

도심지 물다짐 공법의 적정 시공방법에 관한 연구

정달영¹, 장종환², 정진혁^{2*}

¹서울시립대학교 토목공학과, ²서울시 도시기반시설본부

Study on the Optimal Construction Method for the Compaction Method of Hydraulic Filling in Metropolitan Areas

Dal-Yeong Jeong¹, Jong-Hwan Jang², Jin-Hyuck Chung^{2*}

¹Department of Civil Engineering, University of Seoul

²Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters

요약 본 연구는 도심지에서 좁은 폭 구간에 실시하는 물다짐 공법의 적정 시공방법 제안을 연구목적으로 한다. 도심지 차도나 보도의 도로함몰로 차량의 파손, 인명의 손실 등이 발생할 수 있다. 공사장 인근에서 발생하는 도로함몰의 주요 원인은 부실시공이다. 원인조사 결과 약 25~49%가 굴착복구 미흡으로 발생하는 것으로 발표되었다. 굴착복구 시공은 장비 혹은 인력으로 실시하며, 다짐장비나 인력으로 다짐이 어려운 소폭의 관로 되메우기, 흠막이가시설과 구조물 사이 협소 공간 되메우기 등을 수행할 때는 통상적으로 물다짐 공법을 사용하고 있다. 그러나 물다짐에 관한 다짐원리와 시공 조건 관련 표준시방 및 품질관리 기준은 미흡한 상태이다. 이에 본 연구에서는 물다짐 공법에 대해서 다짐원리 및 적정 되메우기 재료와 다짐효율에 관한 실내모형시험을 수행하고, 현장시공 현황 및 문제점을 조사분석하여 물다짐 공법의 가이드라인을 제시하였다. 결론적으로 물다짐 공법의 원리를 분석한 결과 투기하는 되메우기 재료는 입도분포와 투수성이 주요 인자로 입도 및 투수계수의 세부기준을 제시하였고, 시공방법은 다짐효율을 높이기 위해 하부 배수층을 확보한 상태로 0.3m 단위로 층별 물다짐을 수행하여 상대다짐도 90%이상의 다짐품질을 확보해야 한다. 또한 물다짐이 완료된 상태에서 엄지말뚝을 인발한 경우 교란범위인 H-pile 단면기준으로 폭(B)의 1.5배, 높이(H)의 1.0배 주변 지반에 추가 물다짐을 수행하여야 한다.

Abstract This paper suggests a proper hydraulic filling method in downtown areas. Road subsidence on roadways and sidewalks in downtown areas can result in vehicle damage and casualties. The representative cause of road subsidence is the fraudulent construction in nearby construction sites. A deficiency of excavation restoration causes approximately 25~49% of subsidence. This is performed by equipment or manpower. Hydraulic filling is used in backfilling narrow pipe conduits and spaces between structures. On the other hand, standard specifications and quality assurance standards regarding hydraulic filling principles and construction conditions are insufficient. Therefore, in-door model experiments on hydraulic filling principles, backfilling material, and compaction efficiency were performed. This paper suggests guidelines by investigating and analyzing construction status. In conclusion, thrown backfilling material has a particle size distribution and permeability coefficient as major factors, and detailed standards of the factors are suggested. To improve the compaction efficiency, 90% or more, compaction by the floor should be in units of 0.3m while ensuring a lower drainage layer. When an H-shape stabilizing pile is pulled out after filling, additional hydraulic filling should be in the disturbance range.

Keywords : Compaction Method, Hydraulic-Filling, Metropolitan, Optimal Construction Method, Road Subsidence

*Corresponding Author : Jin-Hyuck Chung(Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters)

email: trashal@seoul.go.kr

Received November 18, 2019

Accepted February 7, 2020

Revised January 15, 2020

Published February 29, 2020

1. 서론

도심지 공사는 장소가 협소하여 구조물과 흠막이가시 설 사이 공간이 좁은 경우가 많이 발생하고 있다. 다짐기 계의 진입이 제한되는 85 cm이하의 좁은 공간에서는 물 다짐을 시행한다고만 국토교통부 건설기준코드에 수록되어 있고[1], 물다짐 사용재료, 다짐층수, 다짐 방법 등에 대한 정확한 규정은 명시되어 있지 않다. 이러한 상황 때문에 현장에서는 기준 없이 임의 시공하고, 다짐도 확보가 안 되어 도로함몰의 원인이 되는 경우가 있다.

이에 본 연구에서는 물다짐공법 되메우기 재료와 다짐 방법을 제시하였다. 현장시공 현황을 조사하여 물다짐 시공 문제점을 분석하고, 실내모형시험을 통하여 되메우기 재료와 다짐방법의 효율성을 분석하였다. 도심지에서 사용빈도가 높은 흠막이가시설과 구조물 사이가 협소한 경우에 대해서 물다짐 공법의 적정 시공방법을 제시함으로써 도로 및 보도함몰 등의 재해 요인을 저감시키는 효과를 기대한다.

2. 현장 현황조사

도로함몰 원인을 문헌을 통하여 조사하고, 현장에서 물다짐 시공현황을 확인하기 위해 흠막이가시설을 시공 중이거나 시공예정인 도심지공사장의 현장소장과 건설사업관리기술자를 대상으로 설문지를 통하여 조사하였다.

2.1 도로함몰 원인조사

도로함몰의 원인은 인근에 공사장이 있을 경우와 인근에 공사장이 없는 경우로 나눌 수 있다. 인근에 공사장이 있는 경우는 대부분 공사장의 부실시공으로 인하여 발생 되는 것으로 알려져 있다. 대표적인 사례로 흠막이가시설의 차수처리 미흡, 지보시공 불량, 굴착복구 미흡, 지반보강 미흡, 굴착중 지하수위 저하로 인한 배면지반 침하, 과다굴착에 의한 벽체 변형 등이다[2].

2015년 1월에서 8월까지 국내 대도시 도로함몰 현황을 조사하였다. 발생한 도로함몰은 39건이다. 굴착복구 19건(49%), 상하수도 20건(51%)으로 보고되었다[3].

2010~2015.7월까지 도로침하, 함몰, 동공 발생현황에서 가로 2 m, 세로 2 m이상의 도로함몰 발생현황으로 한 조사결과는 굴착공사 관련이 54%이다. 굴착 공사 중에서도 매설물 하부, 측벽부 주변에 느슨한 되메우기로 인한 함몰이 10건으로 26%이다[3].

또 2016년 같은 도시에서 최근 2년간 발생한 143건의 도로함몰 원인을 분석하였다. 상수관 손상에 따른 함몰이 67%, 굴착복구 미흡에 따른 함몰은 25%, 공사 중 관리미흡으로 인한 함몰은 8%이었다.

굴착복구 미흡으로 인한 함몰은 최소 25%에서 49%까지를 점유하고 있는 것으로 조사되었다.

2.2 현장 현황조사

설문에 응답한 15개 현장의 주요 현황조사 결과는 Table 1~Table 4와 같다. [3]

Table 1. hydraulic filling material

material	sand	stone powder	sand or stone powder	quality soil	etc
count	4	1	4	3	3

Table 2. compaction method

compaction method	drained	undrained
count	11	4

Table 3. layer height(cm)

height	less than 30	30~50	50~100	more than 100	etc
count	6	3	1	4	1

Table 4. compaction criteria(%)

criteria	more than 95	more than 90	less than 90	etc
count	6	3	1	1

동일한 발주처에서 감독하고 있는 현장에서 명확하고 통일된 기준 없이 물다짐 시공을 하고 있다는 것을 설문 조사를 통하여 알 수 있다.

3. 실내모형시험

간단한 실내모형시험을 통해 물다짐공법의 원리와 실제 다짐효과를 분석하고, 다짐효율이 가장 좋은 방법을 찾기 위하여 국토교통부 건설기준코드에서 제시하고 있는 물다짐 재료인 모래와 석분으로 모형토조를 제작하여 물다짐을 수행하였다.

3.1 실내모형시험

3.1.1 물성 및 역학시험

실내모형시험은 현장에서 일반적으로 사용하는 입도가 좋은 모래와 석분에 대하여 물다짐의 원리를 확인하기 위해 시행하였다. 재료 확인을 위해 물성 및 역학특성과 관련된 체분석, 삼축투수시험, D-다짐시험을 수행하였다[4.5].

3.1.2 모래 물다짐 시험

기본 물성 및 역학시험이 끝난 시험시료를 사용하여 실제 현장에서 물다짐 공법을 수행하는 방법과 동일하게 모형토조에서 모형시험을 수행하였다.

모래 물다짐 시험은 하부 배수조건에 따른 다짐특성에 관한 시험을 1 m 전체 투기를 수행하고, 각각 0.3/0.4/0.5 m 단계별 투기 시험을 수행하였다.

첫 번째로 하부 배수상태에서 1 m 전체투기를 수행하였다. 모형토조에 모래시료를 1 m 높이로 한 번에 투기하고 최상단에서 현장시공과 동일하게 호스로 물을 부워 물다짐을 하는 방법으로 시험순서는 모래시료 투기, 물다짐, 투수, 하부배수, 배수완료 후 침하량 측정 순이다.

배수상태에서 각각 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m 단계투기로 시험을 수행하였다. 모형토조에 모래시료를 0.3/0.4/0.5 m로 단계투기하고 층별로 물다짐, 투수, 하부배수, 배수완료 후 침하량 측정을 수행하는 방법이다.

비배수 상태도 1 m 전체투기를 수행하였다. 모형토조의 양측 하부 배수층을 차수한 상태로 모래시료를 1 m 높이로 한 번에 투기하고 최상단에서 현장시공과 동일하게 호스로 물을 부워 물다짐을 하는 방법이다. 시험순서는 투기, 물다짐, 투수 및 포화, 포화완료, 양수 후 침하량 측정 순이다.

3.1.3 석분 물다짐 시험

석분을 사용한 시험은 모래시험의 결과를 참조하여 1m 전체투기와 모래 물다짐 시험에서 다짐효율이 가장 좋았던 0.3 m 단계투기를 수행하여 모래 물다짐 시험결과와 비교하였다.

3.1.4 엄지말뚝 인발 시험

엄지말뚝 인발시 교란영역을 확인해 보기 위하여 모래와 석분에 대하여 각각 0.3 m 단계투기를 수행하였다. 이후 모형말뚝을 타설하여 인발 후 주변지반에 관입강도를 측정하였다.

3.2 실내시험결과

3.2.1 물성 및 역학 시험결과

모래시료의 체분석 결과 균등계수는 각각 6.12, 9.00이고 곡률계수는 각각 1.10, 1.15로 통일분류법 상에 양입도의 모래인 SW로 분류되었다. 석분시료 체분석 결과 균등계수는 각각 13.33, 7.86이고 곡률계수는 각각 1.20, 1.04로 통일분류법 상에 양입도의 모래인 SW로 분류되었다.

삼축투수시험결과 모래의 투수계수 7.55E-03, 석분의 투수계수 2.01E-02으로 석분의 투수계수가 약 2.66배 크게 나타났다.

모래시료의 D-다짐 시험결과는 최대건조단위중량(γ_{dmax}) 19.0 kN/m^3 , 상대다짐도를 고려한 건조단위중량($\gamma_{dmax} \times 0.9$) 17.1 kN/m^3 , 최적함수비(O.M.C) 8.3 %로 나타났다. 석분시료의 D-다짐 시험결과는 최대건조단위중량(γ_{dmax}) 21.7 kN/m^3 , 상대다짐도를 고려한 건조단위중량($\gamma_{dmax} \times 0.9$) 19.5 kN/m^3 , 최적함수비(O.M.C) 7.5 %로 나타났다.

3.2.2 모래 물다짐 시험결과

Table 5는 물다짐 모래시료 배수조건 최대건조단위중량 산정결과이다. 그 결과 1 m 전체투기에 비해 단계투기가, 단계투기도 층간 투기 높이가 낮을수록 다짐효과가 우수하다.

모래시료 비배수조건 1 m 전체투기 결과 모래의 간극이 100 % 포화되었다. 비배수 상태의 특성상 간극의 공기가 상부로 배출되어 표층을 교란하고 이후에는 배수가 되지 않기 때문에 표층 상부의 잉여수를 양수해야하는 상황이 발생했다. 이것은 실제 시공여건에 부합되지 않으며, 토층이 고탍수비로 유지되어 강도나 밀도를 측정할 수 없는 상황이다. 따라서 비배수 상태에서의 물다짐은 실제 시공에서도 배제해야 되는 것으로 판단하였다.

Table 5. Test Results for Drainage Conditions of Sand

Filling Height (m)	Water Content (%)	Filling Volume (m^3)	Wet Unit Weight (kN/m^3)
1.0m	11.10	0.53856	16.30
0.3m	6.50	0.54912	15.62
0.4m	3.53	0.54912	15.19
0.5m	8.09	0.53856	15.86
Filling Height (m)	Total Weight of Dry Sand (N)	Final Volume (m^3)	Maximum Dry Unit Weight (kN/m^3)
1.0m	7803361	0.48576	16.06
0.3m	8021674	0.45936	17.46
0.4m	8045665	0.47520	16.93
0.5m	7849052	0.46464	16.89

3.2.3 석분 물다짐 시험결과

Table 6은 물다짐 석분시료 배수조건 최대건조단위 중량 산정결과이다. 그 결과 모래시료와 동일하게 1 m 전체투기에 비해 단계투기가 우수한 것으로 나타났다.

Table 6. Test Results for Drainage Conditions of Stone Powder

Filling Height (m)	Water Content (%)	Filling Volume (m ³)	Wet Unit Weight (kN/m ³)
1.0m	9.97	0.54384	16.76
0.3m	6.63	0.55440	16.25
Filling Height (m)	Total Weight of Dry Stone Powder (N)	Final Volume (m ³)	Maximum Dry Unit Weight (kN/m ³)
1.0m	8204119	0.46992	17.46
0.3m	8410360	0.42768	19.67

3.2.4 엄지말뚝 인발에 따른 교란영역 시험결과

Fig. 1과 Fig. 2는 모형말뚝 인발에 따른 교란영역 시험결과이다. 시험결과 모형말뚝 주변에서 모래 및 석분시료 모두 6 cm내에서 교란으로 인한 강도저하가 발생된 것으로 나타났다. 심도 30 cm 이후 구간은 이론적으로는 토압이 계속 증가하는 경향이여야 하나 하부 배수층의 배수저항으로 인하여 함수비가 높아져 강도가 감소한 것으로 판단된다.

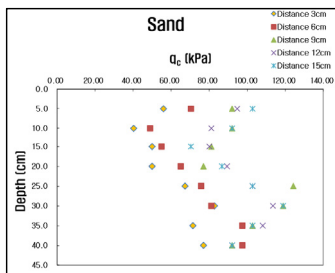


Fig. 1. Test Results for Cone Penetration of Sand

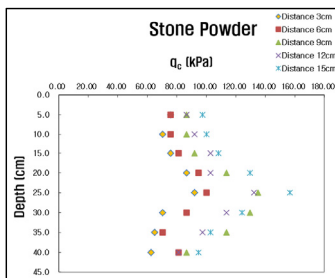


Fig. 2. Test Results for Cone Penetration of Stone Powder

3.3 실내시험 결과분석

3.3.1 되메우기 재료

실내모형시험의 최종 시험결과를 통해 얻은 결론은 물다짐의 원리가 물이 지반에 침투하는 침투수력의 영향을 크게 받았다. 좋은 입도에 투수성이 좋은 되메우기 재료를 사용할수록 다짐효과가 좋아지는 것으로 나타났다. 물다짐 시공 후 되메우기 지반은 도로, 도로측구, 보도 등으로 활용된다. 그러므로 일정 하중에 대한 주행성이 확보되어야 하는 역학적 특성을 가져야 한다. 이러한 특성에 가장 부합하는 수평배수공 표준시방서의 내용을 참조하여 Fig. 3과 Fig. 4에서 모래와 석분의 기준 입도범위와 투수계수를 제시하였다[6].

(1) 모래

가. D15 : 0.075 mm ~ 0.9 mm

나. D85 : 0.4 mm ~ 8.0 mm

다. 0.08 mm 통과량(#200체) : 15 % 이하

라. 다음 입도분포 범위 내에 있어야 한다.

마. 투수계수 : 1×10^{-3} cm/sec 이상

바. 이 때, D85 및 D15는 각각 입경가적곡선에 있어서 통과중량 백분율이 85 % 및 15 %에 해당하는 재료의 입경을 말한다.

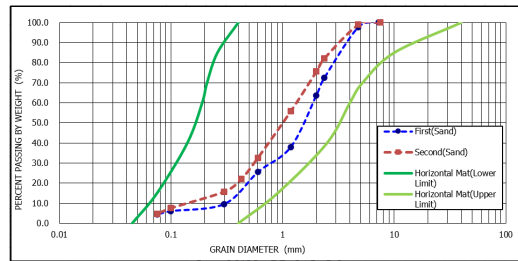


Fig. 3. Sand Criteria in Horizontal Mat

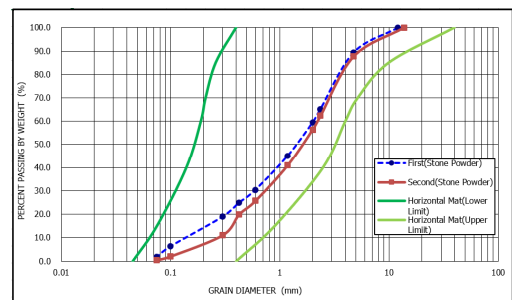


Fig. 4. Stone Powder Criteria in Horizontal Mat

(2) 석분

가. 석분의 재료기준은 설계도서를 따른다.

나. 설계도서에 재료기준이 규정되지 않을 경우는 아래 기준을 만족하는 재료를 사용한다.

- 0.08 mm체 통과량 : 15 % 이하
- 투수계수 : 1×10^{-3} cm/sec 이상

3.3.2 다짐효율

실제 물다짐 시공방법을 구현한 모형토조시험을 통해 다짐의 원리가 침투수력에 있다는 것을 보였다. 그러므로 다짐효과 증대를 위해서는 하부에 배수층이 필수적이다. 모래와 석분시료 모두 층다짐 두께가 감소할수록 상대다짐도가 커지고 0.3 m로 층별 물다짐했을 때 90 % 이상의 상대다짐도로 가장 좋은 다짐효율이 나타났다.

물다짐의 층별 다짐도를 측정하기 위해 들밀도 시험을 수행하였다. 그 편차가 심도별로 차이가 없고, 투기한 전체 체적이 물다짐에 의한 침하를 반영하여 감소된 체적으로 다짐밀도를 산정한 결과와 편차가 커서 들밀도 시험을 신뢰할 수 없는 상황이 발생하였다. 이 현상을 고찰한 결과 일반적인 전압다짐은 다짐의 효과가 즉시 나타나기 때문에 들밀도시험의 결과가 어느 정도 신뢰성을 가질 수 있다. 그러나 물다짐의 경우 침투수압과 투수 입자 재배열과 같은 시간 의존적 다짐방법이다. 이에 전체 투기량과 감소된 체적의 비로 다짐밀도를 산정하는 것이 좀 더 합리적이라고 판단하여 체적의 비로 다짐밀도를 산정하였다.

모형토조에 모래와 석분시료를 1.0 m 전체투기와 0.3/0.4/0.5 단계투기 물다짐을 수행한 시험결과는 단위 체적당 침투수력이 토층두께(z)에 반비례한다는 이론식과 같이 물다짐하는 층 두께가 감소할수록 침투수력이 증가하여 다짐효과가 증대되고 최대건조단위중량이 증가하는 결과가 나타났다.

또한 양호한 입도의 되메우기 재료를 사용한 경우 침투수압 증가에 의한 토립자에 가하는 마찰력 증대와 침투유속의 증가에 기인한 토립자 재배열시 간극의 일부가 토립자로 채워지게 되어 밀도가 증가하는 효과가 있으며, 이는 투수에 의한 체적감소와 더불어 다짐도를 높이는 효과가 있다고 사료된다.

Table 7과 Table 8은 실내모형시험 결과로 산출된 물다짐 최대건조단위중량의 시공성 확인을 위해 현장에서 가장 일반적으로 사용하는 Eq. (1)의 상대다짐도(R_c)를 산정하였다. 되메우기 및 뒤채움 표준시방서 기준인

상대다짐도 90%와 비교해 본 결과 모래와 석분시료 모두 0.3m 단계별 물다짐 성과가 상대다짐도 90 %이상을 상회하는 것으로 나타났다.

$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \times 100\% \quad (1)$$

where, R_c relative compaction(%), γ_d dry unit weight in field(kN/m^3), γ_{dmax} maximum dry unit weight(kN/m^3)

Table 7. Relative Compaction of Sand Drainage Conditions

Sand	Water Content (%)	Filling Volume (m^3)	Final Volume (m^3)	Maximum Dry Unit Weight (kN/m^3)	Relative Compaction (%)
1.0m	11.10	0.53856	0.48576	16.06	84.5
0.3m	6.50	0.54912	0.45936	17.46	91.9
0.4m	3.53	0.54912	0.47520	16.93	89.1
0.5m	8.09	0.53856	0.46464	16.89	88.9

※ Appay 90 % or more based on relative compaction for hydraulic filling

Table 8. Relative Compaction of Stone Powder Drainage Conditions

Stone Powder	Water Content (%)	Filling Volume (m^3)	Final Volume (m^3)	Maximum Dry Unit Weight (kN/m^3)	Relative Compaction (%)
1.0m	9.97	0.54384	0.46992	17.46	80.5
0.3m	6.63	0.55440	0.42768	19.67	90.6

※ Appay 90 % or more based on relative compaction for hydraulic filling

3.3.3 엄지말뚝 인발에 따른 교란영역 산정

Fig. 5와 Fig. 6은 물다짐 완료 후 엄지말뚝 인발시 발생하는 교란범위이다. 3~6 cm의 수평거리에서 교란이 발생하였음을 점선으로 표시된 부분에서 알 수 있다. H-pile 단면기준으로 폭(B)의 1.5배, 높이(H)의 1.0배로 산정되었다.

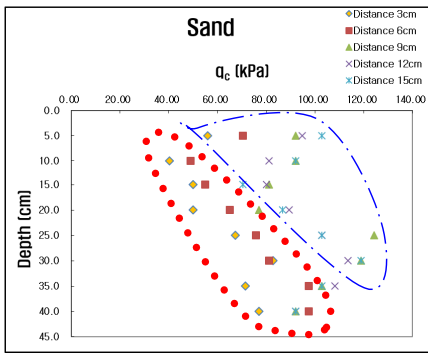


Fig. 5. Disturbance Area of Sand

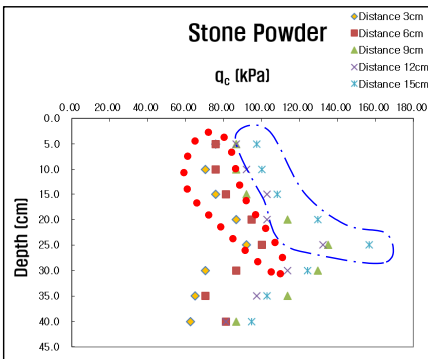


Fig. 6. Disturbance Area of Stone Powder

4. 결론

본 연구는 도심지에서 좁은 구간 되메우기에 사용되는 물다짐공법에 대하여 실내 모형시험을 통해 물다짐 원리와 가장 효율적인 방법에 대하여 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 물다짐 공법에서 다짐도를 결정하는 재료의 특성은 시험결과 입도와 투수성이 주요 인자이며, 국가건설기준코드 수평배수공의 재료기준을 준용할 경우 이를 만족하는 것으로 판단된다.

둘째, 물다짐에 의한 다짐의 원리는 침투수력에 의해 발생하므로 하부에 배수공을 설치하여 시공하면 다짐효과가 충분한 것으로 나타났다.

셋째, 물다짐의 다짐도는 들밀도시험보다 전체투기량과 감소된 체적의 비로 관리하는 것이 신뢰할 수 있는 결과를 나타내었다.

넷째, 물다짐 효율은 층별 다짐하는 토층두께에 반비례하므로 층두께를 얇게 유지하는 것이 유리하다.

다섯째, 물다짐이 완료된 상태에서 엄지말뚝을 인발한 경우 교란이 발생하므로 인발 후 추가 물다짐을 수행하는 것이 좋다.

References

- [1] Ministry of Lands, Infraconstruction and Transport, "Re-fill and Backfill, KCS 11 20 25", pp.1-8, 2016. <http://www.kcsc.re.kr> (accessed Nov. 13, 2019)
- [2] Ministry of Lands, Infraconstruction and Transport, "Safety Management Manual for Ground Settlement(Collapse)", 2015, pp.9-32.
- [3] J.H. Jang, S.Y. Park, D.Y. Jeong, J. H. Chung, Y. J. Choi, "A Study on the Construction Management Method of the Compaction Method of Hydraulic Filling that may caused Ground Settlement", p.72, Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters, 2017, p.72.
- [4] S. Lee, J.S. Kim, M. C. Kang, H.H. Shin, "Theoretical Soil Mechanics", p.736, YEAMOONSA, 2014, pp.57-80, pp.662-675. ISBN: 978-89-273-0319-0
- [5] S. Lee, T. H. Kim, J. H. Lee, "Soil Testing Method", p.529, GOOMIBOOK, pp.153-165, pp.355-362, 2007. ISBN: 89-8225-316-5
- [6] Ministry of Lands, Infraconstruction and Transport, "Horizontal Drainage, KCS 11 30 15", pp.1-7, 2016. <http://www.kcsc.re.kr> (accessed Nov. 13, 2019)
- [7] Lim, Ju-Heon, *A Study on Compaction Efficiency of Hydraulic Filling by Finite Element Analysis*, master's thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, 2008.

정 달 영(Dal-Yeong Jeong)

[정회원]



- 2013년 12월 ~ 현재 : 서울시 도시 기반시설본부 안전관리과
- 2017년 2월 : 부산대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 서울서립대학교 토목공학과(박사과정)

<관심분야>

토목구조, 건설안전

장 종 환(Jong-Hwan Jang)

[정회원]



- 1989년 12월 ~ 현재 : 서울시청
- 2010년 9월 ~ 현재 : 서울시 도시
기반시설본부
- 2018년 2월 ~ 현재 : 한양대학교
건설관리학과(석사과정)

<관심분야>

토질 및 기초, 건설관리(CM)

정 진 혁(Jin-Hyuck Chung)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서울시립대학교 토
목공학과(공학석사)
- 2009년 8월 : 서울시립대학교 토
목공학과(공학박사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 서울시 도
시기반시설본부 안전관리과

<관심분야>

토질 및 기초, 토목시공