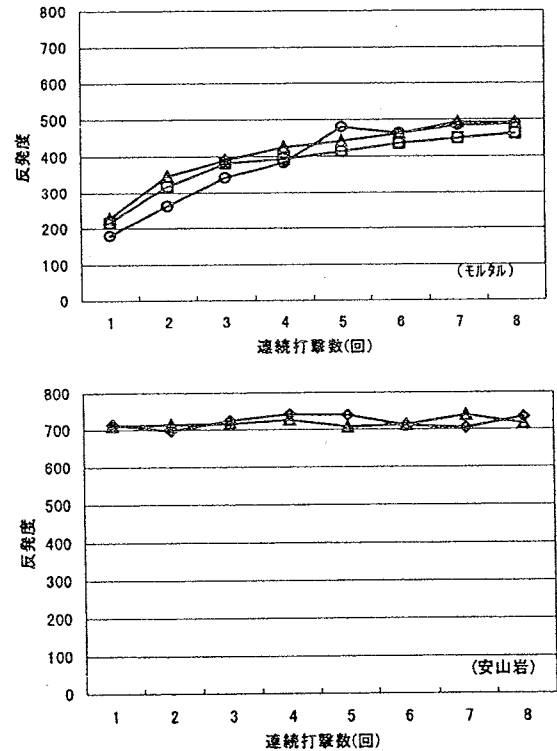


図-8 異なる粗度の試験面における連続打撃結果

### 3.4 試験面の曲率の影響

泥岩、砂岩など8種類の円柱供試体の端面と側面において比較測定を行った。供試体は、ダイヤモンドビットでコアリングした後、端面をダイヤモンドカッターで切断して作成した。支持方法は作業機の上とした。

図-9によると、側面の反発度は端面の反発度の0.9~1.0倍(平均0.96倍)となっている。側面打撃の場合の反発度が小さいのは、サポートリングと供試体側面がしっかり固定されていないこと、打撃方向がコアの中心線と必ずしも合っていないことなどによるものと考えられる。

#### 4. まとめ

エコーチップの反発度に及ぼす測定条件の影響について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①鉄塊固着に比べて台に置く条件では反発度が1~20%程度低下しているが、その低下率は供試体の種類によって異なる。また、台に置く条件では、台の種類にかかわらず反発度にはほとんど差はない。
- ②同じ点を連続打撃した場合、反発度が一定になる打撃回数は材料によって異なる。連続打撃で一定になった時の反発度は、材料によっては1回目の反発度の2倍程度になることもあり、どの値を用いるか十分検討する必要がある。
- ③紙ヤスリ研磨やダイヤモンドカッター切断面程度の平滑さ(標準偏差で0.03mm程度)であれば、反発度に及ぼす粗度の影響はないと判断される。
- ④円柱供試体の側面の反発度は、端面の反発度より4%程度小さな値となる。
- ⑤軟らかい材料は硬い材料に比べて測定条件の影響を受けやすい。

実際にはコア箱に入ったままのコアの側面を測定する機会が多いと考えられるが、今回の検討結果を踏まえれば、以下の点に留意する必要がある。

- ・打撃方向がコアの中心線を通るように試験機をしっかりと固定する。
- ・連続打撃を避け、測定点の近傍で数点測定してその平均をとる。
- ・表面の凹凸の著しい箇所は避ける。

以上のような点を考慮して使用すれば、エコーチップは岩石の力学特性の相対指標値を得るための試験機として十分実用的であると判断される。今後は、反発度に影響を与える他の諸要因についても明らかにし、簡便で精度の高い測定方法を確立したい。また、その上で、様々な岩石についてもデータを蓄積し、岩石の力学特性を評価する指標試験としての有効性を高めていきたい。

#### 5. 参考文献

- 1) 岩の力学連合会：ISRM 指針, Vol.2, 1983.3.
- 2) 橋本 徹・片川 秀基・平野 秀次・村上 弘行：エコーチップ硬さ試験器による岩石材料物性評価の試み：第33回地盤工学研究発表会(山口), pp.1231~1232, 1998
- 3) Verwaal W., Mulder A.: Estimating Rock Strength with the Equotip Hardness Tester, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, No.6, pp.659-662, 1993

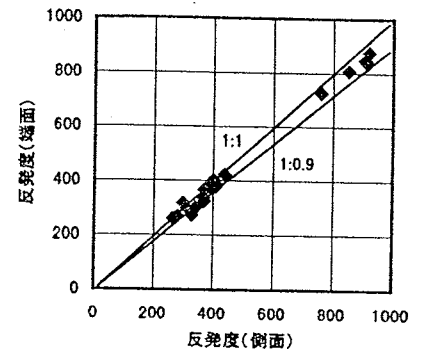


図-9 端面と側面の反発度の関係