

地盤の視点に基づく環境・景観創造に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平18～平20

担当チーム：地質チーム

研究担当者：佐々木靖人、品川俊介、吉田直人

【要旨】

環境影響評価法・自然再生推進法・景観法などの施行により、土木分野においても動物・植物・生態系・自然環境・景観などの保全・復元・再生が必要になっている。これらは、非生物的環境（いわゆる地盤環境）と密接に関連して成立している。例として、植物の保全や移植をする場合、土壌や地下水による地盤環境の保全や必要に応じて景観の保全・創造のため地場の石材を活用した景観等に調和した土木構造物の構築が考えられる。

本研究では、石材の利活用法の提案、地下水に関わる地盤環境と生態系の調査・評価技術の提案を目的として、文献調査や実態調査を行った。この成果を踏まえ、石材の利活用に関する手引き目次を作成するとともに、文献調査によって、岩盤中の地下水の水位に関する影響調査範囲の設定や影響予測手法の提案のための基礎資料を得た。さらに、地盤の視点に基づく生態系等の保全・復元・再生手法に関して、平成17年度までの共同研究成果をとりまとめた。

キーワード：石材、土木構造物、劣化、地下水、生態系

1. はじめに

環境影響評価法、自然再生推進法、景観法が施行される等、国民の環境に対する意識が高まっている。生態系や景観保全のためには、体系的な地盤調査手法、地盤からみた生態系の予測・評価手法、地盤の視点からの景観設計、環境保全措置などの体系化が必要である。しかし、これらの具体的手法はほとんど構築されておらず、環境保全・景観検討の現場では、経験的な対応にとどまっているのが現状で、地盤からの視点の不足により問題を発生させている例もある。

そのため本研究では、石材に関する文献調査や実態調査を行うとともに、石材の利活用法に関する手引きの目次案の検討を行った。また、地下水に関わる地盤環境と生態系の調査・評価技術の提案を目的に、文献調査を行った。さらに、地盤の視点に基づく生態系等の保全・復元・再生手法に関して、平成17年度までの共同研究成果をとりまとめた。

2. 石材の土木構造物への利用に関する研究

2.1 研究の概要

石材の土木構造物への利用については、河川の護岸、のり面保護、ロックフィルダムのリップラップ材などとして利用されているが、一般に土木技術者の石材に関する知識やその取り扱いの経験が乏しい。一方、石材の選定基準に関しては明確なものがなく、施工完了

後に劣化が著しい例も散見されることから、石材の劣化に関する文献調査に基づき知見を整理するとともに、アンケートや現地調査により劣化事例の調査を行った。さらに、現場施工後に、早期劣化を起こした事例に関して、劣化機構に関する調査を実施した。

そして、これらの成果を現場技術者へ還元するため、石材の利活用に関する手引きの目次案を検討した。

2.2 石材の劣化と物理特性の関係の整理

2.2.1 調査方法

1) 岩石の室内試験結果の整理

石材の有効活用のための必要物性の整理を目的として、これまでのダム建設において実施された45の報告書の岩石試験結果の整理を行った。

2) 既往文献の整理

石材の劣化事例の整理および劣化原因の収集を目的として、「石材」、「劣化」、「風化」等をキーワードに、石材の劣化や物理試験結果に関する文献について整理を行った。

2.2.2 結果

1) 岩石の室内試験結果の整理

ダム建設において実施された試験のうち、岩石物性と凍結融解の耐久性との関係についての試験結果をまとめた。(図-1、2)

吸水率は、0.5%以下であると凍結融解に対する耐久性は高い結果となった。

動弾性係数は、値が $6.0 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 以上であれば、凍結融解に対する耐久性が高い結果となった。

これらの結果は、既存の実験結果を整合するものであった。なお、吸水率、動弾性係数ともに岩種により劣化しやすい値が異なる傾向が見られた。

このことから、石材においても骨材等と同様に、岩種や岩質に応じた基準値の設定による有効利用が可能であることを示した。

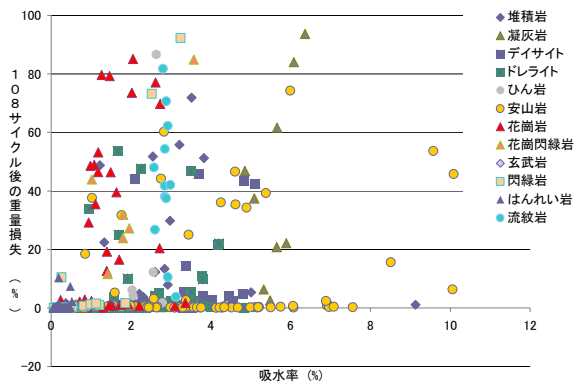


図-1 凍結融解に対する耐久性（吸水率）

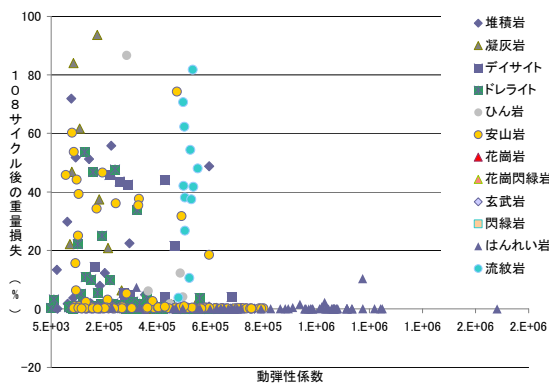


図-2 凍結融解に対する耐久性（動弾性係数）

2) 既往文献の整理

石材の風化・劣化と岩石の物性試験を行っている既往文献の整理を行った結果、61 事例収集した。その内、劣化環境や条件を整理している文献について抽出した。

①凍結融解による岩石への影響

- 凍結融解試験と各試験結果の報告によると、凍結融解サイクルと孔隙率の関係（凍結融解のサイクル数の増加による孔隙率の上昇）は、一軸圧縮強さや相対動弾性係数との関係（孔隙率の減少による一軸圧縮強さ、相対動弾性係数の減少）でみられた傾向と調和する。¹⁾
- 岩石の凍結融解実験を行い、飽和度の違いによる空隙率の増加の差を調査した結果によると、凍結融解

による劣化の程度は空隙水の飽和度に大きく依存する。²⁾

②高温、低温による岩石への影響

- 高温の影響を受けた岩石の強度変化の結果によると、花崗岩および安山岩の圧縮強度は、高温下（100℃）ではDryのものは強度がほとんど変化しないがWetのものは強度が低下する傾向が見られている。³⁾
- 熱サイクル試験装置で、岩石に高温側は、15℃～100℃、低温側は-160℃の一定のサイクルを与えた結果によると、岩石の強度、弾性係数は温度履歴回数の増加に伴い、低下し、収束する傾向があった。⁴⁾

③塩類風化による岩石への影響

- 塩類風化の室内試験を実施し、塩類風化の速度は、岩石物性の中でも特に空隙径分布と引張強度の影響を受けている可能性が高いことが示唆された報告があった。⁵⁾

④岩石に含まれる鉱物が劣化へ与える影響

- モンモリロナイトを含有する岩石は、乾湿風化試験を行った結果によると、含有していない岩石よりも明らかに風化しやすい傾向が見られている。また、空隙率が同じであっても空隙の構造の差において、風化速度が異なった結果が報告された。^{6) 7)}
- モンモリロナイトを含有している安山岩とそうでない安山岩の劣化状況の経時変化を追った報告によると、モンモリロナイトを多量に含んだ安山岩は、室内に保存し、4年後において、90%以上がれき状以下の細片へ変化した結果となった。モンモリロナイトをほとんど含まないものは、れき状に至ったのは、数%程度でほとんど劣化しなかったという結果が報告された。⁸⁾

以上の文献を整理した結果、石材の選定には、石材の利用する環境（温度、水の供給状態、塩類による影響）に応じた密度、強度（圧縮・引張）、動弾性係数などを考慮して選定する必要があること、石材そのものの岩種、岩質や含有鉱物にも注意する必要があることが示唆された。

2.3 石材の劣化事例の調査

2.3.1 調査方法

1) アンケート調査

直轄河川においても、多自然護岸等において石材を利用しているケースがある。そこで、多自然護岸等に使用した石材の劣化事例の有無について、各地方整備局にアンケート調査を行った。

2) 石材の劣化事例の現地調査

石材の利用環境に応じた劣化事例の現地調査として、

大分県、熊本県、宮崎県内に存在する石仏、石橋、石積み護岸、橋台等を調査した。

3) 劣化機構の調査

河川護岸に使用した石材が早期劣化した事例について、劣化原因の詳細調査のため、鉱物分析等の各試験を行った。

2.3.2 結果

1) アンケート調査

石材の利用実態の調査の目的で、各地方整備局へアンケートを行い、中部地方整備局から回答を得た。

その結果、劣化調査はほとんどされておらず、石材の劣化事例、状況は把握できなかった。

2) 石材の劣化事例の現地調査

現地調査の結果、土木構造物に使用された石材の多くは良好な状態を保持していたものの、一部の石材には風化による亀裂や表面に剥離が生じているものがあった。劣化していた事例の詳細を以下に示す。

① 臼杵磨崖仏[大分県臼杵市 岩種：溶結凝灰岩]

平成7年に国宝に指定されている磨崖仏である。石仏の下部は補修され、地下水排除のための排水管を設置しており、亀裂が生じた岩盤にはアンカーが打たれ、風化した表面には合成樹脂を含浸させるなど補修がされている。

石仏には、節理・亀裂が多く見られ、下部は、藻類の繁殖が確認できたことから、劣化の原因として、水の存在が大きく影響していることが考えられる。



図-3 石仏下部の劣化状況

② 明正井路一号幹線一号橋[大分県竹田市 岩種：溶結凝灰岩]

現在も使用されている水路橋で、橋の側面には藻類が繁殖しており、石材には湿潤状態であることが推察される。劣化箇所は、日当たりの悪い北側、アーチの裏側で、表面の剥離が生じていた。劣化原因として、析出物が見られないことや水分状態、日当たり条件から凍結融解であると考えられる。



図-4 劣化による表面の剥離

③ 弥生橋の橋台[宮崎県宮崎市青島 岩種：砂岩]

橋台の北面の中段の飛沫帯にあたる箇所劣化が確認された。本箇所は、橋台の竣工時から石材の窪みの成長速度を経年的に計測している⁹⁾箇所である。

報告によると石材の窪みの深さは、南面で大きく、西面、東面、北面の順で小さくなる。どの方位でも下段0~40cm程度では、窪みの深さは小さく、南面では、中段80~120cm程度の箇所でも最も窪みが大きい。窪みの深さは、日射量の差や、海水飛沫による海水供給による塩類風化とされている。

本調査では、文献による計測時よりさらに20年程度経過しており、石材の窪みがより顕著に確認できた。



図-5 飛沫帯箇所の劣化

3) 劣化機構の調査

早期劣化の事例として、河川護岸のかご工に用いられた栗石が施工後半年程度で劣化した事例について、劣化機構を詳細に分析した。採取されたばかりの石は新鮮堅硬で一軸圧縮強度は140~200MPaであり、吸水率も1.5%未満を示すほか、目立った亀裂もなく、JISA5006によれば硬石に分類される石であった。

劣化した栗石の写真を図-6、7に示す。かご工に用いられた栗石は、古第三紀の四万十帯音無川層群に属する珪質泥岩、泥岩~細粒砂岩、中粒砂岩、粗粒砂岩であった。



図-6 亀裂の入った細粒砂岩



図-7 劣化して砂状になった中粒砂岩

劣化機構の分析として、以下の試験を実施した。

①耐久性試験 (JGS2125 - 2006 (岩石の促進スレーキング試験法))

数サイクルでは変化が見られなかったため、サイクル数を増やし、10~20 サイクル程度で実施をした。

その結果、泥岩、細粒砂岩、粗粒砂岩については、表面に析出物が見られ、一部の試料からは、浸水時に錆汁が溶出した。試験前後の写真を図-8 に示す。

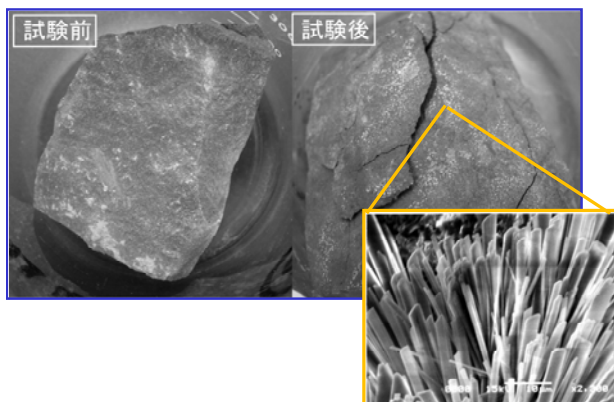


図-8 スレーキング試験前後の岩石の状況

②鉱物、析出物分析

膨潤性のある粘土鉱物の存在は確認できなかったものの、劣化を生じる岩石の多くから黄鉄鉱の含有が確

認できた。

析出物を走査型電子顕微鏡内臓のエネルギー分散型 X 線分析装置を用いて分析したところ、Ca、S、O が検出され、析出物は石膏 (CaSO₄) であることがわかった。

③酸化試験

岩石を過酸化水素水に水浸し、強制的に酸化させた後、その溶出液の水質分析を行った。

SO₄ および Fe が溶出するものは、乾湿繰返しによって劣化するものが多かったが一部例外もあった。

④安定性試験

硫酸ナトリウム水溶液を用いて、石材の安定性試験を実施した。手順としては、溶液に1日浸した後、105°C で6時間程度乾燥させることを1 サイクルとし、これを繰り返した。

その結果、珪砂泥岩をのぞく、ほぼ全ての岩石で劣化が生じた。劣化が生じるまでのサイクルは、細粒砂岩に比べ中粒砂岩のほうが短い傾向にあり、吸水率の大小と関係があると見られる。

これらの試験結果から、劣化機構として以下のことが明らかとなった。

①黄鉄鉱が酸化して硫酸を生成

②硫酸と岩石中のカルシウムが反応し、石膏 (CaSO₄) を生成

③石膏の結晶圧・水の浸透圧により孔隙が拡大

以上の分析結果から、黄鉄鉱の含有量が多く、吸水率が高いほど早期劣化が生じやすいことがわかった。

本事例より、古第三紀の四万十帯に属する石材を扱う際には、注意が必要である。

2.4 石材の利活用に関する手引きの目次案の検討

研究成果を現場技術者へ還元するため、既存文献や岩石・石材に関する基準等を整理し、石材の利活用に関する手引きの目次案 (表-1) を作成した。今後、とりまとめを行う予定である。

3. 地下水に関わる調査事例の整理

3.1 調査方法

1) 建設事業において環境保全の対象となる地下水に関わる事例の調査

まず、全国の公共事業において、生態系保全の観点で地下水がどのように取り扱われているかの現状を把握する目的で、資料整理を行った。

具体的には、国土交通省各地方整備局、北海道開発局、(旧)日本道路公団および水資源機構に対して実施した、動物・植物・生態系、地形地質や地盤に関する

表-1 石材の利活用に関する手引き（目次案）

【土木分野における石材の利活用に関する手引き（目次）】

1. 土木分野における石材の利用
 1. 1 歴史
 1. 2 現在の用途
 1. 2. 1 コンクリート骨材
 1. 2. 2 ロックフィルダム材料、盛土
 1. 2. 3 護岸、水制、蛇かご
 1. 2. 4 石垣
 1. 2. 5 ペーブメント
 1. 2. 6 化粧張石
2. 土木材料としての石材に要求される性能
 2. 1 強度
 2. 2 耐久性
 2. 3 美観
3. 石材の代表的な試験、基準等
 3. 1 圧縮試験
 3. 2 吸水率
 3. 3 密度
 3. 4 凍結融解試験
 3. 5 点荷試験
 3. 6 硫酸ナトリウムによる安定化試験
 3. 7 乾湿風化試験
 3. 8 スレーキング試験
 3. 9 ロサンゼルス試験
 3. 10 X線回折試験、岩石薄片観察、電子顕微鏡観察等
4. 石材の選定における留意点
 4. 1 利用環境
 4. 1. 1 温度
 4. 1. 2 塩類の影響
 4. 1. 3 水の供給状態
 4. 1. 4 日射条件
 4. 1. 5 侵食、磨耗の影響
 4. 1. 4 景観および生態学からの視点
 4. 2 石材に含まれる鉱物
 4. 3 石材の採取地

参考資料：石材を利用した歴史的構造物データベース
劣化事例調査表
石材の劣化に関する文献集

環境保全の事例に関するアンケート調査結果から、地下水保全に関する検討が行われたことがわかる事例、あるいは湿地や湧水などの水辺を対象にした事例を抽出し、整理を行った。

2) 地下水位の影響予測手法の調査

環境影響調査に関する指針類^{たとえ10)}には岩盤中の地下水調査手法について特に記述がないが、トンネル工事においては地下水位への影響は必ず懸念されるため、環境への影響を深く検討する上では岩盤中の地下水位予測のための調査が必要となる。

そこで本研究では、トンネル工事等の地山掘削時に行われる地下水調査手法を整理する際の基礎資料とするため文献調査を実施し、地下水位に係る調査範囲の設定方法および予測手法に関して整理を行った。

3.2 調査結果

1) 建設事業において環境保全の対象となる地下水に関わる事例の調査

調査結果を表-2に示す。動物・植物・生態系、地形地質や地盤環境に関する環境保全に関する調査事例

表-2 調査結果

		事例数	割合
動物・植物・生態系、地形地質や地盤に関する環境保全		47件	
うち	地下水・湿地・湧水に関する保全調査	25件	53%
	うち 道路事業	18件	72%
	うち 河川・ダム事業	7件	28%
	うち トンネル工事	13件	52%
	うち ダム・堰工事	4件	16%
	うち 橋梁下部工事・土工事	8件	32%

47件のうち、本研究で対象となる地下水・湿地・湧水に関する保全調査事例は25件あった。その内訳を見ると、事業別では道路工事が72%を占め、工種別ではトンネル工事が53%を占めた。アンケート結果の整理から、トンネル、切土、橋梁下部工事など、地下水位低下の影響に関する調査が必要とされるケースが多いことが判った。一方、少数ではあるが、湛水などの地下水位上昇に伴う生態系への影響予測のための調査が含まれている。

2) 地下水位の影響範囲および影響予測手法の調査

文献調査は、日本地質文献データベースによるキーワード検索（「トンネル and 水」）、鉄道総合研究所のトンネル関係文献等の検索により、321文献を抽出し、そのうち48文献を収集した。収集した文献を整理した結果、以下のことが明らかになった。

①山岳域のトンネル施工実績によると、地質の違いや破碎帯の有無によって比湧水量（m³/sec/km）の多寡がある¹¹⁾。また、地質の違いによって、土被りと比湧水量の関係が異なる¹¹⁾。したがって、地下水位に係る影響範囲を検討する際には地質特性を十分考慮する必要がある。

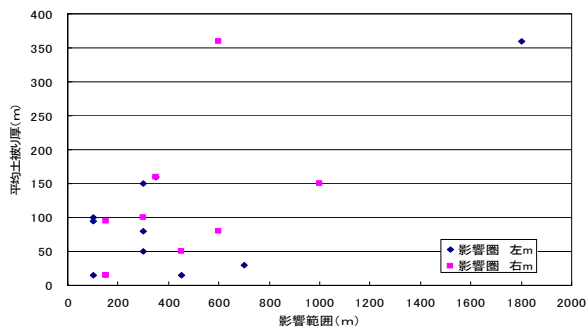
②トンネルの地質、土被りと湧水影響範囲データ¹¹⁾を整理した結果（図-9）、地質や土被り厚によらず、ほとんどの事例でトンネルの片側800m（両側で1,600m）の範囲に収まっていることが判った。

③地下水位に係る影響予測方法として、山岳域においては現地の水文学的調査結果に基づくいわゆる「高橋の方法」¹²⁾が用いられることが多い。

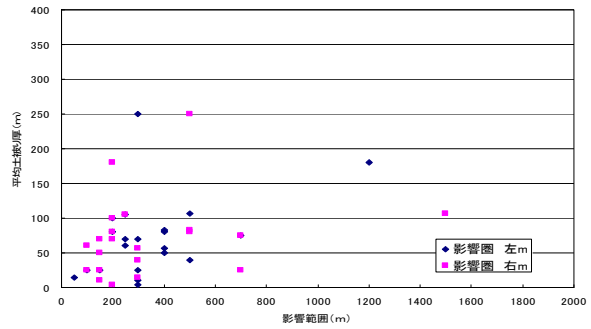
以上の結果は、岩盤中の地下水の水位に関する影響調査範囲の設定や影響予測手法の提案のための基礎資料となるものであるが、地下水の水位に関する調査は、経験的に求められた手法が多いので、今後、データの蓄積をしていく必要がある。

4. 地盤の視点に基づく生態系等の保全・復元・再生手法に関するとりまとめ

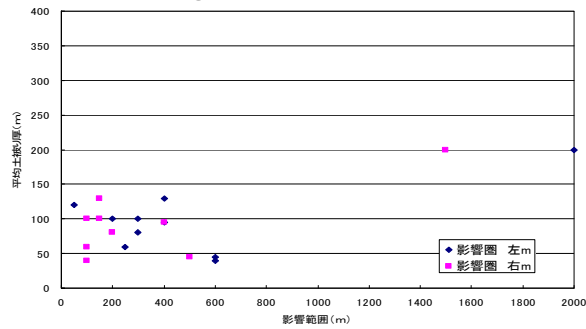
13年度から17年度まで実施した「地形地質的視点に基づく生態系への環境影響の予測・軽減技術に関する



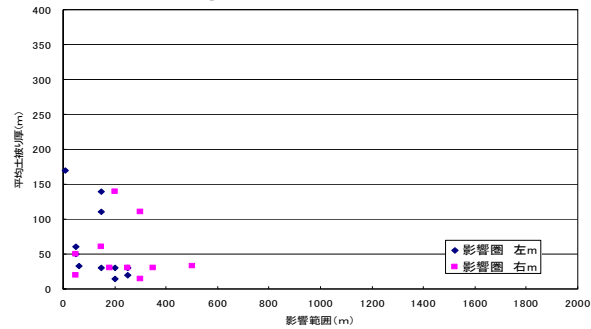
①火山岩類、火山碎屑岩



②深成岩類、片麻岩



③古生層、中生層、変成岩



④第三紀層～第四紀層

図-9 地質毎のトンネル土被りと湧水影響範囲 (石井・佐久間¹¹⁾ のデータをもとに作成)

る共同研究」の内容をもとに、地盤と生態系の関係について整理し、18年度に共同研究報告書「応用地生態学-生態系保全のための地盤の調査・対策技術の体系化-」¹³⁾としてとりまとめた。これにより、生態系保全のための地盤の調査から対策までの基本的なスキームを提案した。

5. まとめ

- 1) 石材の劣化に関する調査・整理を行ったところ、土木構造物において利用する石材の選定には、石材の利用環境に応じた試験による調査が必要なこと、場合によっては石材に含有する鉱物に関する調査を行うことが必要であることがわかった。
- 2) 研究成果を現場技術者へ還元するため、石材の利活用に関する手引きの目次案を作成した。今後、とりまとめを行う予定である。
- 3) 文献調査によって、環境影響評価における岩盤中の地下水の水位に関する影響調査範囲の設定や影響予測手法の提案のための基礎資料を得た。
- 4) 地盤の視点に基づく生態系等の保全・復元・再生手法に関して、平成17年度までの共同研究成果をとりまとめた。

参考文献

- 1) 日下部祐基他：凍結融解による岩盤の劣化機構に

関する考察, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.155-158, 2005

- 2) 京谷孝史他：多孔質軟岩（大谷石）の凍結融解による力学特性劣化の定量的把握について, 土木学会論文集 No.652/3-51, pp.103-114, 2000.6
- 3) 稲田善紀他：熱水および高温の影響を受けた岩石の強度・変形について, 岩石力学に関するシンポジウム講演論文集, 18, pp.331-335, 1986
- 4) 稲田善紀他：温度履歴を受ける岩石の強度・変形特性について, 資源・素材 99 (秋季大会) 岩盤工学・資源開発, pp.3-4, 1999
- 5) 山田剛他：塩類風化速度に与える岩石物性の影響に関する一実験, 応用地質 第46巻第2号, pp.72-78, 2005
- 6) 松倉公憲他：頁岩および凝灰岩の乾湿風化について (I) 日本地理学会予稿集 16, pp.32-33, 1978
- 7) 松倉公憲他：頁岩および凝灰岩の乾湿風化について (II) 日本地理学会予稿集 18, pp.6-7, 1980
- 8) 鈴木哲也：防波堤用捨石の劣化に及ぼすモンモリロナイトの影響, 三鉱学会連合学術講演会講演要旨集, pp.63, 1987
- 9) 松倉公憲：地形変化の科学-風化と侵食-, 朝倉書店, pp.206-214, 2008.11
- 10) 道路環境研究所編：道路環境影響評価の技術手法 2007 改訂版 第3巻, 423p, 道路環境研究所,

2007.11

- 11)石井政次・佐久間文彦：トンネル湧水の地形・地質的分類—全国主要鉄道トンネルの恒常湧水の実態調査をもとに—，鉄道技術研究報告，No.1041，pp.1-80，1977.3
- 12)高橋彦治：均等質透水層におけるトンネルの湧水，鉄道技術研究報告，No.198，pp.1-16，1961.4
- 13)土木研究所ほか：地形地質的視点に基づく生態系への環境影響の予測・軽減技術に関する共同研究報告書 応用地生態学—生態系保全のための地盤の調査・対策技術の体系化—，土木研究所共同研究報告書，No.359，220p，2007.3

RESEARCH ON THE ENVIRONMENT AND LANDSCAPE CREATION FOCUSING ON THE GROUND

Abstract:

After the law concerning the environment is enforced, preservation, restoration and creation of ecosystem and environment are needed in civil engineering. The ecosystem is closely related to the ground environment.

In order to propose the using method of stone materials for preserve, restore or create landscape, we carried out literature survey and questionnaire survey. On the basis of the results, we proposed the Contents of the using manual of stone materials for civil engineering structures.

In order to propose the technique of investigation and evaluation for ground environment and ecosystem, we carried out literature survey and questionnaire survey. The results are basic sources of propose the technique of investigation and evaluation for groundwater level in the rock mass. Additionally, on the basis of the joint research results, we compiled the method for preservation, restoration and creation of ecosystem from a geo-environmental point of view.

Keywords: rock material, civil engineering structure, deterioration, groundwater, ecosystem