

都市環境工学演習 A
(報告書)

都市環境工学専攻

嘉門研究室

修士 1 回 松橋 大作

目次

日韓セミナーと現場見学	1
第1章 本会議	
1.1 発表形式	2
1.2 日韓セミナーへの参加動機	2
1.3 当日まで	2
1.4 発表日当日	3
1.4.1 開会	3
1.4.2 発表	3
1.4.3 閉会	5
1.5 懇親会	5
1.6 本会議を終えて	6
第2章 現場見学	
2.1 清溪川の復元工事	7
2.2 蘭芝島における埋め立て処分場を利用したワールドカップ公園	8
2.3 現場見学を終えて	9
終わりに	10

日韓セミナーと現場見学

第五回環境地盤工学に関わる日韓共同セミナー（以降、日韓セミナー）は京都大学、Seoul National University (Geoenvironmental Research Center)、及び Korea Institute of Construction Technology の主催により、京都とソウルにおいて毎年交互に開催されている。

研究内容は環境地盤工学に関する幅広い問題を対象とし、その目的はそれぞれの国における地盤環境の工学的問題を理解し、その解決法を発見することにある。さらに、国際交流の舞台として、参加者同士が交友を持つこともその狙いとしている。参加者は日本と韓国の修士・博士課程の学生とポストドクター、大学スタッフ、及び社会人により構成され、本年度の日韓セミナーへの投稿論文は32編に及んだ。尚、研究論文執筆・プレゼンテーション・ディスカッションにおける使用言語は全て英語である。

今年度においては、2005年6月4日に韓国 Seoul National University において日韓セミナーが開催された。さらに日本からの参加者は、翌日の6月5日に①清溪川の復元工事、②蘭芝島における埋め立て処分場を利用したワールドカップ公園の造成、の二つの現場見学に参加した。

第1章 本会議

1.1 発表形式

日韓セミナーは会場内（Seoul National University）の二つの会議室を用いて A と B に分かれた二つのセッションが並行して進められた。セッション A では主に汚染土壌の浄化と封じ込めに関する研究を対象とし、セッション B では廃棄物埋め立て処分場とそのモニタリングに関する研究を対象とした。それぞれのセッションは 10 時 25 分～、13 時 50 分～、15 時 35 分～、の三回に分かれ、各セッションの所要時間は一時間半で発表者は 5 人であった（ただし、最後のセッションにおいては 1 時間 45 分 6 人）。私が発表したセッション A-1（10 時 25 分～）においては、まず発表者が 15 分程度の発表を行い、発表後すぐにディスカッション（質疑応答）を行うという形式であった。

1.2 日韓セミナーへの参加動機

現在自分が専門としている環境地盤工学という分野において、英語による論文作成・さらには海外でのプレゼンテーション・ディスカッションを経験してみたかった。さらに、今後自分が研究においても仕事においても、その成果を発表する場を国内に留まらず海外にも設けたいと欲した時、もしくはその必要に迫られた時、求められるであろうスキルを身に付ける機会としても利用したかった。

1.3 当日まで

本セミナーに投稿する論文は、私が卒業研究で得たデータに今年の 3 月に卒業された小川泰弘氏の実験結果を加えたものに基づき、作成したものである。そのため、執筆は 3 月下旬から開始すれば充分であろうと考え、余裕を持って取りかかったつもりだった。しかし、まず英語の論文の形式から勉強することから始まり、他の英語の文献を参照しながら論文で用いる単語・表現を選び出し、その上で文構成を考えていく…この慣れない英語での執筆は悪戦苦闘の連続であり、ついに締め切りぎりぎりまで見直し・修正を繰り返し、論文投稿の締め切り日である 5 月 9 日まで作業を繰り返すこととなった。

論文完成後は当日に発表するパワーポイントの準備に取りかかった。この作業も悪戦苦闘の連続であったが、とりあえず一通りのスライドができあがった。そこで、英語での発表の方法は日本語でのやり方とはやはり異なるだろうと思い、研究室の同期である FLORES 氏（氏はペルー人だが英語が非常に堪能である）に私の発表を見ても

らい、修正点やたくさんのアドバイスをいただいた。さらに、嘉門先生、勝見先生、乾先生にも発表の練習をみていただく時間を割いてもらい、数々の御助言をいただいた。そのおかげもあって私のスライドも満足のいくものになった。出発日まで残った時間は、発表後のディスカッション時に想定される質問とその答えのリストを作ることにした（その数は20項目以上に及んだが、これを頭に叩き込んでおいたおかげで当日の質問には答えることができた。）。そして前日まで何度も何度も、発音に気を配りながら発表の練習を繰り返した。

1.4 発表日当日

1.4.1 開会

6月3日に日本の参加者総勢18名とソウル市内のホテルに宿泊し、翌朝タクシーで会場である Seoul National University に向かった（写真-1）。参加者はまず登録の手続きを済ませた後、開会式が行われる会議室に集まった。そこで、Junboun Park 助教授による開会の挨拶から会議は始まった。

次に、イリノイ大学より招かれた Krishna R. Reddy 教授が「Interface Shear Behavior of Landfill Composite Liners」というタイトルの一時間のレクチャーを行った。その内容は、埋め立て処分場において遮水ライナーを使用した失敗事例・処分場の紹介・力学的挙動・モデルを用いた分析や実験結果にまで及ぶ包括的なものであった。レクチャー終了後には質疑応答の時間が設けられ、活発なディスカッションが繰り広げられた（写真-2）。

1.4.2 発表

15分の休憩後、いよいよ最初のセッションが始まった。私の発表はセッション A-1 の中で4番目である。その内容は、遮水壁としての新技术



写真-1 発表会場



写真-2 ディスカッション

であるソイルベントナイト鉛直遮水壁に、無機化学水溶液を透水させた時に十分な遮水性は維持されるのか否かを実験的に評価するものである。セッション A-1 における他の発表者は社会人の方、ポストドクターの方、研究機関の方であり、さすがに上手い発表をすると感じながら自分の順番を待った。3 番目の方の発表も終わり、私の名前が呼ばれる。想像していたほどの緊張はなく、適度な高揚感とともに発表を始めた（写真-3）。練習の成果もあって、多少のつまずきはあったものの、納得のいく発表ができ、満足していた。しかし、すぐに一番心配していたディスカッションが始まる。挙手された二人の質問者の質問・意見の内容は大きく分けて以下の3点であった。

1. 想定される耐久年数の 250 年という数字はどうやって算出したのか？
2. 実験に用いた砂の粒径は？
3. この研究で対象とした汚染物質は重金属なのか？石油系物質や揮発性有機塩素化合物を用いた実験もやってみるとよい。

想定される質問内容をいくつも考えておいたこともあってか、答えにつまることもあったが、質問者には伝わったと思う。会議において英語で質問され、その質問に英語で答えることは想像以上に難しいということを実感した。しかし、質問者が私の答えに納得してうなずいた時には嬉しさと同時に、少しの自信を身に付けることができた。

会議はその後も順調に進み、私も自分の発表が終わってからは他の発表者の研究を聞くことに集中できた。特に、セッション B-2 の Yong Sung Kim 氏は、私と同じ修士課程ながら流暢な英語を用いた非常に上手なプレゼンテーションを行っていた。後に会話をする機会を持った時、氏は7年間海外留学の経験があるということだったのでその英語能力の高さには納得できたが、総じて韓国の発表者はみな英語が堪能であるような印象を受けた。



写真-3 発表状況



写真-4 閉会式

1.4.3 閉会

17時30分、すべての発表が終わり、参加者全員が閉会式の行われる会議室に集まった。そして、嘉門先生による閉会宣言とともに会議は幕を閉じることになった（写真-4）。英語による論文執筆、プレゼンテーション、ディスカッション、海外での会議、あらゆるものが初体験であったがそれら全てのことに3ヵ月間全力を尽くして来た緊張感から解き放たれ、心地良い気分で先生の御言葉を聞いていた。自分にできる努力はしてきたという思いがあったため、満ち足りた気分だった。

1.5 懇親会

会議終了後、日韓セミナー参加者全員による夕食を兼ねた懇親会が開かれた。私はそこで、韓国の学生との交流を深めるため、積極的に会話をした。相手は日本語を話せず、こちらはハングルを話すことはできないため、言語はもちろん英語である。お互いの自己紹介から始まり、食べ物や学生生活、自分たちの将来の話等、話題は様々なものに及んだ。実は出国前、現在の日韓における外交問題について韓国の学生の考えを聞いてみたいと思っていたのだが、話が弾み、冗談が飛び交う中では残念ながら聞くことはできなかった。

懇親会も中盤になり、日本と韓国の学生の中からそれぞれ一人ずつ Best Presentation Award が発表されることになった。日本人の学生の中で発表されたのは私の名前であった。驚きを隠せず、正直信じられない思いであり、賞状と賞品を授与した時は手の震えを感じた（写真-5）。

もちろんこれは私一人の力ではなく、ここまでの発表にさせていただいた先生方のお力によるものであることは十分にわかっていたが、それでも感動して胸の中は一杯であった。自分にできるだけの努力をしてそれが報われた時の思い…この経験と感動は自分の人生における大切な財産となった。

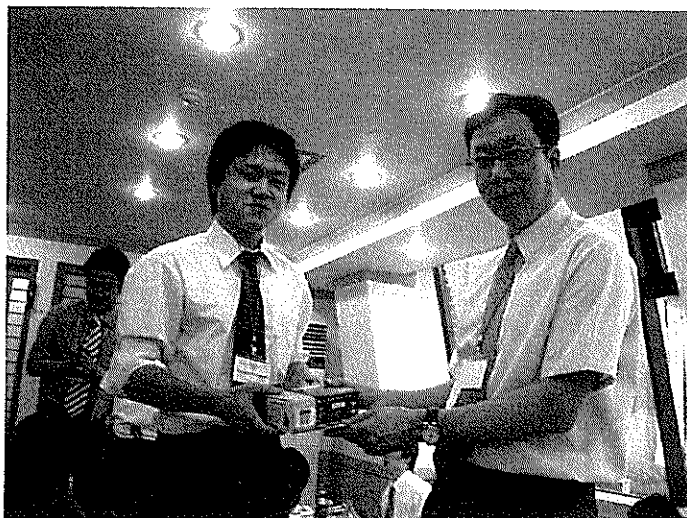


写真-5 受賞式

1.6 本会議を終えて

会議を終え、環境地盤工学という分野において、日韓それぞれの国において問題となっているものが何であるのかを知ることができた。また、それら問題への対策方法も様々であり、お互いの国における解決策を学びあえたと思う。

さらに、韓国の学生とコミュニケーションを図れたことは私の大きな喜びである。今回の会議に参加できなければ、韓国の学生と英語で話す機会はきっとまだまだ先になっていたに違いない。今後はさらに英語の勉強もして、自分が専門とする分野を英語で説明し、相手に十分にわかってもらえるようになりたいと強く思った。

第2章 現場見学

6月5日（日）においては次の二つの現場見学を行った。

2.1 清溪川の復元工事

2.2 蘭芝島における埋め立て処分場を利用したワールドカップ公園の造成

2.1 清溪川の復元工事

清溪川は、北側に北岳山と仁王山、そして東側の駱山と南側の南山から水が流れ込み、かつてソウルを中心を横切っていた川である。しかし、河川の汚染が深刻化し、伝染病と犯罪の温床として悪名高い存在となったため、その後、都市の発展とともに河川にフタをし、道路・高架道路として利用されるようになった。

しかし、清溪川をフタで覆ったことは、機能性や効率性だけが強調された開発時代の産物で、環境を重視する現在の流れにあわなくなった。その他、高架橋の老朽・都市の再活性化・文化スペースの創出等の理由から、失われたソウルの本来の姿を取り戻そうと清溪川の復元が求められるようになった（写真-7）。

その工事の過程にはもちろん数多くの問題があった。その大きなものは交通と周辺商人への対策である。都心の幹線道路であった清溪川路の斜線が減ることによって交通混乱は必至となる。そこで、車線縮小の内容を広く市民に知らせる・乗用車利用の自粛や公共交通の利用を持続的に訴える・交通案内を強化する等の対策を講じた結果、市民の積極的な協力もあつ



写真-6 清溪川の施工現場

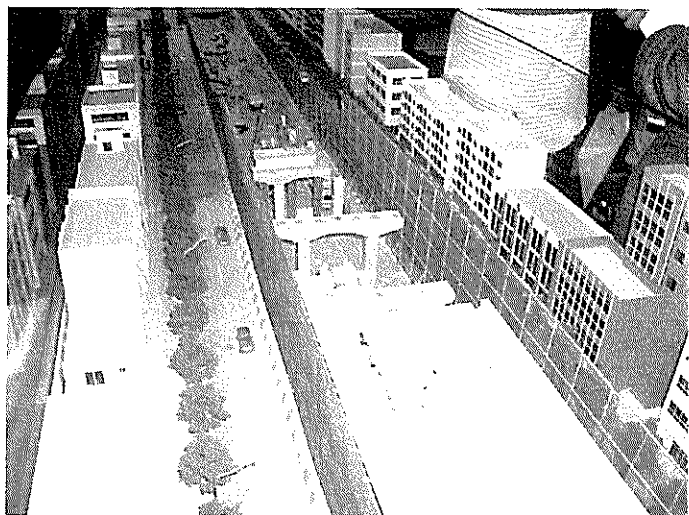


写真-7 清溪川の模型（手前から奥に向かって工事進行の様子を示している）

て心配されていた交通混雑はなかった。周辺商人に対しては、清溪川を巡る無量シャトルバスを運行する・付近の駐車料金を割引する・金融財政支援を行う・移住希望者には専門商店街施設を用意する等の対策を行った。

現在は作業工程の9割が終了しているとのことであった。復元後には周辺をエコロジー公園として市民の憩いの場を提供することによって、自然と人間中心の環境に配慮した都市空間を目指していく。

2.2 蘭芝島における埋め立て処分場を利用したワールドカップ公園の造成

蘭芝島はかつては蘭と靈芝が生殖し、季節毎にあらゆる花が満開する美しい島であり、また、白鳥、里鴨などの数万の渡り鳥が訪れる自然の宝庫であった。しかし、急激なソウルの巨大都市化の過程で、1978年ゴミの埋め立て地と化した。以後、1993年までの15年間、生活ゴミ、建設廃資材、産業廃棄物などの約9200万 m^3 のゴミがここに埋められ、90余メートルの二つのゴミの山ができた。

その後、発生ガスや浸出水による環境汚染が深刻化したため、蘭芝島を環境に配慮した公園に再生しようとする努力が始まった。

まず、埋め立て処分場の上部を覆土・整地し、斜面の安定処理を行った。周辺には遮水壁を設け浸出水の拡散を防いだ。また、発生するメタンガスは収集して競技場と隣接地域のマンションの冷暖房の燃料として再活用されている(写真-8)。

現在はすでに二つの立派な公園が完成しており、園内には休日を楽しむたくさんの人の姿が

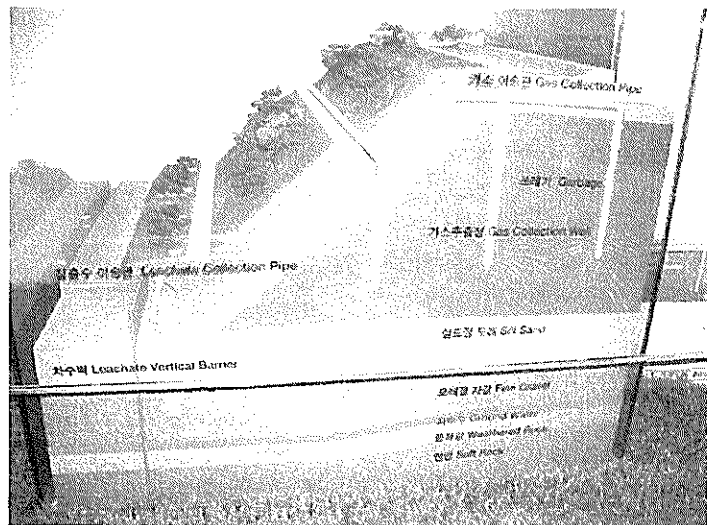


写真-8 ワールドカップ公園の模型



写真-9 現在のワールドカップ記念公園

みられた（写真-9）。

2.3 現場見学を終えて

韓国随一の都市として、そして世界を代表する都市として、ソウルも時流に合わせた変化を遂げている。産業優先の開発を進めた結果、環境悪化を招き、今度はその対策に追われる。この過程は世界の大都市と呼ばれるほとんどが経験しているものであり、日本も例外ではない。

清溪川の復元の様子を見学していた際に、私は東京が辿った変化をソウルに重ねあわせた。東京はかつては水の都と呼ばれるほど、水を利用した産業・文化の発展が盛んであり、また、その景観も素晴らしいものであったという。しかし、世界の大都市としての発展に伴い、水路が軽視されるようになると、工場排水等の原因による水質汚濁が進んだ。そして現在では再び水辺の空間が見直されている。ソウルもまた、都市における景観が見直され、都市構造のあり方が変わってきており、再び私がソウルを訪れる時にはきっと今とはまた異なった姿になっていることと思う。

蘭芝島におけるワールドカップ公園も、現在はその地中には廃棄物が溜まっている。しかし、いつかはその安定化のための措置が成果として現れ、またもどのような美しい姿の蘭芝島が取り戻せる時がやってくるかもしれない。

終わりに

今回、海外での発表の場を与え、論文発表に際し様々なご助言を賜りました 嘉門雅史 教授に厚く御礼を申し上げます。勝見武 助教授、 乾徹 助手には英語の論文の作成が初めての経験であった私を終始指導して頂き、今回の論文を作成・発表することができました。深く感謝の意を示します。

また、ソウルでの会議におきましては Seoul National University の Junboun Park 助教授、 KICT の Ha lk Jung 氏をはじめとした現地の方々に大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

さらに、ソウルへの渡航に際し、平成 16 年度第 2 回・研修助成基金殿より渡航費として助成金を頂きました。運営委員の方々には重ねて御礼を申し上げます。



Best Presentation Award

Mr. Daisaku Matsuhashi

is presented this award for the best presentation in the 5th Korea Japan Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering in Seoul National University on 4th June, 2005.

Masashi Kamon (Kyoto University)

加内 雅史

Junbom Park (Seoul National University)

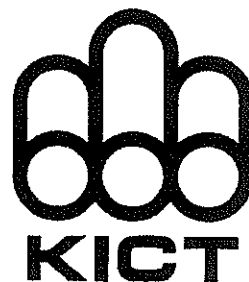
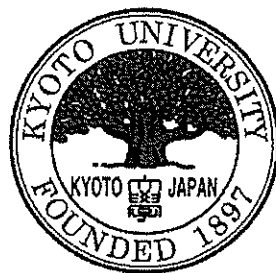
Junbom Park

Ha Ik Jung (KICT)

鄭 夏翼

The 5th Korea-Japan Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering

Date: 4th June, 2005 ~ 5th June, 2005



Host Organizations: Seoul National University (Geoenvironmental Research Center)
Kyoto University
Korea Institute of Construction Technology

15:35~17:20

Session A-3: Remediation & Containment (III) (Room 403)

(Session chair: Toru Inui)

Application of Fe-loaded Zeolite in Permeable Barriers for the Contaminated Groundwater with Both Cd and Cr(VI) : a Pilot Scale Model Test

Sungsu Rhee, Seunghak Lee and Junbom Park

Improvement of Toughness of Cement Treated Clay for Barrier System by Inclusion of Fibrous Materials

Nozomu Kotake, Masafumi Hirata, Tomoyuki Akai, Masato Yamamoto, Masahide Ishikawa and Masashi Kamon

Distribution of Dioxins in Soil and Sediment in Lake Biwa Basin and Evaluation of Aquatic Dioxins in Yasu River and Lake Biwa

Baek Soo Park, Keisuke Sato, Reiko Saino, Masakazu Kanematsu, Kazuhide Hayakawa, Masafumi Nakamura and Yoshihisa Shimizu

Mechanical Properties of H-H joints in H-jointed Steel Pipe Sheet Piles

Yuuki Mitsuda, Shinya Inazumi, Makoto Kimura and Masashi Kamon

The Ageing Effect on the Removal of Cesium and Cobalt from Radioactive Soil by the Electrokinetic Method

Gyenam Kim, Jaehyuk Hyun and Ha-Ik Chung

Hydraulic Properties of H-H joints in H-jointed Steel Pipe Sheet Piles

Shinya Inazumi, Makoto Kimura, Yuuki Mitsuda and Masashi Kamon

DISCUSSION

Session B-3: Waste Landfills & Monitoring (III) (Room 405)

(Session chair: Ho Young Jo)

Settlement Analysis of Dredged and Reclaimed Soil Using Improved Hydraulic Consolidation Test

Hyunggon Kim, Junbom Park, Ki-ho Lee and Yong Sam Kwon

Influence of Freezing Method on the Permeability of Frozen-thawed Soils

Yuzuru Ito, Masashi Kamon, Kazuto Nii and Kenji Aramoto

Geoenvironmental Characteristics of Atomizing Slag for Waste Landfill Application

Ha Ik Chung, Sang Keun Kim, Yu Jun, Won S. Chang and Jeoung S Park

Laboratory Scale Preliminary Investigations for In Situ Electrokinetic Remediation with Permeable Reactive Barrier

Halk Chung, WonSeok Chang and MyungHo Lee

Reduction of Ammonia and Hydrogen Sulfide Emissions by Stable Aqueous Foam-Microbial Media

Seung-Ryong Lee, Joon Kyoung Han, Jooyoung Park and Kyoungphile Nam

A Case Study on Bridge Pier Scour in Fine-grained Soils

Kiseok Kwak, Hyunsuk Yoon, Ju hyung Lee, jaehyeon Park and Moonkyung Chung

DISCUSSION

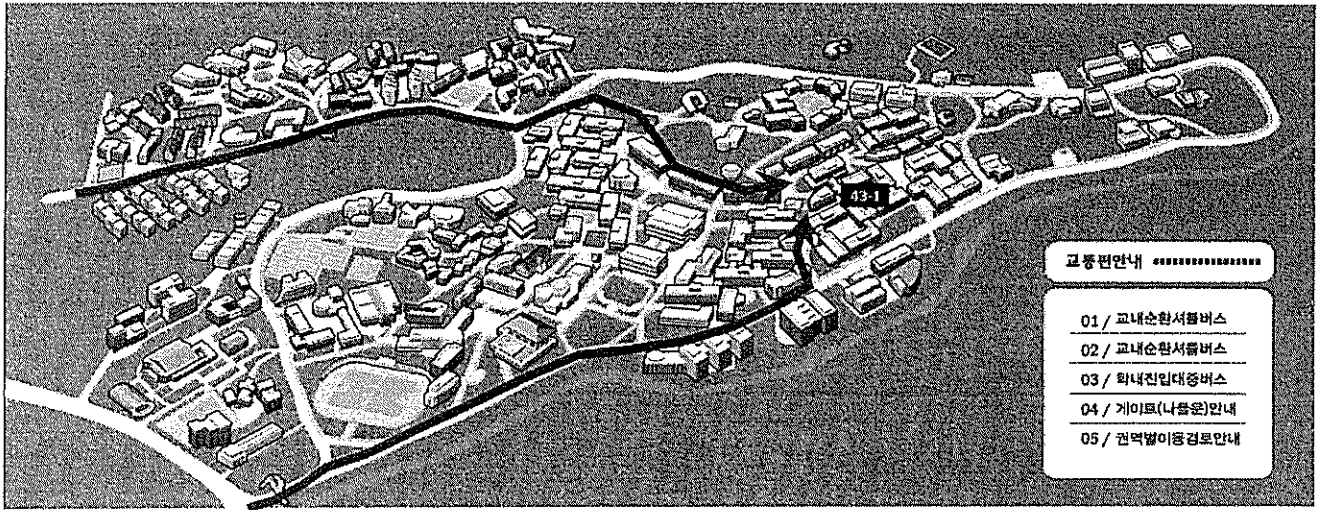
17:20-17:30

Closing Remarks

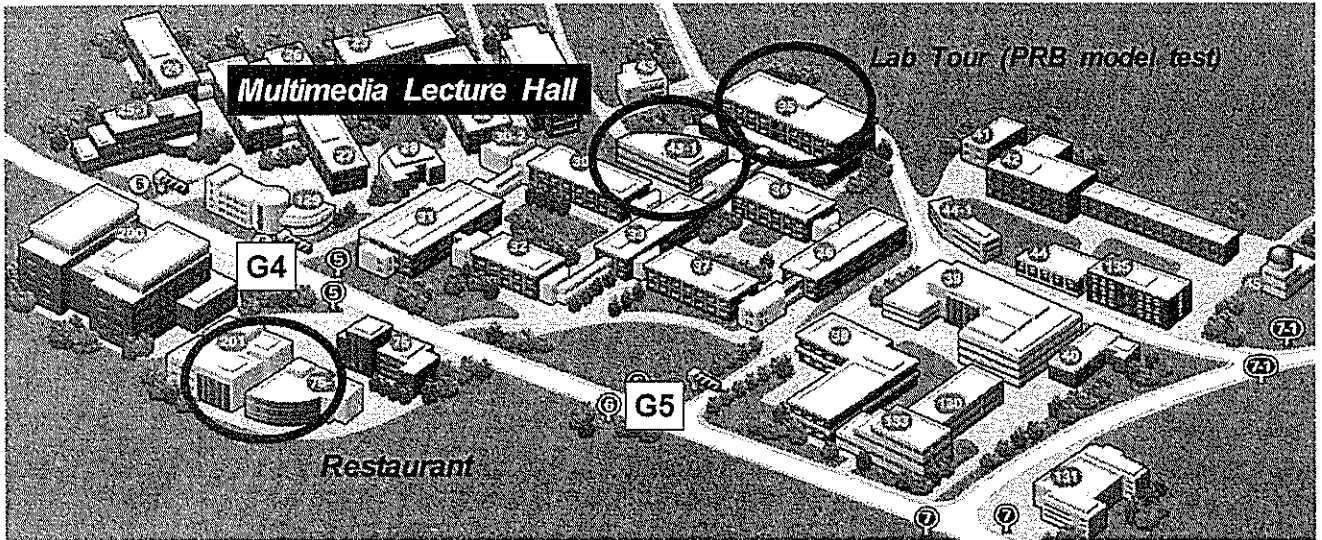
(Room 401)

Masashi Kamon (Professor, Kyoto University, Japan)

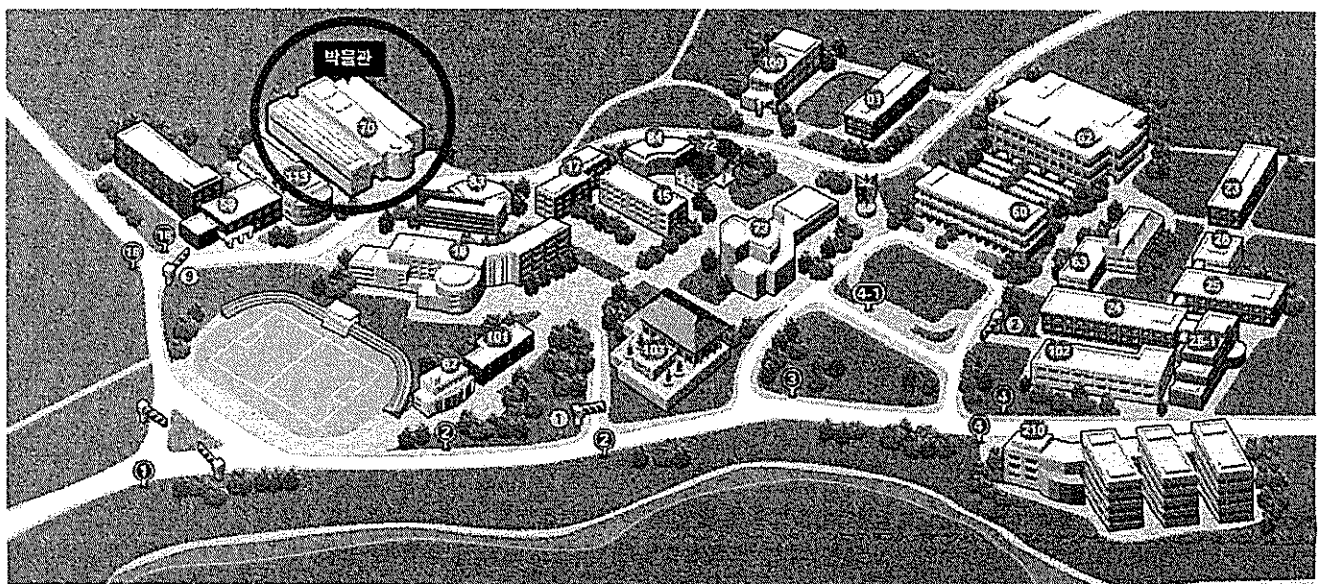
1. Seoul National University



2. Multimedia Lecture Hall (No. 43-1), Building No. 35 and Restaurant



3. Seoul National University Museum



DATE: 5th June, 2005

VENUE: Waste Landfill in KOREA (World Cup Park)

09:00~12:00 TECHNICAL TOUR

12:00~13:30 LUNCH



Sponsored by

- Brain Korea 21 (Research Division of Seoul National University / Hanyang University for Social Infrastructure and Construction Technology)
- HYUNDAI Engineering & Constructuon Co. LTD
- SAMSUNG Corporation
- SK Engineering & Construction

Hydraulic conductivity of soil-bentonite wall permeated with various inorganic solutions

Masashi Kamon¹, Yasuhiro Ogawa², Daisaku Matsuhashi², Takeshi Katsumi¹, Toru Inui¹, and Susumu Araki³

¹*Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University, Japan*

²*Graduate Student, Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University, Japan*

³*Raito Kogyo Co., Ltd., Tokyo, Japan*

ABSTRACT: Construction of soil-bentonite cut-off walls is a valid method to prevent the contaminants in soil from migrating in groundwater. In situ hydraulic performance of soil-bentonite wall is influenced by many factors, such as the stress status, concentrations of chemicals in groundwater, accidental defects, and so on. In this study, flexible wall permeability tests were conducted to evaluate the chemical compatibility of the soil-bentonite in terms of the hydraulic barrier performance. Experimental results show that 1) hydraulic conductivity values permeated with distilled water were lower than 1.0×10^{-8} cm/s and 2) hydraulic conductivity values permeated with inorganic solutions (CaCl_2 , MgCl_2) of 0.1 and 1.0 mol/L, or seawater, against which bentonite does not swell adequately, were only less than one orders of magnitude higher than those permeated with distilled water. As a conclusion, soil bentonite is enough chemically compatible for the inorganic solutions.

1 INTRODUCTION

Vertical cut-off walls are constructed at contaminated sites to contain the contaminants and prevent their transport in the aquifer. A hydraulic barrier material in the cut-off wall system is required to have a low hydraulic conductivity. Soil-bentonite vertical cut-off walls provide extremely low hydraulic conductivity values as well as sufficient deformability. A new method for the soil-bentonite cut-off wall construction has been developed recently, by employing the TRD (Trench cutting and re-mixing deep wall) method to construct the cut-off wall of high homogeneity.

It is well known that the hydraulic conductivity of soil-bentonite strongly depends on the chemical component of the permeant, as well as the effective consolidation pressure, because bentonite does not swell against inorganic solutions or nonpolar liquids (Norrish and Quirk 1954). When the soil-bentonite is used as a cut-off wall, its chemical compatibility should be assessed under the given conditions in the field. This paper presents the experimental results of permeability tests for the soil-bentonite specimens under various confining pressures to evaluate the effects of inorganic chemical solutions and confining pressures on the hydraulic barrier performance of soil-bentonite.

2 EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Sample preparation

Table 1 shows the procedure of the sample preparation. Soil-bentonite specimens used in the laboratory experiment were prepared according to the construction procedure of the soil-bentonite cut-off wall employing the TRD method, which is as follows; 1) mix the in-situ soil with the bentonite slurry in the trench to achieve enough fluidity, 2) add and mix the bentonite powder in the trench. Table 2 shows the physical properties of the soil-bentonite mixture.

The mixture was then poured into the consolidation cell of 60 mm in diameter and pre-consolidated at the consolidation pressure, which is dependent on the confining pressure in the permeability tests.

2.2 Permeability test

After a certain period of the pre-consolidation, soil-bentonite specimens, having a 25 mm height and 60 mm diameter, were subjected to the hydraulic conductivity test with a flexible-wall permeameter (ASTM D 5084). Confining pressure values were 15, 30, 60, 90, 120, and 150 kPa. A hydraulic gradient was 50-60 except the case of the confining pressure was 15 kPa, where it was approximately 30. The permeants were distilled water, calcium chloride (CaCl_2) solutions, magnesium chloride (MgCl_2)

solutions, or seawater. Major component of the seawater is shown in Table 3. CaCl_2 and MgCl_2 solutions were used to investigate the effects of divalent cations, which are commonly found in natural aqueous system as well as in water discharged from the industrial process. Concentrations of these solutions were 0.1 and 1.0 mol/L.

2.3 Free swell test

Free swell tests were conducted for the bentonite powder used in this study according to ASTM D 5890. Swelling volume of 2 g bentonite after 24 hours soaking in a certain solution was measured.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Changes in hydraulic conductivity with time

Figure 1 illustrates the changes in hydraulic conductivity values with the pore volumes of flow when the confining pressure was 30 kPa. As the permeation proceeded, hydraulic conductivity values permeated with the distilled water continuously decreased, particularly at the early stage of the test. This is possibly because the bentonite in the specimen could absorb the influent water with the formation of diffuse double layer and osmotic swelling since it did not swell fully during the pre-consolidation. Hydraulic conductivity values with the CaCl_2 and MgCl_2 solutions were stabilized in the range of 1×10^{-8} to 3×10^{-8} cm/s, which were higher than those with the distilled water. Although the soil-bentonite was exposed to the distilled water at the pre-consolidation, sodium ions included in the bentonite were replaced with calcium or magnesium ions as the permeation with CaCl_2 or MgCl_2 solutions proceeded, and the swell characteristic of bentonite changed from the osmotic swelling to the crystalline swelling. In addition, the collapse of diffuse double layer was considered to lead to the higher hydraulic conductivity values (Katsumi, Onikata, Hasegawa, Lin and Kamon 2001).

Figure 2 illustrates the long-term changes in hydraulic conductivity values of the soil-bentonite specimens permeated with 0.1 and 1.0 mol/L CaCl_2 solutions, at the confining pressure of 30 kPa. The cumulative flow volume was larger than 6 pore volumes. Although the hydraulic conductivity values increased or decreased slightly at the beginning of the permeation, they were stabilized in the range of 1×10^{-8} to 3×10^{-8} cm/s after the cumulative flow volume exceeded 3 pore volumes. Therefore, the soil bentonite wall can maintain its low hydraulic conductivity in the long term against the inorganic solutions having such high concentrations.

3.2 Effect of the confining pressure

Table 1. Materials and the procedure for the sample preparation

Material	Proportion
Gravel sand ($w_n = 26\%$)	1) Mix the gravel sand and the volcanic cohesive soil in a dry weight ratio of 25 : 4.
Volcanic cohesive soil ($w_n = 70\%$)	
Bentonite	2) Add to the soil the 10 % bentonite slurry with the volume for the flow value of the mixture to reach 150 mm according to the JIS R 5201 method.
Distilled water	
	3) Add and mix the powder bentonite with 100 kg/m^3 to the mixture.

Table 2. Basic properties of soil-bentonite

Liquid limit (%)	75.2
Plastic limit (%)	24.2
Plastic index	51.0
Particle density (g/cm^3)	2.72
Water content (%)	32.0
Grain size distribution	
Gravel fraction (%)	4.1
Sand fraction (%)	51.7
Silt fraction (%)	23.3
Clay fraction (%)	20.9

Table 3. Concentrations of major cations in the seawater used in the laboratory experiments

	Na	Mg	K	Ca
Concentration (mol/L)	0.293	0.039	0.089	0.015

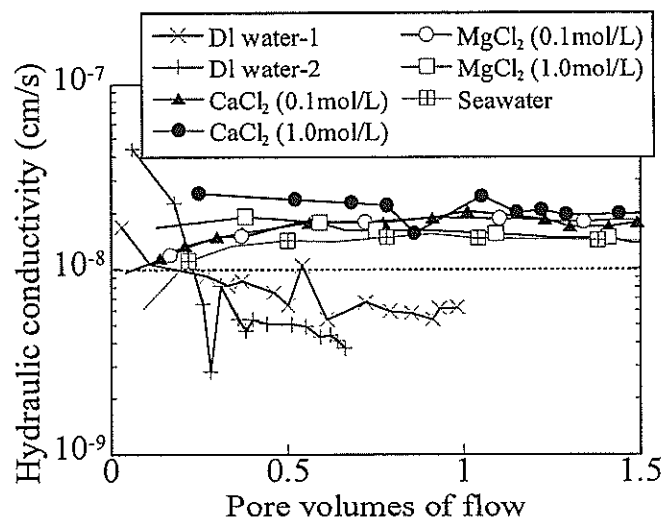


Figure 1. Changes in the hydraulic conductivity values with the pore volumes of flow

Figure 3 illustrates the hydraulic conductivity values affected by the confining pressures, when permeated with various solutions. Hydraulic conductivity values permeated with the distilled water were about 1×10^{-8} cm/s, which is three orders of magnitude lower than that for the soil sample itself (the mixture of the gravel sand and the volcanic cohesive soil) of 1×10^{-5} cm/s. The larger confining pressure led to the lower hydraulic conductivity values regardless of the types of solutions. This is probably because the lower void ratio induced by the higher pre-consolidation and confining pressure results in the decreasing effective void space that allows the water flow. Even at the lowest confining pressure of 15 kPa, the hydraulic conductivity values were approximately 1×10^{-8} cm/s. At the confining pressure of 150 kPa, the hydraulic conductivity values were about one-fourth as high as those at the confining pressure of 15 kPa. The effect of inorganic solutions on the hydraulic barrier performance was similar regardless of the confining pressure; the hydraulic conductivity values permeated the inorganic solutions were 1 to 3 times higher than those with the distilled water.

3.3 Effect of the concentration of the inorganic solution

Figures 4 illustrate the hydraulic conductivity values affected by the concentrations of the CaCl_2 and MgCl_2 solutions. Hydraulic conductivity values permeated with the inorganic solutions were only approximately twice as high as those permeated with the distilled water. As previously noted, this is because the osmotic swelling and diffuse double layer were collapsed with the effect of divalent cations (Katsumi, Benson and Kamon 2001). Comparing the results for 0.1 mol/L CaCl_2 solutions with those for 1.0 mol/L CaCl_2 solutions (see Fig. 4(a)), the hydraulic conductivity values were almost similar. From this result, it is indicated that the concentration of the inorganic solution has no significant effect on the hydraulic barrier performance of the soil-bentonite wall when it is higher than 0.1 mol/L. The consistent results were observed in the hydraulic conductivity values permeated with MgCl_2 solutions. Table 4 shows the results of free swell tests for the bentonite using the permeants used in this study. Swelling volume for 0.1 mol/L inorganic solutions was almost equal to those for the 1.0 mol/L solutions. In addition, the hydraulic conductivity values for the seawater were similar to those for the CaCl_2 and MgCl_2 solutions as shown in Fig. 3; swelling volume for the seawater was also similar to that for the CaCl_2 and MgCl_2 solutions. From these observations, it can be considered that the swelling volume values of the bentonite using inorganic solutions are the indices of their effects on the hydraulic conductivity of the soil-bentonite.

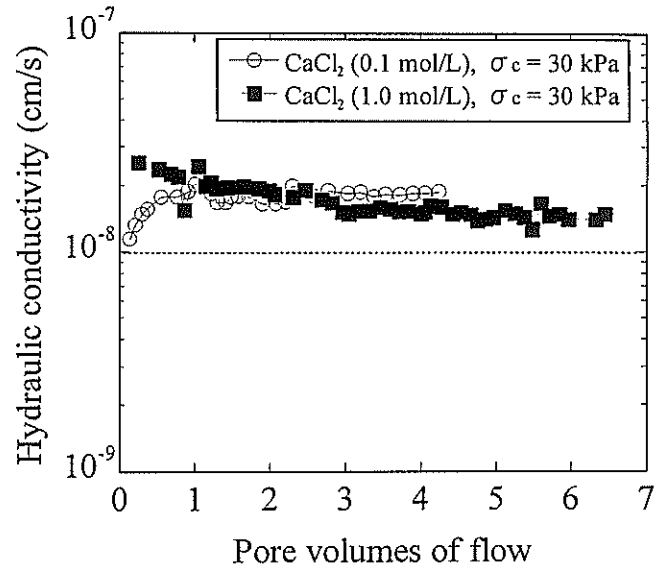


Figure 2. Long-term change in the hydraulic conductivity values permeated with CaCl_2 solutions

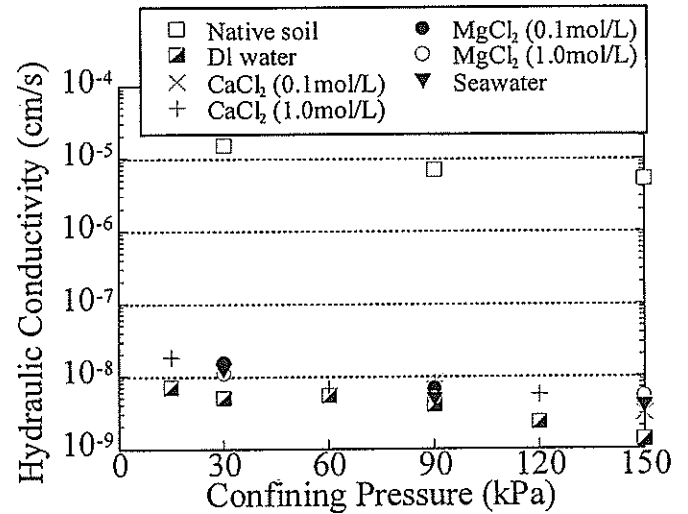


Figure 3. Relation between the hydraulic conductivity values and the confining pressure

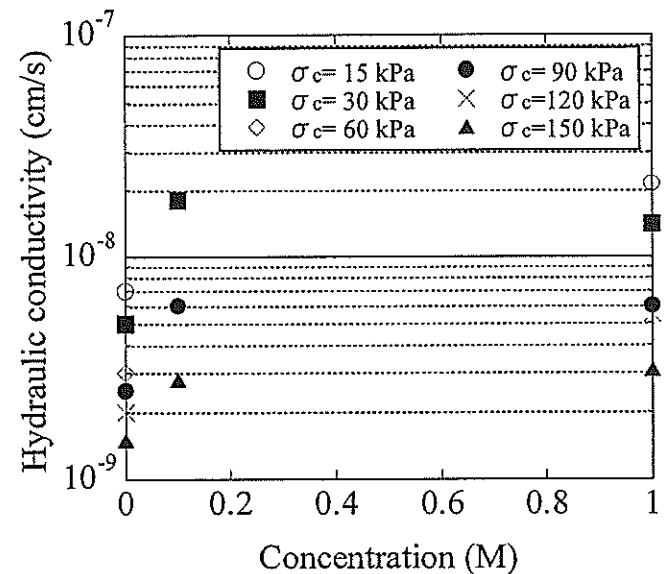


Figure 4 (a). Relation between the concentration of CaCl_2 solutions and the hydraulic conductivity values

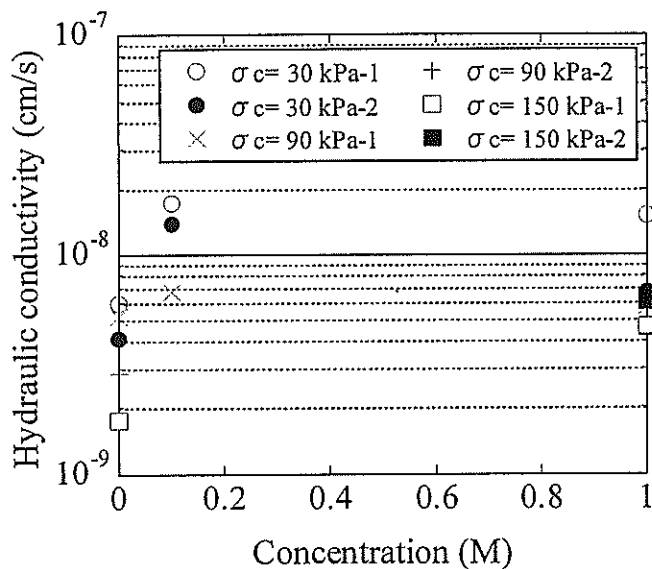


Figure 4 (b). Relation between the concentration of $MgCl_2$ solutions and the hydraulic conductivity values

Table 4. Swell volume of the bentonite for the permeants used in the permeability tests.

Solutions		Swell volume (mL/2g-solid)
Distilled water		24
CaCl ₂	0.1 (mol/L)	8.0
	1 (mol/L)	7.5
MgCl ₂	0.1 (mol/L)	7.8
	1 (mol/L)	7.5
Seawater		7.8

4 CONCLUSIONS

The main results obtained from this study are as follows:

- (1) The larger confining pressure led to the lower hydraulic conductivity values of the soil-bentonite specimens regardless of the types of inorganic solutions.
- (2) Hydraulic conductivity values permeated with the inorganic solutions were only approximately twice as high as those permeated with the distilled water. This is because the bentonite in the specimen can swell to a certain degree at the pre-consolidation stage. The concentration of the inorganic solution has no significant effect on the hydraulic barrier performance on the soil-bentonite wall when it is higher than 0.1 mol/L. These experimental results confirmed the chemical compatibility of the soil-bentonite in terms of hydraulic performance.

- (3) Swelling volume value of the bentonite using a certain inorganic solution can be an index of its effect on the hydraulic barrier performance of the soil-bentonite.
- (4) Even when permeated with the high concentration of divalent solutions (1.0 mol/L) at the lowest confining pressure of 15 kPa, the hydraulic conductivity value of the soil-bentonite is lower than 1×10^{-7} cm/s. Along with its chemical compatibility, the soil-bentonite is confirmed to be suitable for the barrier material in the vertical cut-off wall system.
- (5) Hydraulic conductivity values for the $CaCl_2$ solutions were stabilized in the range of 1×10^{-8} to 3×10^{-8} cm/s even when the cumulative flow volume reached larger than 6 pore volumes. However, in order to clarify the in-situ performance of the soil-bentonite wall in the long term, it is necessary to monitor the long-term changes in hydraulic conductivity values in laboratory tests.

REFERENCES

- Norrish, K. and Quirk, J. (1954): Crystalline swelling of montmorillonite, Use of electrolytes to control swelling, *Nature*, Vol.173, pp.255-257.
- Katsumi, T., Onikata, M., Hasegawa, S., Lin, L.C., Kamon, M. (2001): Hydraulic conductivity of modified bentonite permeated with inorganic chemical solutions and its applicability to landfill barrier, Proceeding of the Third Japan National Symposium on Environmental Geotechnology, Japanese Geotechnical Society, pp.315-320 (in Japanese).
- Katsumi, T., Benson, C.H., and Kamon, M. (2001): Chemical compatibility of bentonite liner material, *Tsuchi-To-Kiso*, Japan Geotechnical Society, Vol.49, No.2, pp.21-24 (in Japanese).