

環境負荷低減のための大谷採石地下空間の有効利用と維持管理の試み

TRIAL USE AND MAINTENANCE MANAGEMENT OF OYA TUFF UNDERGROUND QUARRY FOR ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION

井上 達也¹・清木 隆文^{2*}・早坂 晃³・佐藤 大地⁴

Tatsuya INOUE¹, Takafumi SEIKI^{2*}, Akira HAYASAKA³, Daichi SATO⁴

Since huge collapse had occurred at ruined Oya tuff underground quarries in Oya area, Utsunomiya city, Tochigi Prefecture, reutilization trial such as experiment, investigation almost have been cancelled. In terms of taking the future development into consideration, those underground quarries should be used effectively as space resources. This study focuses on utilizing Oya underground quarry to settle cloud server units effectively. The authors applies LCC concept to understand the advantage and disadvantage of the underground spaces with comparison to above ones. Moreover, this study calculate temperature change around undergrounds quarry to evaluate the environmental load for long term with evaluating power consumption. Finally, we calculate LCC of environmental loads and construction and maintenance management process and report advantage of underground quarry.

Key Words : *Oya tuff, underground quarry, environmental impact reduction, effective use, maintenance management*

1. はじめに

(1) 研究背景

宇都宮市大谷町では現在までに地下空間陥没事故が発生している。大谷採石地下空間の危険性またはその空間の有用性を地域住民に理解して頂けるように調査・実験などを行っている。また今後の先進国の発展を考慮していく場合、地下空間を貴重な空間資源と捉え有効利用することが求められている^{1), 2)}。

(2) 研究目的

本研究では、現存する大谷採石地下空間を有効利用することをふまえ、地上・地下で同様の規模の施設を建設から維持管理に至るまでのLCCを仮定から算出して、価値の定量化から指標を設定する。これをもとに、地下構造物の有用性について検討する。

また、電力消費量の算出に関して、地下空間内の年間を通して変化する温度環境を数値解析で現場調査をもとに検討する。また維持管理に必要なコストを算出し、種々を足し合わせた数値を維持管理に必要なLCCとして示し、地上施設と地下施設との比較を行った結果を報告する。

2. 栃木県宇都宮市大谷地区の概要

宇都宮市は、首都圏から約100kmに位置し、東北新幹線でJR東京駅から49分、東北自動車道で浦和ICから98kmと交通至便の地であり、古くから北関東エリアの中核都市として発展してきた。また、大谷石は、宇都宮市の中心から北西約7kmの大谷町付近に、北西に約2km、南西に約4kmにわたり、薄い緑色の凝灰岩として所々に露頭が見られる。採石地域は北西に約3km、南北に約6kmにわたって分布している。

大谷地区の地質³⁾は、大別すると先第三紀、新第三紀および第四紀からなっている。先第三系としては、足尾帯に属する中・古生層と後期中生代の流紋岩質酸性火砕岩類とがある。新第三系は、グリーンタフ変動による火山岩類と緑色凝灰岩を主とし、大谷層と呼ばれる。新第四系は、川崎層群の礫層が小規模にみられ、平地部では、洪積統の段丘礫層と河川流域の沖積低地に段丘礫層が分布し、沖積統を除き関東ローム層が全域を覆っている。

大谷地区では、古くから建築資材として用いられてきた大谷石の採石が盛んに行われてきた。しかしながら、大谷石採石後の採石跡地下空間の多くは放置され荒廃している。再利用されているのは、ごく

キーワード：大谷石、地下採石場、環境負荷低減、有効利用、維持管理

¹学生会員 宇都宮大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering Utsunomiya University
(mt116422@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

²正会員 宇都宮大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering Utsunomiya University

³ 前田建設工業株式会社 Maeda Corporation

⁴ 宇都宮市役所 Utsunomiya City Hall

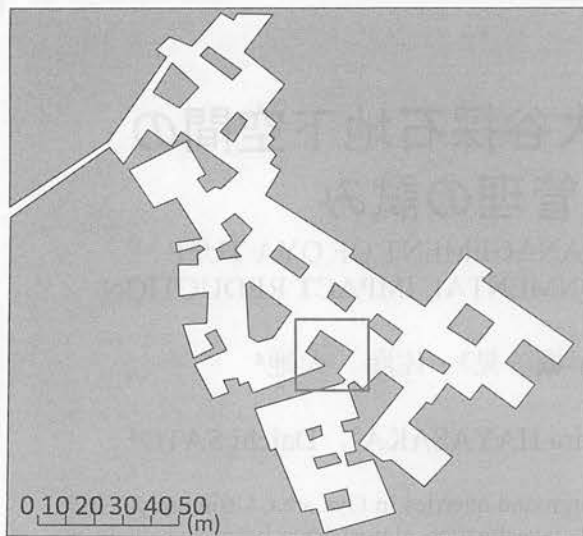


図-1 現場調査対象地下空間の模式平面図

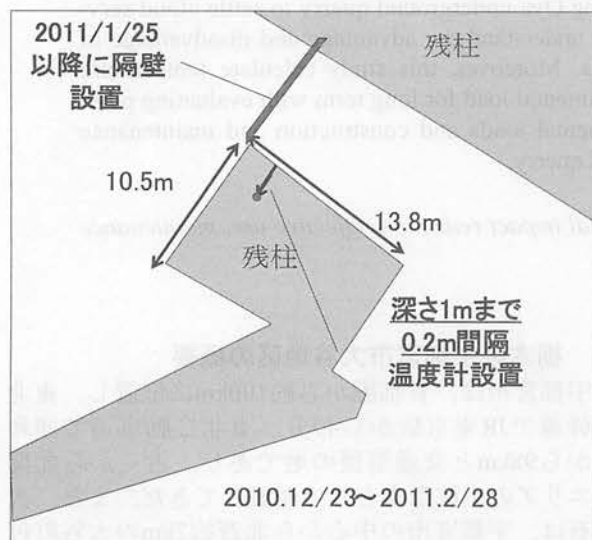


図-2 温度観測地点付近の模式図

一部であり、大谷地区には利用されていない地下空間が多数存在している。

3. 現場調査と数値解析

(1) 現場調査について

本研究において現場調査の対象とした地下空間は、坑口が横坑であり地下空間内部まで車両によって進入することが可能である。また、空間の一部は雨水並びに地下水の影響によって水没している。

本研究では地下空間内の壁体に温度センサーを埋め込み、その温度変化を観測する現場調査を実施した。

本研究は、この調査結果を熱伝導解析で再現することで、数値解析の熱伝導問題の再現性を確認することを目的とする。

(a) 調査概要

本研究で実施した調査は、地下空間内の壁体に深さ1mまで20cm間隔で温度センサー（熱電対）を埋め込み、その温度変化を2010年12月29日から

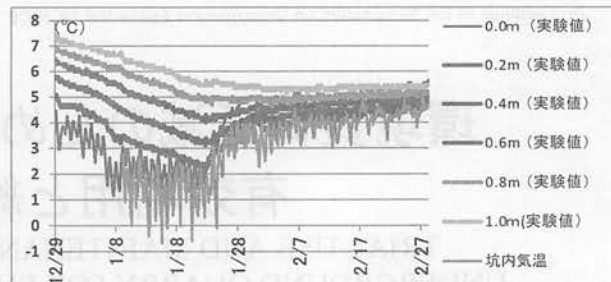


図-3 地下空間内壁体温度観測調査の観測結果

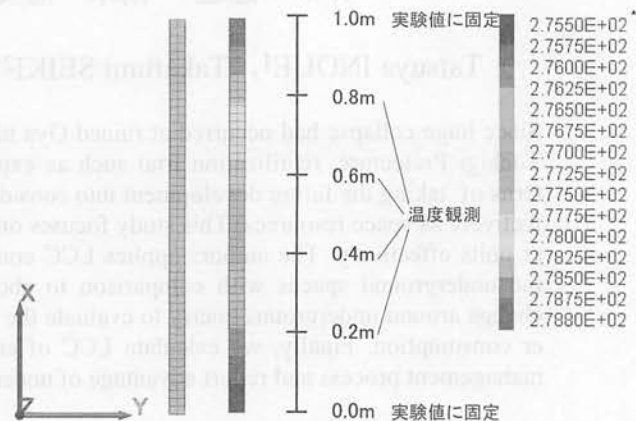


図-4 解析条件

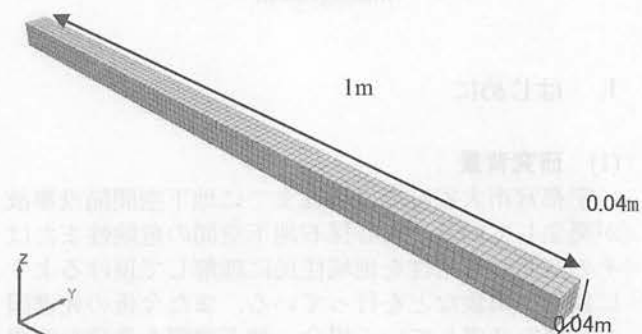


図-5 解析モデル

2011年2月28日までの62日間観測したものである。

また、本調査において2011/1/25からは隔壁を設置し外部からの空気の流入を遮断した状態の温度変化も観測した。

(b) 調査結果

壁体内温度の観測結果を図-3に示す。本調査では、2010/12/29から2011/1/25までの期間、外部空気の変化に伴って坑内気温が緩やかに低下し、この影響で大谷石壁体温度も緩やかに低下する様子が観測されている。

また、2011/1/25に隔壁を作成し外部からの空気の流入を遮断することで、それ以降の観測結果は逆に大谷石壁体の温度に影響をうける形で坑内気温が上昇する様子が観測された。0.0m地点の温度に着目すると、隔壁設置後は0.6m地点温度よりも温度が上昇している様子が確認されている。

(2) 数値解析について

本研究は、解析ソフト(FLAC3D, Itasca社製)を用

表-1 解析に用いた物性値^{4), 5)}

	大谷石
熱伝導率(W/mK)	1.074
比熱(J/kgK)	1508.3
密度(kg/m ³)	1730

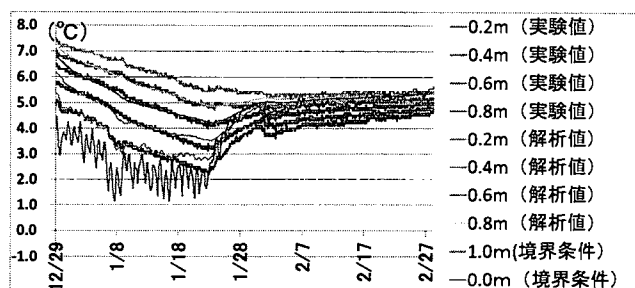


図-6 解析 A の解析結果

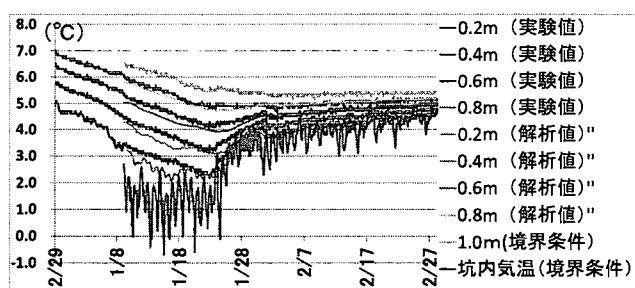


図-7 解析 B の解析結果

いて、熱伝導解析を行った。解析にはこの解析ソフトの熱伝導解析オプションを使用した。また、本論文では地下空間壁体温度観測調査を再現し調査結果と比較することで、解析の再現性の確認を行うことを目的として実施した二つのパターンの解析結果について報告する。

(a) 解析条件

解析モデルは、0.04m×0.04m×1m の棒状モデルとし、境界条件として解析モデル両端の温度を調査値に固定する。解析のタイムステップは 30s に設定し、温度計測間隔は 120s に設定する。

また境界条件は、0m地点温度に0m地点の壁体温度を与える場合（解析A）と、対象地下空間内温度を与える場合（解析B）の二つのパターンを設定した。解析条件を図-4に、解析モデルを図-5に示す。また、解析に用いた物性値を表-1に示す。

(b) 解析結果

解析結果を図-6(解析 A)、図-7(解析 B)に示す。ここで、0m 地点と 1m 地点の温度は境界条件で与えられるため、重要なのは 0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m, 各地点の温度の推移である。また、0.2m 地点までは 0m 地点の温度変化の影響を大きく受ける様子が確認された。

(3) 現場調査と数値解析の比較

調査結果と解析 A の結果を比較すると、隔壁を設置した 2011/1/25 までの温度の変化には、ある

表-2 電気料金

	1年	50年
電気料金地上施設 (万円)	106.54	5326.93
電気料金地下施設 (万円)	23.83	1191.33

程度精度よく再現できている。しかしながら、2011/1/25 以降は 0.2m 地点の温度で最大約 1℃の差が生じている。これは、0.0m 地点の境界条件に 0.0m 地点の調査値を設定したことが原因である。温度観測調査において、隔壁設置後（2011/1/25 以降）の 0.0m 地点の壁体温度が急激に上昇しており、それに影響を受ける形で各地点の解析値も急上昇の様子が確認できた。よって、2011/1/25 以降に関して、0.0m 地点の調査値は境界条件として適切でないと考えられる。

調査結果と解析 B の結果を比較すると、隔壁を設置する以前の 2011/1/25 までの温度の変化には、最大約 1℃の差が生じている。これは、解析 B において 0.0m 地点の境界条件に坑内気温を設定したことが原因であると考えられる。現場では、2011/1/25 まで隔壁を設置していないため、外気の流入に伴って坑内気温の変化が大きくその影響で差が生じたと考えられる。しかしながら、2011/1/25 以降はある程度よく再現できている。

4. LCC算出に基づく大谷採石地下空間の有効利用の検討

(1) LCCの算出について

本研究は LCC の算出を行う対象として、既往の研究¹⁾において検討が行われた、都市施設（コンテナサーバー）を選択した。

また、一般に土木構造物のライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, 以下 LCC) とは、計画・設計－建設－維持管理－解体撤去の各過程に要する費用の総額であり、これを式に表わすと、式(1)のようになる⁶⁾。

$$LCC = C_i + C_d + C_m + C_f \quad (1)$$

ここに、 C_i : 初期建設費用、 C_d : 運用費用、 C_m : 維持管理費用、 C_f : 解体撤去費用

式(1)は計画・設計から解体撤去に至るまでの全コストの合計を示しているが、維持管理費用のみを取出して LCC として比較検討している例⁹⁾も多い。

このため、本論文では地下空間にコンテナサーバーを設置し利用する事を想定し、その際の維持管理費用 C_m のみを LCC として検討を行う。

(2) 算出項目について

(a) 施設共用時の電気料金

電気料金は、既往の研究³⁾において算出された環境負荷値における電力消費量を東京電力の電力料金

表-3 かぶり厚さに対応した材料費

呼び強度(N)	24	27	30
地上資材コスト(円)	29110	30596	31487
地下資材コスト(円)	21016	22089	22732

表-4 施設工事の面積と工事費

	延床面積(m ²)		建設コスト(万円)	
	S構造	SRC構造	S構造	SRC構造
地上	6.58	2.171	118.44	91.182
地下	9.11	3.006	163.93	144.228

表-5 ポンプ規格⁹⁾

出力(W)		400
吸込高さ(m)		12～40
揚水量(l/分)	全揚程28mの時	38
	全揚程40mの時	17
ジェット部直径(mm)		98

表-6 地下水のくみ出し費用

	1日	1年	50年
消費電力量(kWh)	9.6	3504	3931488
電気料金(円)	127	46253	2312640

表-7 設備設置費用^{2),8)}

	費用(万円)
昇降設備(40m分)	354.24
くみ上げポンプ	20

単価を用いて年間の電力料金をもとに算出する。コストの算出に関して、原子力規制委員会による年間電力料金推移(推測)⁷⁾を基に電力料金の高騰率を1.7倍と考え、現在の電力料金から耐用年数である50年での電力料金単価を22.44円/kWhと推測した。施設共用1年後と50年後における地上施設並びに地下施設の電力料金の算出結果を表-2に示す。

(b) 部材投資費用

本研究では、地下施設の十分な維持管理情報がなく、施設部材の劣化状況の把握が困難で補修・補強効果の定量的な評価が無いなかで、施設の供用期間中のトータルコスト(LCC)を維持管理費(コスト)と予期しない損害(リスク)の和として定義し、維持管理案を検討する。本研究で取り扱う維持管理案として、最小限の維持管理しか行わずその代わりに大きなリスクを覚悟しようとする案や、莫大な、見方によっては過剰な維持管理費を投入し、リスクをできる限り排除しようとする案は、費用最小化を考える意味で望ましくない。そこで、本研究では供用中の補修や補強が少なくなるように、ある程度の初期費用を投入し、それによって部材が劣化するのを防ぐような維持管理案を理想とし、以降検討を行う。

また、部材投資費用は、コンテナサーバーを設置する基礎に必要な鉄筋コンクリートの材料費、工事

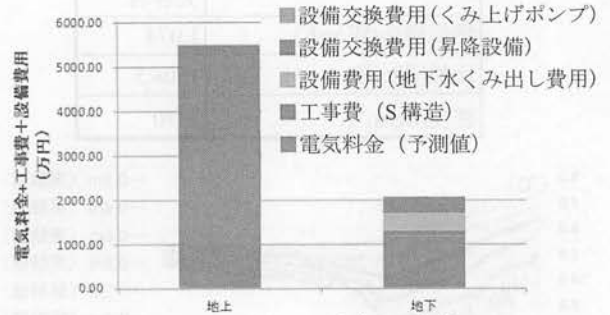


図-8 電力料金+工事費+設備費

費を部材投資費用とする。

50年間の施設共用に必要な鉄筋コンクリートのかぶり厚さは、鉄筋コンクリート中性化深さの算出手順に基づいて算出した。中性化深さの平均値は、下記の式(2)に基づき算出した⁸⁾。

$$\bar{C}_t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \sqrt{t} \quad (2)$$

α : 環境条件による係数⁸⁾

環境条件による係数 α は、二酸化炭素ガスの侵入に影響を及ぼすコンクリートの乾湿の程度を示すもの。本研究では地下空間の恒湿性から地下設備では $\alpha=1.0$ 地上設備では $\alpha=1.1, 1.3, 1.5$ として検討する。

β : 仕上材による抑制係数⁸⁾

仕上材なしの場合、 $\beta=1.0$ 、仕上材がある場合 $\beta<1.0$ である。本研究では、地上施設及び地下施設ともに $\beta=1.0$ とする。

γ : コンクリートの品質係数⁸⁾

水セメント比 x と中性化比率 R との関数であり、水セメント比 x の値によって、式(3)もしくは式(4)で算出される。

$$\gamma = \frac{R(x-0.25)}{\sqrt{0.3(1.15+3x)}} \quad (x \geq 0.6) \quad (3)$$

$$\gamma = 0.37R(4.6x-1.76) \quad (x \leq 0.6) \quad (4)$$

このかぶり厚さと施設の建設面積をもとにして、工事費、材料費を算出し、それを維持管理費に換算する(表-3、表-4)。

(c) 地下水くみ上げ費用

本研究では地下施設を供用する中で、採石地下空間に流れ込む可能性が大きい地下水の処理についても検討を行う。この場合、地下から地上に地下水をくみ上げて、近隣の河川に放流することを想定する。ポンプの消費電力は、地下水のくみ上げ量をもとにして、必要となるポンプの規格を決定する。本研究では、土被り40mの採石地下空間から地下水を地上にくみ出すことを考える。よって、40mの吸い上げが可能⁹⁾で、対象地下空間に必要な揚水量を満足するポンプを採択した(表-5)。

このポンプは、出力が400Wで、一日(24時間

稼働)で9.6kWh/日、1年間で3504kWhの電力を消費する。仮にこのポンプが50年間連続に稼働したとすると、175,200kWhの電力を消費する。地下水くみ上げ費用は、この値に電力単価をかけ合わせた積として得られる(表-6)。

(d) ポンプ、昇降設備の設置費用

本研究では維持管理に関しての費用算出を行うために、初期投資としての建設費用は検討せず、供用時に必要となる補強・修繕部分を初期費用として算出して維持管理費用を定義する。

しかし、昇降設備また地下水排出に必要なポンプ等の設備は施設供用期間とともに老朽化し、設備の交換を行なう必要がある。本節では、このための費用を算出する。昇降設備は、既往研究²⁾より建設費用が算出されているためにその値を参考にした。くみ上げポンプの場合は資料⁸⁾を参考にした(表-7)。なお、設備の交換回数とともに50年間で1回と仮定した。

(3) 有効利用の検討

地上施設と地下施設における50年後のLCCを比較した結果を図-8に示す。

施設を50年間という長期稼働させる場合は、施設共用時に発生する管理費(電気料金)が補修・補強(初期投資によって構造物の寿命を延命化した場合)に比べて、施設全体に占める割合が非常に大きい。図-8より費用全体としてかかる費用が最大(電気料金が予測値・工事費がS構造)の場合、地上施設においては全体費用5491万円であり、そのうちの建設費用が占める割合が2.99%、電力料金の割合が97.01%となった。地下施設においても全体の費用が最大になる場合(電気料金が予測値・工事費がS構造)、全体費用は、1310万円で、建設費用割合が9.04%、電気料金割合では90.96%となった。また地下施設では、地上設備に比べて工事費(初期費用)の割合が地上施設に比べて高い。以上より費用合計から地上施設を建設するよりも、現存する地下空間(大谷採石地下空間)に施設を建設の方が経費を節約できる可能性がある。

5. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

(a) 現場調査と数値解析

本論文では、地下空間内壁体温度観測調査の結果を用い、熱伝導解析によって調査を再現することで、熱伝導解析の整合性の確認を試みた。境界条件の異なる二つのパターンの解析を行い、調査結果と解析結果の比較を行った結果、解析Aでは隔壁設置後(2011/1/25以降)に最大で約1℃の継続した差を確認した。解析Bにおいては、隔壁設置前(2011/1/25以前)に最大で約1℃の差を一部で確認した。解析Aの2011/1/25以降に関して、0.0m地点の調査値は境界条件として適切でないことが懸念される。

しかしながら、2011/1/25以前では解析Aが調査結果をよく表しており、解析Bの結果と合わせて検討すると、数値解析による調査結果の再現性のある程度確認することができた。また、今回は熱伝導解析において単純な棒状モデルを使用し、一次元的な熱の伝わりのみを再現していることから、計測を行った箇所における熱伝達現象は、一次元的であると考えられる。

(b) LCC算出に基づく大谷採石地下空間の有効利用の検討

本研究では、熱負荷値から算出される消費電力を求めることと、施設を稼働させた場合を想定し、必要となる維持管理のコスト化を検討した。既往研究⁵⁾で地下空間を研究実験施設として活用した場合、地上施設に比べて、地下施設が維持管理の面で有利であるので、本研究では、より一般的な施設として都市施設(データセンター)として用いることを想定した。

ここでは、地上・地下における部材腐食確率から施設自体の寿命を算出し、必要となる補強(かぶり厚さ)がどの程度地上・地下において差が生じる可能性を比較対象とした。結果として、地下に都市施設を建設した場合、地上に同様の規模の施設を建設した場合に比べて、同程度の資材品質の場合、地下施設の方の寿命(施設の耐用年数)が長くなる可能性がある。

(c) 維持管理

維持管理を視点においた地上・地下での施設稼働時を比較した結果は、地下空間の恒温恒湿という特性が維持管理時において計算上メリットとなることを示している。部材腐食確率算出時に用いる環境条件の係数 α が地上施設と地下施設との比較の際に計算結果に大きな差を生む要因となり、構造物の寿命(耐用年数)を算出した場合、地下施設の方が地上施設に比べて建設材料品質が同程度であってもまた耐用年数を延ばすために必要な部材(かぶり厚さ)も地下施設の方が少ない結果になった。工事に際してのCO₂排出量も資材量に依存するために、地下施設の方が有利という結果になった。

環境負荷値と維持管理費が全体コストに占める割合を算出した結果、地上設備では、維持管理費が占める割合が3.7%、電力料金が占める割合が96.3%、地下設備においては10.5%、89.4%という結果となり、維持管理(工事費)の全体に占める割合が少ない。

設備費用として地下水のくみ出し費用と設備交換費用を算出した、地下水くみ出しは坑内環境維持を目的として維持管理費に加えた。また、設備交換費用はくみ出しポンプと昇降設備が施設供用に伴い老朽化が起こるが、設備の補強という形式ではなく設備交換による維持を行うために、発生する費用として維持管理費に加えた。

全費用は、維持管理費を加えた場合でも、地上設備の方が高い結果になった。また地上施設よりも、地下施設のほうが全体費用に占める維持管理費の割

合が高い。これは、地下施設の全体費用が安いために維持管理に必要とする費用の割合が高くなったと考えられ、地下施設の方が維持管理の占める額が安く有利となる要因にはならない。

(2) 今後の課題

(a) 維持管理算出について

必要な工事費、補強・補修費は維持管理費用全体でみると環境負荷値に比べかなり小さいことから、実務の状態を再現できているのか、不明な点が多い。本研究で用いた工事費単価の事例は工場であるので、算出を試みる構造物に近い工事費単価の選定を行うことが望まれる。また建設材料の単価から維持管理に必要な費用算出についても基礎となるものに対して検討を行ったが、昇降設備の場合は設備の老朽化に伴って必要となる設備の更新を想定して建設費を算出した。本研究の場合は、設備の更新を50年間で一回として算出した。昇降設備の更新を行う期間が明確になれば、より実績に合った地下施設の維持管理費の算出が可能になる。地下水のくみ出しポンプについても同様である。またこのほかにも必要となる設備の検討を行うことによって維持管理費の再現性が高くなると考えられる。

LCC算出は補修・補強を行う期間その際に必要な補強費用の算出、さらに東日本大地震のように大規模な災害に備えてリスクマネジメントを行うために必要であり、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 早坂 晃, 井上 達也, 清木 隆文: 地盤の熱特性に基づいた大谷採石地下空間の有用性評価に関する検討, 土木学会第 39 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 2ps, CD-ROM, VII-38, 2012.
- 2) 高橋 京, 清木隆文: 大谷採石地下空間の有効利用と維持管理に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第15巻, 土木学会 [一般投稿論文], pp.71-78, 2010.
- 3) 中村洋一, 松居誠一郎, 鈴木陽雄: 宇都宮市大谷付近の地質, 宇都宮大学教育学部紀要第 2 部, 31, pp.105-116, 宇都宮大学教育学部, 1987.
- 4) 土木学会 岩盤力学委員会: 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして, 丸善出版社, 平成 18 年, 2006.
- 5) 国立天文台編: 理科年表 机上版 第 80 冊, 丸善株式会社, 2007.
- 6) 亀村勝美, 副島紀代, 吉澤一雄: 新たな指標による地下構造物の性能評価について, 地下シンポジウム論文・報告書, 第 17 巻, 土木学会【投稿論文】.
- 7) 原子力規制委員会
URL: <http://www.nsr.go.jp/index.htm> (2012 年 10 月 参照)
- 8) 和泉意登志, 喜多達夫, 前田照信 著: コンクリート構造物の耐久性シリーズ中性化, 技報堂出版, 1986.
- 9) 日立ポンプ 浅深両用ポンプ製品情報
<http://kadenfan.hitachi.co.jp/lineup/category.php/08/080102/1/> (2012 年 10 月 参照)