

多量湧水を賦存する活断層周辺の地下水対策と 水理特性について

The estimation and the countermeasure for tunnel hydoro-geoloical condition including the huge groundwater around the active fault

村山秀幸¹⁾・岩田広己²⁾・奥田勉³⁾・望月齋也³⁾・岡村浩孝⁴⁾

Hideyuki MURAYAMA, Hiroki IWATA, Tsuyoshi OKUDA, Tokiya MOCHIDUKI, Hirotaka OKAMURA

The Koi tunnel (Hiroshima No.4 High Way: HIROSHIMA-SEIFUUSINTO line, about 4,900m length) has some shallow overburden sections. The Koigami area is the one of those sections and its depth is from the surface to the tunnel roof about 50m. This area consists of Masa-soil, hard weathered granite, and the Koi-active is running beside the Hachiman river. The Koi-double way tunnel is planned to be located across the Koi-fault, developed in the Koigami area. Therefore, we needed to carry out a lot of boring survey, geophysical exploration, hydrological survey. The results of these survey and the numeral hydro-simulation are following. Koigami's shallow overburden area consists of the hard weathered and weak rock, which was fractured by the event displacement of Koi-active fault, and has the huge groundwater of the different water head between the front and the back of Koi-fault.

This paper describes the estimation of the hydoro-geological condition of this Koigami area and the countermeasure for the huge groundwater around the active fault by using the deep re-injection well method. This method was carried out from the surface before the tunnel excavating. Consequently, the tunnel face under construction keep on so dry condition, but consists of weak rock. So, this method will be considered the economical and safety countermeasure.

Key Word: active fault, huge groundwater, hard weathered granite, hydoro-geological condition
deep well method, re-injection well

1. はじめに

広島高速4号線(広島西風新都線, 延長約4,900m)のうち己斐トンネル第二工区では, 己斐上地区においてボーリング調査, 物理探査, 水文調査などの事前結果から, 活断層である己斐断層¹⁾の発達に伴い地山が極端に脆弱化し多量の湧水が賦存すると予測されており, この活断層が遮水層として機能することによって施工時に被圧地下水を伴う突発性湧水の発生が危惧されていた. 己斐断層の発達する己斐上地区は, 最小土被り約50mで上下線2本のトンネルが通過し, 己斐断層(活断層, 確実度I, 活動度C, 長さ7km, 走向NNE, 断層形態: 屈曲, 変位基準: 谷, 尾根, 断層変位(横ずれ成分): 右横ずれ70m以下)がやや湾曲して流下する八幡川とほぼ同方向(北北東-南南西)に発達しており, この断層活動に伴う地山の脆弱化と豊富な地下水の賦存がトンネル施工における最重要課題となった.

本報告は, 己斐上地区において地表から地下水位低下工法(ディープウェル工法)を実施しトンネル切羽

1)正会員 博士(工学) 株式会社フジタ 技術センター土木研究部

2)正会員 修士(工学) 株式会社フジタ 土木本部生産技術部

3)株式会社フジタ広島支店 フジタ・奥村・伏光建設共同企業体

4)広島高速道路公社

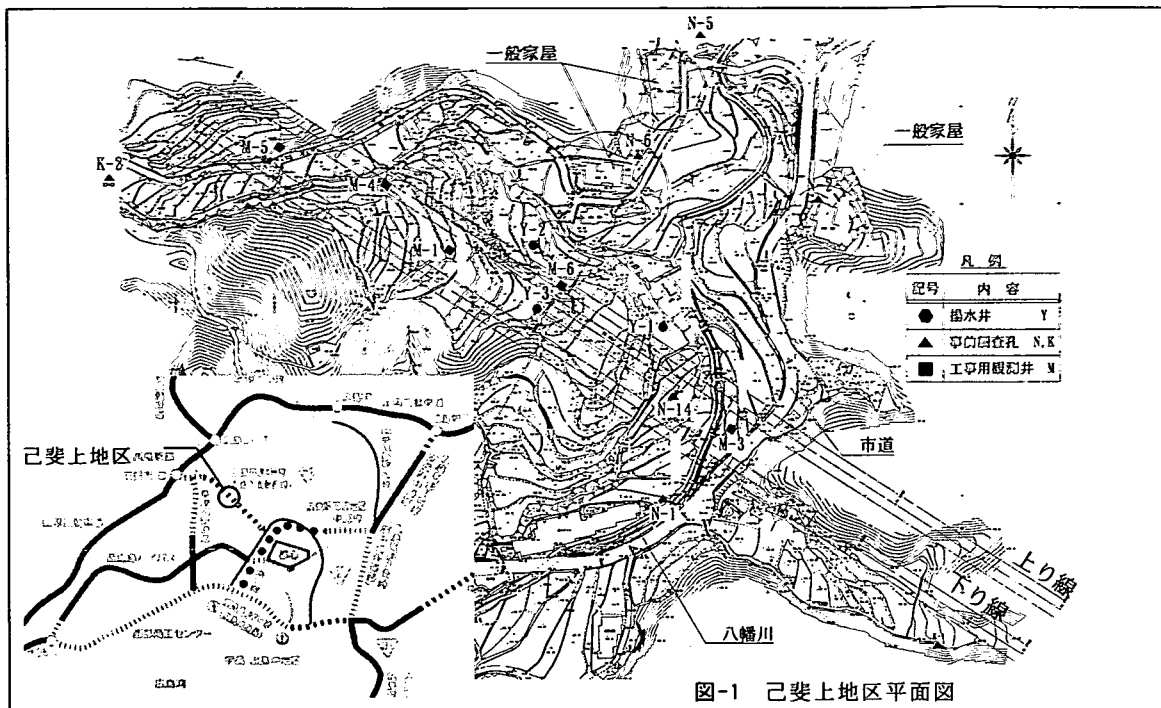


図-1 己斐上地区平面図

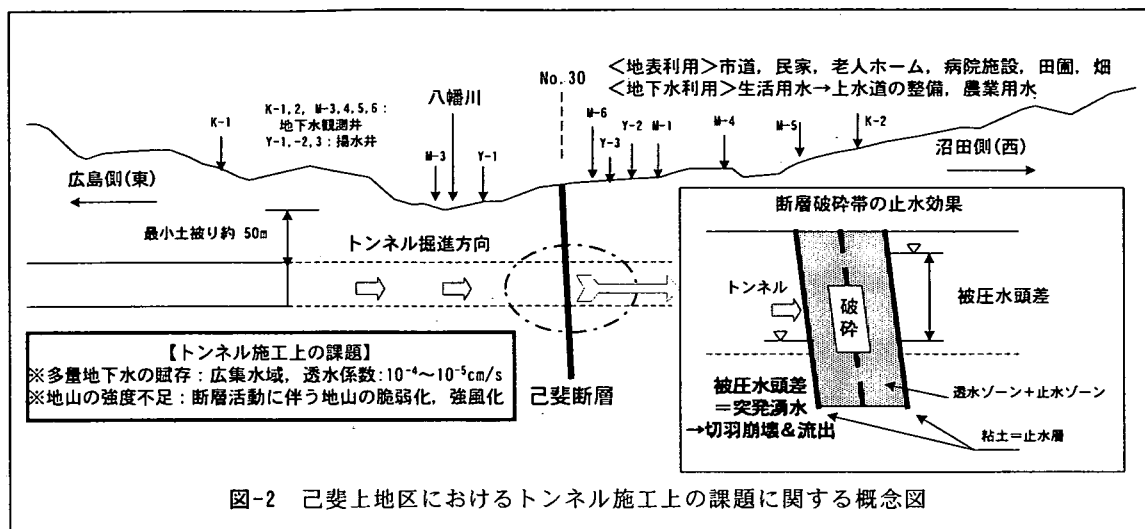
到達以前に地下水位を強制的に低下させることにより脆弱な強風化花崗岩地山を安全かつ経済的に施工した事例について報告する。さらに、断層周辺の特異な水理特性について揚水試験および水文・水質調査の結果から検討した結果について述べる。

2. 地下水対策工の概要

2-1 トンネル掘削における課題

図-1 に示すように、己斐上地区は市道、民家、老人ホーム、病院などの施設と田圃・畑として利用されており、生活用水および農業用水は井戸水を使用している。よって、事前調査として八幡川流域の広域的な水文調査を実施すると共に調査結果を考慮した地下水影響解析（浸透流解析）を実施し、トンネル掘削による地表湧水問題を検討した結果、トンネル掘削によって周辺のほとんどの井戸が水涸れすると想定された。よって、その対策としてトンネル掘削以前に上水道を整備すると同時に、トンネル掘削の影響を把握するために主要な地下水利用箇所近傍に地下水観測井を配置する計画とした。

己斐断層に伴う地山の破碎および脆弱化は、弾性波屈折法探査において多くの低速度帯（最低弾性波地山速度 $V_p=1.9\text{km/s}$ ）として把握され、鉛直方向で実施したボーリング調査より地山深部まで強風化（マサ化）した花崗岩の分布として確認されていた。しかしながら、己斐断層本体がどの位置に発達しどのような性状を呈するかが不明確であった。すなわち、トンネル路線では己斐断層の通過地点と地山の脆弱状況を把握することが重要課題となり、断層を貫く斜めボーリングを事前に実施した。その結果、粘土幅 10～15cm の断層破碎帯を確認し己斐断層本体の位置を明らかとした。一方、阪神・淡路大震災を契機として全国各地で地震防災を目的とする活断層調査が実施されており、そのうち己斐断層に拘わる調査結果^{2),3)}と今回の斜ボーリングで確認した断層粘土を比較検討した結果、両者は非常によく一致することを確認し、ボーリングによって得られ断層粘土は己斐断層本体であることがより明確となった。以上より、己斐断層本体はたかだか数 10cm の粘土で構成されているがその均質性と連続性が高く、その粘土層の厚さが薄くても遮水層となる



可能性が十分示唆されると同時に、付近は断層活動により破砕作用を強く受けていることが明確となった。

八幡川流域の水文調査より、己斐上地区は全般に地下水位が高く広域な集水面積を有しており、地盤の透水係数が $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$ と通常の岩盤より高い透水性を示すことから、トンネル掘進に伴い湧水が急激に増加し己斐断層周辺で最大 3.8t/分の多量湧水が発生することが浸透流解析により予測された。さらに、ボーリング調査によってトンネル周辺の地山は極端に脆弱化し切羽の自立性が疑問視されると同時に、地下水が豊富で己斐断層の発達に伴う断層粘土が止水層となり付近の地下水理構造を規制している可能性が示唆された。この様な地山・水理条件のトンネルでは、被圧地下水脈を切羽が通過する際に、水圧により切羽崩壊が発生し土砂と地下水が大量に流出し大出水事故に繋がるケースが過去に数例発生⁹⁾している。上記の施工課題を図-2に模式的に示す。

2-2 対策工法の検討

本トンネルでは前述の課題と共に、①地表湧水の問題は上水道を整備し解決している。②地表沈下や陥没は最小土被りが 50m であり切羽崩壊による土砂流出がない限り心配ない。③坑外からの事前対策が可能な土被りである。④地下水観測井が整備されており地下水挙動を 3 次元的に把握できる。などを考慮して地表からボーリング孔を用いる強制地下水位低下工法(ディープウェル工法)を試験的に実施し、この試験揚水による地下水位の変動状況をモニタリングすることにより最終的な対策工法を検討する計画とした。図-3に対策工法の選定フローを示す。ディープウェル工法のメリットは、切羽での掘削作業に左右されずに切羽到達以前に地下水位を低下できることにある。

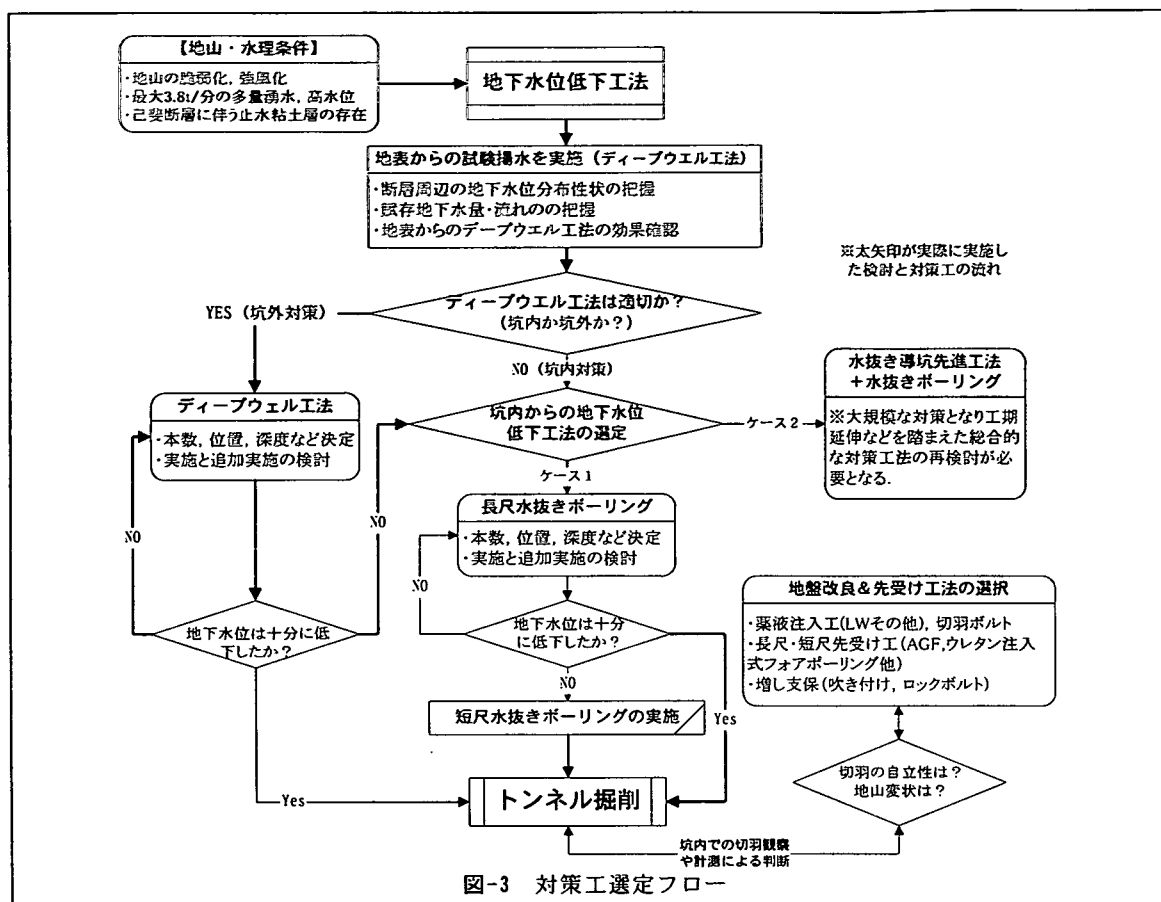
3. 地下水位低下工法とその効果

3-1 試験揚水と対策工法(ディープウェル工法)の実施

(1) 水位低下状況

試験揚水井(Y-1,Y-2)は図-1に示したように、己斐断層を挟んで両側(断層からの平面離隔約 30m)の八幡川上流側に 2 孔(掘削径 $\phi 300\text{mm}$, L100m)、追加地質調査兼地下水観測井 2 孔(M-1, $\phi 66\text{mm}$)を配置した。試験揚水井では孔内電気検層を実施し、Y-1にて GL-76m 付近(トンネル底盤より約 20m 下位)で卓越した水みちの存在を確認し、Y-2の GL-75m と 97m 付近では Y-1 ほど顕著ではないが深部に水みちを確認した。

揚水試験は Y-1,Y-2 のみ単独で揚水する場合と、同時に揚水する計 3 ケースを実施した。図-4、図-5に



Y-1, Y-2 を同時に試験揚水した場合の付近の水位低下状況を示す。試験結果から、己斐断層を挟んで広島側（東側）の各観測井で予想を上回る水位低下と広範囲の影響領域が観測され、逆に沼田側（西側）ではほとんど水位低下が観測できず、断層を挟んで地盤の水理特性が明瞭に異なることが判明した。すなわち、断層東側では換算透水係数 10^{-3}cm/s 程度の均一な砂に近い性状を示し、断層西側では断層粘土に起因する止水層の発達によりいくつかの狭いブロックに区別されていることが想定された。

(2) 水質調査結果

己斐断層部地下水の性質・起源を調べ、地下水低下工法の資料とするために、河川水、トンネル地表部の沢水、揚水井の水質分析を行った。図-6、図-7 に分析結果を示す。

これらの図によれば、S1, S2 の河川水、沢水、Y1～Y3 の揚水井の地下水、観測井 K2 の地下水は、ヘキ

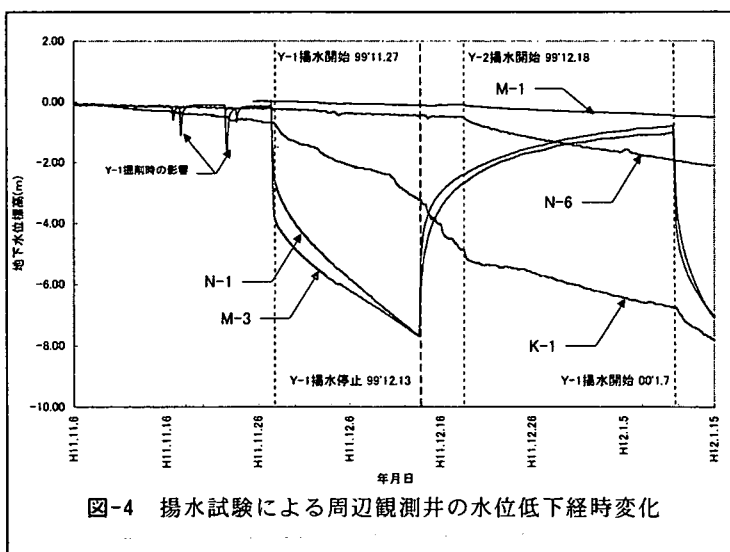
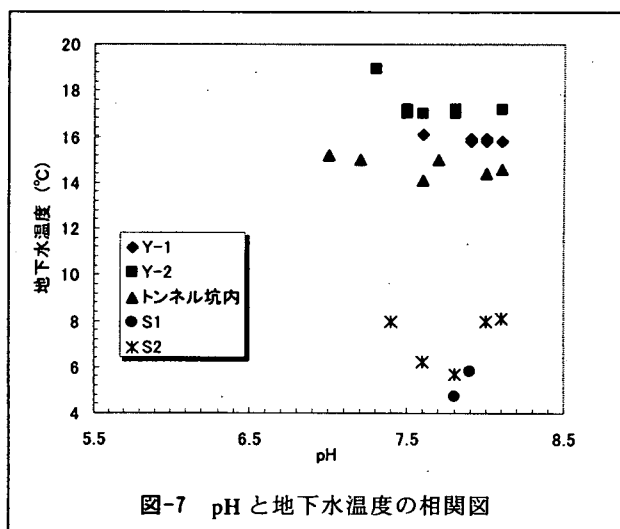
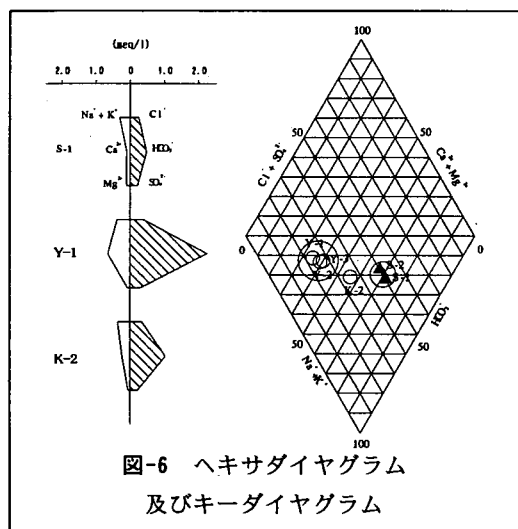
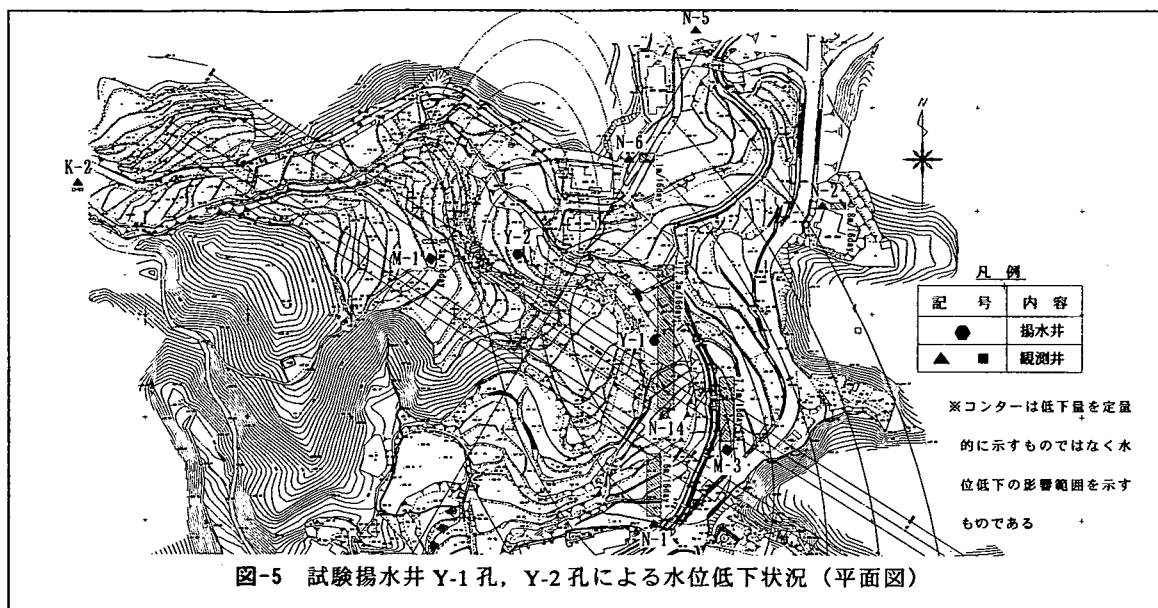


図-4 揚水試験による周辺観測井の水位低下経時変化



サダイアグラムの形状、キーダイアグラムのプロット位置ともに異なり、それぞれのグループを形成していることが判明した。このことから、トンネル湧水は地表水や浅層地下水とは異なる深層地下水であると考えられた。また、図-7 では Y-1, Y-2 の地下水温度に 1℃程度の差が見られることから、同じ貯留水槽でも己斐断層により分離されている可能性があり、この結果は試験揚水結果を支持するものである。

(3) 考察

この試験揚水によって、地表からのディープウェル工法が効率的に地下水位を低下できることが実証され、断層近傍の本格的な地下水対策工として、西側の水位低下が不十分であることを考慮して追加揚水井 Y-3 と観測井 M-4,6 を断層背面極近傍に配置し一斉に揚水を開始した。

3-2 対策工の効果検討

図-8 にディープウェル工法による地下水位低下状況を示す。図より 3 本の揚水井によって断層近傍の被圧水頭差がほぼ解消され、切羽が断層近傍に達した段階で突発性湧水が発生する可能性を事前に極力低減させ

ることができたと考えられ、なお、揚水結果から断層西側に水理特性の異なるいくつかのブロックの存在が示唆されたことより、断層からさらに沼田側(西側)のブロックに対する対策工として、断層手前約 20m の切羽位置から水平水抜きボーリング($\phi 100\text{mm}$, L100m)を 2 本実施し、坑内からの対策も併用して実施した。

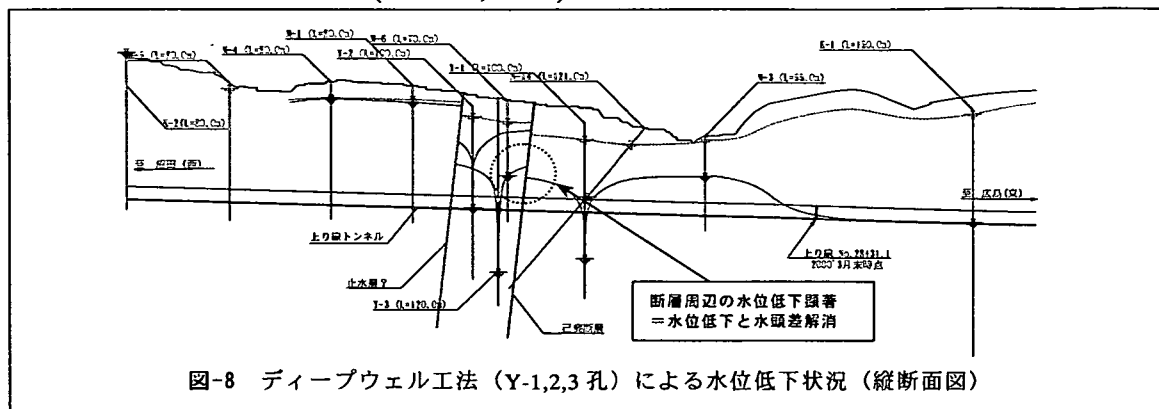


図-8 ディープウェル工法 (Y-1,2,3 孔) による水位低下状況 (縦断面図)

3-3 掘削時における己斐断層付近の地山状況

上り線トンネル掘削時における切羽は、断層手前 150m 程度から滲水もなくマサ状の強風化花崗岩が締まった状態で露出し、土砂であるが切羽の自立性は保たれた。すなわち、切羽で多量の湧水が発生し断層背面が被圧していた場合には、切羽の崩落や湧水を伴う流出現象が発生しうる地山状態であったと判断でき、相当の補助工法を坑内から実施すべき地山状況であったと考えられる。一方、下り線トンネルでは、己斐断層の極近傍で断層粘土より手前の土塊が切羽より押し出す現象が発生した。この地山押し出し現象は断層手前の極数メートルの区間であり、湧水はほとんどない状態であった。このように己斐断層の断層粘土は非常に脆弱かつ膨張性を有しており、もし切羽で多量湧水が発生し、断層背後の地下水水頭差が切羽に作用していれば、突発性湧水現象と切羽の崩落を伴う地山災害が発生した可能性が高いと考えられる。

その後、上り・下り線トンネルが己斐断層を通過し、インバート施工時の段階でディープウェルによる揚水を停止したところ、直ちにインバートから地下水の涌きだし現象が発生した。以上より、ディープウェル工法により確実にトンネル周辺の地下水位を低下させていたことが改めて実証された。

4. おわりに

本トンネルは、前述の事前対策工を講じることによって己斐断層の掘削を無事完了した。本トンネルで採用した地表からのディープウェル工法は、その効果を十分発揮し経済性の向上と切羽崩落・出水事故を未然に防止することに十分寄与したと考えられる。また、付近は活断層の発達によって特異な水理性状を呈することが種々の調査と揚水試験によって明らかとなった。一方、活断層を通過するトンネル、あるいは流量が豊富な河川を低土被りに通過するトンネルは今後も多く設計・施工すると考えられ、地下水が問題となるトンネルにおける事前地下水対策としてディープウェル工法は、地山条件を十分吟味することによって非常に有効な対策工法であるといえる。

【参考文献】

- 1) 活断層研究会編：新編日本の活断層-分布と資料-, 東大出版会, 1991
- 2) 広島市：広島地域における五日市・己斐・広島西縁断層の活動履歴及び活動性調査, 科学技術庁平成 7 年度・平成 8 年度地震調査研究交付金成果発表会予稿集, 平成 9 年 9 月
- 3) 広島市地域活断層調査委員会：己斐断層外 2 箇所活断層報告, 1996
- 4) 例えば, 土木学会：トンネル地質調査と岩盤計測, p. 170-180, 1983