2차 압밀침하를 고려한 도시우수관망시스템의 유출특성분석 Runoff Characteristics in Urban Drainage Systems Considering Secondary Consolidation Settlement

이찬욱* · 유도근** · 전환돈*** · 장동일****

Lee, Chan wook*, Yoo, Do Guen**, Jun, Hwan Don***, and Chang, Dong Eil****

Abstract

In general, underground facilities are designed accounting for the primary consolidation settlement and are buried in consideration of the allowable residual settlement. The subsequent secondary consolidation settlement is smaller than the first one and occurs during a longer period of time. However, in areas where deep soft grounds (coastal areas, etc.) are abundant, settlement of up to 50 cm may occur due to secondary consolidation, the hydraulic characteristics may change, and the facilities may operate under conditions that are different from the initial planned design. Therefore, this study establishes scenarios accounting for secondary consolidation settlement (long-term settlement) and various settlement degrees and compares the hydraulic characteristics of rainwater pipelines with those of the initial plan for storm-water drainage. An attempt is made to evaluate the uncertainties concerning the capabilities of the facilities.

Key words : Hydraulic Characteristic, Secondary Consolidation Settlement, Urban Flood

요 지

일반적으로 지하시설물은 1차 압밀침하가 이루어지고 허용잔류침하량을 고려하여 매설하며 이후 발생하는 2차 압밀침하량은 1차 압밀침하량에 비해 미소하고 그 기간이 길어 침하량을 설계에 반영하기에 한계가 있어 무시하는 경우가 많다. 그러나 대심도 연약지반(해안지역 등)이 발달한 지역의 경우 2차 압밀침하로 인하여 침하가 최대 50 cm 가량 발생할 수 있으며 초기 계획한 설계와 다른 조건으로 수리적 특성이 변형되어 운영될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 2차압밀침하량(장기침하), 침하정도 등의 시나리오를 구축하고 초기 계획된 우수관로와 2차침하가 완료된 우수관로의 수리적 특성의 비교를 통해 우수관의 통수능력의 변화 및 초기 통수능력에 대한 불확실성을 제시하고자 하였다.

핵심용어 : 수리학적 특성, 2차 압밀침하, 도시홍수

1. 서 론

우리나라는 1970년 이후 지속적인 경제발전과 인구증가에 따라 2015년 기준 1 km²당 509.2명으로 인구밀도가 꾸준히 증가하고 있다. 따라서 한정된 토지를 집약적으로 사용하게 되었으며 지속적으로 인구밀도는 증가될 것으로 예상되

고 있다. 도시지역에서의 침수는 관로내의 역류 또는 기존설계의 용량을 초과하여 우수 배제가 이뤄지지 못할 경우 발생할 수 있다. 이러한 도시지역에서의 침수는 사회적, 개인적 등 다양한 측면에서의 피해를 일으킬 수 있어 보수적인 측면에서의 설계가 필요하다. 이러한 설계를 위해 (Jin, 2003; Berggren, 2007; Olofsson, 2007; Kim, 2012; Son et

*정회원, 수원대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: skyblue985@naver.com)

Member, Master's course, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

**정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수(E-mail: dgyoo411@suwon.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

***정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료(Tel: +82-2-369-4256, Fax: +82-2-2011-8090, E-mail: dechang@daelim.co.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Korea University

al., 2016) 등은 설계홍수량을 추정하는 등의 강우자료 분석에 따른 설계방안을 제시하는 연구가 다수 진행되어져 왔다. 그러나 우수관로가 매설된 지반의 침하에 따른 수리적 특성의 변화를 고려한 연구는 현재까지 진행된바 없다.

최근 연약지반 위에 설계된 부산신항 옹동배후단지에서 1.5 m이상의 지반침하가 발생하여 연약지반의 침하와 관련된 문제가 대두되고 있다. 지상 구조물뿐만 아니라 지하구조물의 매설을 위해서는 침하를 고려할 필요가 있다. 침하의 종류는 크게 탄성침하(즉시침하), 1차 압밀침하, 2차 압밀침하(Creep)로 구분할 수 있다. 2차 압밀침하는 점성토 지반에 긴 시간동안 발생하며 1차 압밀 침하 후 지속되는 침하를 의미한다. 지반 침하가 최종적으로 종료된 후 우수관을 매설하는 것이 이상적이지만 대부분의 우수관은 공사기간 및 예산에 맞춰 1차 압밀 종료 후 매설되며 이후 발생하게 될 2차 압밀침하량에 대해서는 일반적으로 무시한다. 그러나, 연약지반의 경우 초기 지반특성 검토시 2차 압밀침하량이 5~30 cm정도(Tetsuzo and Shigeru, 2012) 또는 10~50 cm (MOLIT, 2012)가 발생할 수 있어 결국 초기 계획한 설계와는 다른 조건으로 운영될 수 있다. 따라서 최종 침하가 발생한 이후의 우수관의 수리적 특성에 대한 연구가 필요하며 본 연구에서는 연약지반에 1차 침하 완료후 매설된 우수관로에 대하여 2차 침하량을 가정하고 일부 시나리오를 생성하여 이때의 수리적 특성의 변화를 비교 분석 하였다.

2. 방법론

2.1 이론적 배경(2차 압밀침하)

2차 압밀침하 즉, 장기침하와 관련하여 (Yoshikuni and Nakanodo, 1974; Hansbo, 1981; Onoue, 1988; Zeng and Xie, 1989; Chung et al., 2009) 등은 장기침하의 압밀 시간을 예측하는 연구를 수행하였으며 (Timoshenko and Goodier, 1951; Hooke, 1678; Schmertmann et al., 1978) 등은 각각 탄성론, 변형을 영향계수를 활용하여 사질토에서의 침하량 산정 방안을 제안하였다.

연약지반은 기초 지반으로서 충분한 지지력을 갖지 않는 지반으로 표준관입시험의 N값이 0~4인 부드럽고 압축성이 큰 점토, 실트, 피트 등으로 이루어진 지반을 의미한다. 연약지반의 판정 기준은 토질과 층 깊이에 따라 Table 1과 같이 달라진다(LH, 2018). 연약지반에 발생하는 침하는 크게 즉시침하, 1차 압밀침하, 2차 압밀침하로 구분할 수 있으며 각각의 침하량을 더한 값을 총 침하량이라 칭한다. 그러나 2차 압밀침하량은 그 발생시간이 매우 장기간에 걸쳐 발생하며 1차 압밀침하량에 비해 상대적으로 작고, 하중 또는 배수특성과 밀접한 관계를 보이지 않아 적정 정확도로 해당 침하량을 계산하고 제어하기 어렵기 때문에 일반적으로 설계시 총 침하량 산정에 반영하지 않는다. 또한, 기존 설계하중 대비 추가적인 요소들에 의해 더 큰 하중이 가해질 수 있다는

점에서 우수관의 보수적인 설계는 필수적이다.

Table 1. Soft Ground Judgment Standard

Division	Layers depth	uniaxial compressive strength q_u (kN/m ²)	cone penetration test q_c (kN/m ²)	N
clay or viscose soil	Less than 10 m	Less than 60	less than 800	less than 4
	more than 10 m	less than 100	less than 1200	less than 6
sand or sand soil	-	-	-	less than 10

2차 압밀침하는 포화된 점성토 지반의 압밀과정에서 1차 압밀이 끝나는 시기부터 확인되는 점성토 지반의 압밀과정에서 1차 압밀이 끝나는 시기부터 확인되는 점성토의 압축 크리프(Creep)현상을 말하며 공극수압 소산 이후 계속되는 체적변화에 의해 발생한다. 2차 압밀로 인한 침하량을 산정하기 위해서는 실내 압밀시험 또는 현장 계측 자료인 e -log t 곡선을 통해 Ep. (1)의 2차 압밀 지수를 우선적으로 산정하고 Ep. (2)를 활용해 산정할 수 있다.

$$C_a = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \quad (1)$$

$$S_s = C_a^1 \times H \times \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right), \quad C_a^1 = \frac{C_a}{1 + e_p} \quad (2)$$

Eq. (1)에서 C_a 는 2차 압축지수로서 실측에의해 산정할 수 있는 값이다. Δe 는 간극비의 변화량, t_1 은 1차 압밀 종료시간을 t_2 는 2차 압밀시간을 의미한다. Eq. (2)에서의 e_p 는 1차 압밀 종료시의 간극비, H는 점토층의 두께(m), S_s 는 2차 압밀 침하량(cm)이다.

앞서 언급했듯이 대부분의 현장에서는 기간내에 공사를 완료해야 하는 제약조건을 갖고 있어 2차 압밀침하량을 무시한 상태에서 Table 2와 같이 허용 잔류침하량 범위내에 들어오면 우수관을 매설하게 되므로 위의 Ep. (2)를 통해 침하량을 산정하고 이를 고려할 필요가 있다.

Table 2. Residual Settlement Permitted

Division	Allowable residual load (cm)
Single-family housing site, Neighborhood living space	5
Green areas (park), on roads, underpasses, and structures installed; Other paper	10
Green tract of land	30

2.2 방법론 절차

본 연구에서는 기존 설계(안)에서 고려하지 않았던 2차 압밀침하를 고려할 경우 수리적 특성의 변화와 그에 따른 문제 발생점을 파악하고자 Fig. 1과 같은 방법론을 적용하였다. 먼저, 2차 압밀침하는 연약지반에서 발생할 수 있으므로 연약지반의 형태를 띄고있는 바닷가 인근 지역 등의 우수관망 정보를 획득한다. 두 번째로는 침하량을 산정할 필요가 있다. 도시우수관망시스템은 비교적 넓은지역에 분포되어 매설되게 된다. 따라서 우수관 매설지반에 따라 다른 침하량을 보일 수 있으므로 지반의 구성형태별로 블록을 구분지어 블록별 침하량을 산정하였다.

마지막으로 대표적인 도시유출해석 프로그램중 하나인 Storm Water Management Model, EPA-SWMM (Metcalf and Eddy, Inc. et al., 1971a, 1971b)에 산정된 침하량을 적용하여 침하에 의한 우수관망시스템의 수리적 특성을 분석하였다.

Fig. 1. Methodology Procedure

3. 적용 및 결과

3.1 적용대상 지역

본 연구에서는 바닷가 인근에 위치한 연약지반위에 조성된 부산시 강서구 A City의 우수관망을 활용하였다. 해당 지역은 최근 1.5 m가량의 지반침하로 인한 피해가 발생한 부산신항 옹동 배후단지 인근 지역으로 이 지역 역시 연약지반의 형태를 띄고 있다. 본 연구에서는 장기침하로 인한 우수관망 수리특성을 비교하기 위해 동일 구간을 대상으로 기존 설계에 적용된 설계 인자를 사용하였다. 강우는 A City는 57개의 맨홀, 58개의 관로, 1개의 저류지 및 1개의 유출지점으로 설계되어있다(Fig. 2). 강우자료는 대상지역에 지속시간 80분을 갖는 확률강우량을 Huff 3분위 분포를 통해 지속시간 80분 강우량을 구축하였다.

3.2 장기침하량 산정

EPA-SWMM에 적용할 장기침하량을 산정하기 위하여 A-city를 지반의 상태(연약층 두께, 쌓기고 등)에 따라 Fig. 3과 같이 11개의 블록으로 구분 지을 수 있다.

Fig. 2. Application Area

Fig. 3. Classification by Ground Status

구분된 블록별 잔류침하량 산정 결과는 Table 3과 같다. 우수관 매설 후 초기(1년)에는 R2-1-25블록이 9.09 cm로 가장 많이 침하가 될 것으로 예측되었으며 시간이 지날수록 침하증가율이 더 큰 R2-1-17a블록의 침하가 더 많이 발생할 것으로 예측되었다. 또한, 침하량의 범위는 1년 기준 5~9 cm범위로 발생되었으며 24년 후에는 모든 블록에서 매년 2 cm 이내의 침하가 발생될 것으로 예측되었다.

3.3 침하량 적용 결과(월류 발생량)

산정된 침하량을 대표적인 도시유출해석 프로그램중 하나인 EPA-SWMM에 적용하여 침하 기간에 따른 월류량을 산정한 결과는 Fig. 4와 같다. 설계시 고려하지 않은 침하가 발생한 결과 초기(1년)의 경우 맨홀에서 9 톤의 월류가 발생될 것으로 나타났다. 이후 시간이 지남에 따라 우수관망시스템에서의 월류량이 증대되는 것을 확인할 수 있다.

3.4 침하량 적용 결과(월류발생 위치)

본 절에서는 침하 발생기간에 따른 월류발생지역을 공간적으로 분포시키고 해당지역의 수리적 특성을 분석하고자 하였다. 맨홀에서의 월류 발생 위치는 Fig. 5와 같다. 초기(1년)에는 두 곳의 맨홀에서 월류가 발생하게 되었으며 시간이

Table 3. Results of Long-term Settlement by Block

Block Name	Annual long-term subsidence (cm)												
	1 year	2 year	3 year	4 year	8 year	12 year	16 year	20 year	24 year	28 year	32 year	36 year	40 year
R2-1-17a	8.7	13.7	17.7	19.7	24.7	27.7	30.7	31.7	33.7	34.7	35.7	36.7	37.7
R2-1-17b	5.15	10.15	12.15	14.15	19.15	21.15	23.15	25.15	26.15	27.15	28.15	28.15	29.15
R2-1-18	5.82	9.82	11.82	12.82	16.82	18.82	19.82	20.82	21.82	22.82	23.82	23.82	24.82
R2-1-19	5.56	10.56	13.56	16.56	21.56	24.56	26.56	28.56	30.56	31.56	32.56	33.56	34.56
R2-1-20a	7.04	11.04	14.04	16.04	20.04	22.04	24.04	25.04	27.04	27.04	28.04	29.04	30.04
R2-1-20b	6.75	9.75	11.75	13.75	16.75	18.75	19.75	20.75	21.75	22.75	23.75	23.75	24.75
R2-1-21	6.75	10.75	12.75	13.75	17.75	19.75	20.75	22.75	23.75	23.75	24.75	25.75	25.75
R2-1-22	6.9	9.9	11.9	13.9	16.9	18.9	20.9	21.9	21.9	22.9	23.9	23.9	24.9
R2-1-23	8.76	11.76	13.76	15.76	18.76	20.76	21.76	23.76	23.76	24.76	25.76	25.76	26.76
R2-1-25	9.09	13.09	16.09	18.09	22.09	25.09	27.09	28.09	29.09	30.09	31.09	32.09	33.09
R2-1-26	6.43	9.43	11.43	13.43	16.43	18.43	20.43	21.43	22.43	22.43	23.43	24.43	24.43

Fig. 4. Flood Variation by Year

Fig. 5. Flood Location by Period

지남에 따라 점차 발생지역이 넓은 공간으로 분포 되는 결과가 도출되었다.

Fig. 6의 (a)는 네모칸에 발생한 월류발생 지역을 블록별로 구분한 그림이다. R2-1-17a의 침하량이 R2-1-17b의 침하량보다 비교적 큰 값이 예측되어 경사가 점차 완만해짐에 따라 자연유하식으로 운영되는 우수관망시스템의 특성상 통수능력이 저하되고 시간이 지남에 따라 월류량 역시 증대된 것을 알 수 있다(Figs. 4(b), 4(c)).

Fig. 7의 (a) 또한 네모칸에 발생한 월류발생 지역을 블록별로 구분한 그림이다. Fig. 7(b)는 월류가 발생한 지역 부근의 4개의 블록이다. 월류가 발생한 지역은 R2-1-20b이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 유출방향의 지반(R2-1-23)의 침하량이 비교적 커 경사가 급해짐에 따라 통수능력이 좋아 질 수 있으나 그 이외의 주변 지반(R2-1-20a, R2-1-18) 또한 월류발생 지반보다 침하량이 커 역경사가 발생하여 통수능력의 저하와 월류량이 증대된 것으로 판단된다. 이처럼 우수관망시스템은 넓은 공간에 매설되는 사회기반 시설물로서 침하로 인한 수리적 특성이 복합적인 양상에 의해 이뤄지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 우수관 매설(설계)과정에서 고려하지 않았던 2차 압밀침하 시나리오를 가정하여 실제 연약지반에 해당하는 도시지역(부산시 강서구 A City)에 적용하였다. 적용 결과로 장기침하를 고려할 경우 기존 설계와는 다른 홍수 유출 결과를 보였으며 홍수발생의 위험 역시 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 부산, 송도 등과 같이 해안가 인근 연약지반을 매립하여 계획한 단지를 포함하여 2차 침하가 발생할 수 있는 지역에는 향후 20~30년 동안 발생할 수 있는 침하량을 고려한 우수관 설계가 필요할 것으로 사료된다. 한편, 기존에 연약지반에 매설 되어있던 우수관로는 수리적 안정성 확보 측면에서 침하 영향을 고려하여 상시 유지관리 및 부등침하에 대비한 보강 대책 수립을 고려해야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 우수관의 수리적 안정성 보강 대책 수립 및 지하시설물 매설에 있어 적정 허용침하량 산정과 관련된 기초 연구 자료로 활용될 것으로 기대된다. 향후 연구는 실제 연약지반을 대상으로 한 사업지구내 구역별 장기침하량 산정 값을 반영한

Fig. 6. Major Area (1) by Flood

Fig. 7. Major Area (2) by Flood

시나리오를 수립하여 장기침하에 의한 신뢰성 높은 우수관의 유출특성분석을 수행하도록 하겠다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2019002950002).

References

- Chung, S.G., Lee, N.K., and Kim, S.R. (2009). Hyperbolic method for prediction of prefabricated vertical drains performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 10, pp. 1519-1528.
- Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. *Proceedings of 10th ICSMFE*, Stockholm, Vol.3, pp. 677-682.
- Hooke, R. (1678). *Lectures de Potentia Restitutiva, or of Spring. Explaining the Power of Springing Bodies*. Printed for John Martyn Printer to the Royal Society, London.
- Jin, Y.G. (2003). *A study on cause analysis of flood area and reduction measure by urbanization*. Master's thesis, Seoul National University of Technology.
- Berggren, K. (2007). *Urban drainage and climate change: Impact assessment*. Ph.D. dissertation, Luleå University of Technology.
- Kim, K.Y. (2012). *Flood risk and vulnerability analysis in an urban stream by non-stationary rainfall frequency analysis: A case study of the Woo-Yi Stream basin*. Master's thesis, University of Seoul.
- Korea Land & Housing Corporation (LH). (2018). *Civil land design guidelines*.
- Olofsson, M. (2007). *Climate change and urban drainage-future precipitation and hydraulic impact*. Ph.D. dissertation, Luleå University of Technology.
- Metcalf and Eddy, Inc., University of Florida, and Water Resources Engineers, Inc. (1971a). Storm water management model, Vol. I: Final report. EPA Report 11024 DOC 07/71 (NTIS PB-203289), US EPA, Washington, DC, USA.
- Metcalf and Eddy, Inc., University of Florida, and Water Resources Engineers, Inc. (1971b). Storm water management model, Vol. II: Verification and testing. EPA Report 11024 DOC 08/71 (NTIS PB-203290), US EPA, Washington, DC, USA.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT). (2012). *Road design manual*.
- Onoue, A. (1988). Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration. *Soils*

and Foundations, Vol. 28, No. 4, pp. 165-174.

Schmertmann, J.H., Brown, P.R., and Hartman, J.P. (1978). Improved strain influence factor diagrams. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No. 8, pp. 1131-1135.

Son, H.W., Kim, M.S., Park, K.M., and Moon, Y.I. (2016). A study on design flood estimation equation of small and medium sized urban river. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 2, pp. 473-482.

Tetsuzo, M., and Shigeru, Y. (2012). Road on soft ground, committee of floating foundation, general institute of civil engineering (in Japanese).

Timoshenko, S., and Goodier, J.N. (1951). *Theory of elasticity*.

New York, USA: McGraw-Hill.

Yoshikuni, H., and Nakanodo, H. (1974). Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability. *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp. 35-46.

Zeng, G.X., and Xie, K.H. (1989). New development of the vertical drain theories. *Proceedings of 12th ICSMFE*, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 2, pp.1435-1438.

Received	October 1, 2019
Revised	October 2, 2019
Accepted	October 17, 2019