

굴착에 따른 인접 제방의 파이핑 해석

Piping Analysis for Excavation in a Embankment

이 송*
Lee, Song

국 중 진**
Kook, Joong-Jin

정 민 형***
Jung, Min-Hyung

Abstract

One of the cause of embankment failure for piping is a routine design for piping consideration without exact understanding of that. Therefore, in this study, comparison and analysis of existing piping consideration methods had been conducted through embankment sections when sheet piles constructed on sandy ground. For the Terzaghi method and the critical hydraulic method, safety factors were changed up to double depending on the method. And for the critical velocity method, it was dramatically changed due to design parameters. Consequently, existing piping consideration method currently used is recommended not to be applied to all ground conditions uniformly but to applied with exact understanding of each consideration method characteristics depending on ground conditions.

요 지

파이핑에 의한 제방 사고의 원인은 설계과정에서 파이핑 현상에 대한 정확한 이해 없이 단순 적용되는 검토과정이 문제의 한 원인이 된다. 이에 본 연구는 사질토 지반에 가까운 제방단면에 sheet pile을 타입할 때 굴착면에서 기존의 파이핑 검토 방법들을 비교·분석하였다. Terzaghi 방법과 한계동수경사 방법에서 안전율은 각 방법에 따라 최대 2배의 차이를 보였다. 그리고 한계유속 방법은 설계인자를 어떻게 판정하느냐에 따라 큰 편차를 나타내었다. 결론적으로 기존의 파이핑 해석방법을 모든 지반 조건에 일률적으로 적용하기 보다는 지반 조건에 따라 각 해석방법이 가지는 특성을 이해하고 적용해야할 것이다.

Keywords : Critical hydraulic gradient, Critical velocity, Flow net, Piping

핵심 용어 : 한계동수경사, 한계속도, 유선망, 파이핑

* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

** 서울시 도시교통본부 도로계획 담당관실

*** 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : scugeo@uos.ac.kr 02-2210-2272

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2009년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

하천 제방에 근접하여 구조물을 시공하기 위해서는 지하수와 및 우기시 홍수위의 영향에 대한 고려가 무엇보다도 중요하며 이를 반영한 설계와 시공이 이루어져야 한다. 여기에 사질지반의 경우, 지반굴착 시에는 파이핑 발생 가능성에 대한 세심한 주의가 요구된다. 파이핑 발생으로 인한 사질지반의 붕괴 사고는 과거로부터 종종 발생하는 문제였으며, 실제로 2006년 집중호우시 안양천변 지하철 공사구간의 제방 붕괴도 파이핑이 하나의 원인으로 작용하여 막대한 재산 손실이 발생한 바 있다. 이러한 파이핑 사고발생 사례를 분석해보면 파이핑에 대한 검토가 누락되었다기보다는 파이핑 검토 방법에 대한 정확한 이해와 고찰 없이 기존의 검토방법을 단순 적용했기 때문이라고 판단된다.

굴착저면의 파이핑에 관한 연구로는 Harza(1935), Terzaghi(1943), Harr(1963) 등의 연구가 있으며(박중영, 2002), Justin(1923)과 Richardson(1954)을 거쳐 한계유속에 의한 검토방법 또한 체계를 갖추었고, 구조물 기초설계기준(2003)이나 서울시 시설물 설계·시공 및 유지관리 편람(2001) 등에 각 검토방법 별 기준안전율이 제시되어 있다. 그러나, 댐과 하천제방에 대한 파이핑 연구와 비교하여 볼 때 사질지반 굴착시 굴착저면의 파이핑 파괴에 관한 연구도 상대적으로 부족하고, 구체적인 적용방법에 대한 사항 또한 미흡하여 실제 현장 적용에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 현재 파이핑에 대한 안정성 해석에 주로 적용되고 있는 Terzaghi 방법, 한계동수경사 방법 및 한계유속 방법의 안전을 변화 추이를 실제 제방단면에 적용하여 해석하였다. 파이핑 안정성에 굴착저면과 배면의 수위차, Sheet pile 근입깊이가 큰 영향을 미치므로 파이핑 안전율에 대한 변화 양상을 이들 인자의 변화에 따라 안전율을 검토하고, 각 해석방법의 결과를 비교 분석하였다.

최근 제방 붕괴사고가 발생한 제방에서 두 단면을 선정하여 시추조사 데이터 및 현장투수시험 결과로 얻어진 토질 정수를 이용하였다. Terzaghi 방법이나

한계동수경사 방법 적용에 필요한 유선망과 최대침투 유속은 SEEP/W 프로그램의 결과를 이용하였다.

2. 파이핑 안전성 해석 방법

2.1 Terzaghi에 의한 방법

Terzaghi의 연구에 의하면, 파이핑이 생기는 영역은 Fig. 1에서와 같이 근입깊이 D와 폭 D/2 둘러싸인 직사각형 영역이다. 검토영역 내에 상향의 침투력 J와 하향의 유효중량 W의 비로써 식 (1)과 같이 파이핑에 대한 안전율을 나타낸다.

$$F_s = \frac{W}{J} = \frac{\frac{1}{2}\gamma_{sub}D^2}{\frac{H_{ave}}{D} \cdot \gamma_w \cdot (\frac{1}{2}D^2)} \quad (1)$$

$$= \frac{\frac{1}{2}\gamma_{sub}D^2}{\frac{1}{2}\gamma_w DH_{ave}} = \frac{D\gamma_{sub}}{H_{ave}\gamma_w}$$

여기서, H_{ave} 는 프리즘바닥에서 지표면까지의 평균 수두손실이다.

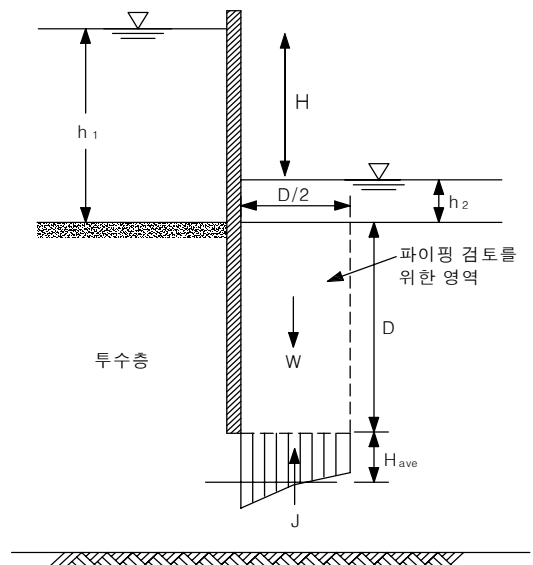


Fig. 1. 파이핑 검토영역

근입깊이 D가 고정된 상황에서 안전율은 Have 값에 의해 좌우된다고 할 수 있으며 이는 유선망을 그려서 결정하는 것이 합리적이나, 실제 설계나 시공시 근사값을 얻기 위한 목적이거나 유선망을 그리기가 힘든 상황에서는 $Have = H/2$ 를 적용하는 경우도 많다.

본 연구에서는 Have 값을 홍수위와 굴착저면간의 수위차(H)의 절반으로 보고 해석하는 Terzaghi 간편식 방법과 SEEP/W 프로그램을 통해 그려지는 유선망으로 구한 Have를 이용한 Terzaghi 유선망 방법을 적용하였다.

2.2 한계동수경사에 의한 방법

흙속에서 물이 상향 침투를 일으키면 유속이 증가할수록 유효응력이 감소하게 되고, 유속이 증가하여 유효응력 $\sigma' = 0$ 인 조건에 도달하면 흙의 안정상태가 파괴되어 파이핑이 발생하는데, 이 때의 동수경사를 한계동수경사라 한다. 유효응력이 0일 때의 동수경사를 한계동수경사 i_{cr} 로 하면 식 (2)와 같다.

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

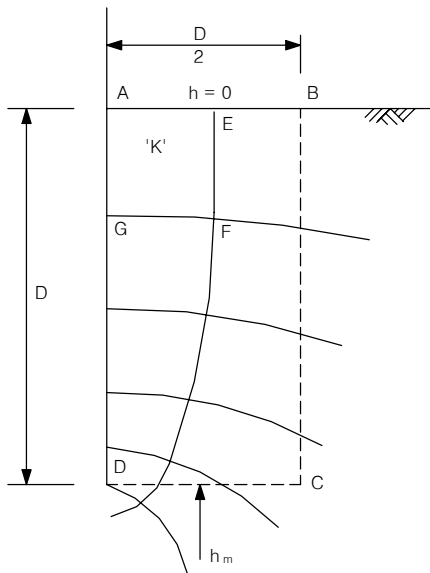


Fig. 2. 동수경사에 의한 방법 예시도

한계동수경사 방법에 의한 파이핑 검토는 다음 식에 의해서 안전율을 구할 수 있으며, 일반적인 사질지반에서 포화단위중량은 1.8~2.0 정도의 값을 가지므로 본 연구에서는 포화단위중량을 1.9, 수중단위중량을 0.9로 사용하였다. 한계동수경사 방법에 의한 안전율은 굴착저면에서의 유출동수경사 i_{exit} 값에 따라 다음과 같이 결정된다. 지반조건이 주어지면 한계동수경사는 일정 값을 가지며, 본 연구에서는 SEEP/W 프로그램을 이용한 유선망해석을 통하여 구해지는 값과 Harr가 제안한 방법을 적용하여 i_{exit} 값을 산정하고자 한다.

$$F_s = \frac{i_{cr}}{i_{exit}} \quad (3)$$

우선 침투류 해석을 통해 얻을 수 있는 그림 2와 같은 유선망도에서 GF면과 AE면 사이의 수두손실은 $\Delta h = \frac{H_1 - H_2}{N_d}$ 이다.

여기서 Harza 식을 이용한 유출동수경사는 식 (4)와 같고, Harr 식을 이용한 유출동수경사는 식 (5)로 구할 수 있다.

$$i_{exit} = \frac{\Delta h}{(AG)} \quad (4)$$

$$i_{exit} = \frac{1}{\pi} \frac{\text{전수두차}}{\text{널말폭의 관입깊이}} \quad (5)$$

2.3 한계유속에 의한 방법

한계유속에 의한 방법이란 흙 속을 통과하는 침투수의 유속이 토립자를 유동하게 하는 한계값을 벗어나 파이핑이 발생하는 현상을 수학적으로 해석하는 방법이다. 체체 및 기초의 흙 입자의 입경에 대하여 소류력에 의하여 입자가 밀려나가는 한계의 침투유속을 구하고, 실제 침투유속이 한계유속을 넘으면 파이핑이 발생된다고 본다. 이때, 침투수의 유속은 식 (6)과 같이 구할 수 있으며, 한계유속 산정에 있어서 투수계수와 관련된 Kovac식, 흙 입자의 입경과 관련된 Richardson

식 및 Justin식이 있다. 이중 Richardson식은 고려 인자가 너무 많아 실무에서는 Kovac식과 Justin식을 주로 이용하고 있으며 본 연구에서도 Kovac식과 Justin식을 이용하여 각각 식 (7)과 (8)에 나타내었다.

$$V = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_w}} \quad (6)$$

여기서, W는토립자의 수중중량(g), A는 물의 흐름을 받는 토립자의 면적(cm²), g는 중력가속도(cm/sec²)이다.

$$V_{cr} = (3 \pm 1)^3 \sqrt{K} \quad (7)$$

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{2}{3} (G_s - 1) dg} \quad (8)$$

여기서, V_{cr} 는 한계유속, G_s 는 토립자의 비중, d 는

Table 1 입경별 한계유속(하천설계기준, 2005)

토립자의 입경(mm)	침투수의 한계 유속(cm/sec)
4.0 ~ 4.8	20.0
2.8 ~ 3.4	17.0
1.0 ~ 1.2	10.0
0.7 ~ 0.85	8.5
0.4 ~ 0.7	7.0
0.25 ~ 0.5	4.2
0.11 ~ 0.25	3.5
0.075 ~ 0.11	2.5
0.044 ~ 0.075	2.0

토립자 입경(cm), K는 투수계수 (cm/sec)이다.

한국수자원학회의 하천설계기준(2005)과 건설교통부의 댐설계기준(2003)에는 입경별 한계유속기준에 의한 검토방법이 Table 1과 같이 입경별 한계유속으로 제시되었다.

하천설계기준에 의하면, 실제의 토립자에는 여러 크기의 것이 혼합되어 있어 입경의 기준을 정하기 어려우므로 침투류 해석에서 얻어지는 침투류의 실유속이 제시한 입경에 대한 한계유속의 1/100 이하가 되도록 해야 한다.

본 연구에서는 수위나 근입깊이 등 다른 조건을 고정 시키고 투수계수만 변화시켰을 때, SEEP/W 해석을 통하여 최대침투유속(V_m)를 구하고 하천설계 기준, Kovac식 및 Justin 식에서 제시하는 한계유속(V_{cr})과 비교하여 안전율을 산정해보고자 한다.

$$F_s = \frac{V_{cr}}{V_m} \quad (9)$$

3. 해석 조건 및 단면

본 연구에서는 각 해석방법에 따른 안전율 양상을 살펴보기 위해 실제 해석 단면으로 최근 파이핑에 의한 붕괴가 발생한 안양천 제방 단면을 선정하였다. 이를 위해 안양천 제방 옆 지하구조물 설치를 위해 설계에 반영했던 시추데이터를 직접 활용하여 2개의 단면

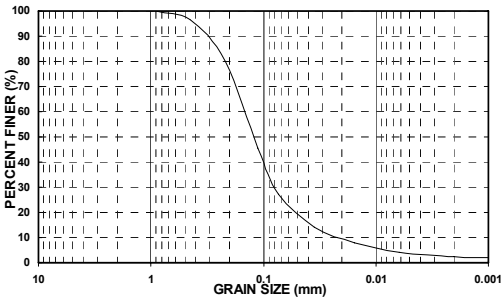
Table 2 안양천 해석단면의 지층조건 및 투수계수

단면-A	지층구분		분포심도(m)	두께(m)	N값	통일분류법	적용 투수계수 (cm/sec)
	매립층	모래	0.0~5.2	5.2	7/30~8/30	GM	2.2×10 ⁻²
퇴적층	모래	5.2~11.0	5.8	7/30~9/30	SM	8.7×10 ⁻²	
	실트	11.0~14.8	3.8	6/30~7/30	ML	8.4×10 ⁻⁵	
	모래	14.8~31.3	16.5	18/30~50/19	SM	8.7×10 ⁻³	
자갈		31.3~40.5	9.2	50/18~50/4	GP	2.2×10 ⁻²	
풍화암		50.5~46.0	5.5	50/5~50/2	-	1.0×10 ⁻⁵	
단면-B	지층구분		분포심도(m)	두께(m)	N값	통일분류법	적용 투수계수 (cm/sec)
	매립층	자갈	0.0~4.0	4.0	10/30	GM	2.2×10 ⁻²
	퇴적층	실트	4.0~7.0	3.0	10/30~11/30	ML	3.0×10 ⁻³
		모래	7.0~10.2	3.2	9/30~13/30	SM	3.0×10 ⁻³
		자갈	10.2~25.0	14.8	50/12~50/2	GP	2.2×10 ⁻²
	풍화토		25.0~31.0	6.0	42/30~50/12	SM	1.0×10 ⁻⁵
	풍화암		31.0~36.0	5.0	50/9~50/2	-	1.0×10 ⁻⁷

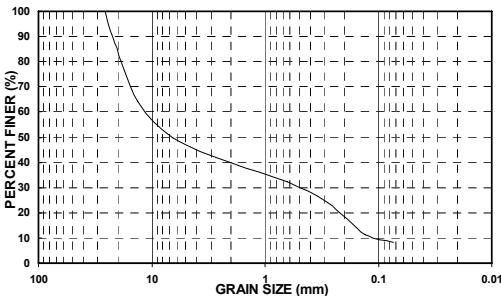
에 대해서 해석하였다. 각 해석단면의 지층조건 및 투수계수는 Table 2와 같다. 여기서, 적용된 투수계수는 현장실험 결과를 바탕으로 측정된 값이다.

본 연구에 이용된 한계유속 산정은 토립자 입경과 투수계수를 필요로 하며 이는 Sheet Pile이 근입되는 지반의 값이어야 한다. Fig. 3은 Sheet Pile이 근입되는 단면-A 퇴적층 하단 SM층의 입도분포곡선과, 단면-B 퇴적층 하단 GP층 각각에 대한 입경가적곡선이다. 단면-A은 Sheet pile 차수벽이 관입되는 SM층의 투수계수가 $8.7 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이며, 단면-B는 관입되는 GP층의 투수계수가 $2.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 이다.

해석 단면-A과 단면-B는 모두 퇴적층에 실트층이 존재한다. 실트층을 해석에 반영한 예비해석을 수행한 결과 등수두선이 ML층에 과도하게 몰렸고 이로 인해 파이핑 해석이 필요 없을 정도로 과도한 안전율을 보였다. 따라서 본 연구에서는 보다 실제 현장상황을 제대로 구현하고 또한 의미 있는 결과도출을 위하여 실트층을 모래층으로 가정하였다.

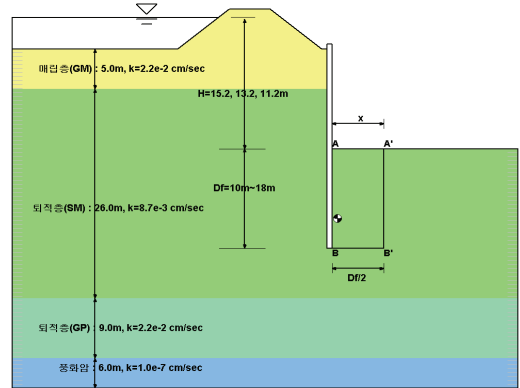


(a) 단면-A 퇴적층 하단 SM층의 입도분포곡선

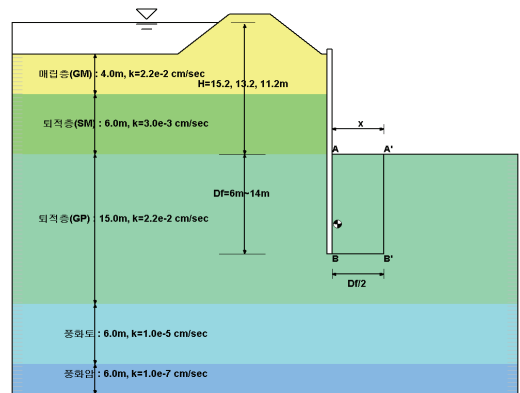


(b) 단면-B 퇴적층 하단 GP층의 입도분포곡선

Fig. 3 각 해석단면 Sheet Pile 근입 위치 토질의 입도분포곡선



(a) 단면-A



(b) 단면-B

Fig. 4 안양천 파이핑 안정성 검토단면

4. 파이핑 해석 결과

4.1 Terzaghi 및 한계동수경사 방법에 의한 안정성 검토 결과

본 연구에서 선정된 두 단면에 대하여 Terzaghi 간편식과 Terzaghi 유선망을 이용하는 방법, 그리고 Harza와 Harr의 동수경사 방법을 통하여 파이핑에 대한 안정성을 검토하였다. 이와 같은 해석을 위하여 유선망 도출이 필요하여 SEEP/W 프로그램을 이용한 유선망 해석을 하였다. 본 연구에서 기준으로 한 안전율은 구조물 기초설계기준(한국지반공학회, 2003)에

따라 Terzaghi 방법과 한계동수경사 방법에 대해서 안전율 2.0을 기준으로 하였다.

Fig. 5는 유선망 해석을 비롯하여 각 해석방법의 과정을 근입깊이 12m, 수위차 15.2m의 경우의 단면을 예시로 나타낸 것이다. Fig. 6은 단면-A, Fig. 7은 단면-B에 대하여 수위차에 따른 각 해석방법의 근입심도별 안전율 그래프를 도시하였다.

Fig. 6~7의 결과를 보면 단면-A, 2에서 근입심도에 따른 안전율 변화 추이가 거의 비슷하게 변화하는 것을 볼 수 있다. Terzaghi 방법으로 구한 안전율을 값이 가장 작고, Harza 방법에 의한 안전율 값이 가장

크게 산정되며, 나머지 Terzaghi의 유선망에 의한 방법과 Harr의 방법은 그 중간 값을 나타낸다. 이러한 안전율의 차이는 각 해석 방법에 따라 상당한 차이를 보이고 있다. 단면-B의 수위차 15.2m의 경우, Harza 방법은 대략 근입깊이 6.5m에서 기준안전율 2.0을 만족하지만 Terzaghi 간편법의 경우 본 연구의 최대 근입깊이인 14m에서도 기준안전율을 만족시키지 못하고 그래프 경향으로 볼 때, 대략 16m 정도에서 기준안전율을 만족시킬 것으로 판단된다. 이러한 경향은 단면-A과 2의 모든 조건의 해석에서 비슷한 양상을 보인다. 따라서 각 해석 방법에 따라 최대 100% 이상의 근입깊이 차이가 발생하여, 이러한 상태를 설계에 반영할 경우 각 안전율 및 근입깊이는 2 배 이상 해석 차이가 나타날 것이다.

여기서, Harza 방법의 안전율은 전적으로 Sheet Pile에 인접한 마지막 유선망요소의 길이에 달려 있는데, 유선망요소의 높이가 길게 산정될수록 안전율은 커지므로, SEEP/W 프로그램으로 산정한 유선망 결과에서 Sheet Pile에 인접한 마지막 유선망요소의 길이 값에 대한 신뢰성 검토가 필요하다. 또한, Terzaghi 유선망 방법은 Have값을 읽을 때 데이터로부터 등수두선의 개수 산정에 주의가 필요하다. 반면, Terzaghi 간편식이나 Harr식은 수위차와 근입깊이만 주어지면 유선망의 형상이나 다른 요인에 상관없이 안전율이 쉽게 결정된다.

Terzaghi 간편식은 두 단면의 결과와 같이 보통 안전율이 작게 산정되므로, 사질지반의 파이핑 안정성 검토시 안전측의 값을 제공한다고 볼 수 있다. 때문에 실제 설계나 시공시 정밀한 결과를 필요로 하는 상황이 아니거나, 유선망을 얻을 수 없는 상황이라면 쉽게 적용할 수 있는 반면, 본 연구 결과와 같이 다른 해석 방법에 비교하여 훨씬 작은 안전율을 보이므로 과다 설계의 문제점을 내포하고 있다.

위의 결과를 통해 파이핑 해석에 있어서 어느 한 방법만을 고려하는 것은 매우 합리적이지 못함을 보여주고 있으며, 따라서 파이핑에 대한 안정성 해석은 지반 조건과 시공현황을 면밀히 분석하여 이를 토대로 이루어져야 할 것이다.

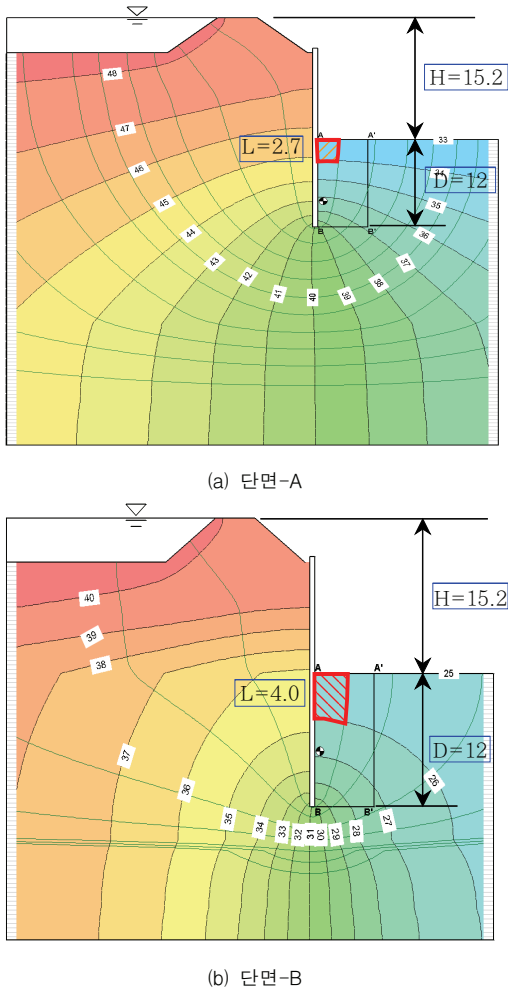
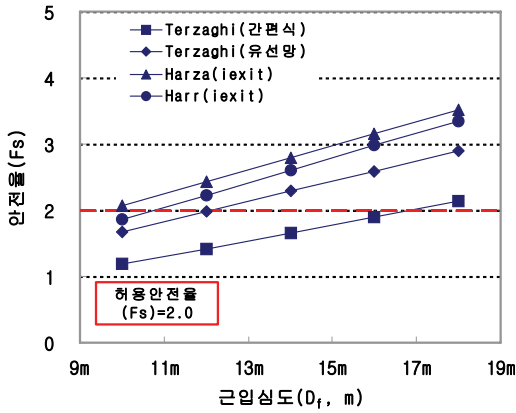
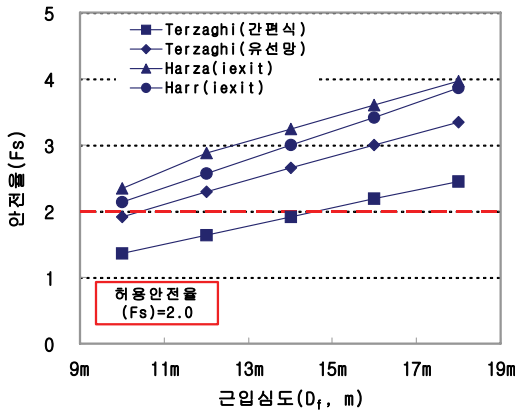


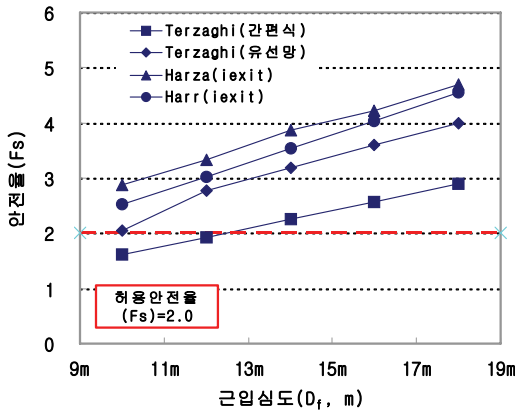
Fig. 5 수위차 15.2m, 근입깊이 12m일 때의 해석 과정



(a) 수위차 15.2m

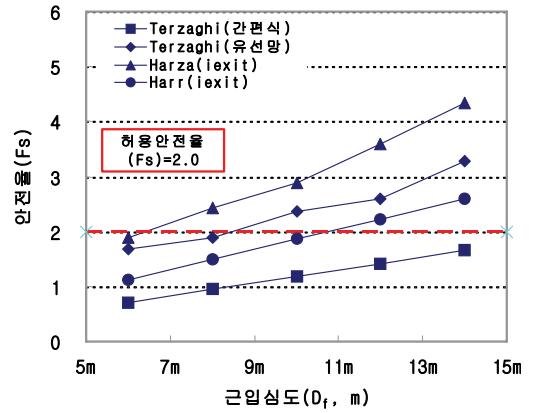


(b) 수위차 13.2m

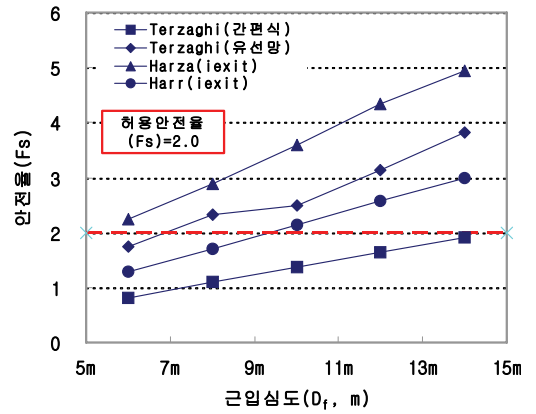


(c) 수위차 11.2m

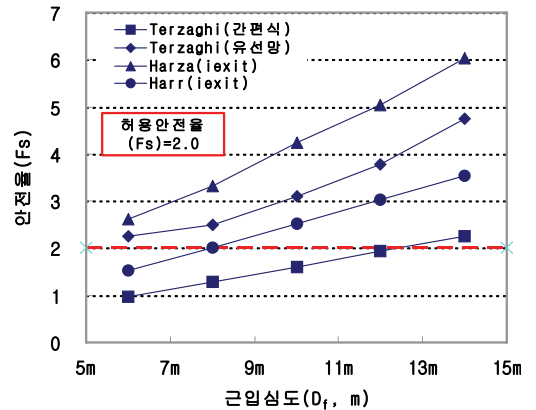
Fig. 6 단면-A의 수위차에 따른 근입심도-안전율 그래프



(a) 수위차 15.2m



(b) 수위차 13.2m



(c) 수위차 11.2m

Fig. 7 단면-B의 수위차에 따른 근입심도-안전율 그래프

4.2 한계유속에 의한 안정성 검토 결과 및 분석

한계유속 V_{cr} 값의 산정을 위한 입경에 따른 한계유속을 설정하고 최대침투유속과 비교한 결과 D40를 사용한 경우에서 파이핑이 발생하였다는 기존연구(김상규 등, 1992)를 바탕으로 하여 본 연구에서는 Justin 식에 토립자의 입경으로 D40의 값을 활용하였고, V_{max} 값은 SEEP/W 프로그램에서 얻어지는 값을 이용하였다. 입경에 따라 한계유속 값을 제시하고 있는 하천설계기준 및 Justin식을 Fig. 8에 비교해 본 후, 실제 지반에서 이 방법을 적용한 안전율을 구하여, 투수계수에 따른 한계유속 값을 제시한 Kovac식의 적용결과와 비교하였다. 실제 하천설계기준과 Justin식에 있어서 입경에 따른 한계유속값은 거의 비슷한 값의 양상을 보였다.

Kovac식에 의한 한계유속은 투수계수에 의해 정해지므로 단면-A에서 0.4113~0.8227cm/sec, 단면-B에서 0.560~1.121cm/sec의 범위를, 입경을 기준으로 한 Justin식은 단면-A에서 3.39cm/sec, 단면-B에서 14.8cm/sec의 값을 수위차에 관계없이 고정값을 갖고, Fig. 9의 수위차에 따른 최대침투유속의 결과를 나누어 Table 3~4와 같이 그 안전율을 산정할 수 있다.

한계유속에 의한 파이핑 해석 결과, Justin식 적용결과에서 Kovac식 적용결과에 비해 안전율이 단면-A에서 4배~8배, 단면-B에서 15배~30배 정도 크게 나타남으로써, 한계유속값을 투수계수 혹은 입경 등

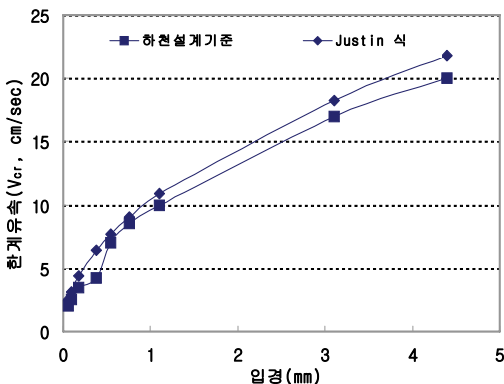


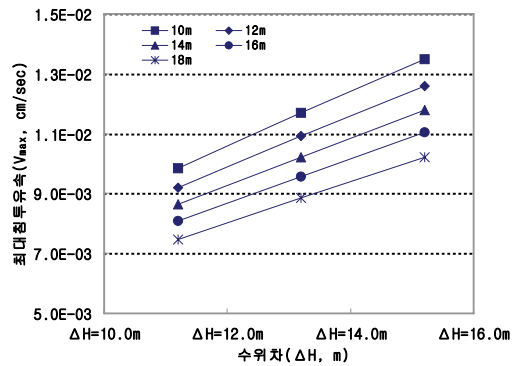
Fig. 8 입경에 따른 한계유속 관계도

어느 방법으로 산정하느냐에 따라 동일 조건에서 구한 파이핑 안전율이 수십 배까지 차이가 나타날 수 있음이 판명되었다.

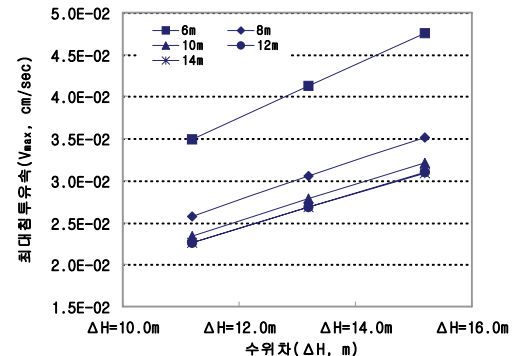
그리고 하천 설계기준에 의하면, 한계유속의 1/100까지만 허용한다는 사항을 고려해 볼 때, 단면-A와 B

Table 3 실제지반 단면-A의 수위차 15.2m에 대한 근입심도별 파이핑 안전율

구분	10m	12m	14m	16m	18m	
V_{cr} (cm/sec)	Kovac	0.4113~0.8227				
	Justin	3.39				
V_{max} (cm/sec)	0.0135	0.0126	0.0118	0.0111	0.0102	
F_s	Kovac	30.5 ~61.0	32.7 ~65.4	34.9 ~69.8	37.3 ~74.5	40.3 ~80.7
	Justin	251.13	269.45	287.53	306.98	332.32



(a) 단면-A



(b) 단면-B

Fig. 9 수위차에 따른 근입심도와 최대침투유속 그래프

모두에서 Kovac식에 의한 안전율을 기준 안전율 1.0에 미치지 못하며, 또한 Justin식은 모두 기준 안전율을 상회하고 있다. 이러한 큰 차이는 각 해석법의 수치적 적용으로부터 작용하는 바도 크다.

실제 지반은 여러 크기의 흙입자로 구성되며, 어떤 지반을 대표하는 입경을 어떻게 정하느냐 하는 것은 논의의 대상이지만, 본 연구에서는 D40 값을 그 지반의 대표입경으로 하였다. 하천설계기준이나 Justin식 적용시 지반의 대표입경을 산정하는 기준은 제시되어 있지 않다. 단일 입경의 입자로만 이루어진 지반이라면 문제가 되지 않지만 단면-B와 같이 어떤 지반을 구성하는 입경의 범위가 크거나 두 가지 정도의 입경이 혼합되어 있는 지반은 대표입경 선정이 안전율에 매우 큰 영향을 주게 된다. 실제로 그림 단면-B에서 D50은 6.5mm로써 D40=2mm와 큰 차이를 보이므로 Justin식 적용에 있어서 또 다른 주의가 요구된다.

Kovac식 적용시 투수계수도 현장투수시험을 하느냐, 입경자료를 이용하여 간접적으로 산정하느냐 등 투수계수 산정방법에 따라서 한계유속 값이 달라지며 실제 지반에서 최대침투유속도 실험을 통해서 구하느냐 SEEP/W등 해석기법을 이용하느냐에 따라 그 값이 크게 달라질 것이다.

이와 같이, 실제지반에 한계유속 방법을 단순 적용하는 것은 매우 위험한 발상이 될 수 있으며, 한계유속방법으로 파이핑 안전율을 산정하고자 한다면 보다 세부적인 적용기준을 먼저 정립하고 그 기준에 부합되는 경우에만 적용해야 신뢰할 수 있는 결과를 기대할 수 있을 것이다.

Table 4 실제지반 단면-B의 수위차 15.2m에 대한 근입심도별 파이핑 안전율

구 분	6m	8m	10m	12m	14m	
V_{cr} (cm/sec)	Kovac	0.560~1.121				
	Justin	14.8				
V_{max} (cm/sec)	0.0476	0.0352	0.0321	0.0310	0.0309	
F_s	Kovac	11.8 ~23.6	15.9 ~31.9	17.5 ~34.9	18.1 ~36.1	18.2 ~36.3
	Justin	311.2	420.9	461.4	477	479.4

5. 결 론

본 연구는 제방에 인접하여 차수벽 및 가시설 시공·설계시 다양한 파이핑 해석방법들을 정확히 이해하고 합리적으로 적용하는 방법에 대한 고찰을 하고자 하였다. 안양천 제방에서 두 단면을 선정하고 수위차, 차수벽 근입깊이를 주요인자로 설정하고 각 해석방법에 따른 안정성 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 파이핑 안정성 해석에 주로 반영되는 Terzaghi 간편식, Terzaghi 유선망 해석, Harr식, Harza식 등 네 가지 방법은 배면 수위차 및 근입심도에 따라 해석한 결과 각 방법간에 안전율과 근입깊이 산정에 있어서 최대 2배 이상의 차이를 보였으며, Terzaghi의 간편법에 의한 안전율 결과가 가장 작고 Harza 방법이 가장 크게 나타났다.
- 2) Terzaghi 유선망이나 Harza식 적용시에는 유선망의 신뢰도가 매우 중요하며, Terzaghi 간편식과 Harr식은 유선망과 관계없이 수위차와 근입깊이만으로 안전율 산정이 가능했다. 실제 설계·시공에 자주 활용되는 Terzaghi 간편법은 개략적인 판단이므로 유선망 해석이 불가능한 경우에 유용한 방법이나 그 결과가 상당히 안전측이므로 과다설계에 대한 우려를 안고 있다.
- 3) 지반의 입경이나 투수계수 등 토질조건에 따른 파이핑 안전율은 한계유속 방법으로 검토하는 것이 합리적이며, 이는 제체의 내부침식에 의한 파이핑 해석에 좋은 방법이다. 그러나, 한계유속과 최대침투유속은 산정 방법에 따라 큰 편차가 나고, 토질조건에 따라 구해지는 안전율 범위도 매우 큰 차이를 보이므로 투수계수나 입경에 따른 기준안전율 값도 달리 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.
- 4) 한계유속 방법으로 구해지는 안전율은 해석결과에 영향을 미칠 수 있는 인자가 너무 많고 각 인자의 영향 정도에 대한 판단도 매우 복잡하여, 다양한 지반조건에 단순 적용할 경우 그 결과를 신뢰할 수 없으며, 명확한 적용 기준 정립을 위한 추가적인 연구가 요구된다.

결론적으로, 기존의 파이핑 해석방법을 현장 조건이나 검토목적에 상관없이 모든 경우에 일률적으로 적용하기 보다는 각 해석방법이 가지는 특징과 문제점을 충분히 이해하고 해석을 시행한 후, Terzaghi 및 한계동수경사 방법은 연직 유효응력이 0인 조건을 고려하여 얻어진 것이므로 상방향 흐름이 지배적인 경우에, 한계유속법은 유출부가 수평흐름이 지배적인 경우로 이를 고려하여 해석방법을 결정해야 할 것이다. 이와 더불어 현장에서는 시공시 흐름에 대한 계측관리를 시행하여 설계방법에 대한 보완이 필요할 것이며, 파이핑에 대한 파괴유형이나 검토 조건별로 보다 더 세부적인 적용 기준 마련을 위한 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부, “댐설계기준”, 2003.
2. 김상규, 신승목, 서홍석, 한성길, “침투유속에 의한 제

방의 파이핑 해석: 사례연구”, 대한토목학회 학술발표회, 1992.

3. 박중영, “모래지반의 Quicksand현상에 관한 모형 연구”, 전남대학교, 2002.
4. 서울특별시, “서울시 시설물 설계·시공 및 유지관리 편람”, 2001.
5. 한국수자원학회, “하천설계기준”, 2005.
6. 한국지반공학회, “구조물 기초설계기준”, 구미서관, 2003.
7. Harr, M. E., “Ground water and Seepage”, McGraw-Hill, 1992.
8. Harza, L. F., “Uplift and Seepage under Dams in Sand”, Trans. Am. Soc. Civil Engineering, Vol. 100, 1935.
9. Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, 1943, pp. 189-194.

(접수일자 : 2008년 6월 27일)

(심사완료일자 : 2008년 8월 4일)