

하천제방 단면의 기하학적 형태와 붕괴 특성에 관한 실험연구

○이 상 태*, 강 태 호**, 박 상 식***, 이 종 태****

1. 서 론

일반적으로 홍수시 하천제방의 붕괴는 월류 및 파이핑에 의한 점진적 붕괴이다. 제방붕괴부는 제체를 구성하는 토립자가 침식되어 나감으로서 점차적으로 발달된다.

월류에 의한 붕괴는 제방높이와 하천의 수위차가 대략 0.5m 이내가 되면 제방마루의 가장 약한 하류단의 부분부터 침식되어 붕괴가 시작되고 물입자가 바닥에 이를 때까지 계속되어 기초 지반에 이르면 중지된다.

홍수로 인하여 제방에 가해지는 외력은 늘 불확정적인 것이어서 불가피하게 홍수류가 하천제방이 월류하여 제방을 붕괴시키는 큰 재해가 발생할 위험성을 완전히 배제할 수 없다. 이는 최근 하천 개수가 잘 이루어진 일부 직할하천에서도 제방붕괴로 침수피해가 크게 발생한 사례를 보아도 알 수 있다. 따라서 하천제방의 안전성을 향상시키는 노력은 홍수피해를 줄이는데 크게 기여 할 수 있다고 본다.

하천 제방붕괴로 인한 피해는 외수유입량과 붕괴부의 크기 및 형태에 따라 그 피해규모에 큰 영향을 미침에도 불구하고 이에 관한 연구는 한정되어 있으며, 아직까지 붕괴부의 확대 과정을 명확하게 해석함에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 실험수로내에 제방을 설치하여 월류 붕괴에 관한 수리모형 실험을 실시함으로써 제방단면 형상에 따른 붕괴특성을 이해코저 노력하였다. 즉, 기존 도시하천의 제방 단면들을 대표하는 단면을 결정하고 이를 기준으로 마루폭과 경사도 등을 변화시킴으로써 나타나는 붕괴과정과 홍수특성 및 붕괴부 형태 등을 측정하였으며, 마루폭, 비탈경사 등이 이들 실험 결과치에 주는 영향을 분석하였다.

2. 수리모형

수리모형실험은 일산 국립건설시험소의 개수로(1.5×1.0×12m)에 폭방향으로 제방을 축조하여 실시하였다. 개수로 상단에는 삼각웨어에 의한 유량 공급장치가 설치되어 있으며 공급되는 유량은 수조에서 정류되어 개수로로 공급된다(사진 1). 그림 1은 개수로 유입유량 결정을 위한 삼각웨어의 월류수심에 따른 유량곡선이다. 하천 제방단면의 체원 결정을 위하여 기존 구축된 서울시 관내 14개 하천 제방을 검토한 결과 제방의 경사는 대부분 1 : 2 이었으며, 마루폭은 약 4m, 높이는 약 2.0~13.0m로 평균 약 8.0m의 제방고를 나타내었다(서울시 관내 하천제방안전도검토 및 치수종합대책수립 기본계획보고서, 1992). 본 연구에서는 실제 제방단면을 1/20으로 줄여 마루폭 20cm, 제방고 40cm, 상하류 경사 1 : 2를 가진 제방을 표준단면으로 가정하여 실험수로에 설치하였다. 표준단면 축조시 체체의 구성물질은 실

* 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정, 건설교통부 시설서기관

** 경기대학교 산업기술종합연구소 선임연구원

*** 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정

****경기대학교 건설공학부 교수

제 축조된 제방과 유사하게 실트와 모래를 7 : 3의 비율로 혼합하였으며 모형에서 시료를 채취하여 분석한 결과 표준 다짐도 74%, 함수비 12.3%, 습윤밀도 1.55 g/cm^3 를 나타내었다.

상류 웨어에서의 유입량은 실험기간 동안 6.1 l/sec 로 일정하게 유지하였으며, 제방 하류측 비탈끝에서 약 2m 떨어진 지점의 수로 양안에 각 1개의 수위계를 설치하였으며, 수로폭 1.5m를 3등분하여 각 1개씩 3개의 유속계를 설치하여 각 시간별 유량을 측정하였다.

또한 하류측 제방 비탈끝에서부터 수로 끝까지 개수로 바닥위에 10cm 두께로 모래를 포설하여 제방 침식으로 인하여 발생한 토사가 하류측 하상에 퇴적되는 양상을 관측하였으며, 월류수에 의한 제방 마루폭의 시간에 따른 확대과정을 관찰하기 위하여 제방 마루에 10cm 간격의 격자를 구성하여 마루폭 확대과정을 사진 또는 비디오로 측정하였다.



사진 1. 수리모형실험 전경

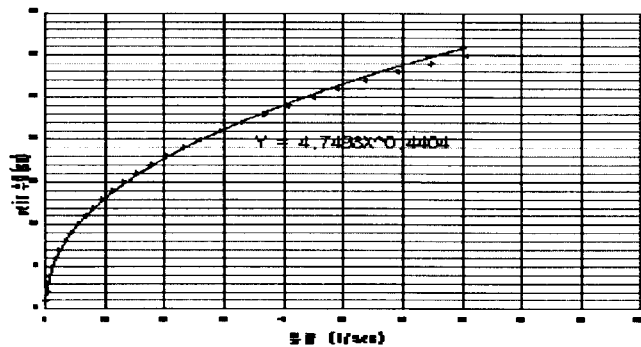


그림 1. 수위-유량 관계곡선

3. 제방의 기하학적 형상과 붕괴 유출수문곡선

3.1 제방 마루폭에 따른 붕괴 유출수문곡선

제방 표준단면(마루폭 20cm, 경사 1 : 20, 높이 40cm ; A-1, 그림 2)을 갖는 제방을 개수로 폭 1.5m 만큼 축조하여 월류수에 의한 제방의 붕괴양상을 실험하였다. 시간별 붕괴양상을

측정하기 위해 비디오 및 15초마다 사진을 촬영하여 분석하였으며, 이 때의 붕괴 유출수문 곡선은 그림 3과 같다.

월류수가 제방을 월류하는 시점부터 약 2분까지는 제체의 침식양상이 거의 미소하여 붕괴 부에서의 유출량이 거의 없다가 약 2분이 경과 된 후부터 급격히 붕괴부가 발달하여 먼저 깊이 방향 즉, 제체 중심방향으로 발달되면서 길이방향(수로 폭방향)으로 발달되는 양상을 보였다.

붕괴부가 형성되기 시작된 지 약 1분 후에 붕괴부 유출량은 최대에 달하여 유입량의 8.2 배인 약 50.0 l/s가 측정되었다. 붕괴부 발달은 월류가 시작된 지 약 3분 30초 까지 지속되다가 하상이 드러나며 붕괴가 종료되었다.

붕괴부는 상부폭 55.8cm, 하부폭 45.9cm로서 전형적인 사다리꼴 형상을 보여주었다. 마루폭 변화에 따른 붕괴 특성을 파악하기 위해 표 1과 같이 표준단면인 실험 A-1을 마루폭 변화에 따라 실험 A-2, A-3로 구분하여 각각 실험을 실시하고 그 결과를 비교하였다.

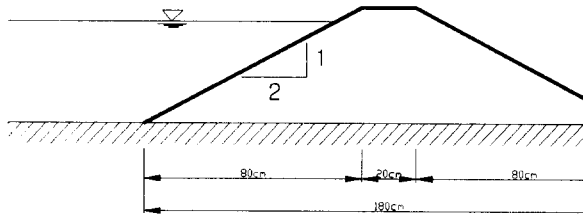


그림 2. 제방 표준단면도

표 1. 마루폭 변화 실험의 조건

실험명	제체 구성재료의 평균입경(mm)	마루폭(cm)	제방고(cm)	경사	공급유량 (l/s)
A-1(표준)	0.21	20	40	1 : 2	6.1
A-2	0.21	10	40	1 : 2	6.1
A-3	0.21	30	40	1 : 2	6.1

마루폭 변화에 대한 붕괴 양상을 모의하기 위해 실험 A-1 조건에서 마루폭을 10cm로 축소(A-2)시켜 붕괴부 양상을 측정된 결과 그림 3과 같이 제방 월류 시작 후 2분부터 붕괴부가 형성되기 시작하여 1분 15초 후인 3분 15초에는 최대 월류량이 약 58.5 l/s에 달하는 것으로 측정되었다. 실험 A-2에서의 최대유량 58.5 l/s는 유입유량 6.1 l/s의 약 9.6배에 달하는 유량이며, 표준단면 실험 A-1에서의 최대유량 50.0 l/s와 비교할 때 침투유량이 약 17% 증가되는 것으로 측정되었다.

붕괴 지속시간에 있어서도 실험 A-1에서는 약 3분 45초에 붕괴가 완료된 반면 마루폭을

10cm로 줄인 실험 A-2에서는 붕괴가 3분 15초 동안 지속되어 붕괴부 발달시간이 약 30초 정도 단축되었다(표 2).

실험 A-2의 최종 붕괴부의 양상은 상부폭 75.1cm, 하부폭 48.3cm의 전형적인 사다리꼴 형상을 띠었으며, 실험 A-1의 최종 붕괴부 보다 크게 측정되었다(그림 4).

또한, 실험 A-1 조건의 마루폭 20cm를 10cm 더 넓혀 30cm로 증가시킨 실험 A-3에서는 A-1, A-2 실험보다 마루폭이 더 넓어진 영향으로 월류에 의한 제방 사면의 붕괴가 약 30초 늦게 시작되었으며, 침투발생시간도 표준단면 A-1 실험보다도 약 30초 후인 4분 15초에 발생하는 것으로 측정되었다(표 2, 그림 3). 또한, 침투유량면에서도 표준단면(A-1)보다 8.7%가 줄어든 46.0 l/s로 측정되었으며 붕괴지속시간은 표준단면(A-1) 보다 약 15초 지연되었다. 최종 붕괴단면은 상부 50.7cm, 하부 36.5cm의 사다리꼴 형상을 띠었다. 결국, 하천 제방 마루폭의 영향은 마루폭이 증가됨에 따라 침투유량을 줄여주며, 침투발생시간 및 붕괴지속시간을 지연시킴을 알 수 있었다.

표 2. 마루폭 변화에 따른 붕괴 유출수문곡선 특성치

실험 명	붕괴 시작시간 (분/초)	붕괴 지속기간 (분/초)	침투 발생시간 (분/초)	침투유량 (l/s)
A-1(표준)	2/00	5/30	3/45	50.0
A-2	2/00	5/15	3/15	58.5
A-3	2/30	5/45	4/15	46.0

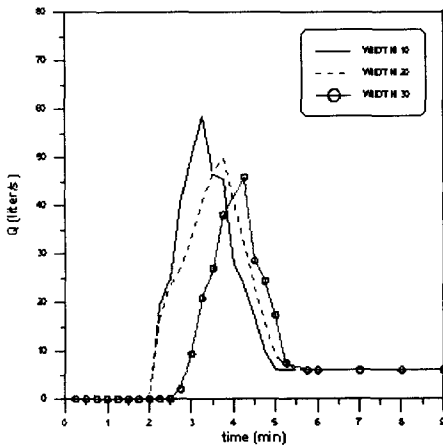


그림 3. 마루폭변화에 따른
붕괴유출수문곡선

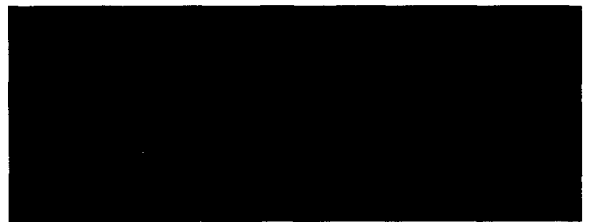


그림 4. 마루폭변화와 붕괴단면 형상

3.2 제방 경사에 따른 붕괴 유출수문곡선

제방 경사 변화에 대한 붕괴 양상을 모의하기 위해 표 3과 같이 A-1 실험(표준단면) 조건에서 제방의 상류 및 하류측 경사를 1 : 1.5로 표준단면보다 급하게 설계하여 붕괴부의 양상을 측정하고 B-2실험 결과는 그림 4와 같이 제방 윗류 시작 2분부터 붕괴부가 형성되기 시작한 2분 15초후인 4분 15초에 최대 유출량 62.0 l/s에 달하는 것으로 측정되었다. 실험 B-2에서의 최대유량 62.0 l/s는 유입유량 6.1 l/s의 약 10.2배에 달하는 유량이며, 표준단면 실험 A-1의 최대유량 50.0 l/s보다 약 24%가 크게 측정되었다. 그러나 침투유량 발생시간에 있어서는 표준단면보다 약 30초가 늦은 4분15초에 발생하였고, 붕괴부가 발달되는 붕괴 지속시간은 표준단면과 거의 비슷하게 발달되었다. 최종 붕괴부의 폭은 상부 55.7cm, 하부 36.8cm 사다리꼴 붕괴단면이 형성되었다(그림 5).

제방의 경사를 표준단면보다 조금 완만한 1 : 2.5인 실험 B-3에서는 침투유량은 45.0 l/s으로 표준단면에서 보다 약 10%가 감소되는 것으로 측정되었다. 붕괴부가 발달하는 과정인 붕괴 지속시간에 있어서는 표준단면(A-1) 실험 보다 약 30초 정도가 길게 측정되었으며, 붕괴부의 형상은 상부 55.6cm, 하부 46.2cm인 사다리꼴 붕괴단면이 형성되었다. 또한, 완만한 경사의 침투유량은 급경사보다 약 10~24% 정도 감소하였다. 그러나, 침투발생시간은 급경사일 경우가 완경사 경우보다 약간 늦어지는 것으로 측정되었으며 이에 관하여서는 추가실험을 통한 충분한 검토가 요망된다.

표 3. 제방 경사 변화 실험의 조건

실험명	제체의 평균입경(mm)	마루폭(cm)	제방고(cm)	경사	공급유량 (l/s)
A-1(표준)	0.21	20	40	1 : 2.0	6.1
B-2	0.21	20	40	1 : 1.5	6.1
B-3	0.21	20	40	1 : 2.5	6.1

표 4. 제방 경사 변화에 따른 붕괴 유출수문곡선 특성치

실험명	붕괴 시작시간 (분/초)	붕괴 지속기간 (분/초)	침투 발생시간 (분/초)	침투유량 (l/s)
A-1(표준)	2/00	5/30	3/45	50.00
B-2	2/00	5/30	4/15	62.00
B-3	2/00	6/00	3/45	45.00

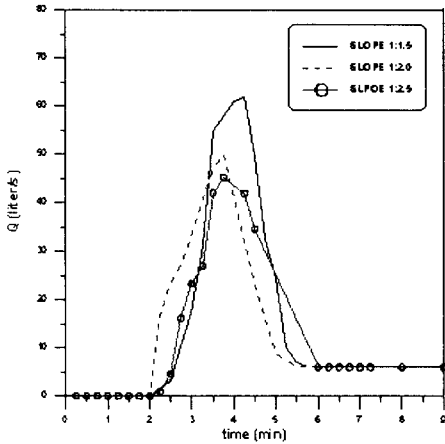


그림 5. 경사 변화에 따른
붕괴유출수문곡선



그림 6. 비탈경사와 붕괴단면 형상

4. 결론 및 요약

본 연구는 홍수시 외수에 의한 도시하천 제방 월류시 이로인한 피해를 경감시키는데 기본 연구가 되는 제방의 기하학적 형상에 따른 제방붕괴양상에 대한 수리모형실험을 실시하였다. 실험결과로는 첫째, 하천 제방 마루폭 변화에 따른 영향은 침투유량 및 붕괴 지속기간에는 큰 영향을 주어 침투발생시간과 붕괴시작시간을 지체시키는 역할을 하였다. 둘째, 제방 경사 변화에 따른 영향은 제방 경사가 완만해짐에 따라 침투유량을 줄이는 효과를 나타내었다. 붕괴부 양상은 상부폭이 더욱 넓게 붕괴되는 것으로 측정되었다. 그러나, 침투발생시간에서는 완경사의 경우가 급경사의 경우보다 약간 빠른 것으로 측정되었으며 이에 관한 원인을 앞으로의 추가실험을 통한 보다 깊이있는 연구가 요망된다.

5. 참고문헌

1. 강태호(1992), “홍담의 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.