

하부 투수층을 가지는 제방침투 수리모형실험

Hydraulic model experiment for infiltration in riverbank and its foundation

김지현*, 이남주**, 류권규***

Ji Hyun Kim, Nam-Joo Lee, Kwonkyu Yu

요 지

국내에서 수행한 대부분의 제방 침투에 대한 수리모형실험 연구는 제체만을 대상으로 수행되었으며, 투수성 기초지반을 고려한 연구는 찾아보기 어려운 상황이다. 이 연구에서는 개정된 제방 설계기준에 따른 1:3의 비탈경사와 투수성 기초지반을 가지는 제방의 침투실험을 수행하였으며, 향후 제방침투 수치모의에 필요한 검보정 자료를 확보할 목적으로 수행하였다. 부산광역시 강서구에 위치한 낙동강 제2하구둑 건설 현장에서 제체의 재료를 채취하여 입도분석과 들밀도시험을 통해 제방의 건조단위중량과 다짐도 및 제방의 투수계수는 각각 1.372 g/cm^3 , 93%, 1.35 m/day 이며 통일분류법의 SM에 속하는 것으로 확인하였다. 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m의 4가지 수위(각각 Case-1~4) 조건에 대하여 정상상태에 도달할 때까지 실험을 계속한 결과 각각의 실험조건별 침윤선은 대체로 동일한 양상을 보였지만 몇 지점에서 위압수두계 수위의 이상점이 발견되었다. 제방을 해체하면서 원인을 찾아본 결과 머드볼이 형성되어 있음을 확인하였으며, 침투 흐름에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

핵심용어 : 제방, 침투, 수리모형실험, 투수성 지반, 머드볼

1. 서 론

최근 기후 변동에 기인하는 집중호우의 발생 빈도의 증대 등에 의해 제방의 안전도 검토 및 안전도 향상에 대해 많은 관심이 모이고 있다. 제방의 침투 현상에 대한 수리모형실험과 관련된 기존의 연구로써 양문용 등(2010)은 청도천(경남 밀양시)에서 채취한 현장재료를 사용하며 동일한 수위에 대해 제방의 폭을 2.4 m, 1.2 m, 0.4 m로 줄여가면서 침투류 거동을 분석하였다. 이남주 등(2010)은 청도천(경남 밀양시)에서 채취한 현장재료를 사용하며 홍수위 증가에 따른 비정상 상태의 침투수위 측정을 수행하였다. 이남주 등(2011a)은 GMS-SEEP2D 모형을 사용하여 정상상태 하천 제방 침투 흐름에 대한 수치모델링을 수행하고 수리모형실험 결과와 비교하였다. 이남주 등(2011b)은 일본식 배수공이 설치된 제방에 대해 각각 정상상태와 비정상 상태로 침투흐름을 분석하였다.

국내에서 수행한 대부분의 제방 침투에 대한 수리모형실험 연구는 제체만을 대상으로 수행되었으며, 투수성 기초지반을 고려한 연구는 찾아보기 어려운 상황이다. 이 연구에서는 개정된 제방

* 학생회원 · 경성대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail: 0168438813@hanmail.net

** 정회원 · 경성대학교 토목공학과 교수 · E-mail: njlee@ksu.ac.kr

*** 정회원 · 동의대학교 토목공학과 교수 · E-mail: pururumi@deu.ac.kr

설계기준에 따른 1:3의 비탈경사와 투수성 기초지반을 가지는 제방의 침투실험을 수행하였으며, 향후 제방침투 수치모의에 필요한 검토자료 확보를 목적으로 수행하였다.

2. 수리모형 실험

2.1 제체의 시료

부산광역시 강서구 명지동에 위치한 낙동강 하류의 4대강 사업 낙동강 제2하구둑 건설 현장에서 제체의 재료를 채취하였다. 그림 1은 시료를 채취한 위치를 표시한 것이다.



그림 1. 낙동강 제2하구둑 건설현장 및 시료채취 지점

한국수자원학회(2009)는 통일분류법(Unified Soil Classification System; USCS)의 GM, GC, SM, SC, ML, CL 등과 같은 일정 정도 점토(C) 및 실트(M)와 같은 세립분을 함유하고 재료의 최대 치수는 100 mm 이내로 하는 것이 바람직하다고 한다. 이에 적합한 시료인지 판단하기 위하여 현장에서 채취한 시료를 입도분석과 들밀도시험을 통하여 제방재료의 특성을 분석하였다. 그 결과 통일분류법의 SM에 속하며 재료의 최대 치수는 9.51 mm로 제방의 재료로 적합한 것으로 판단되었다. 한국수자원학회(2009)에서 제시하는 우리나라의 제방 투수계수 기준은 10^{-3} cm/s 이하인데 본 연구에 사용된 모형 실험용 제방 시료의 투수계수는 1.56×10^{-3} cm/s로서 우리나라의 기준을 다소 초과하는 것으로 판단되었다. 하지만 추후에 덜 안전한 규격의 제방에 대한 침투 현상과 이에 대한 배수공의 효과를 비교·검토할 예정이므로 본 연구에 적합한 조건으로 판단된다.

표 1. 모형 실험용 제방 시료의 시험분석 결과

시 료	투수 시험					입도 분석					
	투수 계수 (cm/s)	함수비 (%)	초기 간극비	단위중량 (gf/cm ³)		USCS (통일분류법)	비중	자갈 (%)	모래 (%)	실트 (%)	점토 (%)
				d	γ_t						
모형실험용 제방 시료	1.56×10^{-3}	8.06	0.897	1.372	1.483	SM	2.603	2.83	82.94	8.20	6.03

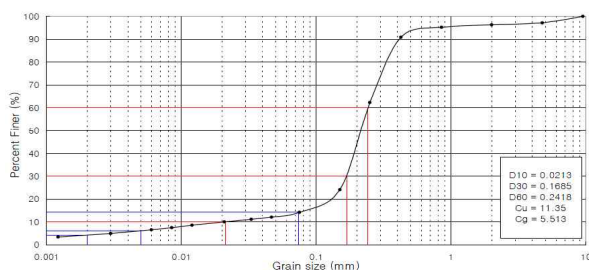


그림 2. 입도분포곡선

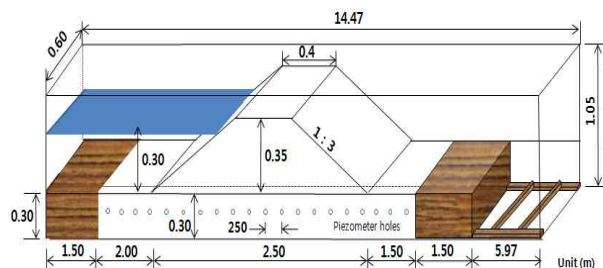


그림 3. 제방 모형의 형상

2.2 제방 모형의 설계

제방 침투실험을 위한 제방 모형은 14.5 m × 0.6 m × 1.6 m의 수조 내부에 제작하였다. 제방 침투에 따른 제체 내의 위압수두를 측정하기 위해 0.30 m간격으로 23개의 위압수두계(piezometer)와 줄자를 설치하였다. 수조바닥 가운데에 설치한 위압수두계로 토사재료가 유입되지 않도록 필터를 제작해 위압수두계의 끝을 막았다. 제작된 제방 모형의 형상은 그림 2와 같다.

한국수자원학회(2009)에서 2005년에 새롭게 개정한 제방의 비탈경사 1:3을 사용하였고 투수층 제방 저면의 길이는 2.50 m, 제방 상부의 길이는 0.40 m, 제체의 높이는 0.35 m, 하부 투수층의 길이는 6.00 m, 높이는 0.30 m로 제작하였다. 그림 2의 제방의 양쪽에 보이는 갈색 상자는 기초지반의 넓은 폭으로 인해 방대한 양의 시료가 필요하기 때문에 시료의 양을 줄일 수 있는 대안으로 설치한 지지대를 표시한 것이다.

모형제방은 제방축조 방법과 유사하게 다짐을 하기위해 흙을 쌓으면서 0.10 m 높이 마다 다짐을 실시하였다. 기초 지반과 1:3 비탈경사를 고려한 제방의 완성된 모습은 그림 4와 같다. 들밀도 실험에 의한 제방모형의 건조단위중량과 다짐도는 각각 1.372 g/cm³, 93%로 측정되었다.

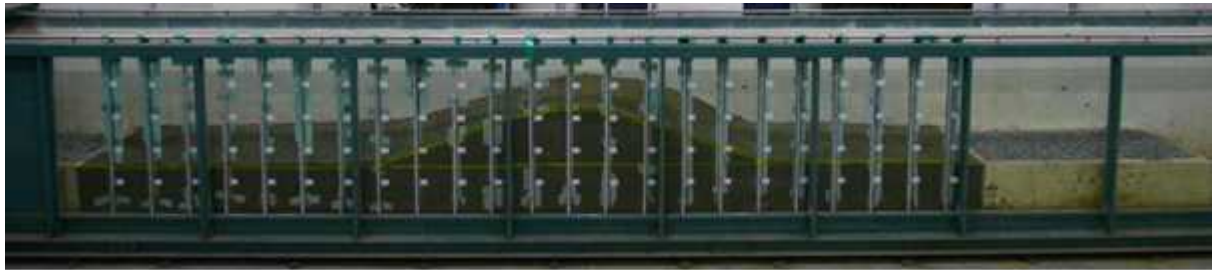


그림 4. 기초 지반을 고려한 제방 모형

2.2 실험방법

홍수위 증가에 따른 비정상 상태의 침투수위 측정을 수행하기 위하여 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m의 4가지 수위(각각 Case-1~4) 조건에 대하여 실험을 수행하였으며, 수위의 오차범위를 2 mm 이내로 유지하였다. 수리모형실험의 측정시간간격은 처음에는 10분 간격으로 측정을 하였으며, 수위 증가율을 고려하여 점차 측정시간간격을 늘여가며 측정하였다. Case-1의 경우 정상상태에 도달하는데 약 14일이 소요되었으며 Case-2~4는 약 5일이 소요되었다. Case-1은 실험시작 18시간 경과 후부터 제외지 사면 하단부에서 유출이 발생하였으며, 320시간 경과 후 상류부의 수두가 안정되는 현상이 나타났다. Case-2~4의 경우 이미 하단부의 유출이 된 상태였기 때문에 정상상태에 도달하는 시간이 Case-1보다 짧게 소요된 것으로 판단된다. 실험결과 침윤선의 수두와 위압계별 수두는 상류쪽(제외지 사면)부터 증가하기 시작하며 하류쪽(제내지 사면)로 확장됨을 알 수 있으며, 실험 초기에는 상류쪽의 수두가 급격히 상승하지만, 점차 상승속도가 둔화되는 등의 일반적인 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 4가지 조건 모두 정상상태에 도달한 침윤선은 동일한 양상을 보였으며 하류쪽에 위치한 피에조미터 19번부터 23번은 수위변화에 따른 영향을 받지 않고 모두 일정한 수두로 확인되었다.

3. 연구 결과

3.1 수위 조건에 따른 침윤선

그림 5는 Case-별 정상상태의 침윤선을 도시한 것으로 실험결과 침윤선의 수두와 위압계별 수두는 상류쪽(제외지 사면)부터 증가하기 시작하며 하류쪽(제내지 사면)로 확장되었다. 실험 초기에는 상류쪽의 수두가 급격히 상승하지만, 점차 상승속도가 둔화되는 등의 일반적인 경향이 나타나

고 있음을 확인할 수 있었다.

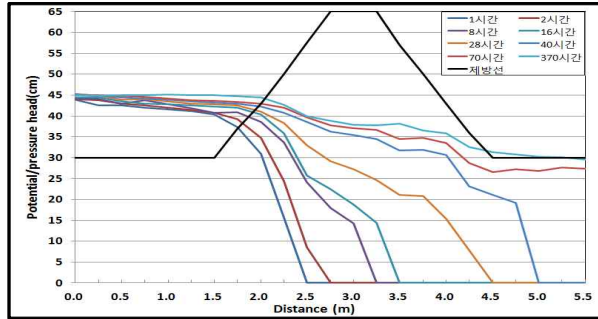


그림 5. 0.45 m 수위의 시간별 침윤선 변화

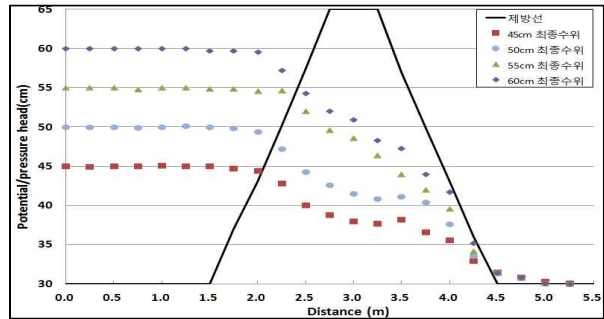


그림 6. 정상상태의 침윤선 변화

표 1. 정상상태 위압수두

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
거리	0	30	50	80	10	13	15	18	20	23	25	28	30	33	35	38	40	43	45	48	50	53	55
제방선	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	37.0	43.0	50.0	57.5	65.0	65.0	65.0	57.0	50.0	43.0	36.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Case-1	45.0	44.9	45.0	45.0	45.1	45.0	45.0	44.7	44.7	42.8	40.0	38.8	38.0	37.7	38.2	36.6	35.6	32.9	31.5	30.8	30.3	30.1	29.8
Case-2	50.0	50.0	50.0	49.9	50.0	50.1	50.0	49.8	49.8	47.2	44.3	42.6	41.5	40.8	41.1	40.4	37.6	33.6	31.4	30.7	30.1	30.0	29.9
Case-3	55.0	55.0	55.0	54.8	55.0	55.0	54.9	54.9	54.9	54.7	52.0	49.6	48.6	46.4	44.0	42.0	39.6	34.2	31.4	30.8	30.1	30.0	29.7
Case-4	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	59.7	59.7	59.7	57.2	54.3	52.0	50.9	48.3	47.3	44.0	41.7	35.2	31.4	30.8	30.1	30.0	29.7

(단위: cm)

4가지 조건 모두 정상상태에 도달한 침윤선은 대체적으로 동일한 양상을 보이지만 3.5 m에 위치한 15번 위압수두계의 수위와 4.0 m에 위치한 17번 위압수두계의 수위에서 튀는 점을 발견하였다. 제내지에 위치한 위압수두계(그림 6의 4.5~5.5 m)는 수위변화에 따른 영향을 받지 않고 각각 일정한 수두가 유지되는 것을 확인하였다.

3.2 머드볼 형성

3.5 m와 4.0 m에 해당하는 위압수두계의 수위가 다른 위압수두계와 유사한 경향을 나타내지 않는 이유를 확인하기 위하여 제방을 해체하면서 침윤선 값이 튀는 지점은 더욱 세심히 조사하였다. 그림 7(a)과 같이 흙이 뭉쳐진 것을 발견하였다. 이것은 머드볼(mud ball)이라 하며 진흙 상태를 이룬 작은 덩어리라고 하며 보통 퇴적암에 포함된 둥근 이토(泥土)나 이암(泥岩)의 덩어리를 말한다. 본 실험에 사용된 시료가 낙동강 하류의 건설 현장에서 채취한 것이라 시료 속에 부유물질과 기름덩어리가 섞여져 머드볼을 형성한 것으로 판단된다. 제방을 축조 할 시 5 mm × 5 mm의 체를 친 후 시료를 사용하였기 때문에 처음부터 머드볼이 있었던 것이 아니라 시간이 경과함에 따라 점점 커져 압력수두에 영향을 준 것으로 판단된다. 제방 단면을 잘라보니 그림 7(b)와 같이 단면에 검은색으로 뭉쳐져 있는 머드볼이 여러곳에서 확인된다. 그림 7(c)와 (d)는 채취한 머드볼의 단면으로 확인된 머드볼의 성분이 각각 다름을 확인하였다.

4. 결론

이 연구에서는 새롭게 개정된 1:3 비탈경사와 투수성 기초지반을 가지는 제방의 침투실험을 수행하여 차별성을 두어 안전성 검토를 하였다. 부산광역시 강서구에 위치한 낙동강 제2하구둑 건설

현장에서 제체의 재료를 채취하여 입도분석과 들밀도시험을 통해 제방의 건조단위중량과 다짐도 및 제방의 투수계수는 각각 1.372 g/cm^3 , 93%, 1.35 m/day 이며 통일분류법의 SM에 속하는 것으로 확인하였다. 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m의 4가지 수위(각각 Case-1~4) 조건에 대하여 정상상태에 도달할 때까지 실험을 계속한 결과 각각의 실험조건별 침윤선은 대체로 동일한 양상을 보였지만 몇 지점에서 위압수두계 수위의 이상점이 발견되었다. 제방을 해체하면서 원인을 찾아본 결과 머드볼이 형성되어 있음을 확인하였으며, 침투 흐름에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

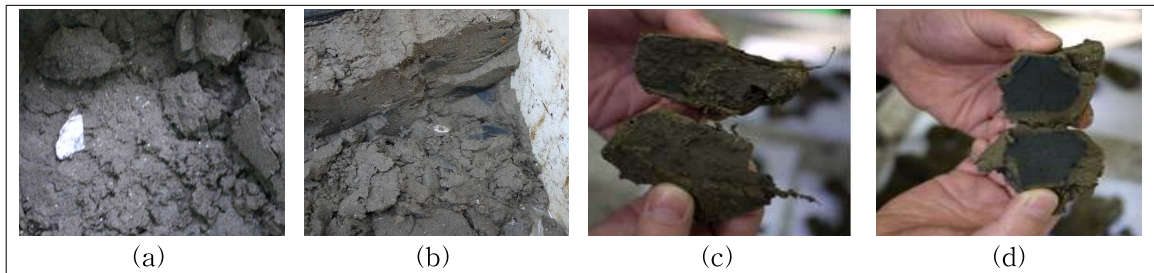


그림 7. 제방해체 작업 중 확인된 머드볼

감사의 글

이 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08 기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2004). 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서, 한국건설교통기술평가원
2. 양문용, 박란주, 이남주, 류권규(2010). 수위 변화에 따른 제방의 침투 실험에 대한 연구, 2010년도 대한토목학회 정기학술대회, CD version, 대한토목학회, p. 179.
3. 이남주, 류권규, 이상호(2011). 홍수시 제방의 침투 해석에 대한 연구, 2011년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회. pp. 1878-1882.
4. 이남주, 김혜림(2011). GMS-SEEP2D 모형을 사용한 정상상태 하천 제방 침투 해석, 한국콘텐츠학회 2011 춘계 종합학술대회, 한국콘텐츠학회, pp. 463-464.
5. 이남주, 김혜림, 류권규, 양문용(2011). 제방 침투 흐름의 비정상 모델링, 한국콘텐츠학회 2011 춘계 종합학술대회, 한국콘텐츠학회, pp. 465-466.
6. 임동균, 여홍구, 김규호, 강준구(2006). “제방 침투 수치해석 모형의 적합성 분석.” 한국수자원학회 논문집, 제39권, 제3호, pp. 241-252.
7. 신진환, 이봉직(1996) 지반의 투수성에 따른 제체 침투류의 변화, 한국산업안전학회지 제11권 제2호, pp. 109-115
8. 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준 해설
9. 허경한(2008). Piping현상 발생에 미치는 투수계수비와 침투유속의 영향에 대한 연구, 한국방재학회논문집, 제8권 제2호, pp. 129-138