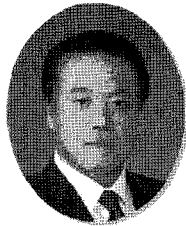


파이핑 발생으로 인한 제방보강시 고 지형조건을 고려한 설계사례



김재현
(주)삼안 토질부 부사장



차달성
(주)삼안 토질부 이사

1. 서론

국내 기존 제방의 선형은 어느 정도 완성되어 있으며, 상향 조정된 홍수빈도에 따라 추가 성토 및 단면확대의 보축이 이루어 졌거나 시행될 예정이다. 그러나 최근 지구 온난화 현상이 가속화됨에 따라 호우 특성이 대규모로 변화하는 양상이며, 강우량 또한 기왕의 수준을 넘어 장래에는 보다 많은 강우량이 예상되어 제방의 파이핑 발생 가능성은 커질것으로 예상된다.

일반적으로 제방의 누수원인은 투수성이 큰 모래층 또는 자갈층인 경우, 지반침하에 의해 하천수위와 제체지반고차가 커진 결과 침투압이 증가한 경우, 제체내 매설된 구조물과 접합부에 흐름이 생기는 경우, 제방단면이 너무 작은 경우, 제체를 충분히 다지진 않은 경우등이 있다.

현장조사 및 탐문조사를 통하여 과거 파이핑이 발생한 지역이나 취약한 지역으로 제방보강이 요구된다면 보강설계시 파이핑이 발생한 구간을 고려하여 시추 및 현장투

수시험결과를 가지고 침투해석을 수행하는 방법이 일반적으로 수행되고 있다.

그러나, 조사계획단계에서 현재 조성된 제방에 있어서 이전에 사행천이 직강화 되었는지, 제방 횡단으로 구거가 연결되어 있었는지, 혹은 하상위에 제방이 축조되었는지등의 고지형 조건부터의 분석이 필요하다.

따라서, 집중호우시 수해발생빈도가 높았던 낙동강 유역에 대한 보강사례를 통하여 계획이나 보강설계단계에서 제방조성 이전의 고지형에 대한 조사 및 분석의 필요성을 제시하고자 한다.

2. 사례별 현황분석 및 보강

2.1 사행천을 직강화함에 따라 구거 위에 제방이 축조된 사례

1) 피해원인 및 주요 현황

◎ 피해원인 : 태풍 예위니아 및 이후 집중호우시 파이핑 발생한 지역으로 제체 및 지반경계부에 파이핑

기술기사 3

이 발행한 바 과거 유로에 제방조성시 이의 경계부를 통한 누수발생

: 과거 사행천에서 현재는 직강천으로 조성된 바 부분적인 하천유로 변경에 따라 자연적인 유로로 내재하고 있음.

- ◎ 발생위치 : 제체와 지반경계의 Toe부이며 3~5m 간격으로 발생.
- ◎ 제체는 일부 GC층(자갈입径1~3cm)이며, 기초지반은 실트질 모래 및 점토질 모래층으로 분포함.

2) 고지형도를 통한 피해원인 세부 분석

그림 2는 고지형도에 현 계획도를 겹쳤을때로서 낙동강 본류에 접해 있는 ○○천, ○○은 과거 사행 하천이었으나, 현재는 직강화된 하천으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 사행천이 직강하천 됨에 따라 일부구간은 하천충적구간위에 제방이 축조되었으며, 과거 수십 년 전, 제방축조 당시 부터 벌개제근 미처리나 비다짐조건, 투수성이 큰 하상재료유용등이 취약 조건으로 내재하게 된다.



그림 1. 파이핑발생 현황사진

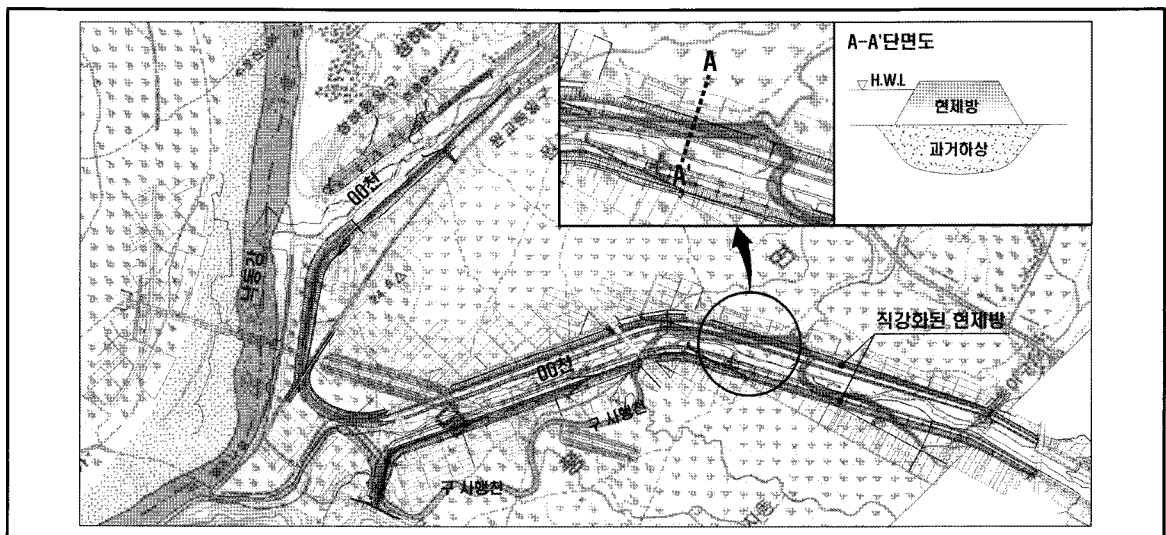


그림 2. 고지형도에 현 제방을 겹친 경우

» » 파이핑 발생으로 인한 제방보강시 고 지형조건을 고려한 설계사례

이후, 집중호우등으로 수위가 높게 상승될 경우는 침투압이 흙의 유효응력보다 크게 되어 보일링(Boiling)현상에서 파이핑(Piping)현상으로 진전됨을 알 수 있다.

3) 침투해석결과 및 보강방안

파이핑 안정해석방법 및 침투해석조건에 대한 주요 내용과 본 검토에 적용된 방법은 표 1과 같다

투수계수값은 구지형을 분석후 상대적으로 취약한 지반심도등의 조건을 고려하여 수행된 투수시험결과를 적용하였다.

침투해석결과 최대동수경사가 허용안전율이미하고 홍수위시 유출속도가 한계유속보다 크므로 보강이 필요한 바 보강방안으로는 지반조건을 고려 혼합교반처리공법을 적용하였다.

표 1. 검토방법 및 해석조건

구분	주요내용
파이핑 안정성 해석 방법	<p>한계동수경사에 의한 방법</p> <p>이 방법은 한계 동수경사에 대한 제한치를 설정하여 파이핑의 기준을 정하거나 Filter의 기준을 역으로 적용 할 수도 있다. 그러나 이러한 방법은 일반적이고 경험적인 것이므로 정상 침투조건에 대한 안전을 설정에도 임의적인 요소가 많고 결과의 해석 범위가 커서 중요구조물에 현지 제조건의 정밀한 검토 없이 적용할 경우 그 결과의 불명확성이 커지게 되는 경향이 있다. 파이핑에 대한 안전율은 다음과 같이 구한다.</p> $Fs = \frac{i_c}{i}, \quad ic = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{Gs-1}{1+e}$ <p>침투력(Seepage force) $J = i \cdot \gamma_w \cdot A$, 동수경사 $i = J/\gamma_w \cdot A$ 여기서, Fs: Safe Factor, ic: 한계동수경사, J: 침투력(Seepage force), i: 동수경사 e: 간극비, Gs: 비중, γ_w: 물의 단위중량, γ_{sub}: 흙의 수중단위 중량, A: 횡단면적</p>
	<p>한계유속에 의한 방법</p> <p>토립자의 입경에 대하여 소류력에 의하여 입자가 밀려나가는 한계의 침투유속을 다음 Justin 방법등으로 구하고 입자는 그 한계치를 넘으면 파이핑이 발생한다고 본다.</p> $V_{cr} = \sqrt{\frac{Wg}{A \gamma_w}}$ <p>여기서, V_{cr}: 한계유속(cm/s), W: 토립자의 수중중량(g), g: 중력가속도(cm/s²) A: 물의 흐름을 받는 토립자의 면적(cm²)</p>
	<p>Bling와 Lane의 경험 방법</p> <p>경험적 침투로에 대한 설계정수를 결정하는 Bligh(1912)와 Lane(1935)의 제안은 토립자의 입경에 따른 정수를 도입하여 최소 침투로와 동수경사의 관계를 설정하여 파이핑을 해석하는데 적용되고 있다.</p>
	<p>침투유량에 의한 방법</p> <p>제방 하부(substratum)에서의 침투유량이 4.1×10⁻⁴(m³/s/m) 이상일 경우 제체에 Blanket을 설치하여 침투수를 조절하여야 한다고 제시하였다. US ARMY Corps of Engineers Engineer Manual, Design & construction of levees "EM 1110-2-1913" 침투유량 $Q_s = Q \times n$ (m³/s/m) (Q: 해석유량, n: 간극율)</p>
침투 해석 조건	<p>침투해석 방법으로는 첫째, 수위변화를 고려했을 경우 수위조건을 대표적인 값으로 고정시키는 정상 침투 해석(Steady state seepage Analysis), 시간적 수위변화를 고려하는 비정상 침투해석(Transient state seepage Analysis)으로 나뉘며, 둘째, 구성토층의 투수조건에 따라 포화토(Saturated soil), 불포화토(Unsaturated soil)로 분류</p>
적용	<p>-해석방법은 한계 동수경사에 의한 방법과 한계유속에 의한 방법적용 - 제방 하류측의 최대 동수경사 및 최대 침투유속을 산출하기 위해 유한요소해석 프로그램인 Seep/W ver 2004를 사용하였다. - 대표단면에 대한 파이핑 검토는 지속강우로 인한 계획홍수위와 평수위를 설정하여 홍수위시 제체내 비정상침투에 의한 제내지 측에 대해 안정검토를 수행 - 수위 급강하 시는 홍수위에서 평수위로 회복되는 시간으로 비정상침투해석을 실시</p>

기술기사 3

표 2. 적용 투수계수

대표 단면	토 층	투수계수 K(cm/s)						적용	비 고
		① 현장 투수시험	② 경험식				③ 문헌값		
			D ₁₀ (cm)	K	D ₁₀ (cm)	K			
○ ○ 제	매립층	1.61E-02	-	-	-	-	1.0E-3~1.0E-1	1.61E-02	현장시험
	실트질모래층	2.39E-02	-	-	-	-	1.0E-3~1.0E-1	2.39E-02	현장시험
	점토질모래층	2.39E-02	-	-	-	-	1.0E-3~1.0E-1	2.39E-02	현장시험
	풍화토층	-	-	-	-	-	1.0E-6~1.0E-3	1.0E-04	문헌값
	외부투취장	7.29E-05	-	-	-	-	-	7.29E-05	실내시험

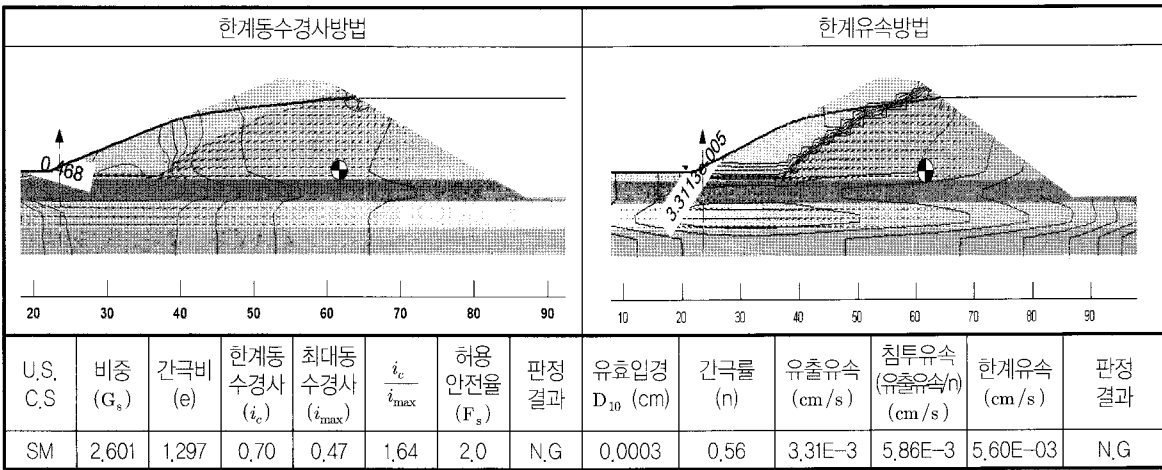


그림 3. 침투해석결과

표 3. 차수보강공법검토

구분	공법	침투주입공법	혼합교반처리공법	Sheet Pile 공법	고압분사공법
시공방법		· 단관 혹은 2중관을 이용 주입재를 지반에 저압으로 주입	· 3축 오거를 이용하여 천공 후 개량재를 저압으로 토사와 혼합, 교반후 벽체 형성	· S/P를Vibro Hammer와 크레인, Water Jet를 이용하여 타입	· 고압분사로 지반을 절삭 파쇄시킴과 동시에 혼합하여 개량 체를 형성
장 단 점		· 주입장비가 소형으로 시공성 양호 · 저소음, 저진동 · 타 보다 강도적용. · 점토지반에는 맥상형태로개량효과적용.	· 소음, 진동이 적어 도심지 시공 가능 · 공기가 작고 경제적 · 시공장비가 대형이라 깊은 심도 및 자갈층 시공성 저하	· 차수효과 양호 · 지하수위 변동 없이 공사 가능하고 강성이 큼 · 경암반, 호박돌층 시공 유의	· 토층변화에 대한 적응성이 높음 · 사질토 개량효과우수 · 초고압 주입으로 지반 용기 문제 주의
재 료		시멘트, 물유리야액	시멘트+물+혼화재	강널말뚝	시멘트+물+원지반
개량경		Ø800~1,200	Ø500×3축	635mm/본당	Ø1,000~1,500
적용지반		모래, 점토, 자갈, 암반	모래, 점토	모래, 점토, 자갈, 암반	모든 토사지반 및 풍화암
주요공법		· MIS, JCM, SGR 등	· DWM, SCW, IBF 등	-	· SIG, JSP, SQ 등

2.2 하상위에 제방이 축조된 사례

1) 피행현황 및 주요내용

- ◎ 피해원인 : 태풍 예위니아 및 이후 집중호우시 파이핑 발생한 지역으로 학교 운동장 조성시 매립된 전석층 사이 공극을 통한 지반누수발생
- ◎ 발생위치 : 제내측 Toe부에서 전면으로 10m구간까지 연속적으로 운동장 전 구간에 대하여 파이핑 및 지반함몰부가 발견됨.
- ◎ 탐문결과 : 현 제방 축조 전, 현 제방과 파이핑 발행구간 하부를 전석 등으로 매립, 복토하여 운동장 조성.
- ◎ 지반현황 : 제체, 기초지반 모두 GM층(자갈입경 1~10cm)

2) 구 지적도의 고지형조건을 통한 피해원인 세부 분석

○○학교 운동장구간내에 구 제방점 도로구간이 확인되었으며, 탐문조사결과 현재는 운동장 일부인 구제방점 도로와 현 제방구간사이에 하상의 전석 쌓기 후 복토하였다고 한다. 따라서, 하상위로 학교운동장 조성시 하상의 재료인 전석과 사질토로 복토(10~20cm)한 구간으로 전석사이의 매우 큰 공극을 통하여 수리적인 흐름이 발생하고 있는 것으로 판단된다.

3) 침투해석결과 및 보강방안

투수계수값은 구지형을 분석후 상대적으로 취약한 지반심도등의 조건을 고려 투수시험결과를 적용하였나, 투

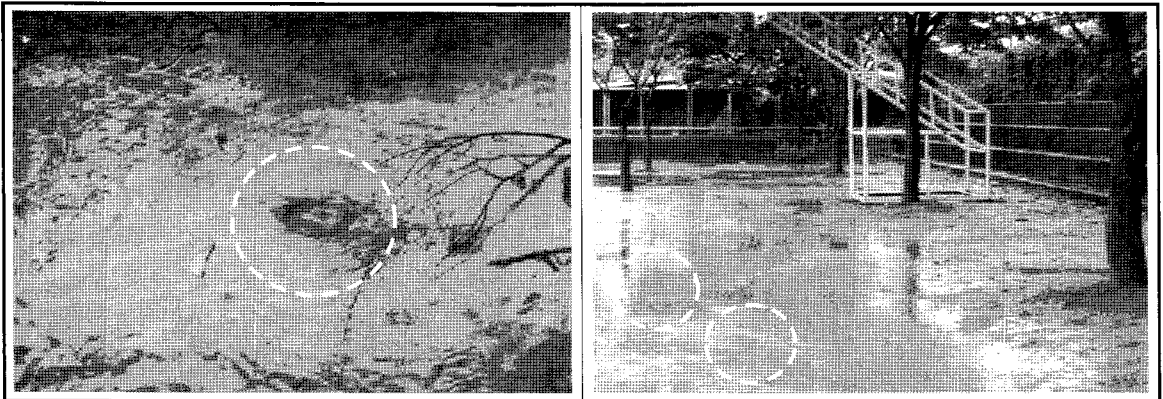


그림 4. 파이핑발생 현황사진

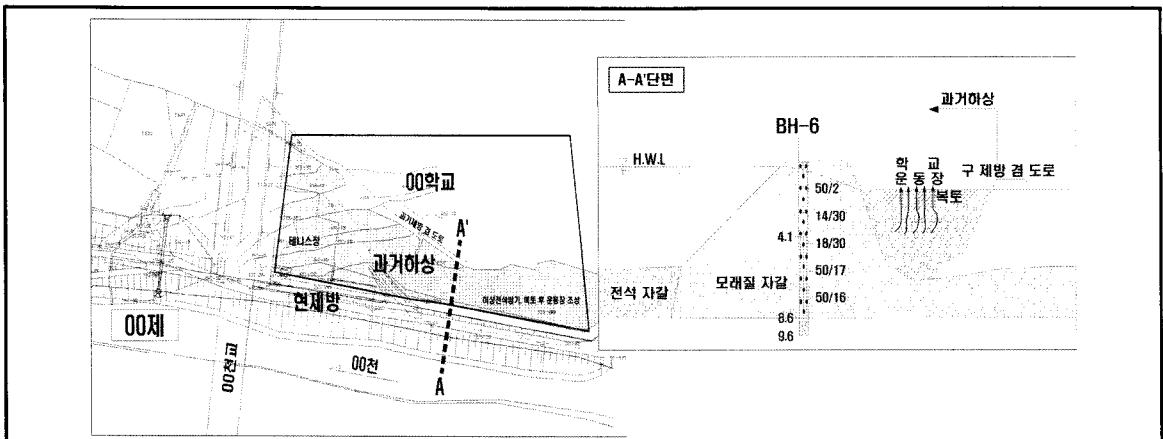


그림 5. 구 지적도와 현 계획을 겹친 경우

기술기사 3

표 4. 적용 투수계수

대표 단면	투 층	투수계수 K(cm/s)						비 고	
		① 현장 투수시험	② 경험식				③ 문헌값		적용
			D ₁₀ (cm)	K	D ₁₀ (cm)	K			
○○○ 세	매립층	시험불가	0.0095	1.35E-2	0.04	4.50E-2	1.0E-3~1.0E-1	4.50E-02	경험식
	호박돌층	시험불가	-	-	-	-	1.0E-3~1.0E0	5.00E-01	문헌값
	풍화토층	-	-	-	-	-	1.0E-3~1.0E-1	1.00E-03	문헌값
	풍화암층	7.27E-04	-	-	-	-	1.0E-6~1.0E-3	7.27E-04	현장시험
	외부토취장	2.76E-04	-	-	-	-	-	2.76E-04	실내시험

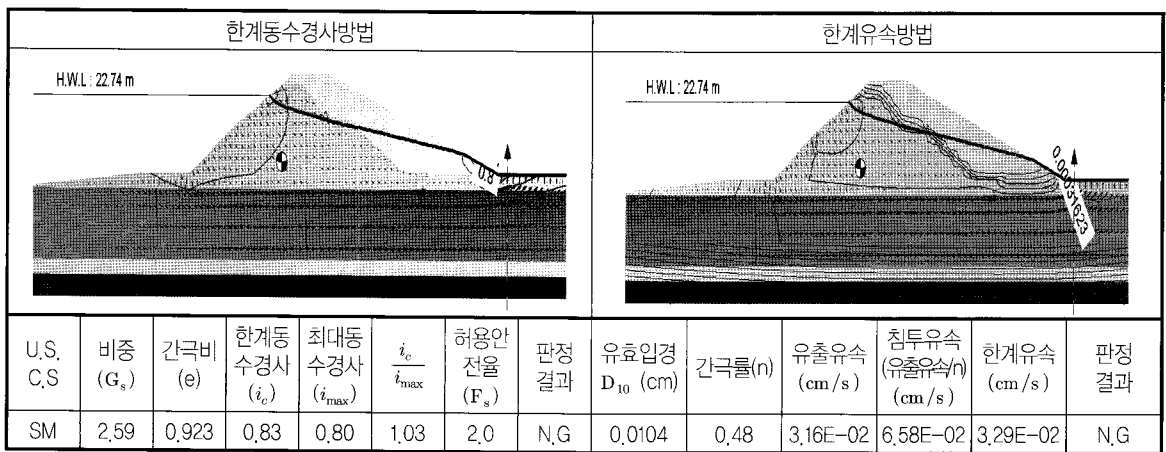


그림 6. 침투해석결과

수시험이 원활하지 못한 지반에 대하여는 경험식과 문헌 값을 비교하여 적용하였다.

침투해석결과 최대동수경사가 허용안전율이이하고 홍수위시 유출속도가 한계유속보다 크므로 보강이 필요한 바 보강방안으로는 지반조건 및 주변민가를 고려 고압 분사공법을 적용함(표 3. 참조).

3. 결 론

1. 사례를 통하여 본 바와 같이 구거 혹은 하상위에 축조된 제방의 경우 수위상승시 인접 구간에 비하여 파이프 발생가능성이 큰 것으로 나타났다.
2. 조사단계부터 고지형도 및 구지적도 분석을 통하여 과거 구거나 하상 위치를 고려한 지반조사 즉, 심도에

있어 1.0m이하 간격의 표준관입시험(SPT)및 합리적인 현장투수시험과 여건에 따라 물리탐사를 병행하여 신뢰성 있는 지반특성을 도출과 보강범위 결정시에도 이의 결과를 반영할 수 있도록 하여야 할 것이다.

3. 침투안정해석방법에 있어서도 한계동수경사 방법의 에도 상대적으로 느슨한 구거나 과거하상지반의 투수 특성을 반영할 수 있는 한계유속방법을 병행 검토하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.
4. 보강방법에 있어서도 과거 자연적으로 흐름이 진행되었던 구간에 대하여는 직접적인 차수보강방법외에도 제내지층에 (Deep Well+필터)+양수시설이나 트렌치+(필터+돌망태)+양수시설로 제체 입자유출을 방지하고 침투수만 처리하던가 하도외(off line) 저류등의 간접적인 방법을 검토하여 적용하여야 할 것이다.