

浅川ダム

F-V断層の安全性の再確認結果

平成24年3月31日

長野県

1. 礫の落ち込み原因の考察

(1) 礫の落ち込みが認められる箇所

F-V 断層に沿う礫の落ち込みは、仮排水トンネル呑口、仮排水トンネル呑口～トレンチ 6、トレンチ 5、トレンチ 3 など複数のトレンチで確認された。

この他、仮排水トンネル呑口～トレンチ 5 上流、トレンチ 3 では F-V 断層以外の割れ目に沿う礫の落ち込みが確認された。

F-V 断層以外の割れ目は写真 1.1 に示すように変位はなく、礫の落ち込みを伴う割れ目の方向も様々である。

(2) 礫の落ち込み形状とその形成

礫が落ち込んでいる箇所の断面形状は、幅の狭い板状、V字型、幅広いロート型など一様な形状ではなく、一つのトレンチの中でも V字型からロート型へなど多様に変化している。

基盤をなす裾花凝灰岩はやや軟質であるため、岩盤が水磨される場所では滑らかに湾曲した浸食面となっておう穴のような凹みや U字型の流路を形成しやすい特徴を有している。

一方で、写真 1.2 に示すように、流水により断層破碎帯が流失して薄い板状の空隙が 60° 程度の勾配でオーバーハングしても壁面が自立する状況が確認できる。これは、基盤岩の割れ目が少なく、流水により浸食されて急崖となっても比較的安定する地質的特徴を示している。

このことから、礫の落ち込みの形状は、断層破碎帯の幅や周辺岩盤の硬さに応じた浸食により、板状、V字型、ロート型などの形状の凹みを形成したものと考えられる。

仮排水トンネル呑口からトレンチ 5 の間では、F-V 断層の走向(N25W)に比較的近い北西～北北西-南東～南南東の古流向が観察されており、この古流向と並行して直線的に伸びる F-V 断層は流水によって深掘れしやすく、板状、V字型、ロート型などの形状の凹みを形成したと考えられる。また、トレンチ 3 においては、F-V 断層の方向とほぼ平行な方向の溝状の凹みが複数認められたことから、この方向の流水があったことを示しており、F-V 断層の断層破碎帯に沿って深掘れが進行したと考えられる。

(3) 礫と岩盤の境界の状況

トレンチ 5、トレンチ 3 など明らかに礫支持構造で擦痕がつきやすい砂礫であっても、落ち込んでいる礫や礫と接している岩盤面に擦痕は認められない(写真 1.3)。

落ち込んでいる礫のマトリックスは、トレンチ 3 を除くといわゆる段丘砂礫と同様の砂質マトリックスである。トレンチ 3 は、ロート型～V字型の断面形状を示し、F-V 断層延長想定位置から礫にかけての幅広い範囲にわたって軟質物と円礫が混在しており、軟質物と礫の間に明瞭な境界面が見られない。これは、断層を含めた幅広い範囲の現象であることから、断層運動によって形成されたとは考えにくく、風化・軟質化とその後の礫の堆積によって徐々に軟質な岩盤と礫とが混在するようになったと考えられる。板状～V字型の落ち込みについても、浸食によって開口部が形成されれば、同様の混在が起きると考えられる。

また、礫と岩盤との境界面は、F-V 断層の上盤側であったり、下盤側であったり、両方(板状の場合)であったり、場所により礫の落ち込みが見られないなど統一性が全くなく、調査箇所全体を通して同じセンスの断層変位で説明しづらい。

このように、落ち込んだ礫と岩盤が断層関係で接しているとする状況は認められない。

(4) 礫の落ち込み原因

F-V 断層付近の礫の落ち込みは、①礫と岩盤の境界面や礫に擦痕が認められないこと、②基盤の軟質物と礫が混在し、礫と岩盤の境界面が明瞭でないこと、③礫の落ち込み部と F-V 断層との関係には統一性がないことなどから、F-V 断層への礫の落ち込みは、断層活動以外の原因によって生じたと考える。

流水によって浸食されやすいものの浸食されて急崖となっても比較的安定しているという裾花凝灰岩の地質的特徴により、F-V 断層に沿って様々な形状の凹みが形成されたこと、変位を持たない様々な方向の「割れ目」にも礫の落ち込みが確認されていることから、礫の落ち込みは流水によるものとする。

以上より、F-V 断層への礫の落ち込みは、「流水等により割れ目や断層等の弱部が浸食されて形成された凹みに、礫が徐々に落ち込んだもの」と考える。仮排水トンネル呑口に見られた板状の落ち込みについても、写真 1.2 に示すように断層破碎帯の部分だけが狭長に浸食され板状の凹みが形成されたところに、流水によって礫が充填されたものとする。

注)「礫の落ち込み」という用語は、断層及び割れ目に沿って砂礫等が挟在している現象を示す用語として用いており、「礫の入り込み」、「礫が挟在」という表現も同じ意味で使用している。



写真 1.1 仮排水トンネル呑口法面に見られる礫を挟む割れ目



写真 1.2 ダム基礎掘削上流端法面の F-V 断層の断層破碎帯が流失してオーバーハングをなす。



写真 1.3 トレンチ 5: 礫と接している岩盤面(上)や落ち込んでいる円礫(下)に擦痕は認められない。

2. 地層の変形原因の考察

2.1 地層のたわみの発生原因の考察

2.1.1 地層のたわみの発生場所

F-V断層の直上付近の地層のたわみは、トレンチ5下流壁面、トレンチ1'において確認された。

この他、仮排水トンネル呑口～トレンチ6の間の山側法面、トレンチ5山側壁面においては、F-V断層から離れた箇所において地層のたわみが確認された。

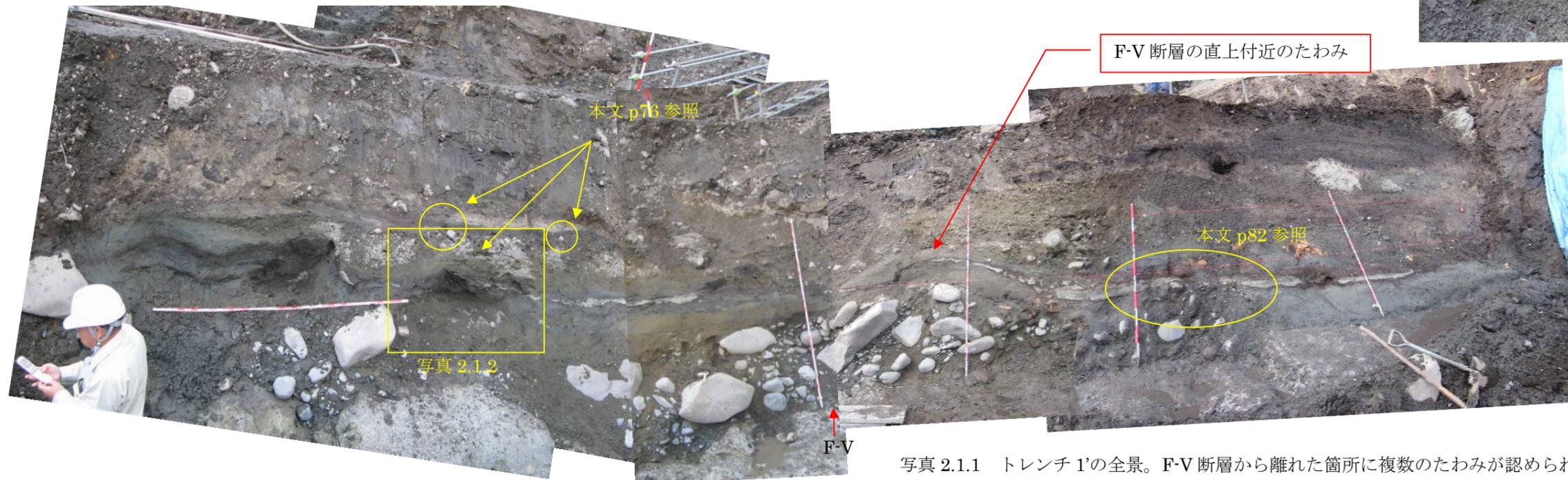
このように、地層のたわみは、F-V断層直上付近だけに限られた現象ではない。その例として、トレンチ1'に認められる地層のたわみの位置を写真2.1.1の全景写真に示す。



有機質土 B

有機質土 B

写真 2.1.2 写真 2.1.1 の黄枠の範囲
巨礫を除去した痕跡に沿って有機質土 B がたわんでいる。



F-V断層の直上付近のたわみ

本文 p82 参照

写真 2.1.2

F-V

写真 2.1.1 トレンチ 1' の全景。F-V断層から離れた箇所に複数のたわみが認められる (黄色枠)。

2.1.2 地層のたわみと F-V断層の詳細位置関係

2.1.1 で述べたように、トレンチ 5 下流壁及びトレンチ 1' では F-V断層の直上付近でたわみが認められた。

(1) トレンチ 1'

岩盤面上の F-V断層とたわみとの詳細な位置関係を図 2.1.1 に示す。岩盤面上の F-V断層とたわみの位置には約 80cm のずれがあり、岩盤面上の F-V断層の直上においては地層の擾乱があるもののたわみは認められない。

F-V断層がわずかに上下変位を伴う左横ずれ断層としての特性を有していることと照らし合わせると、岩盤面上の F-V断層の直上にずれがないため、F-V断層の変位が生じているとは説明できない。



F-V

写真 2.1.3 トレンチ 1' における F-V断層とたわみの位置関係

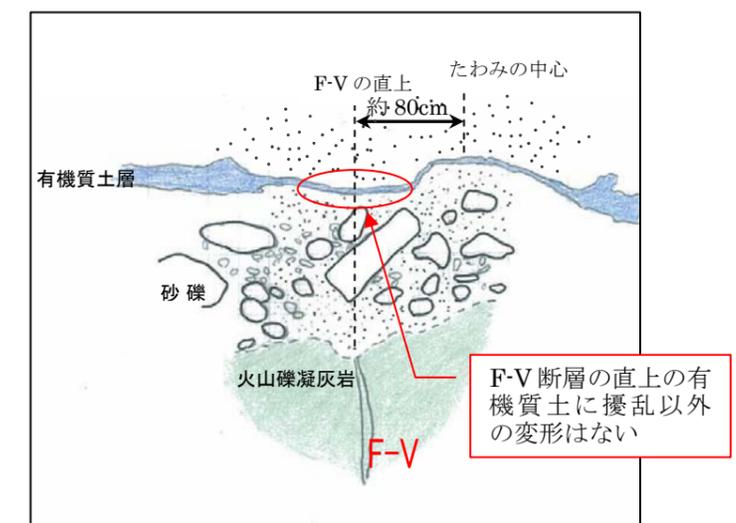


図 2.1.1 トレンチ 1' における F-V断層とたわみの位置関係

(2) トレンチ 5 下流壁

F-V 断層とたわみとの詳細な位置関係を図 2.1.2 に示す。トレンチ 5 下流壁では、写真 2.1.5 に示すように F-V 断層直上の巨礫をとりまくたわみと、巨礫 5A の山側で下向きに落ち込んだようなたわみが認められ、後者は F-V 断層から約 1m 離れた位置にある。これらは 2.2.4 で述べるように、たわんでいる地層のオリジナルな位置との関係から、局所的な地すべりや液状化等によって形成されたと考える。



写真 2.1.4 トレンチ 5 下流壁の全景（最下位の砂礫除去前）

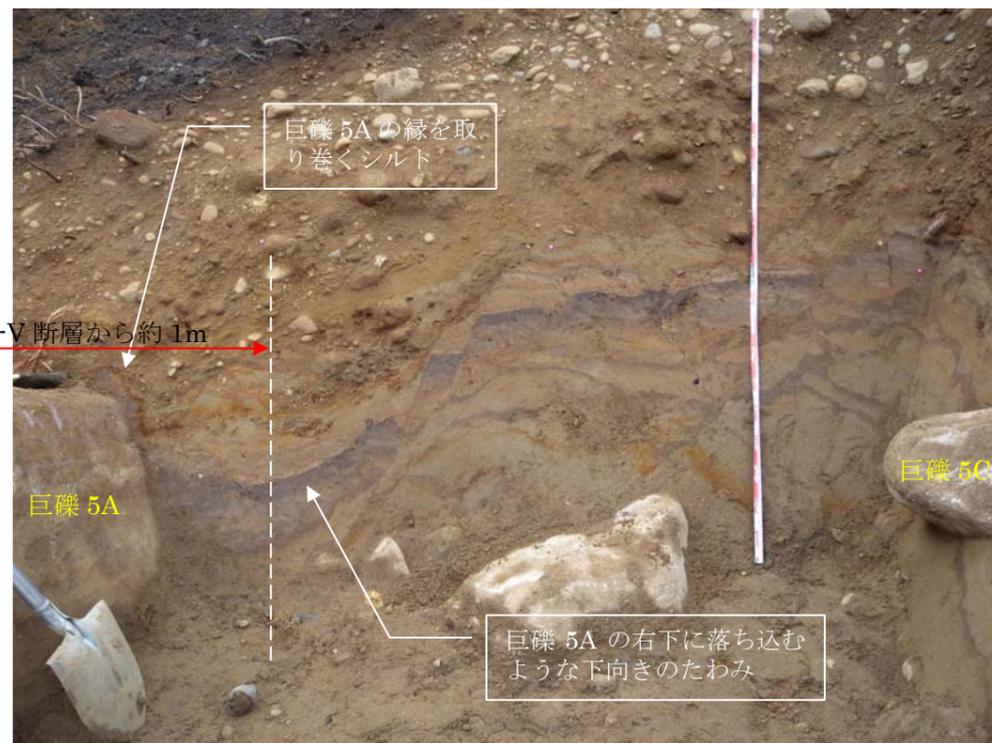


写真 2.1.5 (写真 2.1.4 赤枠内) の写真（最下位の砂礫除去前）
巨礫 5A の頂部をとりまくたわみ（写真 2.1.6 参照）と、巨礫 5A の山側で下向きに落ち込むようなたわみが認められる。

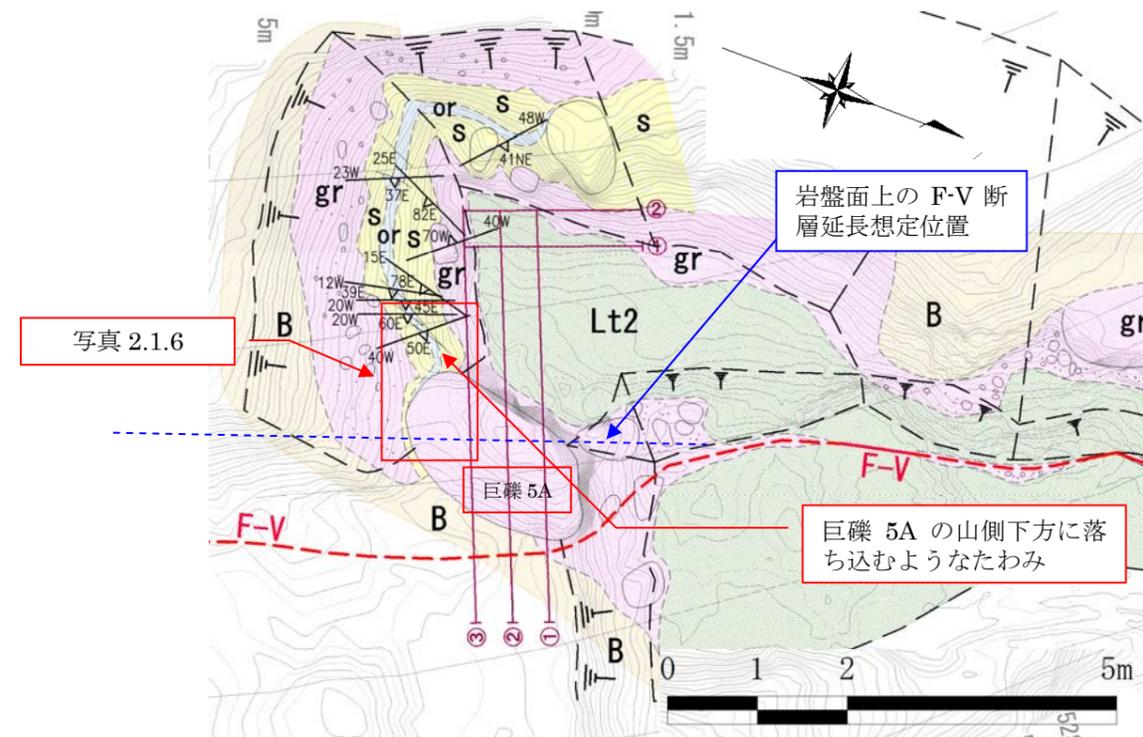


図 2.1.2 トレンチ 5 における F-V 断層とたわみの位置関係



写真 2.1.6 巨礫 5A をとりまくたわみ
(赤破線はたわみの形のみを示している)

2.1.3 地層のたわみの形状

地層のたわみは、F-V断層との位置関係に関わらず、たわんだ地層の下位側に位置する巨礫の密集部や巨礫単体などの上面に沿うように形成されている。これらの例を写真2.1.7～写真2.1.13に示す。

写真2.1.7はトレンチ1'のF-V断層直上付近のたわみで、砂礫層中の巨礫密集部が高まっている付近にたわみが生じている。写真2.1.8は写真2.1.7のたわみを山側に約70cm追い込んだ状況である。写真2.1.8においてたわんでいる有機質土は巨礫密集部の中の特に大きな巨礫1'Aの外周に沿ってたわんでいる。写真2.1.9は写真2.1.8をさらに20cm追い込んだ状況である。写真2.1.8、2.1.9いずれの場合も、地層の厚みは変化しているが巨礫の上面に沿ってスムーズに連続しており、F-V断層の動きによって乱されていない。

なお、写真2.1.9では、巨礫1'A左側で有機質土Bが大きくたわんでいる。これは巨礫1'A左側の地層が低下した結果と考えられる(2.1.7にて詳述)。

写真2.1.11～写真2.1.13はF-V断層の走向と平行する方向に見た場合のたわみの例である。

このように地層のたわみはF-V断層の方向とは関係なく、巨礫密集部や巨礫の形状に依存した形のたわみをなしており、下底面の凹凸がたわみ形成の原因の一つであると考えられる。



写真2.1.7 トレンチ1'中央壁面における有機質土等のたわみ。巨礫の密集部の上面に沿っている。赤矢印がF-V断層



写真2.1.8 写真2.1.7のたわみを山側に約70cm追い込んだ状況。たわみは巨礫の外形に沿うような形になっている。

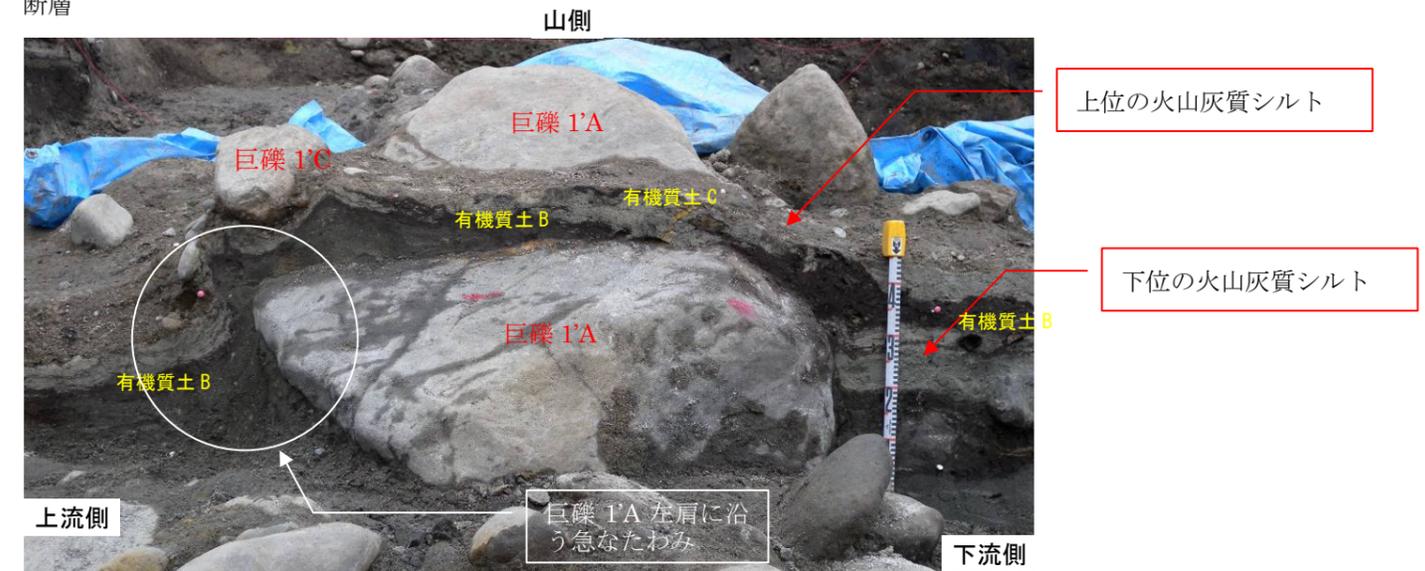


写真2.1.9 写真2.1.8をさらに20cm追い込んだ状況。有機質土B層は巨礫1'Aの右上で一部途切れるが、巨礫1'Aの左右で概ね連続して確認される。上位の火山灰質シルト層は途切れることなく連続している。

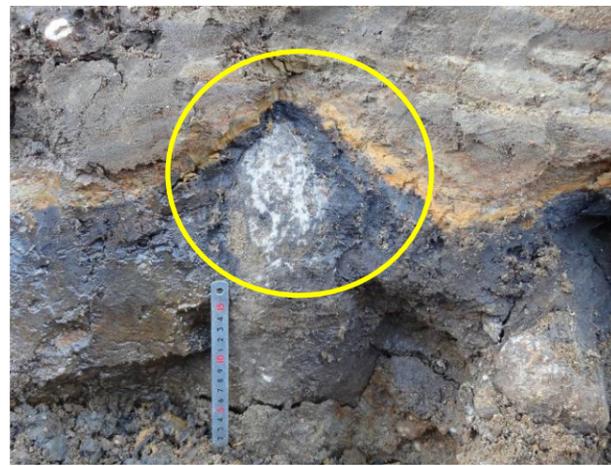


写真2.1.10 仮排水トンネル呑口～トレンチ6の間の法面に見られる地層のたわみ(F-V断層西側約4m)。頂部



写真2.1.11 写真2.1.11右端の黄丸接写。たわみの中心付近で有機質土や火山灰質シルトなどが薄くなっている。白色線位置で横断方向に掘削した結果が写真2.1.12。



写真2.1.12 写真2.1.11の白色線位置での横断面(左右の方向がF-V断層の方向)。巨礫密集部の頂部が低下するとともに、有機質土も傾き下がっている。F-V断層の東側約3.5m。



写真2.1.13 トレンチ5山側壁に見られる巨礫に沿う地層のたわみ。左右の方向がF-V断層方向

2.1.4 地層のたわみの量と基盤岩の段差

(1) トレンチ 1'

トレンチ 1'における F-V 断層直上付近のたわみの量は上下方向で約 25cm である (写真 2.1.14)。これに対してトレンチ 1'の底盤に露出している基盤岩には F-V 断層を境とするはっきりとした上下変位は認められず、わずかに上流側 (F-V 断層上盤側) が低いように見える程度である (写真 2.1.15 の赤破線)。F-V 断層と砂礫層の境界部分を詳細に見ると、F-V 断層を境として約 10cm の段差がある (写真 2.1.16)。

仮に、これを基盤岩における F-V 断層の上下変位としても、たわみの量に比較すると 1/2 以下と小さい。

F-V 断層はわずかに上下変位を伴う左横ずれ断層としての特性を有するものである。横ずれであれば岩盤面上の F-V 断層の直上に切断された兆候があるはずであるが、認められない。

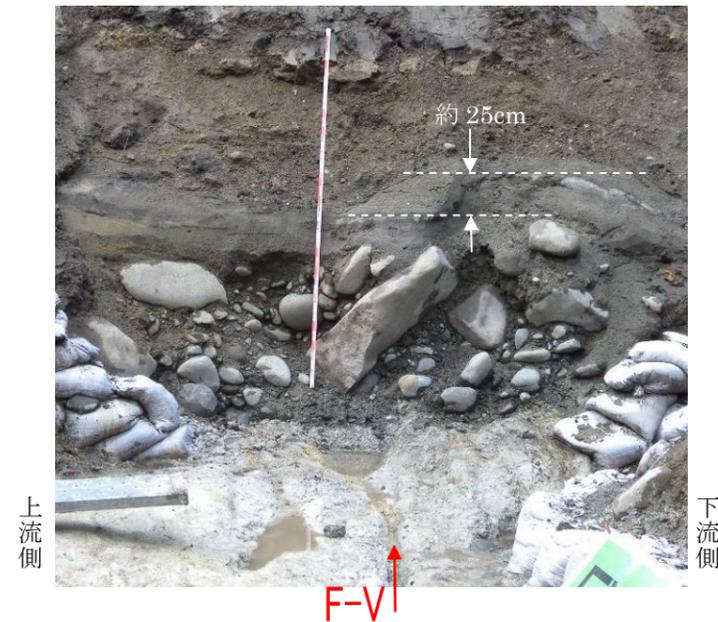


写真 2.1.14 トレンチ 1'における F-V 断層直上付近のたわみ量

(2) トレンチ 5 下流壁

トレンチ 5 下流壁においては、写真 2.1.4 (再掲) に示したように、巨礫 5A の山側で下向きに落ち込むような地層のたわみが認められる。その落ち込みの位置は写真 2.1.4 (再掲) に示すように浸食によると考えられる基盤岩の急な低下の位置に一致している。地層のたわみの量 (落差) は約 35cm、基盤岩の落ち込みは約 60cm である (写真 2.1.4 (再掲))。



写真 2.1.15 トレンチ 1'における F-V 断層を挟む基盤岩の高さの違い

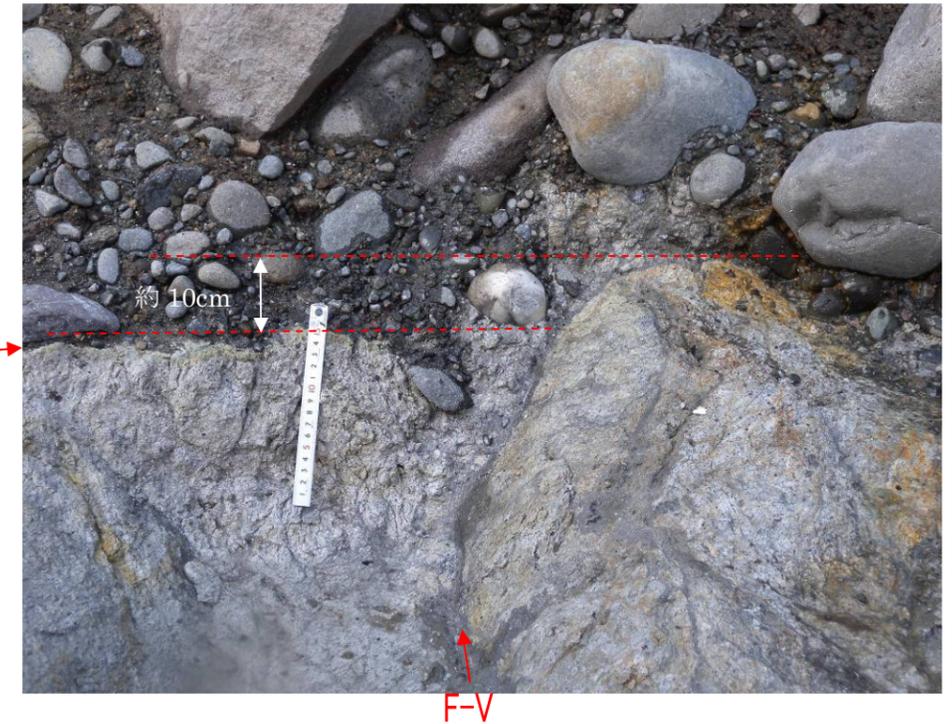


写真 2.1.16 トレンチ 1'における F-V 断層を挟む基盤岩の段差



写真 2.1.4 (再掲) トレンチ 5 下流壁の全景 (最下位の砂礫除去前)

2.1.5 地層のたわみに伴う層厚変化

各所で認められる地層のたわみの特徴として、たわみの頂部で地層が薄くなっていることがあげられる。代表的な例として仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の山側法面における状況（写真 2.1.17）と、トレンチ 1' におけるたわみ層の追い込み時の状況（写真 2.1.18）を示す。

写真 2.1.17 では下位の砂礫層の中から礫が重なり合って突き出ている。その突き出ている礫の外形に沿う形の明瞭なたわみが認められ、礫の頂部では褐色のシルト層が明らかに薄くなっている。

また、写真 2.1.18 では、巨礫右側の火山灰質シルト層は、巨礫右側から巨礫頂部に向けてたわみつつ層厚を減じており、下位のものは頂部に至る前にせん滅している。トレンチ 1' における古流向調査の結果、巨礫左側から右側に向かう流れがあったと考えられることから、巨礫の左（上流）から右側（下流）へ巨礫を乗り越える流水の環境下において、巨礫の上流側～頂部にはシルト層が堆積しなかったと考えられる。このことも、堆積の場に形成されていた凹凸が地層の層厚の変化やたわみの原因になっていることを示している。



写真 2.1.17 仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の山側法面
下位の砂礫から突き出た礫に沿って有機質土層がたわんでおり、上位の褐色のシルト層は礫の頂部で薄くなっている（黄矢印）。

2.1.6 地層のたわみに伴う地層の擾乱

仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の山側法面及びトレンチ 1' において、たわんだ地層そのものに擾乱が認められる。仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の山側法面における有機質土の状況を写真 2.1.19 に、またトレンチ 1' における状況を写真 2.1.20 に示す。

後述のように、このような擾乱は液状化の痕跡と考えられ、たわんだ地層が強い地震動を受けたこと、また、液状化が広く発生することによって地層が乱された可能性があることを示している。



写真 2.1.19 仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の山側法面に現れたピラー構造とみられる構造。有機質砂層は段差を生じているが、段差は同層の下限には認められない。トレンチ 5 にてたわみを生じている有機質土と同層準である。



写真 2.1.20 トレンチ 1' においてたわみを形成している有機質土が受けている擾乱。介在する火山灰質シルトが分断され、断片化している。



写真 2.1.18 トレンチ 1' たわみ部 1 回目追い込み後（写真 2.1.15 より 35cm 追い込み）

巨礫右側の火山灰質シルト層は、巨礫右側から巨礫頂部に向けてたわみつつ層厚を減じており、下位のものは頂部に至る前にせん滅している。

2.1.7 トレンチ1'の地層のたわみにおける地層の細部構造

トレンチ1'におけるF-V断層直上付近のたわみを詳細に観察すると、以下の事項が確認できる。

- A) たわみの左側付近において、有機質土に右上がりの逆断層的な短い段差が認められる(写真2.1.23)。
- B) 有機質土の上位の砂層中には、粗砂の層が介在し、段差は認められない(写真2.1.23)。結果的に粗砂層と有機質土層の間の砂層は、たわみの頂部に向けて有機質土の段差に応じて層厚が薄くなっており、たわみや段差が堆積時に同時進行的に形成されていたことを示す。
- C) たわみに向き合う形で相対するように、左上がりの押し被せ褶曲状の構造が認められる(写真2.1.22)。
- D) 有機質土には擾乱を受けた兆候があるものの、F-V断層によって切断された兆候は全くない。
- E) たわみは巨礫の縁に沿ってスムーズに連続しており、F-V断層の動きによる乱雑な乱れが全くない。

以上のような特徴並びに前項までに述べた事項を考慮すると、この構造をF-V断層の横ずれ変位によって説明することは困難であり、たわみと押し被せ褶曲状の構造の間が、地震時の揺れや液状化に伴って相対的に沈下したために生じた構造と考えられる。

なお、当該たわみ部分の追い込み調査によって、上記A)の構造が奥行き方向に連続して既出写真2.1.9(白丸部分)につながることを確認している。



写真 2.1.21 トレンチ 1' 中央壁面における有機質土等のたわみ。巨礫の密集部の上面に沿っている。赤矢印が F-V 断層

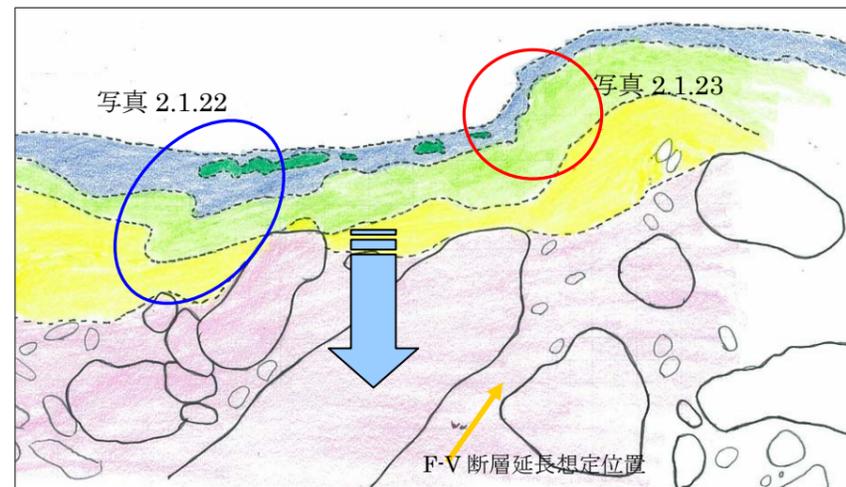


図 2.1.3 写真 2.1.21 の白枠箇所の地質概略図

この位置では、青囲み、赤囲みの位置に相対してたわみが認められる。いずれも逆断層的(左側は押し被せ褶曲状のたわみで段差は生じていない)で、両者の間が相対的に沈下したことが考えられる。



写真 2.1.22 写真 2.1.21 黄色枠内クローズアップ
押し被せ褶曲状の構造が認められる。

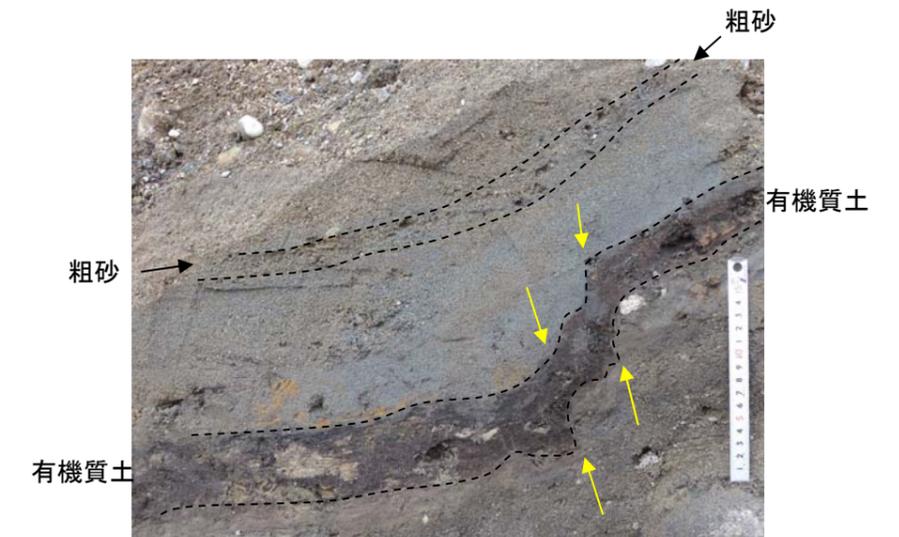


写真 2.1.23 写真 2.1.21 赤枠内の接写。粗砂、有機質土にたわみが認められ、逆断層的な段差も認められる。有機質土中に介在する火山灰質シルトの擾乱(断片化)が顕著。

2.1.8 堆積環境調査結果

以上述べてきたような変形がF-V断層の変位に関連しているかどうかについては、地層が平らな場で堆積したのか、あるいは凹凸のある場で堆積したのかが調査課題となるため、トレンチ1'において試料を採取し、花粉、珪藻などを分析して地層の層相と合わせて堆積時の環境を考察した。その結果、たわんでいる地層が堆積した時期の現地は、湿地～乾燥～河川水の流入など頻りに環境が変化する場所であり、水深のある場で厚い細粒堆積物が一様に堆積したような場所ではなかったと考える。

2.1.9 地層のたわみの形成の原因

地層のたわみはF-V断層の直上だけに限られた現象ではない。

トレンチ5、トレンチ1'ともに、たわみの下位の地層(厚さ約1m)は巨礫の多い乱雑な土石流堆積物であるため、その上面には凹凸が認められる。また、この下の基盤岩にも凹凸が多い。したがって、たわんでいる地層が堆積した面には凹凸があったと考えられ、地層のたわみの形状が巨礫の密集部や巨礫の外形に沿っていることを考慮すると、凹凸のある場所での堆積によって初生的に地層はたわんでいたと考えられる。たわみの頂部で地層が薄くなることや、トレンチ1'で確認したように水深のある場での堆積ではなかったことも凹凸のある場に堆積したことを示している。また、2.1.6で示したようにたわんだ地層には液状化の痕跡と考えられる擾乱が認められる。

以上より、地層のたわみは、堆積した場に存在した巨礫の密集部からなる高まりや巨礫単体のなす高まりに沿って地層が堆積したことによる初生的なたわみが、地震時の振動や液状化に伴って基底面の凹凸がより顕著になることにより、さらに増幅されて生じた現象と考える。

2.2 地層の段差の発生原因の考察

2.2.1 地層の段差の発生場所

地層の段差は、トレンチ 1'において F-V 断層直上付近で確認された。この他、トレンチ 5 下流壁面や山側壁面、トレンチ 3B の最上段法面等においては F-V 断層から離れた位置でも確認されており、F-V 断層直上付近だけに限られた現象ではない。

また、段差は、たわんだ地層の一部がずれて生じているものであり、必ずたわみと組み合わせになって形成されている。

2.2.2 地層の段差の連続性

F-V 断層付近に見られる段差の特徴を示す代表露頭として、トレンチ 5 下流壁③の段差を写真 2.2.1 に、トレンチ 5 山側壁面の追い込み前後の状況 (山側壁①～②) を写真 2.2.2 に示す。これらと F-V 断層との位置関係を示す地質概要図を図 2.2.1 に示す。

トレンチ 5 下流壁では 3 回の追い込みの中で複数の段差が認められたが、いずれも被覆層の中でせん滅して基盤まで達しない。段差の下方には、基盤岩が浸食されて形成されたと考えられるなめらかに湾曲した落ち込みがあり、段差を延長すると、この基盤岩の急な落ち込みに一致するが、F-V 断層の位置とはずれている。

トレンチ 5 山側壁で認められた段差は、約 30cm 程度の追い込みによって消滅し、巨礫をとりまくたわみとなった。

また、トレンチ 1'の F-V 断層直上付近において認められた段差を写真 2.1.23 (再掲) に、F-V 断との位置関係を示すスケッチ図を図 2.2.2 に示す。この段差についても、長さは段差の走向方向に約 30cm 程度、段差の傾斜方向に 10 数 cm 程度とごく短く、基盤岩まで連続していない。

このように、F-V 断層近傍にて認められる段差は連続性に乏しく、基盤まで達している状況は認められないことから、基盤岩中の断層等の変位によって直接的に形成されたものではない。

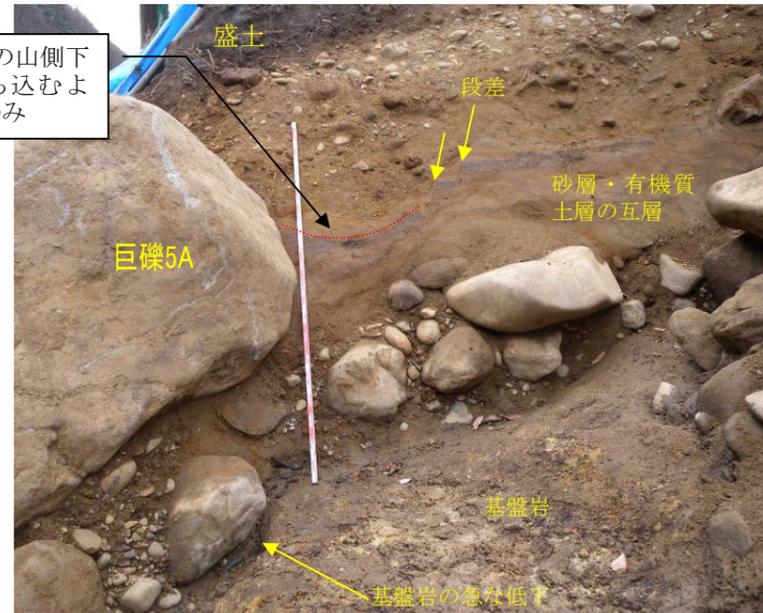


写真 2.2.1 トレンチ 5 下流壁 壁面③
巨礫 5A の山側で下向きに落ち込むようなたわみが有機質土層に認められ、その翼部に段差が生じている。

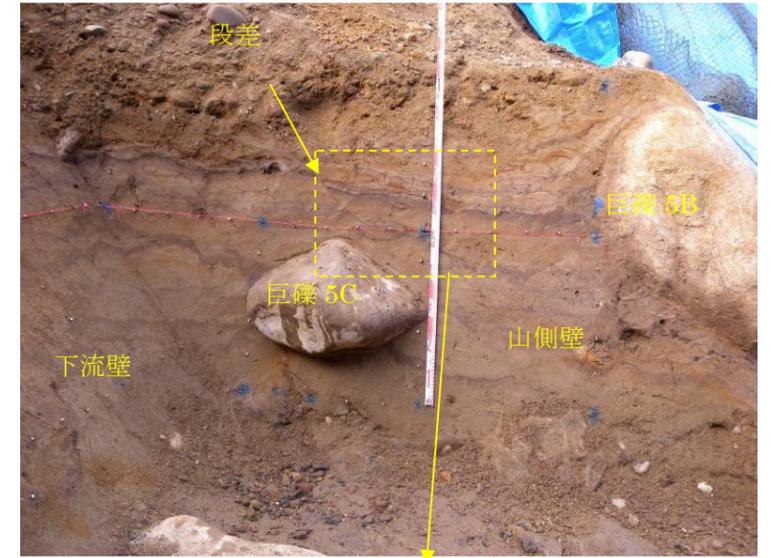
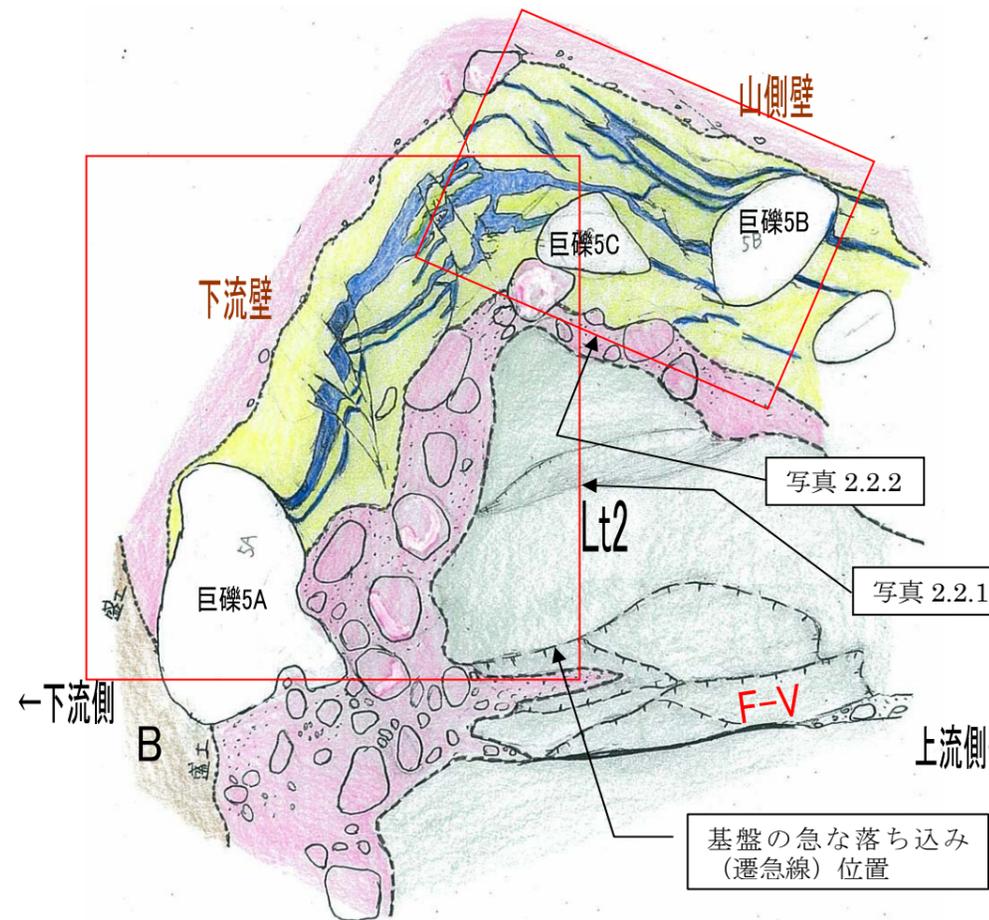


写真 2.2.2 トレンチ 5 下流山側壁① (上) と② (下)
段差は下方へ連続せずせん滅する。また 30cm 程度の追い込みにより、段差が消滅して巨礫をとりまく上に凸なたわみが残る。



凡例	
B	盛土・埋土
■	有機質土
■	細粒砂～シルト
■	粗砂～中粒砂
■	細礫
■	砂礫
Lt2	火山礫凝灰岩

図 2.2.1 トレンチ 5 の下流壁、山側壁と F-V 断層の位置関係を示す地質概要図



写真 2.1.21 (再掲) トレンチ 1' 中央壁面における段差の位置。たわみの一部で段差を生じている。

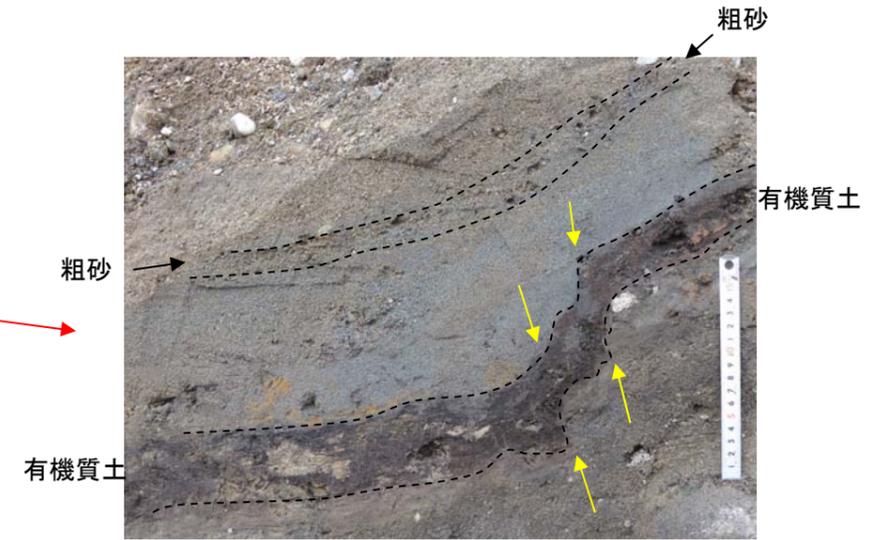


写真 2.1.23 (再掲) 段差は東に急傾斜しており、西傾斜の F-V 断層とは反対方向に傾斜している。

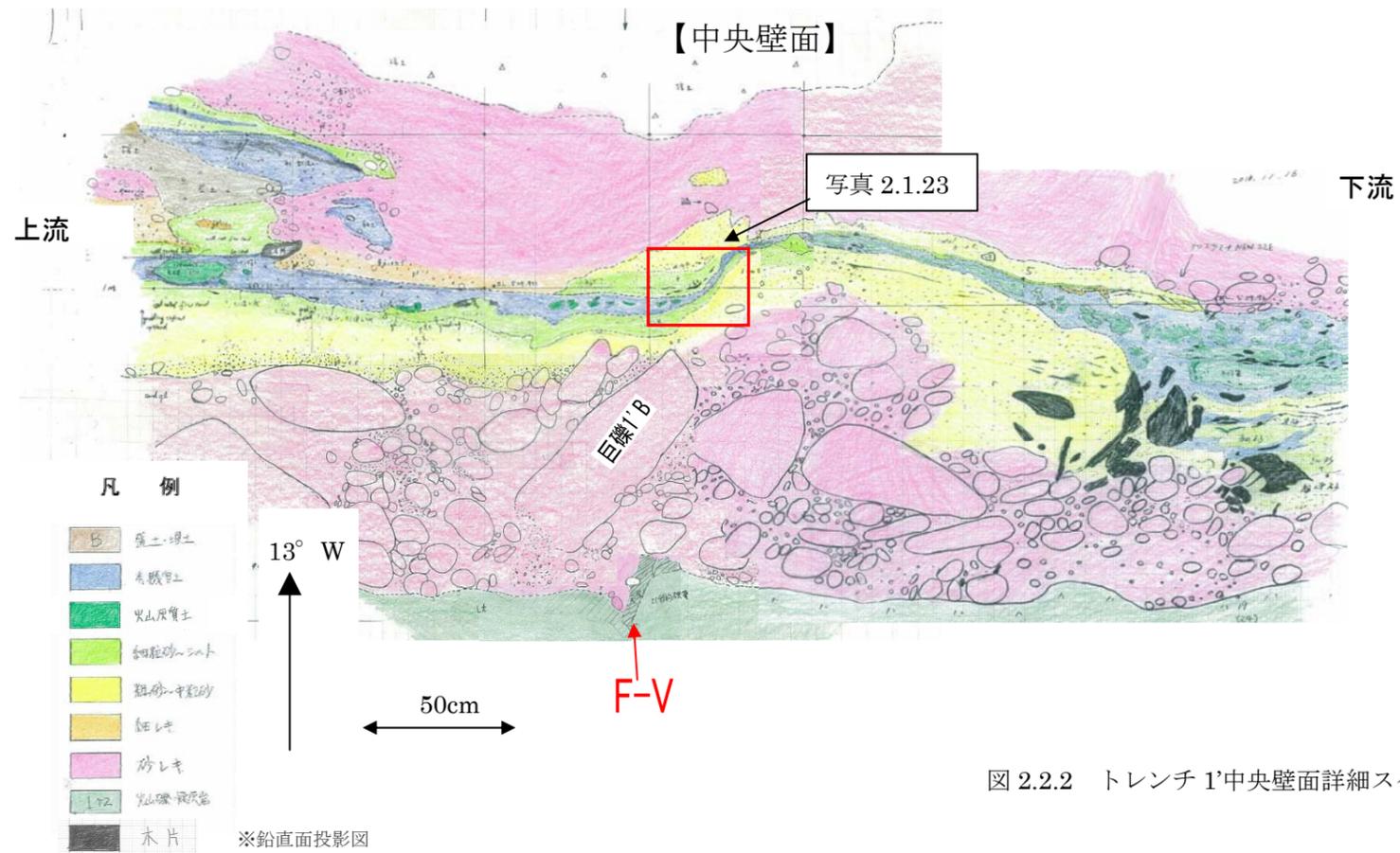


図 2.2.2 トレンチ 1' 中央壁面詳細スケッチ

2.2.3 地層の段差の方向性

図 2.2.3 に、トレンチ 5 下流壁及び山側壁で確認した段差の方向を示す。このように、トレンチ 5 にて観察された段差は、主要なもの全 9 本のうち 8 本が F-V 断層と逆方向に傾斜している。また、トレンチ 1' にて見られた段差についても、写真 2.1.23(再掲)に示されるように F-V 断層とは逆方向に傾斜している。

このように、地層の段差と F-V 断層の傾斜方向は一致しない。このことも、地層の段差が基盤岩中の断層等の変位によって直接的に形成されたものではないことを示している。

2.2.4 段差のずれの向きと巨礫の回転との関係

2.2.2で述べたように、段差はいずれも被覆層内でせん滅して基盤まで達していない。また、段差の想定延長上には基盤岩の急な低下や巨礫の縁が位置している。したがって、F-V断層の変位によって直接的に形成されたものではないと考えられるが、F-V断層が変位した際に礫が回転して段差が発生した可能性が想定される。

図2.2.3に、巨礫5Aが鉛直軸で反時計回りに回転した場合に形成されると考えられる引張り領域と圧縮領域を示す。このように、下流壁で認められる段差の位置は、巨礫5Aの回転によって生じる圧縮領域の前面～側面に位置している。これに対して、下流壁で認められる段差は正断層的な段差であり、圧縮領域に形成されるものではないことから、巨礫5Aの鉛直軸の回転によって段差の形成を説明することはできない。

また、段差を生じている有機質土層は、巨礫5Aをとりまくようにたわんでいる（写真2.2.3）。このため、2.1節で示したたわみの原因を想定すると、もともと巨礫5Aの頂部はたわんでいる有機質土層よりも上に頭を出していたはずである。そこで、図2.2.4に示すように巨礫5Aが水平軸で時計回りに回転しながら下方へ移動した可能性が考えられる。しかし、F-V断層の両側の基盤岩に段差はなく、このような巨礫5Aの移動をF-V断層の変位によって説明することは困難であることから、周辺の広範囲な液状化が巨礫5Aの移動原因と考える。

なお、トレンチ5の東側が浅川右岸の急斜面になっていること、図2.2.5に示すように巨礫5Aの東側は薄い砂礫層を挟んで盛土になっている（一時的に旧地表であった）ことなどを考慮すると、巨礫5Aの移動原因は液状化の他に局所的な地すべり等が原因となったことも考えられる。

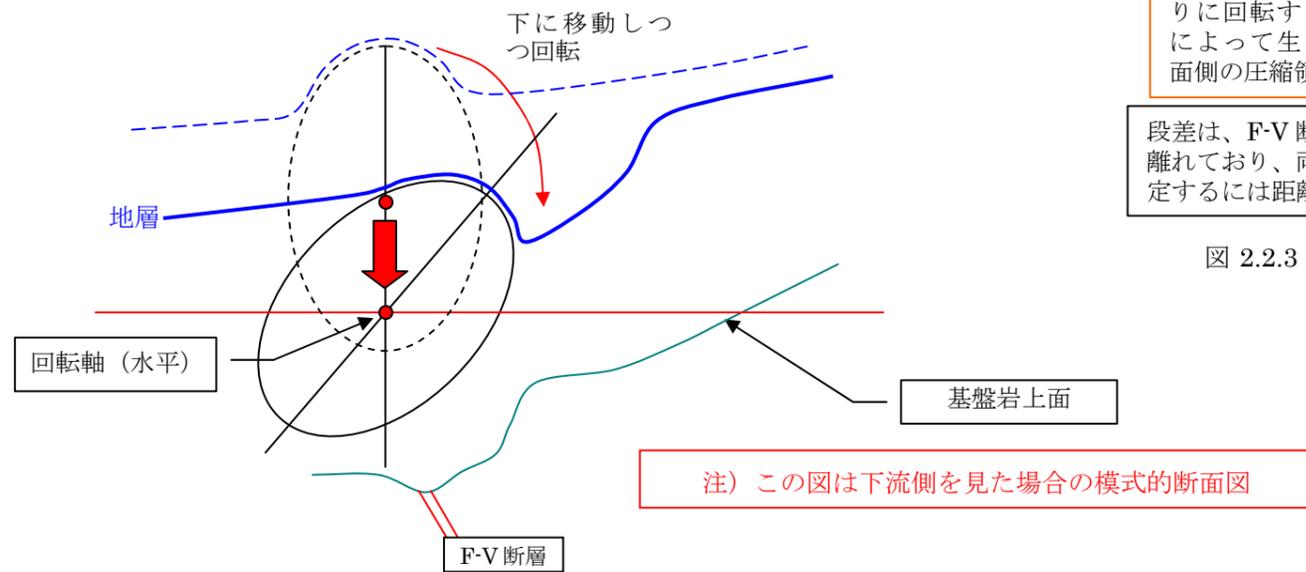


図 2.2.4 巨礫 5A が下方に移動しつつ水平軸で時計回りに回転する場合の模式図

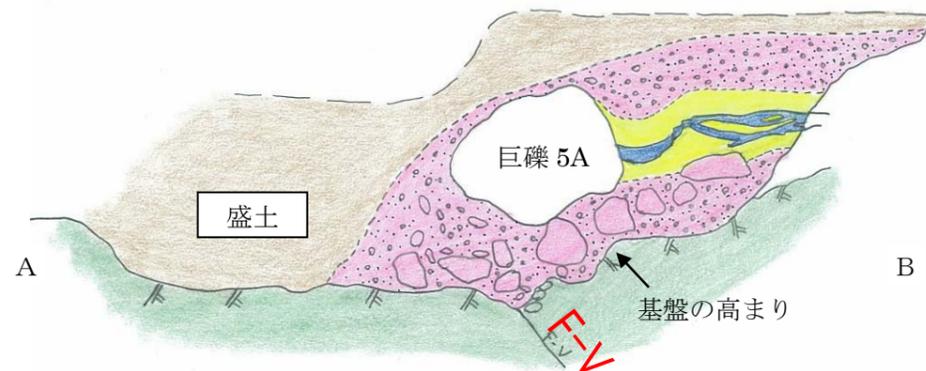


図 2.2.5 トレンチ 5 下流壁法尻付近に沿う概略地質断面

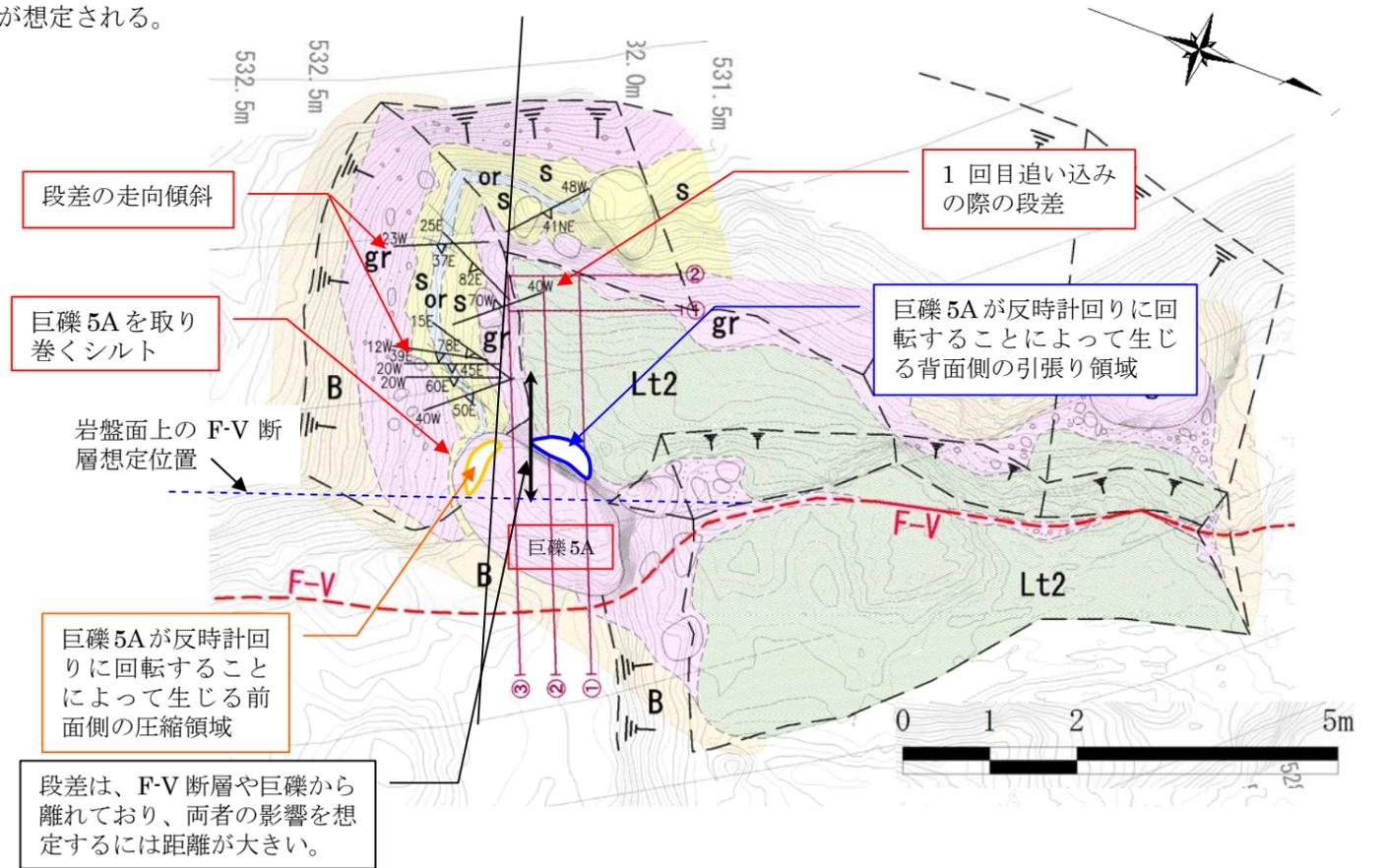


図 2.2.3 トレンチ 5 に認められた段差の方向と、巨礫 5A の反時計回り回転によって生じる可能性のある圧縮領域・引張り領域を示す平面図



写真 2.2.3 トレンチ 5 下流壁③に現れている有機質土層の伸び（最下位砂礫の除去前）。下流壁③の右半部では、有機質土層は川側に緩傾斜している。仮に、変形を受けていなければ、巨礫 5A の上を通過すると考えられる（黄点線）。しかし、有機質土層は巨礫 5A にアバットしており、有機質土層の上部（シルト）が巨礫 5A を取り巻くように湾曲して連続している。

2.2.5 段差周辺の地層の擾乱

地層のたわみについて示したと同様に、段差を生じている有機質土の層準付近には、著しく擾乱した地層が認められる。後述のように擾乱は地層が液状化した痕跡と考えられることから、段差の形成に地層の液状化も関与したことが考えられる。

2.2.6 トレンチ 5、トレンチ 1' 以外の箇所の地層の段差

トレンチ 5、トレンチ 1' 以外で段差が認められたのは、トレンチ 3B (写真 2.2.4) である。

トレンチ 3B の段差は F-V 断層から 20m 程度以上離れた位置で認められるものであり、地層が流動性を保っている間に生じた重力性の段差と考える。



写真 2.2.4 トレンチ 3B 上段法面に認められる段差。F-V 断層からは 20m 程度以上離れている。

2.2.7 地層の段差の形成の原因

地層の段差は、F-V 断層から離れた箇所でも確認され、F-V 断層の直上付近に限られた現象ではない。また、地層のたわみに随伴して見られる構造であり、たわみの形態と段差の向きとは整合的（盛り上がるようなたわみの場合は逆断層的、落ち込むようなたわみの場合は正断層的）であることから、たわみと同じ原因により形成されたと考える。

段差は連続性が無く、走向・傾斜ともに F-V 断層とは異なるため、F-V 断層の変位によって直接的に形成されたとは考えられない。また、付近の巨礫の回転によって形成された可能性も考えられるが、トレンチ 5 の例で検討した結果、F-V 断層の変位による巨礫の回転では説明できない。

したがって、段差は、たわみの形成と同様に、巨礫など不均質な地盤の周辺において初生的にたわんで堆積した地層のたわみが、地震時の振動や液状化等によって増長する際にたわみきれずに段差となったと考える。またトレンチ 3B の例のように、比較的厚い細粒堆積物においては、自重による小規模なすべりを生じて段差となったと考える。

なお、トレンチ 5 は急斜面に近接しており、また一時的に旧地表となったことが考えられることから、局所的な地すべりによる巨礫の移動に関連して形成された可能性がある。

2.3 地層の擾乱の発生原因の考察

2.3.1 地層の擾乱の発生場所

地層の擾乱は、仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の山側法面 (OR-2)、トレンチ 1' (OR-3) で確認されている。写真 2.3.1 に仮排水トンネル呑口法面にて確認した皿状構造と見られる構造を、また写真 2.3.2 にトレンチ 1' 下流部拡幅時の法面で確認したピラー構造やコンボリュート葉理と見られる構造を示す。前者は F-V 断層からは約 8m、後者は 3m 程度離れている。いずれも F-V 断層との位置関係に関わらず、同じ層準内で複数が確認される。

2.3.2 地層の擾乱の特徴と成因

写真 2.3.1(仮排水トンネル呑口法面)や写真 2.3.2 (トレンチ 1' 下流拡幅時の法面) に示した構造はいずれも、液状化した地層から生じた余剰間隙水が移動する際に形成されるものであり、液状化の痕跡と考えられる。

これらが広く認められる OR3 や OR2 は、地震時に広く液状化を引き起こしたものと考える。

2.3.3 液状化を発生させた地震動

調査地は善光寺地震を発生させた活断層帯(長野盆地西縁断層帯)から比較的近い箇所にある。同活断層帯の平均活動間隔は 800～2,500 年とされていることから、調査地はこれまでに数度の地震を経験していると考えられる。液状化を発生させた地震動を明確にすることはトレンチ調査のみからは困難だが、可能性の一つとしてこのような地震動が液状化を発生させたことが考えられる。



写真 2.3.1
仮排水トンネル呑口法面の有機質土とテフラの細互層中に皿状構造と見られる構造が認められる。



写真 2.3.2 トレンチ 1' を下流に拡幅する際の法面に認められたピラー構造やコンボリュート葉理と見られる構造。写真 2.1.20 のたわんだ地層と同層準である。

2.4 地層の変形原因のまとめ

地層の変形のうち、たわみと段差は、たわみの一部がずれて段差となっているなど互いに関連している。たわみ形状と段差のずれの向きが整合的であることから、両者は成因的には同じであり、変形量が多い場合やひずみ速度が速い場合にずれを生じて段差となったと考える。

たわみの形成の原因の一つは、その形状や構造、下位層の凹凸との関係などの検討から、地層が堆積した場の凹凸であると考えられる。F-V 断層の変位や F-V 断層の変位による巨礫の回転だけでは、たわみや段差の形成が説明できないこと、また、堆積環境の面でも水深のある一様な堆積環境ではなかったことなどからも、この原因と考える。

一方、たわんだ地層は著しい擾乱を受けており、過去の地震の際の揺れにより広く液状化したと考える。

以上より、たわみや段差など変形の原因は、「凹凸がある地形の上に凹凸に沿う形で有機質土層等が堆積して形成された地層のたわみが、地震時の揺れや液状化による揺すり込み沈下等により増幅された」と考える。

なお、トレンチ 5 における段差の形成については、たわんだ地層のオリジナルな伸び方向と巨礫の位置関係から、巨礫が移動した可能性が考えられる。しかし、F-V 断層の変位ではその説明が困難であるため、液状化や局所的な地すべりの発生に伴う巨礫の移動が想定される。

3. 粘土の注入

トレンチ3において、粘土状の軟質物を覆っている砂礫を除去した状況を写真3.1に示す。

このように、除去前に筋状の軟質物と見えていた部分は、背後の岩盤に連続している根ありの岩盤であることが確認された。

また、筋状に見えた灰白色の軟質物の表面を削ると、原岩の組織を残していることが確認された

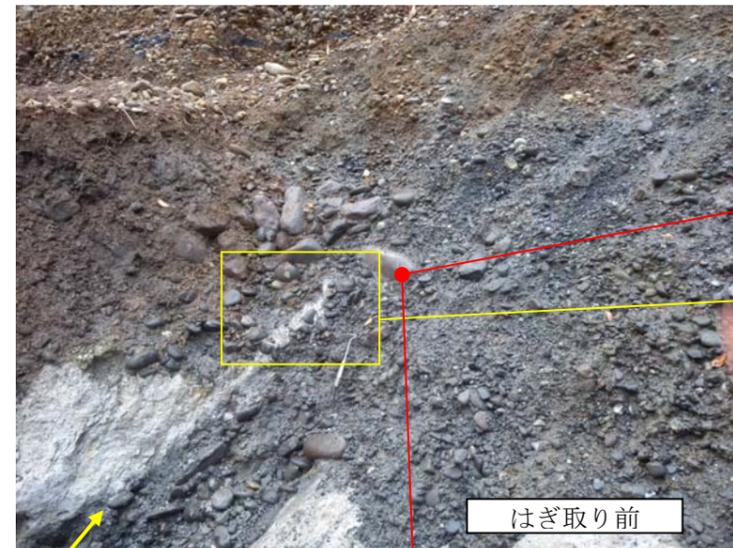
したがって、断層活動によって砂礫層中に絞り出されたものではなく、岩盤の一部が砂礫層に注入しているように見えたものである。なお、本箇所では基盤岩がオーバーハングしているように見えるが、F-V断層上の砂礫層にずれは認められない(写真3.2、写真3.3、図3.1)。



黄丸部分の軟質物の表面を削り込んだ状況のクローズアップ。表面に付着している礫や含水してゆるんだ範囲を除去すると、原岩組織を明瞭に残す部分が現れる。

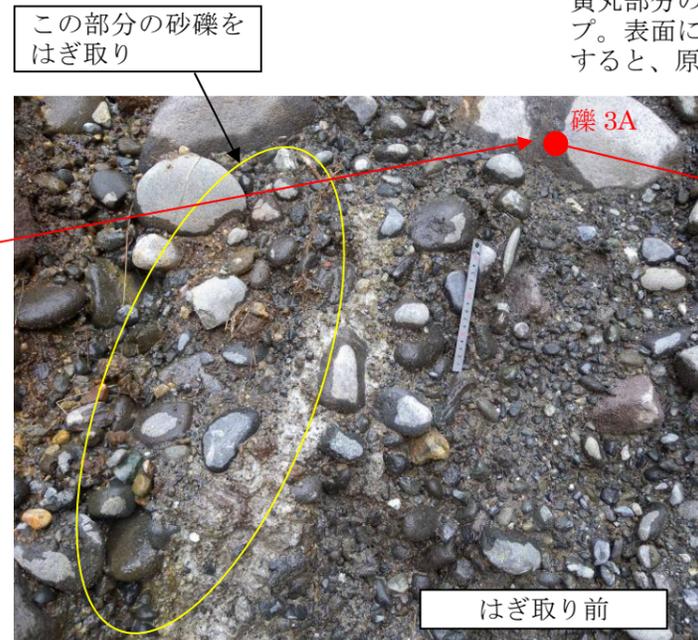


赤丸部分の軟質物の表面を削り込んだ状況のクローズアップ。表面の含水してゆるんだ範囲を除去すると、原岩組織を明瞭に残す部分が現れる。



F-V断層延長想定位置

はぎ取り前



この部分の砂礫をはぎ取り

はぎ取り前



はぎ取り後

写真3.1 灰白色の軟質物の介在部を約80cm追い込んだ前後の状況。はぎ取り後の写真は、やや下方右よりからの撮影。

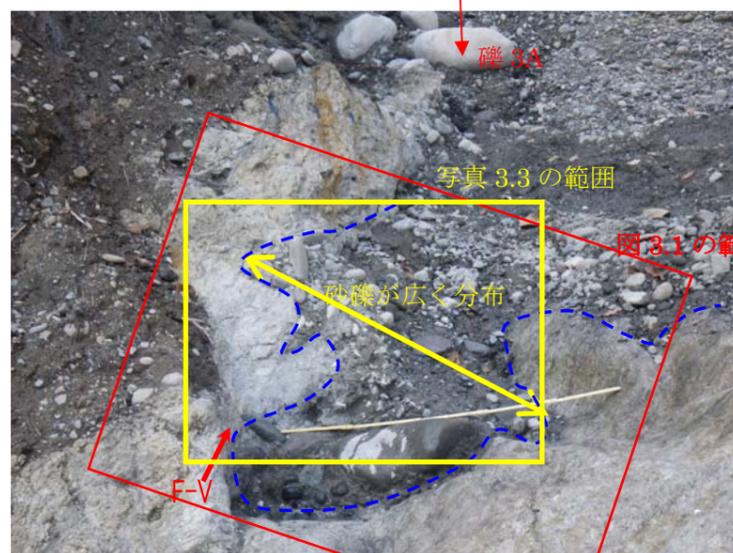


写真3.2 トレンチ3、写真3.1下方のF-V断層と砂礫の関係を正面から見る。



写真3.3 写真3.2の黄枠内砂礫はF-V断層を覆って広がっており、F-V断層に沿ってずれていない。

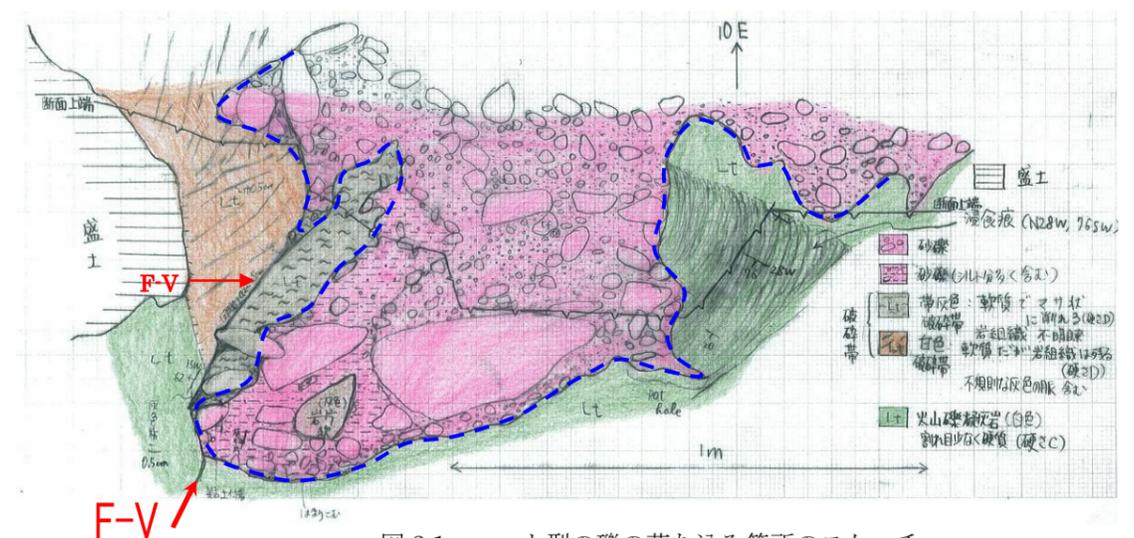


図3.1 ロート型の礫の落ち込み箇所のスケッチ F-V断層の延長上で砂礫層はF-V断層に切られていない。

4. 岩盤面の凹凸

4.1 岩盤面の凹凸調査箇所の状況

基盤岩の表面に残されている浸食の痕跡を変位基準と考え、仮排水トンネル呑口～トレンチ6およびトレンチ5上流側の岩盤面において砂礫等の被覆層を除去して岩盤面の状況を精査した。

ここでは、(1)仮排水トンネル呑口～トレンチ6の間における浸食面の凹凸分布状況、(2)トレンチ5上流岩盤面における浸食面の状況、(3)トレンチ5上流岩盤面におけるF-V断層を挟んだ凹みの状況を示す。

(1) 仮排水トンネル呑口～トレンチ6の間における浸食面の凹凸分布状況

3D画像を図4.1.1に、3Dスキャンにより作成した5cm等高線図を図4.1.2に、全景を写真4.1.1に示す。調査の結果、以下の特徴が挙げられる。

- A) 岩盤露出範囲には、浅く小規模な凹みが多いが、仮排水トンネル側には写真4.1.2に示すような直径約3mの馬蹄形の凹みが発達している。深さは約50cmである。凹みの縁は一般に急勾配で、一部にオーバーハングがある。
- B) 凹みの縁に沿って赤褐色酸化が顕著であり、締まりの良い砂礫が付着している。
- C) この馬蹄形の凹みの中央付近をF-V断層が横断しているが、凹みの外形がF-V断層の両側で食い違っている状況は認められない。

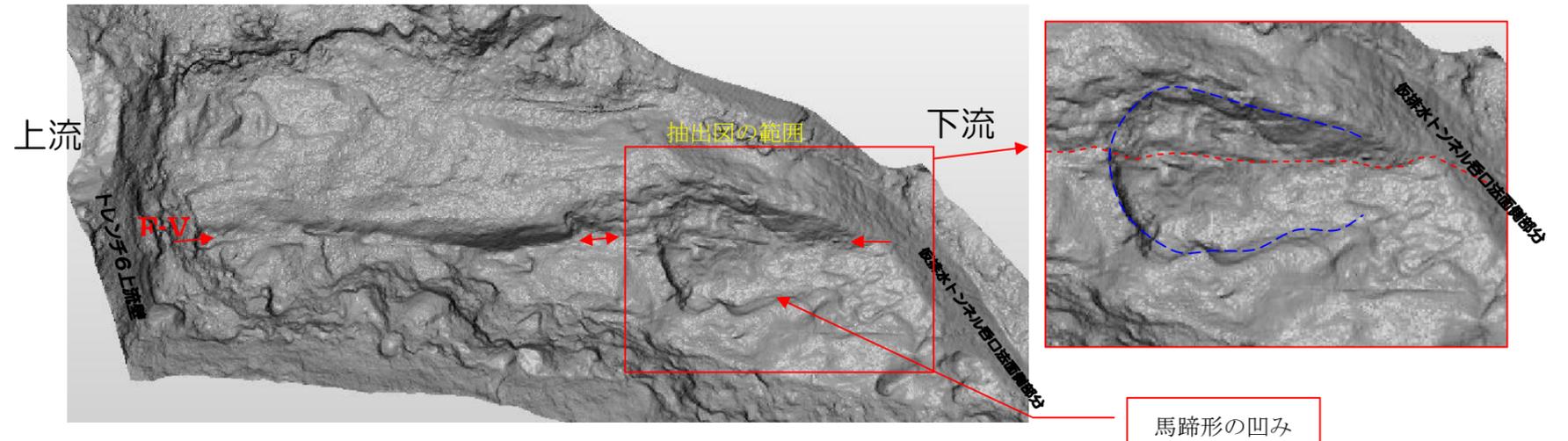


図 4.1.1 仮排水トンネル呑口～トレンチ6の間のF-V断層を挟む測線沿いの地形断面（赤矢印がF-V断層）



写真 4.1.1 仮排水トンネル呑口～トレンチ6の間の基盤上面凹凸（赤点線がF-V断層）

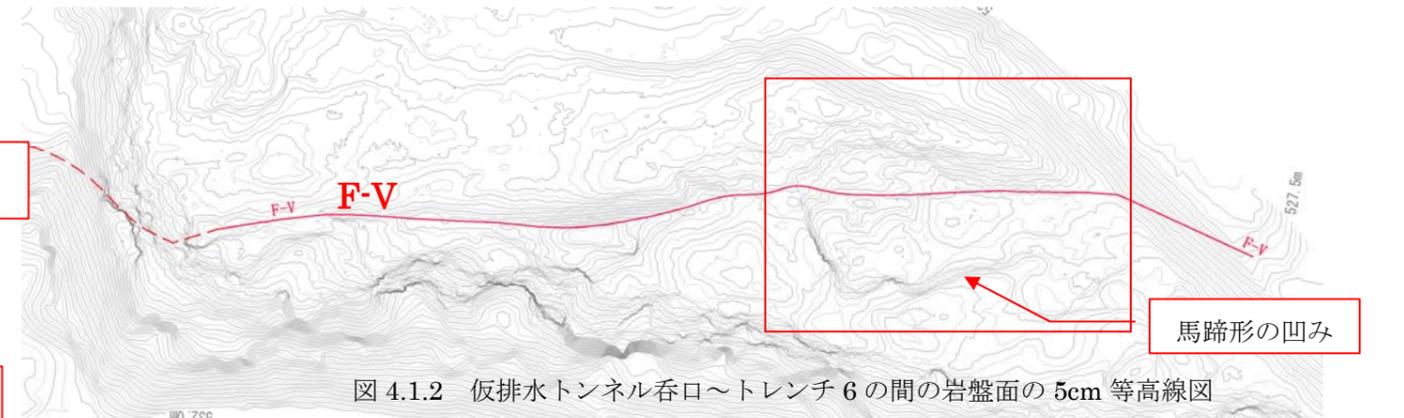


図 4.1.2 仮排水トンネル呑口～トレンチ6の間の岩盤面の5cm等高線図

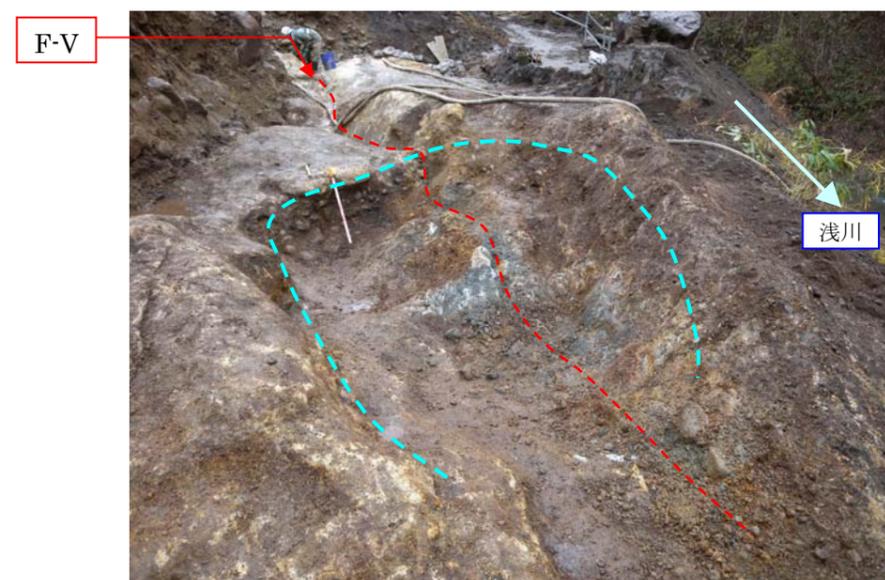


写真 4.1.2 岩盤面の調査範囲下流部の馬蹄形の凹み



写真 4.1.3 岩盤面の調査範囲下流部の馬蹄形凹み（上流側から見る）

(2) トレンチ5 上流岩盤面における浸食面の状況

岩盤面に見られる浸食面の全景を写真 4.1.4 に、侵食面の 3D 画像を図 4.1.3 に示す。

- A) 観察範囲の浸食面は概ね 30° 以上の比較的急な上部の斜面と、概ね 30° 以下の下部の緩斜面に区分でき、下部の緩斜面にはおう穴が認められる。
- B) 斜面下部の現河床に近い範囲では、緩やかに湾曲する浸食面が一面性を持って連続する (写真 4.1.4 中の d 面)。
- C) 斜面の上部は F-V 断層を境に浸食面の形状が異なり、連続的な面としては F-V 断層の断層面を含め、a~c の面よりなる。a 面 (F-V 断層の断層面) を挟む b 面と c 面の段差は、上下方向で約 45cm~50cm、水平方向で 70cm であるが、F-V 断層に向かって左側の b 面は凸型の浸食面で、右側の c 面は凹型の浸食面をなす。よって両者の形状は異なる (図 4.1.3)。
- D) 斜面の肩付近では、F-V 断層を挟んでほぼ同じ高さに岩盤面が分布する。
- E) b 面、a 面、c 面は、いずれも同程度の酸化鉄が付着し、断層面に風化の程度の差は認められない。

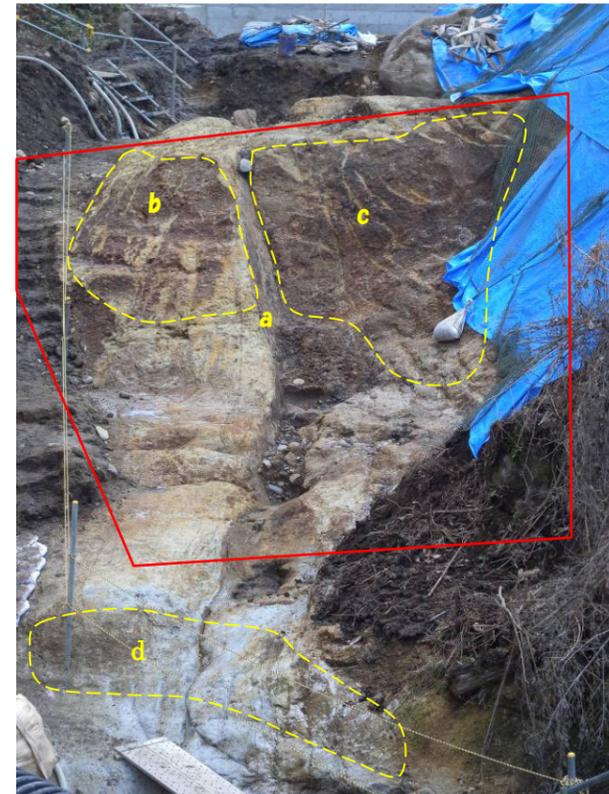


写真 4.1.4 トレンチ5 上流岩盤面に認められる連続する浸食面 a~d の分布 (赤枠は図 4.1.3 の範囲)

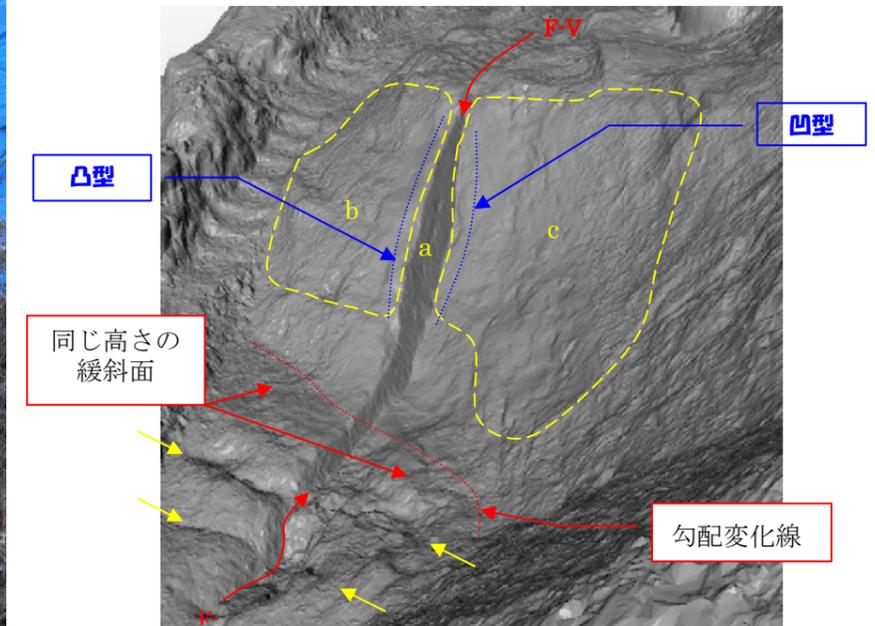


図 4.1.3 トレンチ5 上流岩盤面における基盤の凹凸
黄色矢印が溝状の凹み

(3) トレンチ5 上流岩盤面における F-V 断層を挟む凹みの位置の状況

全景を写真 4.1.5 に、3D 画像を図 4.1.4 に示す。

これらに黄矢印で示しているように、凹みは F-V 断層を横断する箇所
で F-V 断層沿いの浸食によって部分的に途切れるものの、F-V 断層を挟
んで2対の凹みが一致した位置に存在しているものが認められる。



写真 4.1.5 トレンチ5 上流岩盤面の下部。図 4.1.3 に示した岩
盤面下部に認められる溝状の凹みを下流側から見る。2つの凹
みが対になって F-V 断層をまたいで連続している。

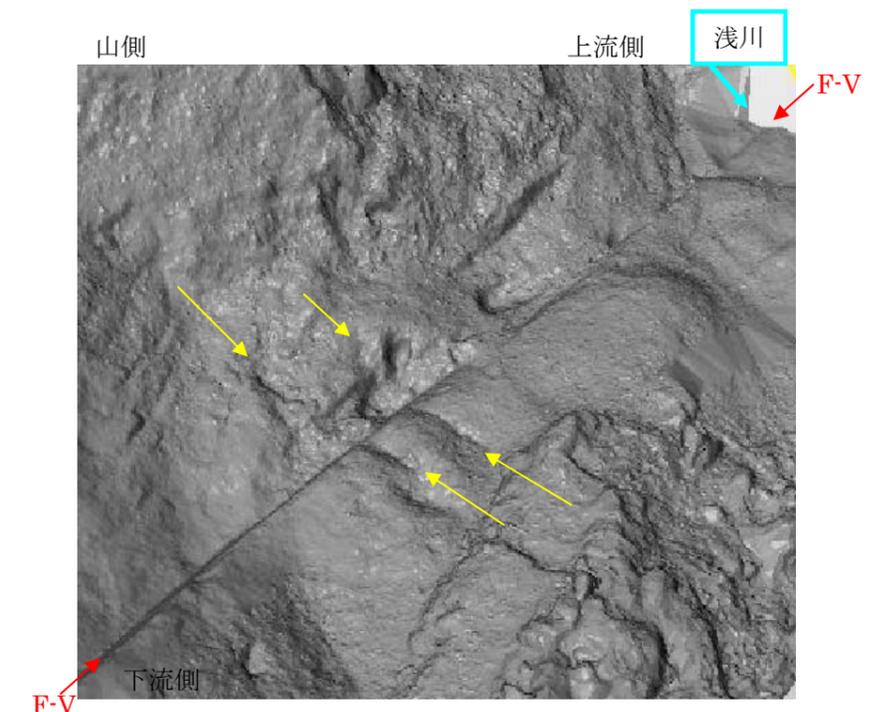


図 4.1.4 トレンチ5 上流岩盤面の下部。図 4.1.3 に示した岩
盤面下部に認められる溝状の凹みを下流側から見た立体図。

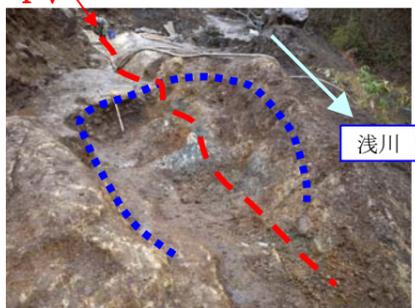
4.2 岩盤面の凹凸から見た F-V 断層の変位

前頁までの結果をまとめると、以下のとおりである。

- A) 仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 では径約 3m の馬蹄形の凹みの中央付近を F-V 断層が横断しているものの、凹みの外形に変位した兆候が認められない。
- B) トレンチ 5 の上流岩盤面では、F-V 断層を境とする段差が認められるものの、F-V 断層の上下盤斜面の縦断勾配が一致しないことから、相対的に岩盤がやや軟質な上盤側にて表層部がより深く浸食されたことが原因と考える。
- C) トレンチ 5 の上流岩盤面に認められる段差は、F-V 断層の両側で水平方向に最大 70cm 程度であるが、仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の馬蹄形の凹みの外形が 70cm 程度ずれているとみなされる兆候は全くなく、F-V 断層による一連のずれとして説明できない。
- D) トレンチ 5 の上流岩盤面では、F-V 断層を挟んで F-V 断層と直交する方向の 2 対の溝状の凹みが向き合って位置しており、F-V 断層による変位を受けた兆候がない。
- E) 仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の馬蹄形の凹みの内部にも F-V 断層に沿う凹凸が認められるが、これは F-V 断層上下盤の岩盤の硬さの違いによるものであると考えられ、馬蹄形の凹みの外の状況と同様である。
- F) 各トレンチの段差の方向性を総合的に見ても系統性がない。

以上より、岩盤面（凹みの外形、段差）を変位基準として見ると F-V 断層による変位は生じておらず、段差は浸食による凹凸の一つと考える。

5. まとめ

調査対象	1. 断層への礫の落ち込み	2. F-V 断層の周辺で見られる地層の変形	3. 粘土状の軟質物の砂礫への注入	4. 岩盤面の凹凸と F-V 断層との関係
<p>代表的な調査の状況</p>	 <p>トレンチ 5</p>	 <p>トレンチ 1'</p>	 <p>トレンチ 3A</p>	
	 <p>砂礫を挟む断層以外の割れ目 (仮排水トンネル呑口)</p>	 <p>トレンチ 1' 追い込み後</p>	 <p>トレンチ 3A 追い込み後</p>	 <p>仮排水トンネル呑口～トレンチ 6</p>
<p>調査結果</p>	<ul style="list-style-type: none"> • F-V 断層に沿う複数の箇所、礫の落ち込みが確認された。礫の落ち込みは、F-V 断層に沿う箇所だけではなく、断層ではない割れ目に沿う箇所でも確認された。 • 礫の落ち込みの断面形状は板状、V字型、ロート型など様々であり、砂礫と岩盤の関係は一定しない • 断層面は、断層破碎帯 (粘土化帯～粘土混じり細片化帯) が流出しオーバーハングした状態でも自立する状況が確認された。 • 落ち込んでいる礫は、河床砂礫と同じ礫種構成で、擦痕を有する礫は確認されない。また、断層面にも擦痕は確認されない。 • F-V 断層直上の礫層に、礫の系統的な配列は確認されない。 • F-V 断層沿いに砂礫層がずれていない。 	<p>【地層のたわみ】</p> <ul style="list-style-type: none"> • F-V 断層直上付近における地層のたわみが、トレンチ 5、トレンチ 1' で認められた。この他、仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の法面、トレンチ 5、トレンチ 1' の計 9 箇所では、断層から離れた箇所において地層のたわみが認められた。 • 地層のたわみの中には、巨礫あるいは巨礫の密集部が存在する。地層のたわみの形状は、巨礫あるいは巨礫の密集部の形状に沿っており、F-V 断層直上付近でたわみが認められたトレンチ 5、トレンチ 1' においても巨礫や巨礫密集部の形状に沿っている。 • 巨礫の上部で地層が薄くなる現象は、仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の法面、トレンチ 5、トレンチ 1' で確認される。 <p>【地層の段差】</p> <ul style="list-style-type: none"> • F-V 断層直上付近における地層の段差が、トレンチ 1' において認められた。この他、トレンチ 5、トレンチ 3B 上段では、断層から離れた箇所において地層の段差が認められた。これら全ての段差の近くに、たわみが認められる。 • 地層に段差を生じている面は、面の傾斜方向にも走向方向にも短く、基盤岩まで達することなく未固結層内でせん滅する。段差を生じている面の方向は F-V 断層の延長上ではない。 • 地層に段差を生じている面の走向・傾斜は、トレンチや壁面ごとに異なる。段差の傾斜は、主要なもの全 11 本のうち 10 本が F-V 断層とは逆傾斜である。 • 地層の段差のずれの方向は、トレンチ 5 では正断層的、トレンチ 1' では逆断層的なずれである。 <p>【地層の擾乱】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 仮排水トンネル呑口法面、仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 の間の法面、トレンチ 5、トレンチ 1' において、一部の層準で地層が擾乱を受けている。なお仮排水トンネル呑口法面においては、地層にたわみや段差は認められない。 • 擾乱の形態は、コンボリュート葉理、皿状構造やピラー構造、地層の断片化、噴砂跡などが見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> • トレンチ 3A において、砂礫層の中に灰白色の軟質物が筋状に介在している状況が確認された。 • 砂礫を除去すると背後に岩盤が連続して分布しており、筋状に見えた灰白色部分は、岩盤の一部が礫に注入するように見えていたものであることが確認された。 • 灰白色の軟質物は、表面の 10 数 cm を除去すると、原岩組織を明瞭に残す部分が現れた。 	<ul style="list-style-type: none"> • 仮排水トンネル呑口～トレンチ 6 では、直径約 3m の馬蹄形の凹みを F-V 断層が横断しているが、凹みの外形が F-V 断層の両側で食い違っている状況は認められない。 • トレンチ 5 上流岩盤面では、比較的急な斜面である上部において F-V 断層を挟んで段差があるが、F-V 断層を挟む岩盤面の形状は一致しない。また、比較的緩い斜面である下部には、F-V 断層を挟んで溝状の凹みが対になって認められる。
<p>考察</p>	<p>F-V 断層に礫が落ち込む現象は、「流水等により割れ目や断層等の弱部が浸食されて形成された凹みに、礫が徐々に落ち込んだもの」と考える。</p>	<p>地層の変形の原因は、「凹凸がある地形の上に凹凸に沿う形で砂等が堆積して形成された地層のたわみが、地震時の震動や液状化による揺すり込み沈下等により増幅された」と考える。 [岩盤上部有機質土の年代 BP.2,010±30y～2,160±30y]</p>	<p>注入の様に見えた箇所は、浸食されて薄くなった基盤岩が砂礫の背後から露出していたものであり、F-V 断層の活動との関連性はない。</p>	<p>岩盤面上の凹凸は、F-V 断層を境としてずれが認められないことから、岩盤面形成後に F-V 断層は活動していないと考える。 岩盤上部砂礫層中の有機物の年代 BP.6,680±40y</p>