

축조재료 및 다짐에 따른 하천제방의 내수성에 관한 실험 연구

○이 상 태*, 강 태 호**, 이 종 태***

1. 서 론

하천의 설계홍수량을 초과하는 홍수의 경우에는 홍수류가 하천제방을 월류하여 제방을 붕괴시키며 이로 인하여 제내지의 광범위한 지역에 홍수 재해를 초래하게 된다. 비교적 하천 개수가 잘 이루어진 한강, 금강 등의 직할하천 일부구간에서도 제방붕괴로 인한 침수피해가 발생한 바 있다. 즉, 1980년 7월 보청천 유역에서 하천제방붕괴 유실로 큰 피해가 있었고, 1987년 7월 금강유역의 부여, 논산, 강경지역에서는 제방월류 및 붕괴로 인한 대범람의 피해가 발생하였고, 1990년 9월에는 한강하류 일산제 제방붕괴로 인한 일산지역의 대침수 피해, 1991년 8월에는 태풍 Gladys에 의한 부산 수영강 상류부의 제방월류에 따른 저지대 침수, 1992년 9월 방조제 붕괴로 인한 목포시의 침수피해를 입었고, 1996년 7월에는 임진강유역의 대홍수로 인한 제방월류 등으로 큰 피해를 겪은 바 있다.

또한, 대도시를 관류하는 주요하천의 제방이 예기치 못한 붕괴로 인한 피해는 도시화, 산업화한 제내지에 상상을 초월하는 인명과 재산의 피해를 당할 수 있기 때문에 이를 보호하기 위하여 제방축조시 관련규정에 의하여 철저한 시공을 요한다. 따라서, 제방의 안전성을 향상시키는 것은 홍수피해의 경감을 위하여 매우 중요하다.

하천제방의 붕괴로 인한 홍수피해는 붕괴부의 규모와 범람 홍수량에 따라 그 피해의 정도가 다양하므로 월류로 인한 제방의 유실단면형과 붕괴속도 및 이에 따른 범람하류부의 지형 변화 등을 이해하는 것은 매우 중요하다. 그러나, 붕괴부의 발달과정과 이로 인한 범람 홍수과의 해석을 위한 이론적인 접근방법은 아직까지 충분히 마련되어 있지 못하며 실험적 방법에 크게 의존하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 제방의 축조재료 및 그 구성비와 시공시 다짐도에 따른 제방붕괴부의 형상, 확대과정 등을 수리모형실험을 통하여 검토함으로써 우리나라 하천 제방의 적정 설계 및 시공을 위한 기초자료를 제공코자한다.

2. 수리모형

수리모형실험은 폭 1.5m, 높이 1.0m, 길이 12.0m의 개수로 공급장치에 폭방향으로 제방을 축조하여 실험을 실시하였다. 개수로 상류에는 삼각웨어에 의한 유량 공급장치가 설치되어 있으며 삼각웨어에서 공급되는 유량은 1차수조에서 정류되어 개수로로 공급된다. 하천제방의 제원은 "서울시 관내 하천제방안전도검토 및 치수종합대책수립 기본계획보고서(1992)"에 기존 구축된 서울시 관내 14개 하천 제방을 검토한 결과 제방의 경사는 대부분 1 : 2 이었으며, 마루폭은 약 4m, 높이는 2.0~13.0m로 평균 약 8.0m의 제방고를 나타내었다.

본 연구에서는 실제 축조된 제방을 1/20으로 줄여 마루폭 20cm, 제방고 40cm, 상하류 경사 1 : 2를 가진 제방을 표준단면으로 가정하여 실험수로의 폭방향으로 만들었다.

* 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정, 건설교통부 시설서기관

** 경기대학교 산업기술종합연구소 선임연구원

***경기대학교 건설공학부 교수

표준단면 제방의 경우 제체의 구성물질은 실제 축조된 제방과 유사하게 실트질 흙과 모래를 70 : 30의 비율로 섞어 램머에 의한 다짐(사진 1)으로 축조하였다. 흙에 대한 성질은 표 1과 같다.

표 1. 축조토사의 특성

토사의 성분	특 성 치	토사의 성분	특 성 치
비 중	2.63	소성지수	2.7
최대입경	4.76mm	통일분류	SM
60% 입경	0.36mm	점착력	0.145kg/cm ²
균등계수	37	내부마찰계수	0.605
# 10번체 통과량	95%	내부마찰각	31° 11' 5.91"
# 40번체 통과량	63%	다짐	A다짐(KSF2312)
# 200번체 통과량	27%	젖은밀도	2.110g/cm ³
액성한계	24.1%	마른밀도	1.874g/cm ³
소성한계	21.4%	최적함수비	12.6%

초기 제방 월류수량 즉, 상류 웨어에서의 유입량은 6.1 ℓ/sec로 일정하게 유지하였으며, 제방 하류측 경사면에서 약 2m 떨어진 지점에 수로 양안에 각 1개의 수위계와 수로폭 1.5m를 3등분하여 각 1개씩 3개의 유속계를 설치하여 각 시간별 유량을 측정하였다.

또한 하류측 제방 끝에서부터 수로 끝까지 개수로 바닥위에 10cm 두께로 모래를 포설하여 제방 침식으로 인한 제체의 일부분이 하류측 하상에 퇴적 되는 양상을 관측할 수 있게 구성하였고, 월류수에 의한 제방 마루폭의 시간에 따른 확대과정을 관찰하기 위하여 제방 마루에 10cm 간격의 격자 구성을 구성하여 마루폭 확대과정을 사진과 함께 기록하였으며 붕괴부가 완전히 발달한 후 최종 하상고변화는 5cm×5cm틀을 제작하여 하상고를 직접 측정하였다(사진 2).

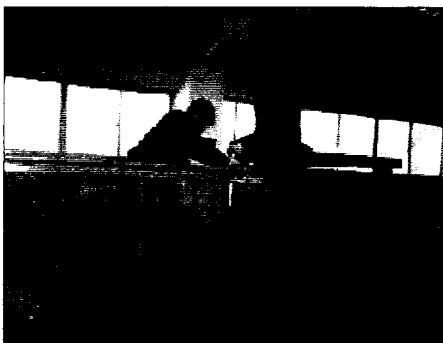


사진 1. 램머에 의한 제체 다짐 광경

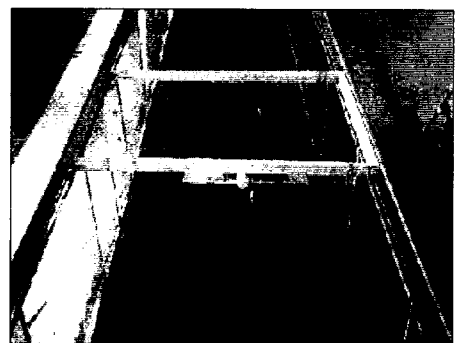


사진 2. 실험완료 후 하상고 측정

3. 제방의 축조 및 다짐에 따른 붕괴 유출수문곡선

3.1 제체 구성재료 혼합비와 붕괴 유출수문곡선

제방구성재료는 실트와 모래가 혼합된 경우가 많으며 본 연구에서는 먼저 실트와 모래의 구성비를 70:30으로 하여, 표준단면(A-1)으로 하여 수리모형실험을 실시하였으며 제방 구성 재료를 변화시켜 실트와 모래의 구성비를 60:40인 경우와 80:20인 경우로 모형을 제작하여 제방 구성재료에 따른 제방붕괴 영향을 검토하기 위하여 실험을 각각 실시하였다(표 2).

제방 표준단면(마루폭 20cm, 경사 1 : 20, 높이 40cm ; A-1)을 개수로 폭 1.5m 만큼 쌓아 월류수에 의한 제방의 붕괴양상을 실험하였으며, 이에 따른 붕괴 유출수문곡선은 그림 1과 같고, 시간별 붕괴양상을 측정하기 위해 비디오 및 15초마다 사진을 촬영하여 분석하였다. 월류수가 제방을 월류하는 시점부터 약 2분까지는 제체의 침식양상이 거의 미소하여 붕괴부에서의 유출량이 거의 없다가 2분이 경과 된 후부터 급격히 붕괴부가 발달하여 먼저 깊이 방향 즉, 제체 중심방향으로 발달되면서 길이방향(수로 폭방향)으로 발달되는 양상을 보였다. 붕괴부가 발달되기 시작된 지 약 1분 후에 붕괴부 유출량이 최대에 달하여 유입량의 8.2 배인 약 50.0 ℓ/s가 측정되었다. 붕괴부 발달은 월류가 시작된 지 약 3분 30초 뒤에 하상 10 cm가 드러나 보이며 붕괴가 종료되어 결국, 붕괴부는 상부폭 55.8cm, 하부폭 45.7cm 의 전형적인 사다리꼴 형상을 띠었다.

모래의 비율을 10% 증가시킨 실트 60%, 모래 40%로 제체를 축조한 제방의 경우에 대하여 실험 C-2에서는 제방 월류시작 2분 뒤부터 붕괴부가 형성되기 시작하였으며, 1분 15초 후인 3분 30초에 최대월류량은 70.0 ℓ/sec로 측정되었다. 이 실험의 최대월류량 70.0 ℓ/sec는 유입량 6.1 ℓ/sec의 약 11.5배에 달하는 유량으로서 표준단면실험 A-1에서의 최대유량 50.0 ℓ/sec보다 40%가 큰 침투유량이 측정되었으며, 침투유량 발생시간은 실험 A-1보다 15초 빠른 3분 30초에 발생하였으며, 붕괴부가 발달하는 붕괴지속시간도 표준단면 실험보다 15초 정도 단축되었다.

한편, 모래의 구성비율을 10% 낮게 한 경우로서 제체를 실트 80%, 모래 20%로 구성된 경우인 C-3 실험에서는 월류수에 의한 제방사면의 붕괴가 A-1, C-2 실험보다 실트질이 많아 점착력이 강하여 붕괴는 30초 더 늦게 시작되었고 침투발생 시간도 표준단면 A-1 실험보다도 약 1분 후인 4분 45초에 발생하였으며 최대월류량은 17.0 ℓ/sec로 측정되었다. 이 때의 월류량은 유입량 6.1 ℓ/sec의 약 2.8배에 달하는 유량으로서 표준단면 A-1 실험의 최대 유량 50.0 ℓ/sec보다 66%가 적은 침투유량이며, 붕괴지속시간도 A-1, C-2실험 보다 1분~1분 30초 더 지속되었다(표 3)(그림 1).

표 2. 제체 구성재료 혼합비 변화 실험 조건

실험명	마루폭 (cm)	제방고(cm)	경사	제체 구성재료(%)		공급유량 (ℓ/s)
				실트	모래	
A-1(표준)	20	40	1 : 2.0	70	30	6.1
C-2	20	40	1 : 2.0	60	40	6.1
C-3	20	40	1 : 2.0	80	20	6.1

표 3. 제체 구성재료 혼합비 변화에 따른 붕괴 유출수문곡선 특성치

실험명	붕괴시작시간 (분/초)	붕괴지속시간 (분/초)	침투발생시간 (분/초)	침투유량 (ℓ/s)
A-1(표준)	2/00	5/30	3/45	50.0
C-2	2/00	5/15	3/30	70.0
C-3	2/30	6/45	4/45	17.0

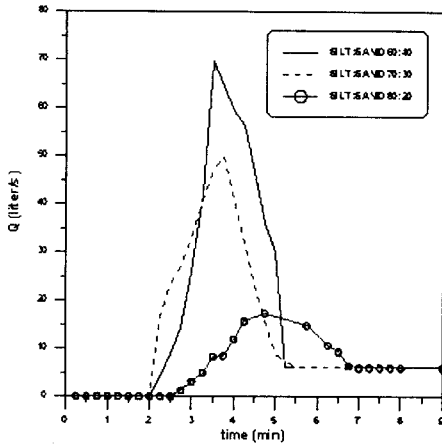


그림 1. 제체 재료 구성비에 따른 붕괴유출수문곡선



그림 2. 제체 구성재료 혼합비에 따른 붕괴부 최종 횡단면

이상의 제체 구성재료 혼합비 변화 실험에서 실트와 모래 중 모래의 구성비가 많을수록 제방붕괴 시작이 빠르고 모래의 구성비가 적을수록 제방 붕괴시작이 늦으며, 침투유량 발생도 모래의 구성비가 높을수록 크게 나타나는 경향을 보였다. 즉 제방 구성재료의 실트가 증가됨에 따라 침투유량발생시간이 지체되고, 붕괴지속시간도 길어짐을 알 수 있었다.

구성재료 혼합비 변화에 따른 붕괴단면은 전형적인 사다리꼴 붕괴 양상으로 측정되었으며, A-1단면은 상부 55.8cm, 하부 45.7cm, 깊이 27.7cm로 전형적인 사다리꼴 형태를 띠었다. C-2 단면은 상부 65.4cm, 하부 55.3cm, 깊이 27.0cm이었으며, C-3단면은 상부 60.9cm, 하부 45.8cm, 깊이 27.7cm로 붕괴되었다(표 4)(그림 2).

표 4. 제체 구성재료 혼합비에 따른 최종 붕괴폭

실험명	붕괴상부폭 (cm)	붕괴하부폭 (cm)	붕괴평균폭 (cm)	제방높이 (cm)	붕괴깊이 (cm)
A-1	55.8	45.7	50.9	40.0	27.7
C-2	65.4	55.3	60.4	40.0	27.0
C-3	60.9	45.8	53.4	40.0	27.7
평균	60.7	48.9	54.9	40.0	27.5

본 실험에서 최종 붕괴부의 횡단면의 평균폭은 54.9cm로서 Fread(1977)의 연구결과인 $H \leq B \leq 3H$ 와 비교하면 본 실험은 $40\text{cm} < 54.9\text{cm} < 120\text{cm}$ 로서 Fread의 연구결과와 일치함을 알 수 있다.

3.2 제방 다짐도에 따른 붕괴 유출수문곡선

제방의 안전을 위해서는 충분한 다짐으로 토립자간의 공극을 최대한으로 줄이어 외수의 침투시 제방침윤선을 낮추어 제방 비탈면으로 나오지 않도록 설계하여 제방 붕괴를 막을 수 있다. 본 연구에서는 제방 표준단면(마루폭 20cm, 경사 1 : 20, 높이 40cm ; A-1)을 동일한 성토재료로써 제체 재료를 수로바닥으로부터 10cm씩 쌓아 실험 A-1의 경우에는 다짐봉 무게 4.5kg, 낙하고 30cm로서 3회의 다짐을 각각 실시하였다. 또한, 다짐 회수 변동에 따른 월류수에 의한 제방의 붕괴양상을 실험하였으며, 시간별 붕괴양상을 측정하기 위해 비디오 및 15초마다 사진을 촬영하여 분석하였고 이 때의 붕괴 유출수문곡선은 그림 3과 같다.

제방 성토재의 다짐도에 따른 붕괴양상을 비교하기 제방 성토재의 다짐회수를 1회(D-2)로 표준단면보다 다짐을 약하게 설계하여 붕괴부의 양상을 측정한 결과 제방월류시작 붕괴부가 형성되기 시작한 2분부터 1분 30초 후인 3분 30초에 최대 월류량은 66.0 l/sec에 달하는 것으로 측정되었다. 이 유량은 유입유량 6.1 l/sec의 약 10.8배에 달하는 유량이며, 표준단면 A-1 실험의 최대유량 50.0 l/sec 보다 32%가 큰 첨두유량이 측정되었다. D-2 실험의 첨두유량 발생시간은 제방다짐도가 약하여 표준실험 A-1보다 15초 빠른 3분 30초에 발생하였고, 붕괴부가 발달되는 붕괴지속시간은 표준실험 보다 1분 10초 빠른 4분 20초 이었다.

제방 성토재 다짐을 표준단면보다 강화시킨 다짐회수 6회(D-3 단면)는 제방월류시작 2분부터 붕괴부가 형성되기 시작한 1분 45초 후인 3분 45초에 최대유출량 15.0 l/sec에 달하는 것으로 측정되었다. D-3 실험의 최대유량 15.0 l/sec는 유입유량 6.1 l/sec의 약 2.5배에 달하는 유량이며, 표준단면 A-1 실험의 최대유량 50.0 l/sec보다 70%가 감소된 것으로 측정되었다. 첨두유량 발생시간 및 붕괴지속시간은 표준실험 A-1과 거의 비슷하였다(표 5)(그림 3).

표 5. 제체 다짐회수 변화 실험의 조건

실험명	재체의 평균입경(mm)	마루폭(cm)	제방고(cm)	경사	각 층의 다짐횟수	공급유량 (l/s)
A-1(표준)	0.21	20	40	1 : 2	3	6.1
D-2	0.21	20	40	1 : 2	1	6.1
D-3	0.21	20	40	1 : 2	6	6.1

표 6. 제체 다짐회수 변화에 따른 붕괴 유출수문곡선 특성치

실험명	붕괴시작시간 (분/초)	붕괴지속시간 (분/초)	침투발생시간 (분/초)	침투유량 (ℓ/s)
A-1(표준)	2/00	5/30	3/45	50.0
D-2	2/00	4/20	3/30	66.0
D-3	2/00	5/30	3/45	15.0

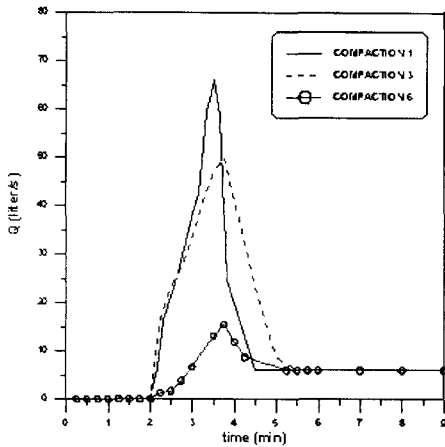


그림 3. 제체 다짐도에 따른 붕괴유출수문곡선

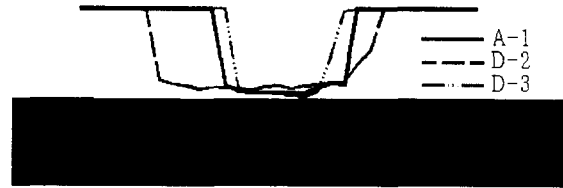


그림 4. 제체 다짐회수 변화에 따른 붕괴부 최종 횡단면

이상 제방 성토재의 다짐회수 변화 실험에서 제방 성토재의 다짐회수가 작을수록 침투유량 발생시간이 빨라지고, 붕괴지속시간이 짧아짐을 알 수 있었다.

한편 각 실험에서 붕괴부 최종 횡단면은 사다리꼴형으로서 표준단면인 A-1단면은 상부 55.8cm, 하부 45.7cm, 깊이 27.7cm이며 D-2단면은 상부 91.3cm, 하부 71.4cm, 깊이 27.0cm로 측정되고, D-3단면은 상부 49.7cm, 하부 30.5cm, 깊이 27.9cm로 각각 붕괴되었다(그림 4)(표 7).

본 실험에서도 최종 붕괴단면을 보면 전형적인 사다리꼴 붕괴형태이며, 평균 붕괴폭 B와 제방고 H의 관계는 $40\text{cm} < B < 120\text{cm}$ 로서 Fread(1977)의 연구결과인 $H \leq B \leq 3H$ 와 잘 일치함을 알 수 있다.

표 7. 제체 다짐회수 변화에 따른 붕괴부의 단면 특성치

실험명	붕괴상부폭 (cm)	붕괴하부폭 (cm)	붕괴평균폭 (cm)	제방높이 (cm)	붕괴깊이 (cm)
A-1	55.8	45.7	50.9	40.0	27.7
D-2	91.3	71.4	81.4	40.0	27.0
D-3	49.7	30.5	40.1	40.0	27.9
평균	65.6	49.2	57.5	40.0	27.5

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 제방 축조의 구성재료 혼합비와 제체 다짐도에 따른 붕괴 유출수문곡선 및 붕괴부 특성에 대한 수리모형실험을 실시하였다. 실험결과 제체의 실트질 성분이 증가할수록 붕괴부를 통한 침투유량이 작고, 침투유량 발생시간이 지체되며 붕괴지속시간도 길어짐을 알 수 있었다. 또한, 다짐도가 증가됨에 따라 침투유량 및 붕괴 지속기간에는 큰 영향을 주어 침투발생시간과 붕괴시작시간을 지체시키는 역할을 하였다. 따라서 제방 축조시 제체 구성물질 선택과 및 적절한 다짐도를 유지하며 시공하면 하천 제방 붕괴로 인한 피해를 훨씬 경감시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 각 실험결과에 나타난 붕괴단면의 형상은 불규칙하였으나 전반적으로 사다리꼴의 유형을 보였으며 붕괴폭과 깊이의 비(B/H)는 $1 < B/H < 3$ 에 부합됨을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. 강태호(1992), "흙댐의 물리적 특성치와 붕괴 유출수문곡선", 경기대학교 석사학위 논문, pp. 1~36.
2. 서울특별시(1992), "서울시 관내 하천제방안전도검토 및 치수종합대책수립 기본계획 보고서", pp. 493~514.
3. 한건연, 이종태, 이원환(1985), "Earth Dam의 파괴로 인한 유출수문곡선의 해석", 대한토목학회 논문집 5(2), pp. 41~50.
4. 건설부(1993), "하천시설기준", pp. 820~837.
5. Fread, D.L.(1977), "The Development and Testing of as Dam-Break Flood Forecasting Model", *Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop Water Resources Council*, Oct.