

Ⅱ. 하천교각의 세굴심 추정과 교각의 기초설계 -HEC 18을 중심으로-

1. 서 론
2. 세굴개론
3. 하천교각의 기초설계
4. 교각의 세굴심 추정
5. 기존교각에 대한 세굴 취약성 평가
6. 세굴방지 대책
7. 세굴심 계측장치

참 고 문 헌

부 록

한양대학교 공과대학 토목공학과
이정규 교수, 이종인, 강창구

1. 서 론

하천을 통과하는 교량의 안전문제는 교량의 상부구조를 통과하는 차량의 중량과 하부구조의 안정성에 중요한 영향을 미치는 교각 세굴심의 크기와 밀접한 관계가 있다. 교량의 하부구조와 관련지어 보면 교량붕괴를 일으키는 가장 일반적인 원인은 교량기초에 세굴을 일으키는 홍수이다. 미국에서 홍수 때문에 발생한 교량피해사례를 보면 Table 1과 같다.

Table 1. 미국의 홍수에 의한 교량피해사례

발생시기	지 역	교량피해 수량	피해정도
1973	미 전역	38개	파괴
1985	펜실베니아 버지니아 웨스트 버지니아	73개	파괴
1987	뉴욕 뉴잉글랜드	17개	피해 또는 파괴

국내의 교량피해 현황을 보면 Table 2와 같다.

Table 2. 교량피해 현황

년 도	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	평 균
피해교량	147	47	4	177	53	37	255	51	112	89	162	89	90	28	140	98.3

< 자료 : 한국수자원학회지, Vol.28, No.26, 1995 >

이들 교량의 피해형태를 보면 세굴에 의한 교각붕괴가 대부분으로 85% 이상을 차지하며 기타 교대 및 접속도로의 유실은 15% 미만이다. 이는 교량설계시 세굴에 대한 안정성 검토가 얼마나 소홀히 다루어 졌나를 보여주는 예라고 볼 수 있다.

우리나라에서도 홍수시에 세굴로 인한 교량피해가 크게 일어나고 있다. 1995년 8월 25일에 발생한 충북선 청안천 철교가 붕괴되어 열차탈선사고가 일어난 것은 홍수시에 교각세굴이 심하게 일어나서 교각이 견디지 못하여 교량이 무너진 대표적인 예이다.

미국에서 실시한 연구결과를 보면 교량이 붕괴되는 가장 공통적인 원인은 홍수가 일어났을 때 교량기초에 발생하는 세굴작용임이 밝혀졌으며, 파괴발생원인을 부위별로 나누어 보면 교각세굴과 교대세굴이 거의 비슷한 비율을 차지하고 있다는 분석결과가 나왔다.

교각세굴이 심하게 일어난 몇가지 사례를 보면, 시공중 공사를 중단한 서강대교의 기초상태를 조사한 바 최대세굴심이 9 m나 발생하였고, 92년 7월에 신행주대교가 무너진 후 실측결과에 의하면 교각밑에 상당한 세굴이 일어났으며, 행주대교 사고원인조사 최종보고서에 의하면 최대세굴심도는 11m로 나타났으며, 외국의 예로 이집트 나일강의 Tahrir교에서 관측한 결과는 최대세굴심이

11m로 나타났다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 교각은 세굴이 심하게 발생하여 교량의 안전에 커다란 영향을 줄 가능성이 큰데도 불구하고 교량을 설계할 때나 교량의 안전성 검토를 할 때 세굴문제를 심각하게 다루고 있지 않은 것은 일반적으로 세굴현상에 대한 정확한 이해의 부족과 세굴을 고려한 교각하부구조에 대한 설계기준이 명확하지 않기 때문이라고 생각된다.

현재 하천시설이나 교량설계에 적용하고 있는 설계기준과 시방서에서 세굴과 관련된 규정을 살펴보면 다음과 같다.

도로교 표준시방서

- 세굴의 영향이 있는 경우, 유수압을 산출할 때 사용하는 수심은 평상시에는 하부구조에 세굴의 영향이 없을 때의 수심에 평상시 하부구조의 영향에 의해 발생되는 세굴의 깊이와 교량의 이용기간중에 예상되는 전반적인 하상저하량을 더한 깊이로 한다. 홍수시에는 평상시의 설계수심에 홍수시 수위의 증가와 홍수시 세굴깊이를 더한 깊이로 한다.
- 하부구조의 평상시에서 설계상의 지반면은 다음 사항을 고려해서 정해져야 한다.
 - (1) 세굴 및 지반면의 저하

미국 도로교 표준 시방서

- 교량의 예비설계시에 교량지점의 수리학적 연구조사는 필수적이며, 교량의 교각과 교대설치 시 세굴심의 추정을 포함하여야 한다.
- 하부구조의 설계편에 의하면 세굴심이 먼저 결정되어야 하며, 이러한 조건하에서 교량의 봉괴를 최소화 하도록 설계가 이루어 져야 한다.

일본 교량설계 · 시공 핸드북

- 하천과의 관계에 관한 규정에서 교량위치, 지간분할, 교각위치 및 교각형상 등은 하천관리자와 충분히 협의하여 구한다.
- 교량의 하부구조를 변경할 때 하천구역내에 설치하는 교대와 교각은 설계홍수위 이하의 흐름을 방해하지 않고, 부근의 하안 및 하천관리시설의 구조에 현저히 지장을 주지 않고, 아울러 교대 또는 교각에 접속하는 하상과 홍수터의 세굴방지를 위하여 적절히 배려한 구조로 한다.

지금까지 국내외의 도로교 시방서나 교량설계 핸드북에서 교대와 교각의 세굴과 관련된 규정이나 항목을 보면, 단순히 교대와 교각을 설계할 때 구조물의 설치위치나 형상은 홍수시에 유수에 미치는 지장을 최소화 하도록 하고, 세굴로 인한 하상저하의 영향을 고려하고 세굴방지에도 세심한 주의를 기울여야 된다는 정도로 규정되어 있는 것이 대부분이다.

따라서 구체적으로 교량의 교각을 설계할 때 일반적으로 세굴발생과정에 대한 정확한 이해의 부족과 세굴에 대한 설계기준이 명확하지 않아서 세굴문제를 상세하게 다루지 않고 형식적으로 처리하는 경향이 많았다. 또한 교량기초의 설계지반면에 대한 뚜렷한 설계기준이 없기 때문에 기

초의 설계지반이 하천수리학적면보다는 교각의 구조안전과 유지관리 측면에 따라 결정되는 경우가 많았다.

교각세굴의 특성은 세굴이 단기간에 일어나는 것이 아니고 장기간에 걸쳐서 지속적으로 일어날 뿐 아니라 홍수가 발생하여 수위가 상승할 때는 최대세굴심이 일어 났다가 수위가 하강할 때는 다시 퇴적작용이 일어나 세굴된 부분이 되메워지기 때문에 실제 발생한 최대세굴심을 관측하기가 어렵다. 또한 하상세굴은 교각과 같은 하천공작물로 인한 국부적 세굴외에도 장기적인 하상변동경향에 의한 하상저하가 일어날 수 있으며, 하상상태는 시간이 지남에 따라 계속적으로 변하고 있으므로 주기적인 세굴조사가 반드시 필요하다.

교각의 세굴은 교량의 안전에 중대한 영향을 줄 수 있음에도 불구하고 하천시설기준이나 하천공사표준시방서에 세굴을 고려한 교각기초에 관한 뚜렷한 기준이 없는 상태이다.

앞으로 교각세굴은 교량의 안전과 밀접한 관계가 있으므로 교량설계시 세굴에 관련된 상세한 설계기준이 마련되어야 할 것이며, 교량의 안전점검시에도 반드시 하천기술자가 참여하여 세굴현상과 관련지어 교량의 안전성이 검토되어야 할 것이다.

2. 세굴개론

2.1 서 론

세굴(scour)은 흐르는 물이 하천의 하상과 하안으로부터 물질(구성재료)을 파내어 멀리 운반하는 것과 같은 침식작용의 결과이며, 세굴은 하상물질에 따라 다르게 발생한다.

토립자가 느슨하면 침식이 빨리 일어나고 점착토나 시멘트처리된 흙은 세굴에 대한 저항성이 크다. 그렇지만 점착토나 시멘트처리된 흙에서도 궁극적으로는 모래하상인 하천과 같이 세굴이 깊게 일어날 수 있다. 하천의 흐름조건이 일정하다고 한다면 최대세굴이 일어나는데 걸리는 기간은 물질에 따라 다르게 나타난다. 다시 말하면 최대세굴심이 일어나는 기간은 하상이 모래와 자갈일 때는 수 시간이, 점착토일 때는 수 일이, 빙적점토와 사암일 때는 수 개월이, 석회암일 때는 수 년이, 조밀한 화강암일 때는 수 세기가 걸릴 것이다.

수축세굴(contraction scour)과 국부세굴을 추정하는 모든 공식은 실험실의 실험결과에 기초를 두고 있으며, 현장실측자료에 따른 검증은 거의 이루어지지 않고 있다. 여기서 추천하는 공식은 세굴심을 추정하는데 가장 적용성이 크다고 생각된다.

도로횡단지점이나 하도잠식에서 세굴상의 요점은 세굴현상이 정지상세굴(clear-water scour)이냐, 이동상세굴(live-bed scour)이냐 하는 것이다. 정지상세굴은 횡단지점이나 잠식지점의 상류에서 하상물질의 이송이 없는 곳에서 일어나고, 이동상세굴은 하상물질이 상류구간에서 횡단지점이나 잠식지점으로 이송되는 곳에서 일어난다.

2.2 총세굴

도로횡단지점의 총세굴은 다음과 같은 세가지 성분으로 나누어 진다.

- (1) 장기적인 하상상승(aggradation)과 하상저하(degradation)
- (2) 수축세굴(contraction scour)

(3) 국부세굴(local scour)

아울러 도로횡단구간의 교각과 교대의 총세굴을 평가할 때는 하천의 횡방향이동(lateral migration)도 고려하지 않으면 안된다.

2.2.1 하상상승과 저하

하상상승과 저하현상은 교량이 설치되는 하천구간에 영향을 줄 수 있는 자연적이거나 또는 인위적인 원인으로 인한 장기적인 하상표고의 변화를 말한다. 하상상승은 교량 상류에 위치한 하도나 유역에서 침식된 물질의 퇴적과 관련이 있는 반면에, 하상저하는 상류로부터의 유사공급이 부족하기 때문에 일어나는 하상의 저하나 세굴과 관련된다.

2.2.2 수축세굴

수축세굴은 하류에서 수면표고 조절에 변화가 생기거나 유수단면적이 축소되거나 할 때 일어날 수 있다. 자연하도에서 수축세굴은 거의 하폭전체에 걸쳐서 하상과 하안으로부터 물질이 이탈하는 것이다. 세굴이 일어나는 것은 유속이 증가되고 하저에 작용하는 전단응력이 커지기 때문이다. 홍수터와 때로는 주하도까지 연장되는 교량접속제방으로 인하여 수류가 수축되는 것이 수축세굴이 일어나는 가장 공통되는 원인이다. 수축세굴은 정지상세굴이나 이동상세굴상태를 가진다.

2.2.3 국부세굴

국부세굴은 교각, 교대, 수제 또는 제방주변으로부터 물질을 이탈시키는 현상이다. 국부세굴이 일어나는 원인은 흐름장애물에 의해서 유발된 수류의 가속도와 이로 인한 와(vortex) 때문이며 이것은 일반적으로 주기성을 가진다. 국부세굴 또한 정지상세굴이나 이동상세굴상태가 가능하다.

2.2.4 하천의 횡방향이동

위에서 언급한 세굴형태 외에도 홍수터(flood plain)내에서 자연적으로 일어나는 하천의 주하도의 횡방향 이동현상은 교각세굴을 증가시키거나 교대나 접근도로에 침식을 일으킬 수 있으며, 교각에 접근하는 흐름각(유입각)이 변화함으로 인해서 총세굴에 변화가 생길 수 있다. 하천의 횡방향 운동에 영향을 주는 요소는 교량의 안정성에도 영향을 미칠 수 있다. 이러한 요소로는 하천의 지형, 하천상의 횡단위치, 홍수특성, 하상과 하안재료의 특성 등이 있다.

2.3 하상상승과 하상저하 - 장기적인 하상표고 변화

장기적인 하상고 변화는 하천의 자연적인 경향이거나 하천이나 유역에 어떤 변화를 준 결과일 수 있다. 하상은 상승하고 있거나, 하강하고 있거나, 아니면 교량지점 부근에서 상대적으로 평형상태를 유지할 수 있다. 장기적 하상상승과 저하에는 강우유출기간에 일어 날 수 있는 국지적인 하상의 절토와 성토는 포함되지 않는다(수축세굴과 국부세굴). 하천은 유출사상이 발생하는 동안에 특정지점에서 깍이고 되메워지며 장기적으로 보면 일정한 하천구간에 걸쳐서 하상고가 높아지거나 낮아지는 경향을 보인다.

기술자(engineer)들에게 주어진 문제는 구조물의 수명기간에 일어날 장기적인 하상변동고를

추정하는 것이다. 장기적인 경향은 교량수명 기간내에 변할지도 모른다. 이런 장기적 변화는 하천이나 유역에 변화를 준 결과이다. 그런 변화는 자연적인 과정이거나 인간활동 등으로 인하여 발생된 것이다. 기술자는 하천과 유역의 현상태를 평가한 다음에 수계(水系)내에서 장래에 예상되는 변화를 평가하여야 한다. 이러한 평가결과를 근거로 장기적 하상변화량이 추정되어야 한다.

다음은 장기적 하상변동에 영향을 주는 요소들이다:

댐과 저수지(교량의 상·하류), 유역의 토지이용변화(도시화, 벌목 등), 수로정비, 사행구간의 첨수로(자연적이거나 인위적), 하류수로 기준수위의 변동(조절량), 하상에서의 골재채취, 하천 내·외로의 유량전환, 전체시스템의 자연적 저하, 굴곡부의 이동, 하천 평면형상에 관한 교량위치, 횡단에 관련된 하천이동 등

공인된 장기적 하상변동량은 해당기관을 통하여 구하여야 한다. 만약에 공인자료가 없거나 그런 값을 얻기 위하여 추가적인 평가작업이 요구된다면, 장기적 하상고변화량은 하천역학의 원리를 이용하여 구하여야 한다. 그러한 계산에는 교량횡단에 미치는 모든 영향을 고려할 필요가 있다: 즉,

하천으로 유입되는 유역유출량(수문학), 하도록 들어오는 토사이송량(유역침식), 하천의 유사이송용량(수리학) 및 위의 요인에 대한 하천의 반응(지형학과 하천역학) 등

이와 같은 평가를 하기 위해서는 다음과 같은 3단계 하천시스템접근법(three-level fluvial system approach)이 이용될 수 있다.

- (1) 일반적인 지형역학과 하천역학 관계를 이용한 정성적 결정
- (2) 여러 가지의 장래조건에 대하여 하천수계의 거동 가능성을 추정하기 위해 확립된 정성적이고 정량적인 관계식을 이용한 공학적인 지형해석
- (3) 하천과 유역내의 변화로 인한 하상고의 정량적 변동량을 예측하기 위하여 물리적모형이나 BRI-STARS와 미국 공병단이 개발한 HEC-6와 같은 수학적모형을 이용하는 물리적과정의 컴퓨터모형화

2.4 수축세굴

2.4.1 서 론

수축세굴은 홍수때 자연적인 단면축소나 교량 때문에 하천의 유수단면적이 감소 될 때 일어난다. 연속성에서 볼 때 유수단면적이 감소되면 평균유속이 증가되고 단면수축 때문에 하상전단응력이 커진다. 이에 따라 수축단면 구간에서 침식력(erosive force)이 커지고 수축구간으로 이송되는 양보다 더 많은 하상물질이 수축구간으로부터 이탈된다. 이와 같이 수축구간에서 하상물질의 이송이 증가되기 때문에 자연상태의 하상고가 낮아진다. 하상고가 낮아지면 유수단면적이 증가되고 하천상황은 상대적 평형에 도달 할 때, 즉 수축구간으로 유입되는 하상물질의 양이 수축구간으로부터 유출되는 양과 같을 때까지 유속과 전단응력을 감소한다. 수축세굴은 또 배수조절을 통한 하류수면 표고의 단기적 변동(일별, 주별 혹은 월별)에 따라 교량개구부의 유속이 변하기 때문에 수축세굴이 일어날 수도 있다. 이와 같은 세굴은 가역적이기 때문에 이런 세굴은 장기적 하상변동 보다 오히려 수축세굴에 포함된다. 수축세굴은 전형적으로 주기성이 있다. 다시 말하면 하상은 유

출사상의 상승기에는 세굴이 일어나고 감수기에는 다시 메워진다.

교량으로 인한 수류수축은 하도단면적의 자연적인 감소나 교대가 하도로 돌출되거나 교각이 유수단면적의 일부를 차단함으로써 발생된다. 단면수축은 또한 홍수터의 일부를 차지하는 교량접속 제방에 의해서도 생길 수 있다. 수축세굴을 일으킬 수 있는 다른 요소로는 (1) 자연적인 하천 단면 감소, (2) 홍수터위의 긴 교량 접속도로, (3) 결빙이나 얼음 결집, (4) 토사퇴적으로 인하여 하안을 따라 형성되는 자연적인 소단(natural berm), (5) 교량개구부의 상하류에 형성되는 섬이나 사주, (6) 유목(debris), (7) 하도나 홍수터의 초목 성장 등이 있다.

수축세굴이 일어나는 세굴형태는 비수축구간의 유사이송 형태에 따라 정지상 세굴과 이동상 세굴로 구분할 수 있다. 이동상 세굴은 상류로부터 수축구간으로 이송되는 하상유사가 생긴다. 이 때는 세굴공으로부터 유출되는 하상 유사량이 상류로부터 세굴공으로 유입되는 유사량과 같을 때 이 세굴공은 평형상태가 된다. 정지상 세굴은 비수축구간의 하상유사 이송량이 무시될 수 있을 정도로 적을 때 생긴다. 이 때는 평균바닥전단응력이 하상물질의 임계운동(incipient motion)에 필요한 응력보다 작을 때 세굴공은 평형상태에 이른다. 수축세굴 계산식은 유사이송량의 보존원리에 기초를 두고 있다. 이동상 세굴일 때 교량구간에서 완전히 발달한 세굴은 유입토사량과 유출토사량이 같을 때 평형상태가 되고, 최대세굴은 전단응력이 유입토사량과 유출토사량이 같게되는 점까지 감소되어 토사량의 연속조건이 평형일 때 발생한다. 정지상 세굴에 대해서는 수축단면으로의 유입토사이송량은 원칙적으로 없고, 최대세굴은 전단응력이 하상물질의 한계전단응력까지 감소될 때 발생한다.

2.4.2 이동상 수축세굴식

Laursen은 단순화된 이송함수와 가정에 기초를 두고 다음과 같은 이동상 수축세굴식을 유도하였다.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{k_2} \quad (1)$$

$$y_s = y_2 - y_1 = (\text{평균세굴심, ft})$$

여기서,

y_1 : 상류 주하도의 평균수심, ft

y_2 : 수축단면의 평균수심, ft

W_1 : 상류 주하도의 바닥폭, ft

W_2 : 수축구간내 주하도의 바닥폭, ft

Q_1 : 상류 하도의 유량, cfs

Q_2 : 수축하도의 유량, cfs, 이 유량은 총홍수량이 보조안전교량(relief bridge)이나 접근도로를 월류하는 유량에 의하여 줄어 들지 않으면 총유량과 같다.

n_1 : 상류 주하도의 Manning 조도계수 n

n_2 : 수축구간의 Manning 조도계수 n

k_1 과 k_2 : 하상물질 이송의 유형에 따라 결정되는 다음 표와 같은 지수

V_*/w	k_1	k_2	하상물질 이송유형
< 0.5	0.59	0.066	대부분이 소류사
0.5~2.0	0.64	0.210	약간의 부유사가 있음
> 2.0	0.69	0.370	대부분이 부유사

여기서,

V_* : 상류하도의 전단속도, $(gy_1S_1)^{1/2}$, ft/s

w : D_{50} 인 하상물질 입자의 침강속도(Figure 3 참조)

g : 중력가속도 ($=32.2 \text{ ft/s}^2$)

S_1 : 주하도의 에너지경사, ft/ft

D_{50} : 하상물질의 중앙입경, ft

2.4.3 정지상 수축세굴식

Laursen의 정지상 수축세굴식은 이송함수식을 내포하고 있지 않으므로 훨씬 더 단순하다. 이것은 단순히 수축단면의 전단응력이 한계전단응력과 같아야 한다는 것이다.

$$\tau_2 = \tau_c \quad (2)$$

여기서,

τ_2 : 수축단면의 평균 하상전단응력

τ_c : 임계운동상태의 평균 하상전단응력

비점착성 하상물질이 완전발달상태일때의 정지상 세굴에 대하여 Lauren은 식(3)과 같은 한계전단응력을 사용하였다.

$$\tau_c = 4D_{50} \quad (3)$$

하상전단응력은 다음식으로 표시된다.

$$\tau_2 = \gamma y_2 S_f = \frac{\gamma V_2^2 n^2}{(1.49)^2 y_2^{1/3}} \quad (4)$$

여기서,

γ : 물의 단위중량 ($=62.4 \text{ lb/ft}^3$)

y_2 : 수축단면의 평균수심, ft

S_f : 에너지경사, ft/ft

V_2 : 수축단면의 평균유속, ft/s

Manning조도계수 n 을 구하기 위하여 Strickler의 근사식을 사용하면

$$n = 0.034 D_{50}^{1/6} \quad (5)$$

식(2)를 다시 정리하면

$$\tau_2 / \tau_c = 1.0 \quad (6)$$

식(3)과 (4)를 식(6)에 대입하고 y_2 에 대해서 풀면, Lauren의 정지상 수축세굴식이 유도된다.

$$y_2 = \left[\frac{V_2^2}{120 D_{50}^{2/3}} \right]^{3/7} \quad (7)$$

y_2 를 유량항으로 나타내면(연속방정식을 이용) 다음식을 얻는다:

$$y_2 = \left[\frac{Q_2^2}{120 D_{50}^{2/3} W_2^2} \right]^{3/7} \quad (8)$$

식(7)과 (8)에서 유속과 수심은 D_{50} 인 입자의 이동이 시작되는 것(initiation of motion)과 연계되어 있다. 식(7)을 다시 정리하면 다음과 같은 한계유속 V_c 를 얻는다:

$$V_c = 10.95 y^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (9)$$

접근수로와 수축구간에 대하여 수류 연속방정식의 적용이 가능하다면 식(8)을 다음과 같이 무차원화 시킬 수 있다. 즉, 다음과 같이 식(10)이 성립된다면,

$$Q_2 = Q = V_1 W_1 y_1 \quad (10)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{6/7} \left[\frac{V_1^2}{120 y_1^{1/3} D_{50}^{2/3}} \right]^{3/7} \quad (11)$$

식(11)에서 대괄호로 된 항은 1.0을 초과해서는 안된다. 만일에 이 항이 1.0 보다 크면 이동상 세굴 상태로 된다.

Laursen의 정지상 세굴식은 다소간 극한적 가정에 근거를 두고 있다. 예를 들면 이 식은 하상물질이 균일하다고 가정하고 있다. 그렇지만 층상으로된 하상물질(stratified materials)이 정지상 세굴을 일으킬 때 가장 가는 입자층의 D_{50} 을 가정한다면 가장 안전한 측인 수축세굴심을 얻게 될 것이다. 이에 대한 대안으로는 하상물질이 층상으로 되어 있는 경우에 정지상 세굴식은 층상에 따라 순차적으로 적용될 수 있을 것이다.

2.5 국부세굴(local scour)

교각이나 교대에 국부세굴을 일으키는 기본적 기구(mechanism)는 이들의 바닥부근에서 형성되는 말굽형와(horseshoe vortex)가 형성되는 것이다(Figure 1 참조). 말굽형와는 장애물의 상류면에 물의 정체현상(pileup of water)이 생긴 결과 교각이나 제방의 전면부근에 발생하는 하강류의 가속도에 의하여 형성된다. 말굽형와의 작용은 장애물의 바닥주변에 있는 하상물질을 이동시킨다. 기저지역으로부터 이탈하는 토사이송률은 기저지역으로 유입되는 이송률보다 더 크기 때문에 세굴공(scour hole)이 발달한다. 세굴심이 점차 커짐에 따라 말굽형와의 강도는 줄어 들고, 따라서 기저지역으로부터 유출되는 이송률도 감소하게 된다.

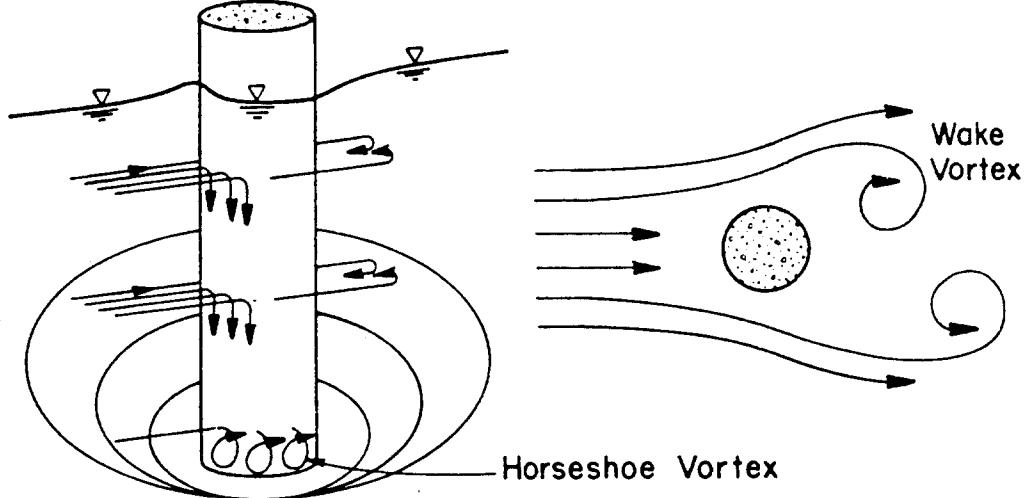


Figure 1. Schematic representation of scour at a cylindrical pier

궁극적으로 이동상 국부세굴은 다시 평형상태에 이르게 되고 세굴작용은 정지된다. 정지상 세굴인 경우에는 말굽형와로 인한 전단응력이 세굴공의 바닥에 있는 입자의 한계전단응력과 같게 되면 세굴작용은 중지된다. 교각의 기저부근의 말굽형와외에 교량의 직하류에는 후류와(wake vortex)라고 부르는 연직방향의 와(渦)가 있다 (Figure 1 참조). 말굽형와와 후류와는 둘다 교각기저부근에서 하상물질을 이동시킨다. 그러나 후류와의 강도(强度)는 교각에서 하류쪽으로 멀어짐에 따라 급격히 감소한다. 그러므로 길이가 긴 교각의 직하류에는 물질의 퇴적현상이 종종 생긴다.

교각의 국부세굴의 크기에 영향을 주는 요소에는 다음과 같은 것들이 있다:

- (1) 교각의 폭, (2) 교각방향이 흐름방향과 경사졌을 때 교각의 길이, (3) 수심, (4) 접근유속, (5) 하상물질의 입경과 입도분포, (6) 접근흐름과 교각이 이루는 각(유입각), (7) 교각의 형상, (8) 하상경사, (9) 결빙이나 얼음결집, (10) 유복

1. 교각의 폭은 국부세굴심에 직접적인 영향을 준다. 교각의 폭이 커지면 세굴심이 증가 한다.
2. 교각의 길이는 교각이 흐름방향과 일치하게 되어 있으면 국부세굴심에 전혀 영향을 주지 않지만, 교각이 흐름방향과 경사지게 되면 교각길이는 세굴심에 상당한 영향을 미친다. 예를 들면 유입각이 같아도 교각의 길이가 2배로 되면 세굴심은 33%가 증가한다.
3. 수심도 국부세굴심에 영향을 미친다. 수심이 증가하면 세굴심이 2배 이상 커질 수 있다.
4. 유속이 세굴심에 영향을 준다. 유속이 크면 클수록 세굴심은 더욱 깊어진다. 흐름이 상류(常流)인가 사류(射流)인가에 따라 세굴심이 달라질 가능성이 있지만 대부분의 연구 자료는 상류에 관한 것들이다.
5. 하상물질의 크기, 입도분포 및 점착성은 국부세굴에 영향을 준다. 모래의 범위에 드는 하상물질은 국부세굴심에 거의 영향을 주지 않는다. 마찬가지로 흐름이나 와(渦)와, 교각 때문에 생긴 난류 때문에 이동될 수 있는 더 큰 입경을 가진 하상물질은 최대세굴심에는 영향을 미치지 않고 단지 최대세굴에 달하는데 걸리는 시간에 영향을 준다. 자

같이나 호박돌과 같이 매우 큰 입자는 세굴공에 보호층효과를 줄 수 있다. 굵은 입자의 보호층효과에 관한 연구결과 세굴공의 보호층효과로 인하여 세굴감소를 고려하는 식들도 발표되었지만, 현재까지는 위의 식을 입증해 줄 수 있는 현장실측자료가 부족한 실정이다. 가는 하상물질(실트와 점토)은 모래하상으로된 하천 만큼 깊은 세굴이 발생할 것이다. 이것은 점착성으로 결합되어 있다 하더라도 마찬가지다. 점착성의 효과는 최대세굴이 일어나는데 걸리는 시간에 영향을 줄 것이다. 하상물질이 모래인 경우에는 최대세굴심이 발생하는데 시간단위로 쟈 수 있는 정도의 기간이 걸리기 때문에 단 한번의 홍수가 일어나도 최대세굴이 생길 수 있다. 점착성 물질인 경우에는 최대세굴심에 이르는데 훨씬 더 긴 시간이 걸릴 것이다.

6. 교각길이를 논할 때 지적한대로 교각에 대한 유입각은 국부세굴에 상당한 영향을 준다.
7. 교각의 전면형상은 세굴심에 20%까지 영향을 미칠 수 있다. 교각의 전면형상을 유선형으로 하면 말굽형와의 강도가 감소되고 이에 따라서 세굴심도 작아진다. 교각의 후면형상을 유선형으로 하면 후류와의 강도가 작아진다. 전단부가 직각인 교각의 최대세굴심은 전면형상이 날카로운 교각(sharp-nose pier)의 경우보다 약 20%가 더 크게 나타나고, 원통형이거나 반원형 교각의 경우보다는 약 10%가 더 크게 나타난다.
8. 모래하상인 수로의 바닥형상은 국부세굴의 크기에 영향을 준다. 모래하상인 하천에서 바닥형상은 사련(ripple), 사구(dune), 평탄하상(plane bed)과 역사구(antidune)로 나눌 수 있다. 바닥형상은 하상모래의 입도분포, 수리특성 및 유체점성 등에 따라 달라진다. 한번의 홍수사상에서도 유량이 증가할 때는 하상형상은 사구에서 평탄하상이나 역사구 하상으로 변할 수 있다. 유량이 감소하면 역으로 될 것이다. 하상형상의 형태와 하상형상의 변화는 유속, 유사이송 및 세굴에 영향을 미치게 된다.
9. 얼음과 유목은 잠정적으로 교각의 폭을 증가시키거나 교각의 형상에 변화를 주어서 하상쪽으로 하향흐름을 일으킬 수 있다. 이것은 국부세굴과 수축세굴을 증가시킬 수 있다. 세굴증가량의 크기는 아직은 거의 알려져 있지 않다. 유목이 얼마나 교각폭을 증가시킬 수 있는가를 추정함으로써 세굴식에서 유목의 영향을 고려할 수 있을 것이다. 빙보(ice jam)일 때 세굴심이 10~20ft 발생했다는 몇 안되는 현장 실측치도 있다(실측자료가 많지 않음).

2.6 정지상 세굴과 이동상 세굴

수축세굴과 국부세굴에는 정지상 세굴과 이동상 세굴의 두가지 세굴형태가 있다. 정지상 세굴은 횡단지점의 상류에서는 하상물질의 이동이 없지만 교각에 의해서 생성된 흐름가속도와 와가 횡단구간내의 물질을 움직이게 만들 때 발생한다. 이동상 세굴은 횡단지점의 상류에 있는 하상물질이 이동하고 있을 때 발생한다.

정지상세굴이 일어나는 대표적인 경우로는 (1) 하상물질이 굵은 하천, (2) 갈수기에 하상경사가 거의 없는 하천(flat gradient streams), (3) 유수에 의하여 이송되는 제일 큰 입자보다 더 큰 하상물질이 국부적으로 퇴적될 때, (4) 소류력이 보호층(armor layer)을 침투해 들어가기에 적당한 위치가 교각가까이에만 있는 보호층이 형성된 하상, (5) 피복층을 침투해 들어가는 위치가 교각가까이에만 있는 식생하도 등이 있다.

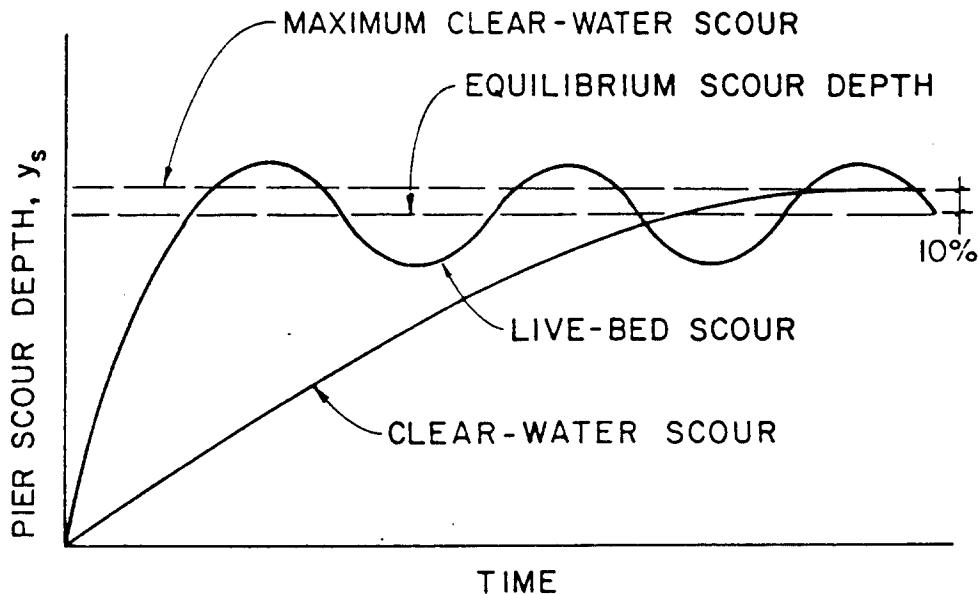


Figure 2. Illustrative pier scour depth in a sand-bed stream as a function of time
(not to scale)

홍수가 발생하는 동안 하상물질이 굵은 하천을 횡단하는 교량은 종종 유량이 적을 때는 정지상 세굴, 유량이 많을 때는 이동상 세굴, 다시 갈수기에는 정지상 세굴을 경험하게 된다. 최대세굴이 일어나는데 걸리는 시간은 이동상 세굴 때 보다 정지상 세굴일 때가 더 길다(Figure 2 참조). 이것은 정지상 세굴이 주로 하상물질이 굵은 하천에서 발생하기 때문이다. 실제로는 정지상 국부세굴은 홍수가 여러번 지난 후에도 최대세굴이 일어나지 않을지도 모른다. 교각에서 정지상 최대국부세굴심이 평형상태의 이동상 국부세굴심보다 10% 정도가 더 크다.

Neill이 제안한 다음 식은 입자의 운동시작과 관계되는 한계유속을 결정하는 식이며, 정지상 세굴이나 이동상 세굴에 같이 사용될 수 있다.

$$V_c = 1.58 [(S_s - 1) g D_{50}]^{1/2} (y/D_{50})^{1/6} \quad (12)$$

여기서,

V_c : D_{50} 이하의 입경을 가진 하상물질의 이동이 시작되는 한계유속, ft/s

S_s : 하상물질의 비중

y : 수심, ft

하상물질은 대개 $S_s=2.65$ 이다.

이 값을 식(12)에 대입하여 다시 식을 정리하면 다음과 같다.

$$V_c = 11.52 y^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (13)$$

식(13)과 식(9)(Laursen의 식)를 비교하면 두 개의 식이 계수만이 다르다는 것을(11.52와 10.95) 알 수 있다. 실용적으로 한계유속 V_c 를 구할 때는 어느 식을 사용해도 괜찮다($S_s=2.65$ 일 때). 식(13)이나 식(9)는 흐름상태가 이동상인지 정지상인지를 결정할 때 장애물이 없는 상태의 흐름에 적용될 수 있다. 횡단면 평균유속이 V_c 보다 크다면 세굴은 이동상이 된다. 이러한 기법은

식생피복이 없는 하도에 똑같이 적용될 수 있다. 홍수터상의 세굴이 정지상인지 이동상인지를 결정할 때는 주의해서 이 절차를 따라야 한다. 대부분의 경우 홍수터에 식생이 있는 것은 침식속도로부터 홍수터 하상을 효과적으로 결합해주고 보호해 줄 것이다. 대부분의 홍수터의 상태는 그 상태에서 정지상 세굴이 일어날 것이다.

하상형상이 사구인 모래하상 하천에서 이동상 교각세굴은 평형세굴심을 중심으로 위 아래로 변동한다(Figure 2 참조). 이것은 하천의 하상형상이 사구일 때, 수로의 하상물질 유사이송량이 변동하기 때문이다. 이런 경우(상류수로와 교량구간에서 하상형상이 사구일 때)에는 교각의 최대세굴심이 평형세굴심보다 30% 정도 더 크다. 그렇지만 대하천을 횡단하는 경우에는(예, 미시시피강, 콜럼비아강 등) 예외적으로 하상형상이 홍수기에 유속이 증가하고 전단응력이 커지기 때문에 평탄하게 된다. 일반적인 경우에는 교각의 최대세굴심은 평형세굴심보다 대략 10% 정도 더 크다(이 것은 Figure 2에 표시하지 않았음).

2.7 하천의 횡방향이동

하천은 동역학적이다. 흐름이 집중된 지역은 계속적으로 제방선을 이동시킨다. S형인 사행하천에서 하도는 횡방향과 하류방향으로 동시에 이동한다. 망상하천(braided stream)은 계속적으로 변하는 여러개의 하도로 되어 있다. 이런 하천에서 자연상태에서 최대세굴심은 수로가 합쳐지거나 수류가 섬이나 사주의 하류에서 합쳐질 때 발생한다. 이때 세굴심은 평균수심을 가진 흐름일 때의 1~2배 정도 되는 것으로 관측되었다.

교량은 정적이다. 교량은 시간과 공간적인 면에서 하천을 한 장소에 고정시켜 놓는다. 수로가 교량구간을 향해 횡방향과 하류방향으로 이동하는 사행하천은 접근제방을 침식할 수 있고 흐름방향이 변하기 때문에 수축세굴과 국부세굴에 영향을 미친다. 하천의 횡방향이동과 교량의 안정성에 영향을 주는 요소로는 하천의 지형, 하천을 횡단하는 위치, 홍수특성, 하상과 하안물질의 특성 및 미세유사량(wash load) 등이 있다.

평면형상의 변화가 언제 일어날가를 예측하기는 어렵다. 이것은 시간에 따라 점차적으로 일어날 수도 있고 대홍수가 일어난 후의 결과가 될 수도 있다. 또한 하천이동의 방향과 크기가 쉽게 정해지지는 않는다. 하천의 횡방향이동과 불안정성에 대한 대책으로는 교량설계시에 예상되는 변화를 내포하거나, 하천조절공사의 시행, 사석공으로 교대를 보호하는 것 또는 교량점검 프로그램에 하천에 관한 면밀한 관측 및 조사를 시행하는 방안이 있다. 횡방향이동을 조절하는 방법은 하천도류공사(river training works), 사석공에 의한 제방안정화 또는 도류제(guide bank)의 축조 등이 있다.

3. 하천교각의 기초설계

3.1 설계원칙과 개념

교량은 대홍수(100년 빈도 이상의 홍수)시의 세굴에도 붕괴의 위협이 없이 견딜 수 있도록 설계하여야 한다. 이것을 위해서는 교량기초설계에 대한 수리학적, 구조적, 지반공학적인 면에서 면밀한 평가가 요구된다.

본 절의 지침은 다음과 같은 개념에 기초를 둔다.

1. 기초는 수리학과 지반공학, 구조설계에 전문적 지식을 갖춘 기술자들로 이루어진 팀이 설계하여야 한다.
2. 교량지점의 수리학적 검토는 교량설계의 필수적인 부분이다. 수리적 검토는 교량의 개구부의 크기와 세굴에 견딜 수 있는 기초설계에 대한 것이다. 분석의 범위와 깊이는 도로의 중요도와 붕괴의 영향에 상응하여야 한다.
3. 세굴추정공식을 사용할 때 이론적인 한계나 불명확한 부분에 대한 적절한 고려가 있어야 된다. 설계자는 합리적이고 신중한 설계가 되도록 수문학적 자료와 수리학적 자료를 가지고 얻어진 세굴심 계산결과를 비교하는데 공학적인 판단을 내릴 필요가 있다. 필요한 자료를 열거하면 다음과 같다.
 - a. 과거 홍수기간 동안 기존 구조물에 발생한 세굴현상
 - b. 홍수유량의 제한방류와 조절효과
 - c. 하천의 수문특성과 홍수기록
 - d. 교량의 구조적인 연속성 여부
4. 경제분석의 원리와 실제 홍수피해를 당한 경험상으로 볼 때, 큰 홍수나 대홍수일 때도 붕괴되지 않을 기초공사를 하는 것이 거의 언제나 투자효과가 있다는 것을 알 수 있다. 홍수때 종종 생기는 도로피해는 교통서비스를 회복하기 위하여 보다 빨리 보수될 수 있다. 반면에, 세굴 때문에 교량이 붕괴되거나 교량에 구조상 중대한 피해가 발생하면 장기간에 걸쳐 사회적 충격과 경제적 손실과 아울러 운전자에게 안전공포증을 줄 수 있다. 교량을 재시공 또는 보수하고 우회도로를 건설하고 유지하는 비용외에도 우회도로를 지나는데 소요되는 추가적인 시간소모, 불편함, 사업상 기회상실 때문에 지역사회나 전지역에 걸쳐 상당한 비용이 들 수 있다. 그러므로 세굴에 대비한 교량기초를 설계할 때 일반적으로 교량의 통수공간의 크기를 결정할 때 요구되는 것보다 더 높은 수준의 수리적 기준이 요구되는 것이 당연하다.

3.2 일반적 설계순서

교량의 형태(type), 크기(size), 및 하부구조물의 위치(location)(이후 TS&L이라 한다)를 결정할 때 다음과 같이 단계별로 세굴에 대한 일반적 설계순서를 따르도록 권장한다.

- 단계 1. 가장 극심한 세굴을 일으킬 수 있는 홍수를 선정한다. 이런 홍수는 100년 빈도 홍수나 100년 홍수보다 작을 때는 월류홍수를 말한다. 여기서 월류(overtopping)는 접근제방이나 교량을 월류하는 것을 말한다.
- 단계 2. 단계 1에서 선정된 홍수에 대하여 수면곡선을 구한다. 수면곡선의 계산에는 WSPRO, Bridge Waterways Analysis Model for Mainframe and Microcomputer 또는 COE의 HEC-2와 같은 팩키지 소프트웨어를 이용할 수 있다.
- 단계 3. 4장의 7단계 설계법(specific design approach)을 이용하여, 단계 1, 2로부터 최악의 상태에 대한 총세굴심을 추정한다. 모든 기초는 100년 홍수나 월류 홍수에 대하여 지반공학적 안전계수가 1.5~2.0의 범위내에서 설계되어야 한다.

- 단계 4. 단계 3에서 얻은 총세굴심을 교량지점의 하도와 홍수터의 횡단면상에 도시한다.
- 단계 5. 단계3과 4에서 얻어진 답을 평가한다. 현재의 세굴추정 절차에 한계가 있음을 고려할 때 구해진 답이 합리적인가? 채택된 세굴심이 공학적 판단하에 얻어진 계산값과 다를 수도 있다.
- 단계 6. 단계 3~5에서 수행된 세굴분석을 기초로 교량 TS&L을 평가한다. 필요하다면 TS&L을 수정한다.
- 설계조건에 대하여 교량지점에서 전체적인 홍수양상을 마음속에 그린다. 홍수와 그에 따른 세굴에 매우 취약한 교량요소를 확인하기 위하여 이러한 마음 속의 그림을 이용한다.
 - 보호대책의 범위는 다음 사항에 따라 결정된다.
 - ▷ 세굴심 예측방법상의 불확실성의 정도
 - ▷ 봉괴 가능성과 그로 인한 여파
 - ▷ 교량을 세굴에 덜 취약하게 만드는데 드는 추가비용. 원래의 공사와 연계된 설계방안이 대부분의 경우에 기왕의 세굴방지대책을 개조하려는 것보다 비용이 덜 듈다.
- 단계 7. 총세굴선(단계 4)보다 위에 있는 모든 하상물질이 제거되어 연직방향과 횡방향 지지력이 상실된 상태에서 교량기초 해석을 실시한다. 모든 기초는 AASHTO의 교량표준시방서(Standard Specification for Highway Bridge)에 따라 설계하여야 한다.
- 흙위의 확대기초
 - ▷ 푸팅의 바닥을 단계 4에서 구한 총세굴선 아래에 둔다.
 - ▷ 푸팅의 상단은 장기적 하상저하, 수축세굴 및 횡방향 이동을 합한 것보다 낮아야 한다.
 - 세굴에 잘 견디는 암반위의 확대기초

세굴에 잘 견디는 화강암과 같은 커다란 암반층일 때 푸팅의 바닥을 깨끗하게 처리된 암반 표면상에 바로 놓는다. 전단고정장치(keying)를 설치하기 위한 발파는 종종 푸팅밑의 암반구조에 손상을 주어 암반이 세굴되기 쉽게 만들기 때문에 작은 고정장치 설치는 피하여야 한다. 매끈한 암반표면위의 푸팅에 횡방향 구속이 필요하다면, 강철 다우웰(steel dowel)용 천공을 뚫고 기초평면 아래에 있는 암반속으로 그라우트 시켜야 한다.
 - 침식되기 쉬운 암반위의 확대기초

풍화되거나 침식되기 쉬운 암반층은 세굴에 대하여 신중히 검토하여야 한다. 얇은 풍화대 밑에 양질의 암반층이 존재하는지 알아 보는 것이 중요하다. 풍화암층이 두꺼울 때는 세굴심을 추정한 후(단계 4와 5) 푸팅바닥이 세굴심보다 낮게 놓여져야 한다. 풍화암을 굴착할때는 조심스럽게 행해져야 한다. 발파가 필요할 때는 바닥평면 밑이 과다하게 파손되는 것을 최소로 하기 위하여 장약은 약한 것으로 촘촘히 설치하여야 한다. 발파지역은 느슨해진 바위조각들을 제거한 후 빙배합 콘크리트로 메꾸어져야 한다.

- d. 트레미실(tremie seal)위에 놓여져 흙위에 지지된 확대기초
 - ▷ 기초의 바닥을 단계 4에서 구해진 총세굴선 아래에 설치한다.
 - ▷ 기초의 상단을 장기적 하상저하와 수축세굴 및 횡방향 이동량을 합한 깊이 이하에 둔다.
 - e. 푸팅이나 캡(cap)이 있는 깊은기초(deep foundation) (천공 샤프트와 타입말뚝)

푸팅 상단이나 말뚝캡을 하상보다 장기적 하상저하량과 수축세굴심을 합한 것 만큼 낮게 설치하면 홍수흐름에 대한 장애와 홍수로 인한 국부세굴이 최소로 될 것이다. 말뚝이 하천수류에 노출됨으로써 침식과 부식으로 손상될 수 있을때는 말뚝기초 푸팅의 표고를 더 낮추는 것이 바람직하다.
- 단계 8. 대홍수에 대하여 단계 2에서 단계 6까지의 순서를 따라 세굴심을 계산한다. 이 때의 대홍수나 안전검토홍수(check flood)는 500년 빈도 홍수가 좋을 것이다. 500년 빈도의 홍수는 발간된 자료에서는 구할 수 없으므로 $1.7 \times Q_{100}$ 인 유량을 사용한다. 경우에 따라서는 기초설계를 검토할 때 500년 빈도 홍수보다 작은 월류홍수가 최악의 상태를 일으킬 수도 있다. 단계 7에서 결정된 기초설계는 대홍수 조건일 때 재평가 되어야 하며 필요하다면 설계수정이 이루어 져야 한다.
- a. 흙이나 풍화암 위에 있는 확대기초의 바닥이 대홍수시의 세굴심 이하인가를 확인한다.
 - b. 대홍수 조건일 때 모든 기초의 최소안전계수는 1.0이어야 한다(극한하중조건).

3.3 설계검토항목(check list)

3.3.1 일반사항

1. 교량의 상부구조 높이를 접근도로의 전반적인 높이보다 높게 한다. 교량의 수로구간을 폐쇄할 수 있는 많은 양의 유목을 운반하는 하천에서는 특히 중요하다. 유목을 운반하는 하천에서는 교량의 하현표고를 100년 홍수에 대한 정상적인 여유고보다 최소한 2ft는 더 높이는 것이 좋다.
2. 연속경간교량은 단순경간교량에 비하여 세굴과 이것으로 인한 기초이동으로 인한 힘에 더 잘 견딘다. 연속경간은 침하나 기초의 회전운동으로 야기된 비평형력에 대하여 교번하중경로를 제공한다. 이런 형태의 구조설계는 상당한 세굴 가능성이 있는 교량에 적합하다.
3. 교각과 교대의 국부세굴이 서로 중복되는 경우가 있다. 국부세굴공이 중복된다면 세굴은 불확정적이며 더 깊어 진다. 국부세굴공의 상단폭은 세굴심의 1.0~2.8배에 이른다.
4. 세굴되기 쉬운 말뚝설계를 할 때는 지지하중을 크게 하기 위하여 짧은 말뚝을 많이 세우는 것보다 긴 말뚝을 적게 사용하는 것을 생각하여야 한다. 이 방법은 공사비를 거의 증가시키지 않고 세굴에 의한 말뚝붕괴에 대한 안전율을 크게 해준다.

3.3.2 교각

1. 교량수명 기간에 하도위치가 이동할 가능성이 있을 때는 홍수터 위의 교각기초는 하도 위의 교각기초와 같은 높이로 설계하여야 한다.

2. 교각은 홍수의 흐름방향과 일치 시킨다. 특히 홍수때 흐름양상이 복잡한 곳에는 원형교각의 수리학적 장점을 검토하여야 한다.
3. 세굴을 감소시키고 얼음과 유목의 결집 가능성을 최소화하기 위하여 교각을 유선형으로 한다. 적절한 곳에 얼음과 유목의 유도장치를 설치한다.
4. 하도에 다중말뚝 Bent의 사용을 생각할 때 얼음과 유목결집의 위험성을 검토한다. 이러한 문제가 있는 곳에서는 세굴심을 추정할 때 마치 고정된 교각인 것처럼 Bent를 설계한다. 수로단면적의 폐색이 중대한 문제라면 다른 교각형태를 검토한다.

4. 교각의 세굴심 추정

4.1 서론

여기서는 교각의 총세굴, 다시 말하면 장기적 하상상승이나 저하, 수축세굴 및 국부세굴을 구하는 방법과 식들을 소개한다.

수축세굴과 국부세굴을 추정하는 여러 가지 방법을 적용하기에 앞서 사전에 준비가 필요한 사항으로 (1) 고정상 하도수리학 계산을 하고, (2) 하상종단에 미치는 장기적 하상변동의 영향을 예측하고, (3) 이런 변화를 반영하기 위하여, 필요하면 고정상 수리계산을 수정하고, (4) 교량 수리 계산을 행한다.

4.2 구체적 설계과정(specific design approach)

교량의 세굴량을 추정하는 6 단계는 다음과 같다.

- 단계 1. 세굴분석 변수의 결정
- 단계 2. 장기적 하상고 변동분석
- 단계 3. 세굴분석법의 평가
- 단계 4. 수축세굴심의 계산
- 단계 5. 교각의 국부세굴심의 계산
- 단계 6. 3장의 설계순서인 단계 3~6에 소개된 총세굴심의 도시 및 평가

기술자는 단계 4와 5의 세굴추정치와 단계 7의 총세굴이 얼마나 합리적인가를 검토하여야 한다. 위의 구체적 설명과정을 통하여 얻어진 값이 3장의 단계 1~6을 만족하면, 설계는 3장의 일반적 설계순서의 단계 7과 8로 진행시킨다.

4.3 상세한 단계별 설계순서

4.3.1 단계 1 : 세굴분석 변수의 결정

1. 3장의 일반적 설계순서의 단계 1과 8의 홍수유량을 결정한다. 500년 빈도홍수량이 기존의 자료에서 구할 수 없으면 $1.7 \times Q_{100}$ 으로 계산한다.
2. 큰 홍수량과 낮은 하류수위의 결합이 발생할 요소가 현재나 장래에 있는지를 검토한다. 이런 요소들은 하상암반이나 기타 조절장치(예를 들면, 오래된 유로전환구조물, 사방조절

댐, 기타 교량 등) 또는 하류의 댐이나 갑문, 교량의 수면높이에 영향을 주는 상하류의 댐 등이다. 교량수로에서 수축흐름과 확대흐름을 고려하고 현재의 조건과 예상되는 장래의 하천변화를 생각한다.

3. WSPRO나 HEC-2를 이용하여 최대세굴이 일어날 홍수량에 대한 수면종단도를 작성한다. 컴퓨터 분석자료와 다른 수리학적 검토를 통하여 세굴계산에 필요한 유량, 유속, 수심 등을 구한다.
4. 필요에 따라 다음과 같은 자료를 수집하고 요약한다.
 - a. 교량지점 지층구조를 알기 위한 시추 주상도
 - b. 교량구간의 하상물질의 입경과 분포도
 - c. 현재의 하도와 홍수터의 단면도
 - d. 하천의 평면도
 - e. 유역특성
 - f. 지역내 다른 교량의 세굴자료
 - g. 교량 상하류의 에너지경사
 - h. 과거 홍수기록
 - i. 인접한 다른 교량에 관한 교량지점, 지점에 인접한 지류와의 합류점, 하상암반 조절장치, 인위적 조절장치(댐, 오래된 사방구조물, 하천도류공 등)와 하류의 다른 하천과의 합류점의 위치
 - j. 하천의 특성(항류성(perennial), 급류, 간헐성, 점진적 수위상승(gradual peak) 등)
 - k. 교량지점의 지형(복단면 하천; 삼각주, 유년기, 청년기, 노년기 하천의 횡단; 충적선상 지의 횡단, 사행, 직선 혹은 망상하천 등)
 - l. 하천의 과거 침식기록
 - m. 하천과 유역의 개발역사(현재와 장래의 조건을 동시에 고려하여야 한다). 지도, 지상 사진, 항공사진의 수집, 지역주민과의 대화, 계획이 세워진 물관련 연구프로젝트의 검토
 - n. 지점 상하류의 하상으로부터 모래와 자갈 채취량
 - o. 교량에 영향을 줄 수 있었던 다른 요소들
 - p. 하천이동의 가능성과 이것이 교량에 미치는 효과 등을 고려하여 교량지점에 대한 정성적인 평가를 내린다.

4.3.2 장기적 하상고 변동분석

1. 단계 1에서 수집된 자료를 이용하여 정성적으로 장기적 하상고의 변동추이를 구한다. 상당한 하상상승이나 저하가 예상되는 곳에서는 다음 중 한가지 이상의 방법을 이용하여 장래 100년에 걸친 하상고의 변동량을 추정한다.
 - a. 유사추적(sediment routing)이나 BR1-STARS와 COE의 HEC-6와 같은 유사량보존 컴퓨터프로그램
 - b. 현재까지 경향의 직선연장 외삽법
 - c. 공학적 판단

- d. 최악의 경우(예, 교량의 직하류에서 다른 하천과 합류하는 경우)는 설계홍수가 하천 본류와 지류의 홍수량과 하천조건의 정성적인 평가를 통하여 하류수위가 낮을 때 발생할 것으로 가정한다.
- 2. 하상이 상승하여 하천횡단에 영향을 미칠 것으로 예상되면 교량위치를 이동시키거나 교량의 하현고를 높인다. 하상이 상승하는 하천은 큰 홍수가 하상상승보다 빨리 발생하기 때문에 현재의 하상고를 세굴추정의 기저선으로 생각한다.
- 3. 하상이 저하하고 있다면 총세굴심을 계산할 때 하상고의 변동추정치를 사용한다.

4.3.3 세굴분석법의 평가

여기서 추천된 방법은 세굴구성성분이 독립적으로 발달한다는 가정이 전제로 되어 있다. 따라서 잠재적 수축세굴이 하도와 교량수리현상에 미치는 영향을 고려하지 않고 국부세굴량을 수축세굴에 더한다. 수축세굴이 상당하다면 부록 A에 제시된 별개의 방법이 사용될 수 있다.

1. 현상태의 고정하상 조건아래 자연상태의 하도수리량을 계산한다.
2. 예상되는 종단도와 평면형상의 변동량을 검토한다.
3. 예상되는 장기적 하상종단이나 평면형상의 변화를 반영하여 고정상 수리계산을 조정한다.
4. 경험적 수축공식과 조정된 고정상 수리량을 사용하여 수축세굴심을 추정한다(단계 4 참조).
5. 조정된 고정상 하도와 교량 수리량을 이용하여 국부세굴심을 추정한다(단계 5와 6 참조).
6. 국부세굴심을 수축세굴에 더하여 총세굴심을 구한다(3장의 일반적 설계순서 단계 4나 4장의 구체적 설계순서 단계 7 참조)

4.3.4 단계 4 : 수축세굴심의 계산

개설

수축세굴은 이동상 세굴과 정지상 세굴로 나누어 진다. 어떠한 경우에도 교량상류의 흐름이 하상물질을 이송하고 있는지(이동상), 아닌지(정지상)를 결정하고 수축세굴의 위치에 의하여 정의된 변수를 가진 적절한 공식을 적용하면 된다. 하상물질의 한계유속이 평균유속보다 크면 ($V_c > V$) 정지상 수축세굴이 일어나고 한계유속이 평균유속보다 작으면($V_c < V$) 이동상 세굴이 일어난다.

한계유속은 2장의 Neill공식이나 Laursen공식을 사용한다. 즉,

$S_s = 2.65$ 일 때 Neill공식은

$$V_c = 11.52 y_1^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (14)$$

여기서,

V_c : 하상물질의 D_{50} 의 한계유속, ft/s

S_s : 하상물질의 비중

y_1 : 상류수심, ft

$S_s=2.65$ 일 때 Laursen공식은

$$V_c = 10.95 y_1^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (15)$$

수축세굴조건

수축세굴은 4가지 경우로 나눌 수 있다(부록의 설명도 참조).

case 1. 교량접속 제방에 의해서 홍수터상의 흐름이 주하도로 집중되게 하는 경우 case 1의 상태는 다음의 경우가 포함된다.

- 하도로 돌출된 교대나 하천의 협착구간에 위치한 교량 때문에 하천의 하도록이 더 좁아진다.
- 주하도는 단면수축이 없지만, 홍수터 위의 유수단면이 제방에 의해서 완전히 차단된다.
- 교대가 하도로부터 후퇴되어 있다.

case 2. 흐름이 주하도로 제한된다(홍수터 흐름이 없음). 정상 하도록이 교량 때문에 좁아지거나 교량지점이 하천의 협착구간에 위치하고 있다.

case 3. 홍수터 구간 흐름은 하상물질 이송이 거의 없는 홍수터 위에 설치된 보조안전교량

case 4. 홍수터 구간의 샛강위에 설치된 보조안전교량(case 1과 유사함)

유의사항:

- case 1, 2, 4는 홍수기의 상류로부터 하상물질의 이송여부에 따라 이동상일 수도 있고 정지상일 수도 있다. 하상물질이송이 있는가 없는가는 Neill이나 Laursen공식을 이용하여 (식(14)나 (15)) 하상물질의 D_{50} 에 대한 한계유속을 계산하여 평균유속과 비교해 보면 알 수 있다.
- case 1(c)는 대단히 복잡하다.

수축세굴심은 다음 요소에 좌우된다.:

- 교대가 저수로 제방선에서 얼마나 멀리 떨어져 있는가.
- 홍수터의 상태(쉽게 침식되는지, 홍수터에 나무가 심어져 있는지, 저수로 제방 높이가 높은지 등)
- 교량지점에서 하천이 상류구간에서 보다 더 넓어지는지 좁아지는지
- 교량개구부로 귀환되는 홍수터 흐름 유량
- 교량구간의 흐름분포
- 기타

교량밑의 주하도는 이동상 세굴이 일어날 수 있는 반면 후퇴홍수터 구간은 정지상 세굴이 될 수 있다. WSPRO와 같은 수면추적모형은 단면수축된 교량 개구부의 주하도와 후퇴홍수터 구간사이의 유량분포를 계산하기 위하여 이용 될 수 있다.

- 홍수터 하상물질의 한계유속이 홍수터구간의 유속보다 작은 유속을 가진 미세한 토사로 되어 있다 하더라도 case 3은 정지상 세굴이 일어날 수 있다. 이에 대한 이유는

- (1) 연중 일부시기에 성장하는 식생이 있을 수 있고,
(2) 미세 하상물질은 교량구간에서 부유하게 되어(wash load) 수축세굴에 영향을 미치지 않을 수도 있다.
4. case 4는 case 3과 유사하지만 보조안전교량구간으로 유입되는 유사이송량이 있다(이동상 세굴).

이 경우는 보조안전교량이 홍수터 위의 샷강수로위에 있을 때 생긴다. 수리학적으로는 case 1과 다르지 않지만 보조교량 개구부와 관계된 홍수터 폭과 보조안전교량을 통과하는 유량분포를 정할 필요가 있다.

이동상 수축세굴

수축구간의 세굴심을 예측하기 위하여 수축구간이 길 때 이동상 세굴에 대한 Laursen의 수정공식을 권장한다. 원래의 공식은 2장에 나와 있다. 수정사항은 Manning의 n 의 비를 제거 한 것이다. 수정식은 하상물질이 상류구간에서 이송되고 있다고 가정한다.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^{6/7} \left[\frac{W_1}{W_2} \right]^{k_1} \quad (16)$$

$$y_s = y_2 - y_1 = \text{평균세굴심}$$

여기서,

y_1 : 상류 주하도의 평균수심, ft

y_2 : 수축단면의 평균수심, ft

W_1 : 상류 주하도 바닥폭, ft

W_2 : 수축단면의 주하도의 바닥폭, ft

Q_1 : 유사를 이송하는 상류하도유량, cfs

Q_2 : 수축하도의 유량, cfs

k_1 : 아래 표와 같은 지수

V_*/w	k_1	하상물질 이송모형
< 0.5	0.59	대부분이 소류사
0.5~2.0	0.64	약간의 부유사가 있음
> 2.0	0.69	대부분이 부유사

$$V_* = (\tau / \rho)^{1/2} = (g y_1 S_1)^{1/2}, \text{ 상류구간의 전단속도, ft/s}$$

w : 하상물질의 D_{50} 의 침강속도, ft/s (Figure 3 참조)

g : 중력가속도 ($=32.2 \text{ ft/s}^2$)

S_1 : 주하도의 에너지 경사, ft/ft

τ : 바닥 전단 응력, lb/ft^2

ρ : 물의 밀도 ($=1.94 \text{ slugs}/\text{ft}^3$)

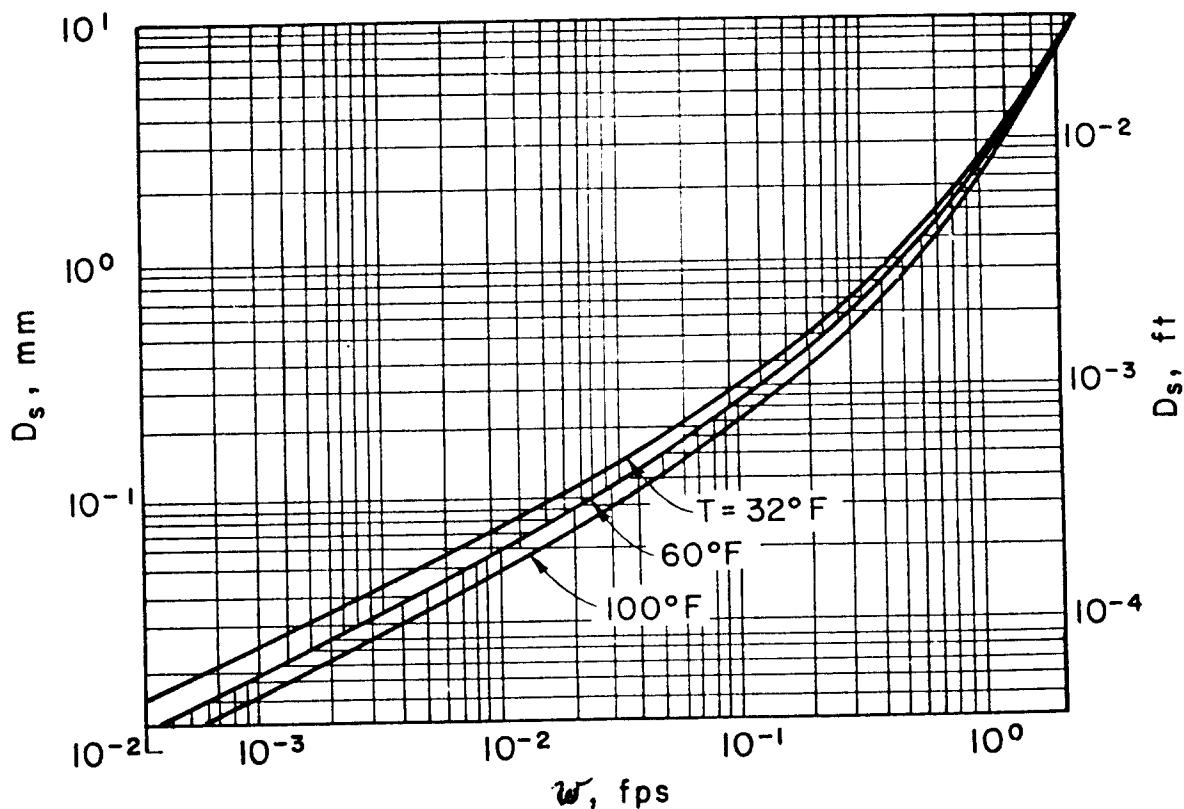


Figure 3. Fall velocity of sand-sized particles

유의사항:

1. Q_2 는 case 1(a)와 1(b)에서와 같이 교량개구부를 통과하는 총유량이 된다. 이것은 case 1(c)의 총유량은 아니다.
2. Q_1 은 교량상류의 주하도 유량이며 홍수터유량은 포함되지 않는다.
3. Manning의 n 비는 주하도는 사구하상이고 대응하는 수축하도는 평탄하상이나 천이사구 하상 혹은 역사구하상일 때 중요할 수 있다. 그러나 Laursen의 식은 하상이 평탄하게 되는 결과로 발생할 이송량의 증가를 정확하게 설명하지 못하고 있다. 다시 말하면 이 경우에 Laursen식은 세굴감소를 나타내는 반면에 실제로는 세굴심의 증가가 생긴다. 더욱 이 홍수시에 평탄하상은 대개 교량통과구간과 동시에 교량상류에 있으며 Manning의 n 값은 같을 것이다. 따라서 n 값의 비가 식(16)에는 빠져 있다.
4. W_1 과 W_2 는 항상 쉽게 정의 되지는 않는다. 경우에 따라서는 이들을 정의하기 위하여 주하도의 천단폭을 사용할 수 있다. 천단폭을 사용하거나 바닥폭을 사용하거나, 중요한 점은 W_1 과 W_2 가 바닥폭이나 천단폭을 가리키도록 일치시키는 것이다.
5. 교량개구부의 평균폭(W_2)은 보통 교각폭을 제외한 바닥폭을 택한다.
6. Laursen식은 교량이 자연수축부의 상류단에 놓여 있거나 아니면 단면수축이 교대와 교각이 있기 때문에 생긴 결과라면 세굴심을 과다추정 할 것이다. 그렇지만 지금으로써는 이 식이 최선의 식이다.

정지상 수축세굴

다음의 정지상 수축세굴식은 Laursen의 연구에 근거하고 있다. 이것은 2장에서 식(8)로 제안되었다.

$$y_2 = \left[\frac{Q^2}{120 D_m^{2/3} W^2} \right]^{3/7} \quad (18)$$

$$y_s = y_2 - y_1 = \text{평균세굴심} \quad (19)$$

여기서,

y_1 : 세굴되기전 홍수터나 하도의 수심, ft

y_2 : 교량개구부나 교량구간의 홍수터의 수심, ft

y_s : 세굴심, ft

Q : 교량 통과유량이나 교량에서 홍수터상의 유량, cfs

D_m : 교량의 개구부나 홍수터의 하상물질의 유효평균입경($1.25 D_{50}$), ft

D_{50} : 교량의 개구부나 홍수터의 하상물질의 중앙입경, ft

W : 교량의 바닥폭에서 교각폭이나 홍수터 폭(후퇴거리)을 뺀 값, ft

주의 할 점은 추천된 정지상 세굴식, 식(18),이 Laursen이 처음 개발한 식(8)과는 D_{50} 대신에 바닥물질의 유효 평균 입경, D_m 을 사용한다는 점이 다르다.

식(18)과 (19)를 결합하면 정지상 세굴심을 계산하는 하나의 식으로 된다.

$$\frac{y_s}{y_1} = 0.13 \left[\frac{Q}{D_m^{1/3} y_1^{7/6} W} \right]^{6/7} - 1 \quad (20)$$

총상으로 된 하상 물질의 경우에는 연속되는 하상물질총의 D_m 을 구하여 식(18)이나 (20)을 사용하여 세굴심을 구할 수 있다.

기타 수축세굴 조건

곡류부의 바깥쪽으로 집중되어 있는, 교량을 통과하는 흐름 때문에 생기는 수로 곡류부의 수축세굴은 곡류부 바깥쪽의 수면의 편수위상승(superelevation)을 구하고 이 때의 유속과 교량을 통과하는 수심을 추정하여 분석한다. 곡류부 바깥쪽의 최대유속은 평균유속의 1.5~2.0배까지 된다. 물리적 모형연구를 통하여 교량구간의 유속과 세굴심 분포를 결정할 수도 있다.

특별한 상황일 때 수축세굴을 추정하려면 하천역학의 원리를 지점의 특수조건에 적용할 수 있는 특수기술이 필요하다. 그런 연구는 수리학과 하천역학 분야에 경험이 있는 기술자에 의하여 수행되어야 한다.

4.3.5 단계 5 : 교각의 국부세굴심 계산

개설

교각의 국부세굴은 하상물질의 크기, 흐름특성, 유체성질 및 교각형상의 함수이다. 이 주제는

실험실에서 광범위하게 연구되어 왔지만 현장실측자료는 많지 않다. 대체로 비슷한 계산 결과가 나오는 식들은 비점착성 모래하상 하천의 이동상 세굴일 때이다.

미국연방도로청(FHWA)은 1983년에 좀 더 일반화된 많은 공식들을 비교하였다(Figure 4와 5). 몇몇의 식들은 푸르드 수의 형태로 표현된 속도를 변수로 취하고 있다. 그러나 Laursen식과 같은 여러 식들은 속도항을 포함하고 있지 않다. Figure 4는 일반적으로 사용된 세굴공식을 비교할 목적으로 푸르드 수 0.3이 사용되었다. Figure 5는 각종 공식들을 현장 실측자료와 비교하였다.

Figure 5에서 알수 있는 바와 같이 콜로라도 주립대학(CSU)공식이 모든 실측치를 싸고 있지만 Jain과 Fischer식, Laursen식, Melville과 Sutherland식, Neill식들 보다 작은 세굴값을 주고 있다. CSU식은 식 속에 푸르드 수를 포함함으로써 교각의 직상류의 유속을 포함하고 있다. Chang은 Laursen식(1960)이 본질적으로 $Fr=0.4$ 일 때의 CSU식의 특수한 경우에 해당한다고 지적하였다 (Figure 6 참조).

Figure 4, 5, 6에 나타낸 식들은 하상 물질내의 더 큰 입자들이 세굴공에 보호충효과 (armoring effect)를 줄 수 있다는 가능성을 고려하고 있지 않다. 장기간에 걸쳐서 많은 홍수에 대한 세굴공의 보호충효과의 중요성이 알려져 있지 않으므로 이에 관련된 식의 사용을 추천하지 않는다. Figure 6에서 CSU식의 y_s/a 와 y_l/a 사이의 관계는 푸르드 수의 함수로 주어진다. 이 관계도표는 Chang이 개발한 것이다. Laursen의 교각 세굴식이 $Fr = 0.4$ 일 때 CSU식의 특수한 경우라는 점에 유의하라. CSU식은 상측안정흐름(upper regime flow)(평탄하상, 역사구, chute와 pool)일 때 세굴심을 정확하게 예측하고 있다. Chang은 그가 연구한 모든 자료에서는 세굴심과 교각폭의 비 (y_s/a)가 2.3보다 큰 값이 없었다고 했다. Melville과 Sutherland는 원형교각에 대한 실험결과의 상한치를 2.4라고 보고했다($Fr<1.0$). y_s/a 의 상한치는 원형교각에 대하여 유도되었으며 다른 교각형상이나 방향에 대한 보정이 이루어지지 않았다. 압력흐름이나 유목 등도 이 값을 증가시킬 수 있다.

이상의 논의 결과 Fr 가 커지면 y_s/a 는 3까지도 될 수 있다. 그러므로 y_s/a 의 최대값으로 $Fr \leq 0.8$ 일 때는 2.4, $Fr > 0.8$ 일 때는 3.0을 택할 것을 권한다. 이 값은 교각방향이 흐름과 일치하고 전면이 반원인 교각에만 적용한다. 교각세굴심을 구할 때 이동상과 정지상 교각 세굴의 경우 모두 다 CSU공식을 사용할 것을 추천한다. 이 식은 교각의 평형세굴심을 예측하는 식이다. 설계 홍수일 때 대부분의 교량지점에 전형적으로 나타나는 평탄하상조건일 때는 최대세굴심이 CSU공식의 계산치보다 10% 정도 더 클 수 있다. 홍수기에 큰 사구로 된 사구하상이 교량지점에 나타나는 특수상황에서는 최대교각세굴심이 추정치 보다 30%가 더 클 수 있다.

이러한 현상은 미시시피강과 같이 매우 큰 하천에서 나타난다. 홍수때 사구하상이 되는 작은 하천에서는 사구는 더 작게 되고 최대세굴심은 평형세굴심보다 10~20% 정도 더 크게 나타날 수 있다. 역사구하상에서는 최대세굴심이 평형세굴심보다 10% 정도 더 클수 있다. Table 3에는 CSU 공식으로 계산한 평형세굴심의 증가율이 사구높이, H 의 함수로 나타내었다. 이 증가율은 CSU공식에 보정계수(K_3)로 도표에 표시 하였다.

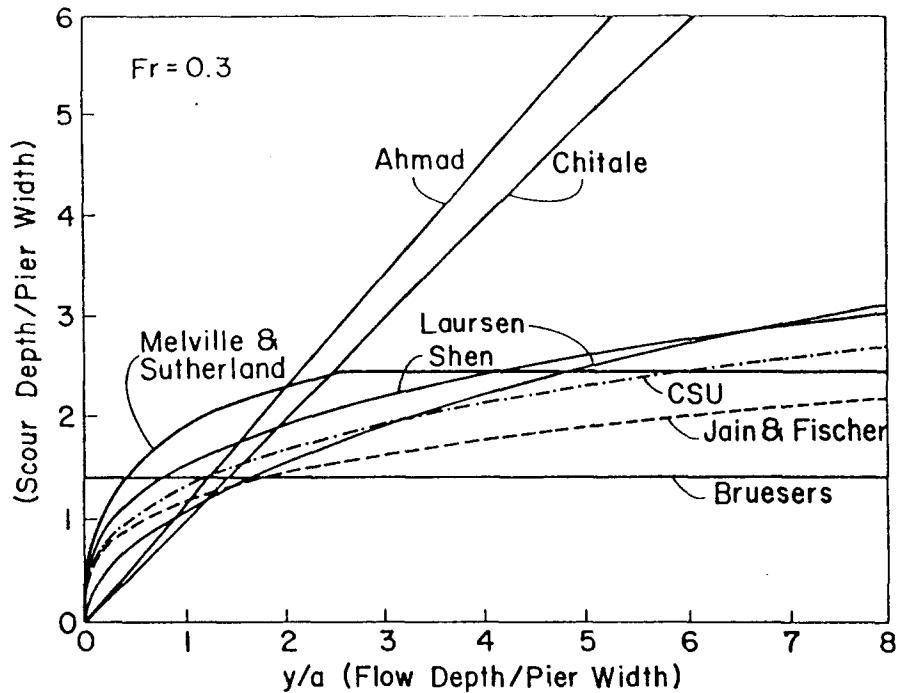


Figure 4. Comparison of scour formulas for variable depth ratio(y/a) after Jones

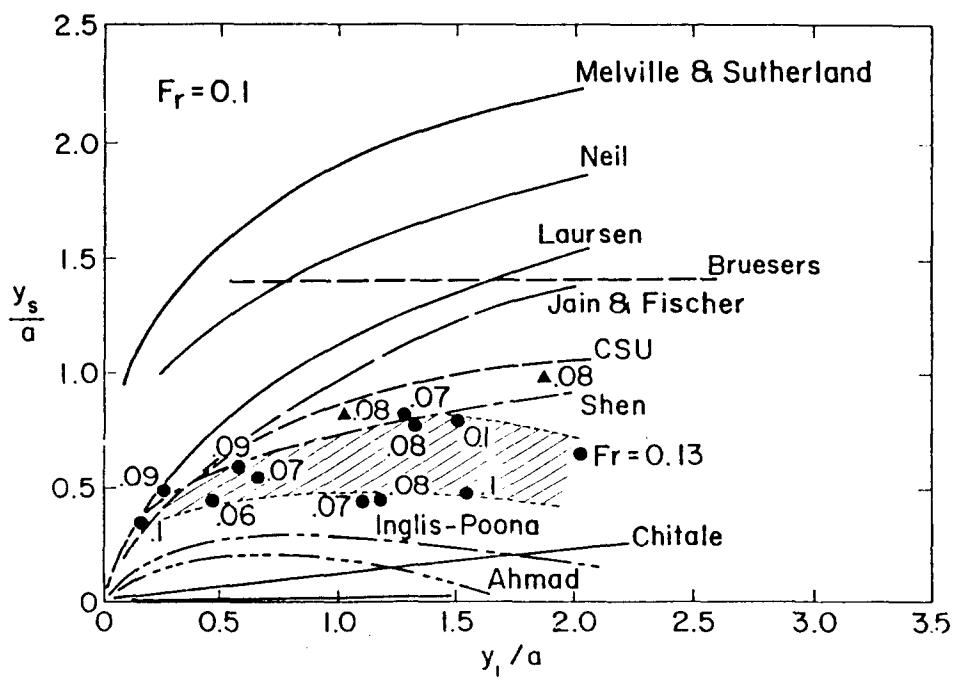


Figure 5. Comparison of scour formulas with field scour measurements after Jones

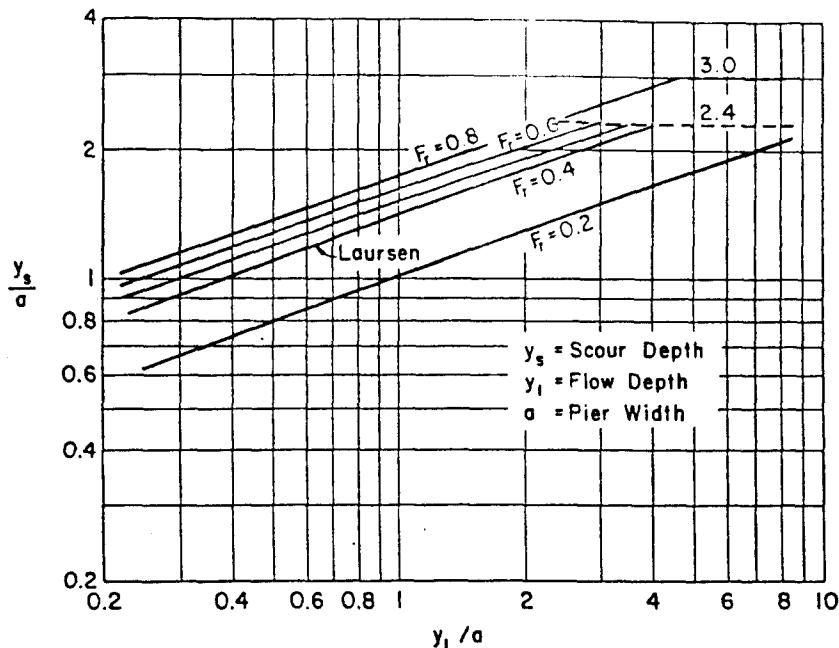


Figure 6. Values of y_s/a vs. y_1/a for CSU's equation

Table 3. 하상 상태에 따른 평형교각 세굴심의 증가율(K_3)

하 천 상 태	사구높이 H , ft	K_3
정지상세굴	-	1.1
평탄하상과 역사구 흐름	-	1.1
작은 사구	$10 > H > 2$	1.1
중간 사구	$30 > H > 10$	1.1~1.2
큰 사구	$H > 30$	1.3

교각세굴심 계산

교각세굴에 대한 CSU공식은 다음과 같다.

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (21)$$

식(21)을 y_s/a 의 항으로 표시하면:

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad (22)$$

여기서,

y_s : 세굴심, ft

y_1 : 교각직상류의 수심, ft

K_1 : 교각 전면 형상에 대한 보정계수 (Figure 7과 Table 4)

K_2 : 흐름 입사각에 대한 보정계수 (Table 5)

K_3 : 하상상태에 대한 보정계수 (Table 2)

a : 교각폭, ft

L : 교각길이, ft

Fr_1 : 푸르드 수 ($= V_1 / \sqrt{gy_1}$)

V_1 : 교각직상류의 평균유속, ft/s

Table 4. 교각 전면 형상에 대한 보정계수, K_1

교각 전면 형상	K_1
(a)square nose	1.1
(b)round nose	1.0
(c)circular cylinder	1.0
(d)sharp nose	0.9
(e)group of cylinders	1.0

Table 5. 흐름입사각에 대한 보정계수, K_2

각도(°)	$L/a=4$	$L/a=8$	$L/a=12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

각도 = 흐름방향과 이루는 경사각(유입각)
 L = 교각의 길이

주의사항: 교각전면 형상에 대한 보정계수 K_1 은 유입각이 5° 이하일 때는 Table 4의 값을 사용한다. 유입각이 5° 보다 클 때는 K_2 가 지배적이며 K_1 은 1.0을 택 한다. $L/a > 12$ 이면 $L/a=12$ 일 때의 K_2 값을 최대치로 사용한다.

노출된 푸팅의 교각세굴

교각푸팅이나 말뚝캡은 세굴때문에 흐름에 노출될 수 있다. 이러한 현상은 장기적 하상저하, 수축세굴, 또는 하천 횡방향이동 때문에 생길 수 있다. 푸팅이나 말뚝캡폭을 기준으로 흐름에 노출된 푸팅이나 말뚝캡에 대한 교각의 국부세굴심의 계산값은 지나치게 안전측이다. 예를 들면 Schoharie Creek의 교량붕괴사례에 대한 계산세굴심은 푸팅폭대신 교각폭을 사용했을 때 모형실험결과나 실측세굴심에 더욱 가까웠다. 이것은 푸팅이 잠재 세굴심을 감소시킨 것 같다.

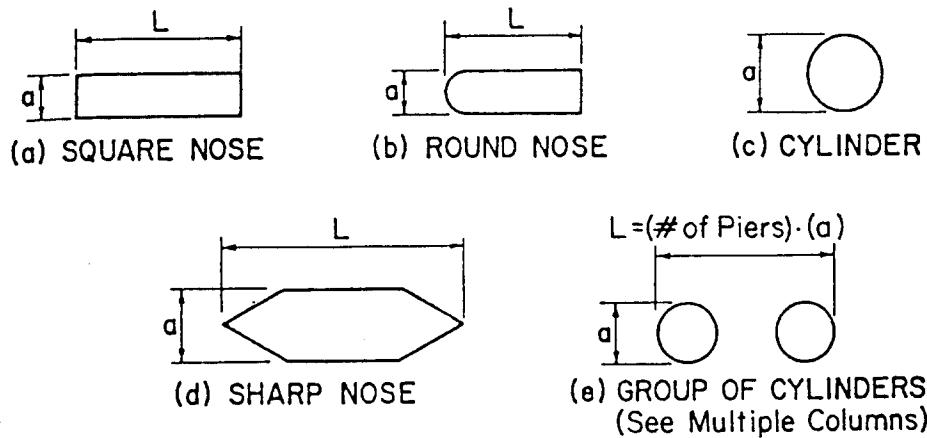


Figure 7. Common pier shapes

일반적으로 연구결과에 의하면 교각의 상류로 연장된 푸팅은 푸팅상단이 하상면과 일치하거나 그 이하에 있을 때 교각세굴을 감소시키지만 세굴공은 푸팅이 흐름장에 돌출한 정도에 비례해서 더 길어지고 더 커진다고 알려져 있다. 이런 연구를 토대로 푸팅이 흐름에 노출될 우려가 있을 때 다음과 같이 교각세굴 계산을 하기를 추천한다.

“푸팅(혹은 말뚝캡)의 상단이 하상면과 일치하거나 그 이하에 있다면(장기적 하상저하와 수축세굴을 고려한 후) 교각폭을 교각세굴식의 ‘ a ’의 값으로 사용할 것을 추천한다. 교각폭이 하상위로 돌출된다면 ‘ a ’의 값으로 푸팅의 폭을 사용하고 세굴식에서 y 와 V 대신에 각각 푸팅으로 차단된 흐름구역 내의 수심과 평균유속을 사용하여 다시 한번 계산을 실시한다. 두 개의 세굴 계산결과중 더 큰 값을 택한다.”

푸팅이나 말뚝캡의 상단이 장기적 하상저하와 수축세굴에 일치한다면 교각폭을 고려하여 세굴심을 계산하여야 한다.

푸팅이 노출되었을 때 평균유속 V_f 는 다음식으로 구한다. :

$$\frac{V_f}{V_1} = \frac{\ln \left[10.93 \frac{y_f}{k_s} + 1 \right]}{\ln \left[10.93 \frac{y_1}{k_s} + 1 \right]} \quad (23)$$

여기서,

V_f : 푸팅의 상단아래 흐름구역내의 평균유속, ft/s

y_f : 하상에서 푸팅의 상단까지의 거리, ft

k_s : 하상입자조도. 대개는 하상물질의 D_{84} 를 택한다. ft

y_1 : 교각 상류의 수심, ft

V_f 와 y_f 의 값이 앞서 나온 CSU식에 사용된다.

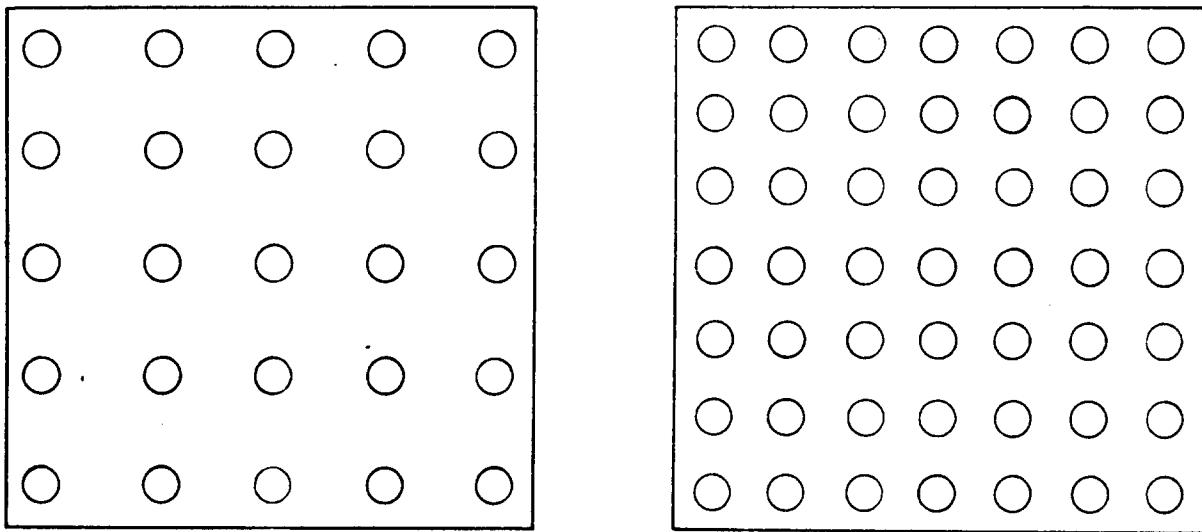


Figure 8. Pile groups

군말뚝이 노출되었을 때 교각세굴

군말뚝에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

“하상위로 돌출되는 군말뚝은(장기적 하상저하와 수축세굴의 결과로 발생한다) 말뚝사이의 빈공간을 무시하고 이들을 전체 말뚝의 투영면적과 같은 하나의 폭으로 간주하여 보수적으로 분석될수 있다. 군말뚝은 말뚝사이의 공간을 폐색할 수 있는 유목이 걸려서 군말뚝이 훨씬 더 큰 덩치로 작용하게 하는 경향이 있기 때문에 유목문제에 대한 적절한 판단을 필요로 한다.”

군말뚝이 국부세굴결과 흐름에 노출된다면 교각세굴을 계산하는데 말뚝을 고려할 필요는 없다.

예를 들면, 말뚝간격이 6ft이고 직경이 16in인 말뚝 5개는(Figure 8) ‘ a ’의 값이 6.67ft로 될 것이다. $(= \frac{16 \text{ in} \times 5}{12 \text{ in}/\text{ft}})$

이런 복합적인 교각폭은 교각세굴심을 구하기 위하여 식(21)에 사용된다. 식(21)에서 다중말뚝에 대한 보정계수, K_1 은 형상에 관계없이 1.0이다. 군말뚝이 Figure 8과 같이 정사각형이면 K_2 는 1.0이 된다. 그러나 군말뚝이 직사각형을 이룬다면 그것이 마치 하나의 교각인 것처럼 칫수를 사용하고 K_2 를 구하기 위하여 적절한 L/a 값을 사용한다.

군말뚝이 노출된 경우의 세굴심은 말뚝사이에 걸린 유목의 효과를 말할 때 외에는 이와 같은 방법으로 분석된다. 유목을 고려하려면, 다중말뚝과 유목을 하나의 일체된 교각으로 간주하는 것이 논리적일 것이다. 적당한 L/a 의 값과 유입각은 Table 5의 K_2 를 정하는 데 이용된다.

수면과 같거나 수중에 돌출된 말뚝캡

수면과 거의 같게 있거나 수중에 있는 말뚝캡에 대해서 세굴 분석을 실시할 때, 노출된 군말

뚝에 의해 야기된 세굴계산, 말뚝캡에 의해 야기된 교각세굴계산과 교각의 일부가 수중에 잠겨 있다면 교각에 의해 야기된 교각세굴계산을 모두 실시 할 것을 권장한다. 안전측인 교각세굴 추정치는 위의 세가지 시나리오로부터 계산 된 값중 최대 교각세굴심이 될 것이다. 말뚝캡에 의하여 일어난 교각세굴을 계산 할 때, 말뚝캡은 하상에 높여 있다고 가정하고 CSU식에서 미리 정의된 V_f 와 y_f 를 사용한다. 교각과 노출된 군말뚝에 대해서는 앞서 논의한 대로 CSU식을 사용한다.

다중교각(multiple columns)

흐름방향에 경사진 다중교각일 때(Figure 7의 a group of cylinder) 세굴심은 교각사이의 간격에 따라 다르다. 유입각에 대한 보정계수는 단일 교각인 경우보다 작을 것이다. 얼마나 작을지는 연구가 미흡하다. 교각간격이 교각직경의 5배 이하인 다중교각에 대하여 CSU공식을 적용하려면, 교각폭 'a'는 유입각에 직각으로 투영한 교각이 투영된 총 폭이다.

예를 들면, 교각 간격이 10ft이고 직경 24in인 원형교각 3개는 유입각의 크기에 따라 2ft와 6ft 사이의 'a' 값을 취할 것이다.

이 복합교각은 교각세굴심을 구하는 식(21)에서 사용된다. 보정계수 K_1 은 교각형상에 상관없이 1.0이고, 유입각의 효과는 흐름방향에 직각인 교각의 투영단면적에 반영되었으므로 $K_2=1.0$ 이다. 다중교각의 세굴심은 교각사이에 걸린 유목을 고려하지 않으면 이 방법으로 분석된다. 유목을 고려한다면 다중교각과 유목을 일체의 교각으로 생각하는 것이 당연하다. Table 5의 K_2 를 정할 때는 적절한 L/a 의 값을 유입각을 취한다.

교각에 걸린 유목으로 인한 세굴

교각에 걸린 유목도 교각의 국부세굴을 증가시킨다. 이것은 교각폭이 커지는 효과가 있어서 유속이 증가되고 하향성분 유속이 더 커진다. 이것은 세굴공으로부터 유출유사량을 증가시킨다. 유목이 교각에 걸렸을 때 세굴심은 교각폭이 실제폭보다 더 크다고 가정하여 추정한다. 문제는 사용될 교각폭의 증가량을 구하는 것이다. 여기에 대한 연구는 거의 없는 실정이므로 추후 실험적인 연구가 필요하다.

세굴공의 폭

비점착성인 하상물질에서 교각이나 푸팅의 한쪽편으로 잭, 세굴공의 상부폭은 다음 식으로 추정될 수 있다.

$$W = y_s(K + \cot \theta) \quad (23)$$

여기서,

W : 교각이나 푸팅의 한쪽편으로 잭 세굴공의 상부폭, ft

y_s : 세굴심, ft

K : 세굴심의 분수크기로 나타낸 세굴공의 바닥폭

θ : 하상물질의 안식각으로 $30^\circ \sim 44^\circ$ 의 범위를 가진다.

세굴공의 바닥폭이 세굴심 y_s 와 같으면($K=1$), 비점착성 모래에서 상부폭은 $2.07\sim2.80 y_s$ 이다. $K=0$ 으로 극한상태일 때는 상부폭이 $1.07\sim1.08 y_s$ 이다.

이와 같이 상부폭은 $1.0\sim2.8 y_s$ 의 범위에 있고 세굴공의 바닥폭과 하상물질의 구성에 따라 달라질 것이다. 일반적으로 세굴공이 깊으면 깊을 수록 바닥폭은 더 작아진다. 실제 적용에는 상부폭으로 $2.8 y_s$ 를 제안한다.

4.3.6 총세굴심의 도시(圖示)와 평가

총세굴심의 도시

교량횡단부의 하도와 홍수터의 횡단면에 장기적 하상고변동, 수축세굴 및 교각의 국부세굴의 추정치를 도시한다. 세굴심을 쉽게 평가할 수 있도록 왜곡축척을 사용한다. 합리적으로 발생이 예상되는 평면형상 변화(사행이동 등으로 인한 횡방향 하도 이동)를 스케치한다.

1. 장기적 하상고 변동은 하상상승이나 저하일 수 있다.
2. 다음에 수축세굴은 장기적 하상상승이나 저하선으로부터 아래로 도시된다.
3. 다음에 국부세굴은 수축세굴선으로부터 아래로 도시한다.
4. 각각의 교각에 대하여 세굴심뿐만 아니라 세굴공의 폭을 도시한다. 교각의 양쪽으로 세굴공 폭은 $2.8 y_s$ 를 사용한다.

총세굴심의 평가

1. 세굴심의 계산치가 설계기술자의 경험과 공학적 판단으로 미루어 볼 때 합리적인지 상반되는 것은 없는지 평가하여, 공학적으로 무리가 없도록 수정한다.
2. 교각의 국부세굴공이 교각사이에 중복이 발생하지 않는지 검토한다. 만일 일부 중복이 발생한다면 국부세굴심이 더 커질수 있다. 교량을 신설하거나 교체할 때는 개구부의 길이는 재검토되어야 하며, 세굴공의 중복을 피하기 위하여 필요한 만큼 개구부는 확장하고 교각 수는 줄여야 한다.
3. 하천의 횡방향이동, 하천유량도, 유속 및 유량분포, 유심선의 이동, 유향의 변동, 하도 변화와 같은 요소들에 대하여 검토한다.
4. 세굴심의 계산치가 실험조건과 비교하여 현장조건에서 너무 깊게 나오지는 않는지 검토한다.
5. 건설비, 안전성과 아울러 유목의 영향도 검토한다.
6. 교량기초설계에서는 기초바닥표고가 3장에서 구한 총세굴심 이하로 되어야 한다.

교량설계의 재검토

이상의 세굴계산치와 검토를 근거로하여 교량설계를 재검토하여 필요한 경우에는 설계를 수정한다. 재검토시에는 다음 사항을 고려하여야 한다.

1. 수로단면적이 충분히 넓은가(즉, 수축세굴이 너무 크지 않은지)?
2. 교각간격이 너무 좁지 않은가(즉, 세굴공이 중복되지 않은지)? 교각의 양측으로 세굴공의 상부폭은 세굴심의 약 2.8배이다. 세굴공이 중복되면, 국부세굴심은 더 깊어질 수 있다.

3. 보조 안전교량이 필요한가? 보조안전교량이나 본교량이 더 길어져야 하는가?
4. 교대의 위치가 하도와 홍수터에 관하여 적절한가?
5. 하천의 교량횡단위치와 홍수터가 적절한 위치에 있는가?
6. 수리학적 계산결과 기초설계에 필요한 적절한 자료를 제공해 주고 있는가?
 - a. 흐름 양상이 복잡한가?
 - b. 수리해석상 2차원 수면 계산모형이 사용되어야 하는가?
 - c. 기초설계는 안전하고 경제성이 있는가?
 - d. 물리적 모형 연구가 필요한가/ 정당한가?

4.4 세굴계산예

4.4.1 일반사항 <Figure 9>

교량길이 : 650 ft

좌측교대 : 저수로 호안에서 200 ft 후퇴지점

우측교대 : 저수로 호안과 일치

교량상판 높이 : 22 ft

거더높이 : 4 ft

교각수 : 6개

교각형상 : 전면반원형 교각(round-nose pier)

교각폭 : 5 ft

교각길이 : 40 ft

교각방향 : 흐름방향과 일치

100년 빈도 홍수 : 30,000 cfs ($= Q_{100}$)

500년 빈도 홍수 : 51,000 cfs ($= Q_{500} = 1.7 \times Q_{100}$)

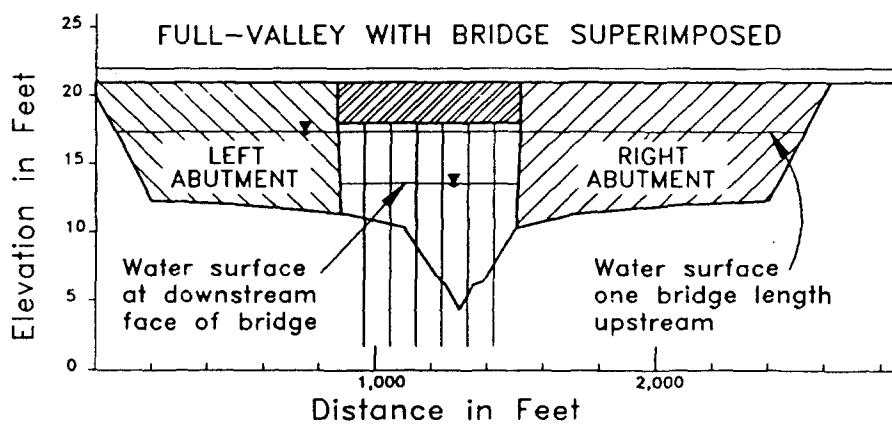


Figure 9. Cross section of proposed bridge

4.4.2 단계 1 : 세굴분석변수의 결정

하천의 1, 2단계 분석결과(2.3절) :

- 하천은 비교적 넓은 홍수터가 존재한다.
- 홍수터는 초목과 나무가 잘 자라있다.
- 수로의 흔적이 있는 것으로 보아 하도의 횡방향 이동가능성이 있다.
- 교량횡단 지점은 비교적 직선하도구간에 위치하고 있다.
- 하도의 기하학적형상은 교량횡단지점의 상하류로 약 1,000ft 정도가 비교적 같다.
- 하상물질과 홍수터 물질의 D_{50} 은 약 2mm이다.
- 하상물질의 최대입경은 약 8mm이다.
- 하천과 횡단지점은 농업과 산림지역인 농촌지역에 위치해 있다.
- 교량횡단지점으로부터 상·하류로 대략 3,000ft 지점의 하상에 암반층 노출
- 교량지점에서 암반층은 하상보다 대략 150ft 밑에 있다.
- 모래 하상이기 때문에 보호층현상은 일어나지 않을 것이다.
- 갈수시에 하도는 1~1.5ft 높이의 사구가 형성된다.
- Q_5 보다 큰 홍수때는 평탄하상이나 역사구 하상으로 될 것이다.

수리특성

수리특성치는 WSPRO를 이용하여 계산한다.

- | | |
|-------|--|
| WSPRO | ▷ EXIT : 교량의 하류지점 계산 프로그램 |
| | ▷ FULLV : 건설전 교량지점에서 홍수시 계산 프로그램 |
| | ▷ APPR : 교량으로부터 교량길이 만큼 상류에 있는 접근수로 단면 계산 프로그램 |
| | ▷ BRDG : 교량건설후 교량지점에서 홍수시 계산 프로그램 |

예제에 사용된 수치는 부록에 있는 WSPRO의 출력치로 주어진다. 세굴분석변수에 대한 특정치는 각 계산마다 별도로 주어지며 WSPRO 출력치의 선번호(line number)와 관련된다. 교량구간과 접근수로구간은 동일한 20개 통수능구간으로 나누어 번호가 부여되어 있다<Figure 10과 11>.

Figure 12는 접근수로구간과 교량지점에서 각각의 통수구간의 유속과 수축흐름을 나타낸다.

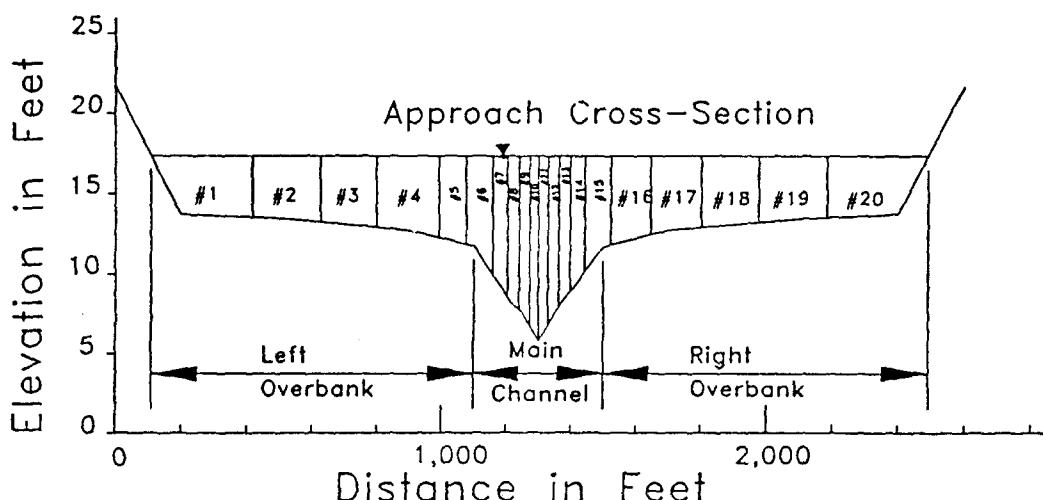


Figure 10. Equal conveyance tubes of approach section

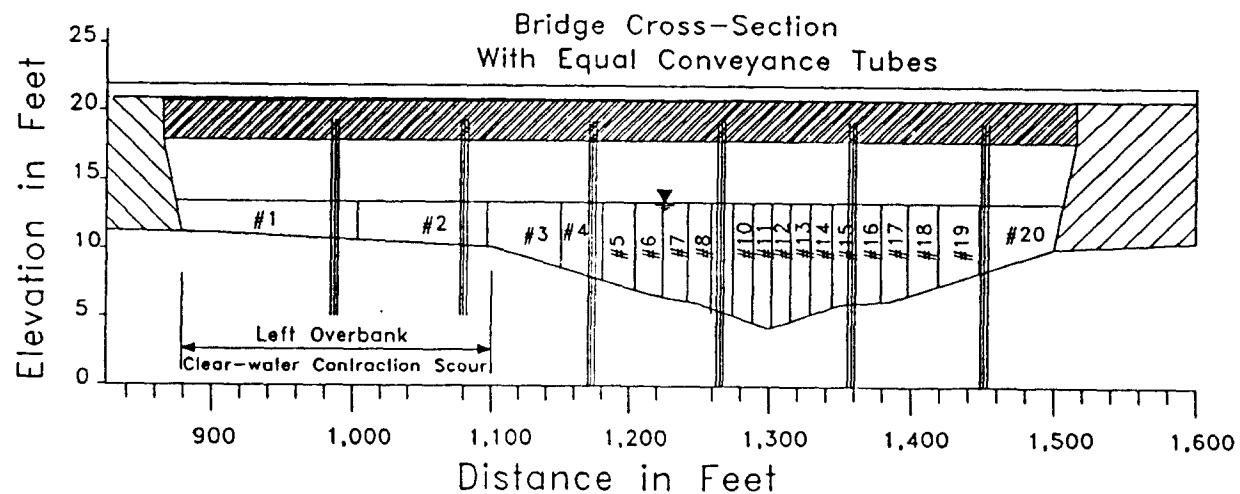


Figure 11. Equal conveyance tubes of bridge section

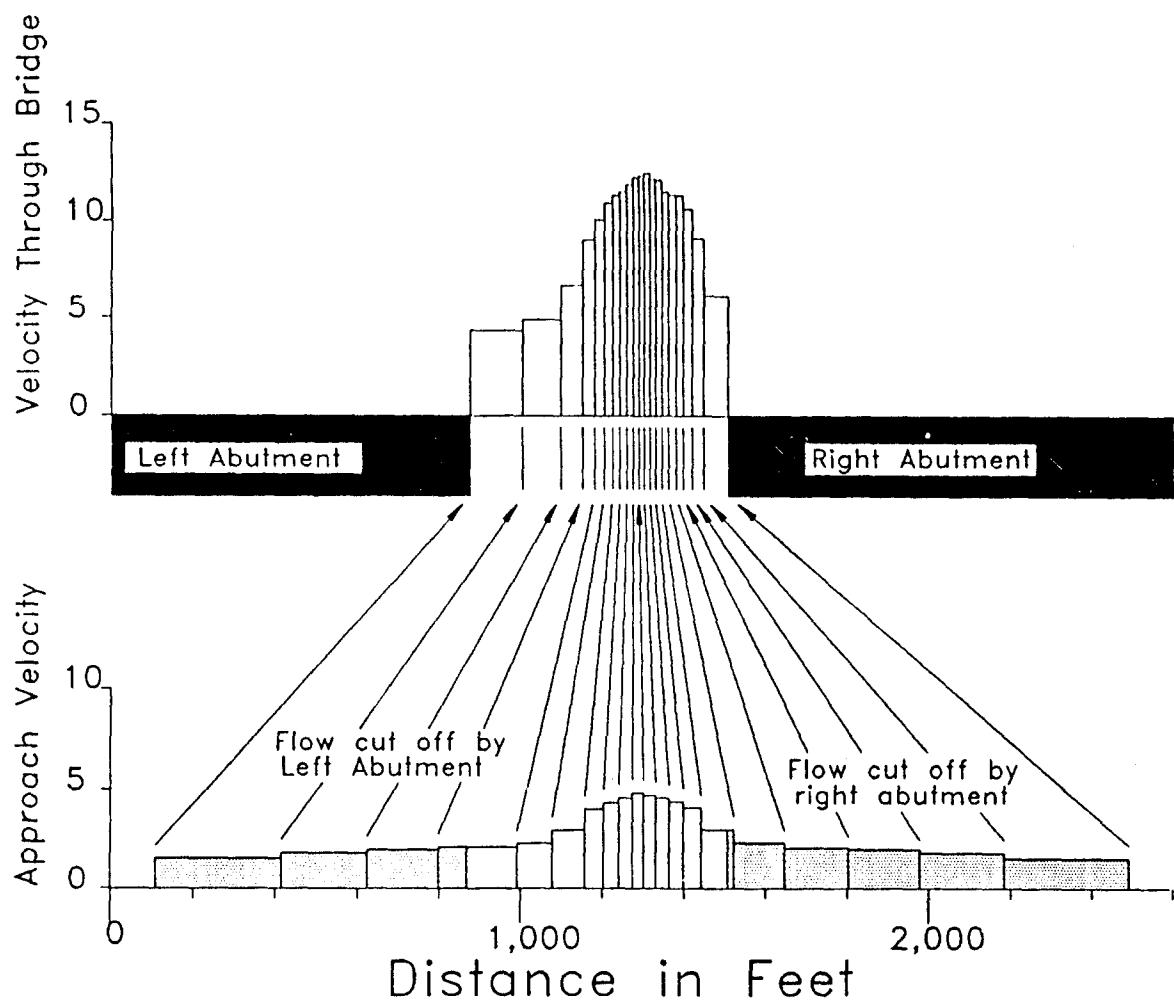


Figure 12. Plan view of equal conveyance tubes showing velocity distribution at approach and bridge section

Table 6~8은 수축세굴과 국부세굴을 계산하는데 필요한 변수값이다.

Table 6. Hydraulic variables from WSPRO for estimation of live-bed contraction scour

		Remarks
Q (cfs)	30,000	Total discharge input to WSPRO, line 11
K_f (Approach)	680,989	Conveyance of main channel of approach. Read directly from WSPRO, line 295, SA#2
K_{total} (Approach)	1,414,915	Total conveyance of approach section. Read directly from WSPRO, line 297
W_1 (Approach) (ft)	400	Taken as the top width of flow (TOPW) for this case. Assumed to represent active live bed width of approach. Read directly from WSPRO, line 295, SA#2
A_c (Approach) (ft^2)	3,467	Main channel area of approach section. Read directly from WSPRO, line 295, SA#2
TOPW (Approach) (ft)	400	Top width of main channel of approach section. Read directly from WSPRO, line 295, SA#2
WETP (Approach) (ft)	400	Wetted perimeter of main channel of approach section. Read directly from WSPRO, line 295, SA#2.
K_b (Bridge)	392,654	Conveyance of main channel through bridge. Read directly from WSPRO, line 244, SA#2
K_{total} (Bridge)	433,451	Total conveyance through bridge. Read directly from WSPRO, line 245
W_2 (Bridge) (ft)	380	Difference between subarea break points defining channel banks at the bridge. Read directly from WSPRO, line 93, less pier widths (20 ft.)
S_f (ft/ft)	0.002	Average unconstricted energy slope. Defined as the head loss (HF) listed on lines 318 or 322 of the WSPRO output divided by the distance between cross sections listed on lines 316, 319, and 323.

Table 8은 교각세굴을 추정하는데(단계 5) 사용될 수리학적 변수이다. 이러한 변수는 WSPRO 출력치에서 얻어진 속도분포도(Figure 13)로부터 정해진다.

4.4.3 단계 2 : 장기적인 하상고의 변동분석

별도로 취득한 수위-유량도와 횡단면자료들을 검토한 결과 하상상승이나 저하가 진행되고 있는 않다는 것을 보여 주었다. 또한 교량의 상하류에 암반이 노출되어 있다는 것은 이 구간에서 하상경사를 통제하는 역할을 한다. 이런 점으로 미루어 볼 때, 현재 하도는 연직방향으로는 비교적 안정적이다. 유역내의 국지적 토지 이용에 변화를 줄 계획이 없고 하상골재 채취가 금지되어 있다. 이렇게 볼 때 상류로부터 유사이송량의 변화로 인한 장래 하상상승이나 저하는 극소가 될 것이다.

Table 7. Hydraulic variables from WSPRO for estimation of clear-water contraction scour on left overbank

		Remarks
Q (cfs)	30,000	Total discharge input to WSPRO, line 11
Q_{chan} (Bridge) (cfs)	27,176.4	Flow in main channel at bridge. Determined in live-bed computation of Step 5A
Q_2 (Bridge) (cfs)	2,823.6	Flow in left overbank through bridge. Determined by subtracting Q_{chan} from total discharge through bridge, or by multiplying total discharge by K_1/K_{total} (line 243, SA#1) for left overbank through bridge
D_{50} (Bridge Overbank) (ft)	0.0066	Median grain size of left overbank area. Note conversion from mm to feet
$W_{setback}$ (Bridge)(ft)	211	Distance from left bank to toe of left abutment less pier width. Determine by subtracting XLAB on line 335 and total pier width from left bank station on line 137
A_{left} (Approach) (ft^2)	4,049	Area of left overbank at approach. From WSPRO, line 294, SA #1
$TOPW_{left}$ (Approach) (ft)	992	Topwidth of left overbank at approach. From WSPRO, line 294, SA #1

Table 8. Hydraulic variables from WSPRO for estimation of pier scour

		Remarks
Area (ft^2)	120.7	Read directly from WSPRO output
V_1 (fps)	12.43	Velocity in conveyance tube #12. Read directly from WSPRO output, line 224
Topwidth (ft)	13.1	Difference between left and right end stations of equal conveyance tube. Read from WSPRO output, line 222
Y_1 (ft)	9.21	Mean depth of Tube #12, computed as area divided by topwidth of conveyance tube

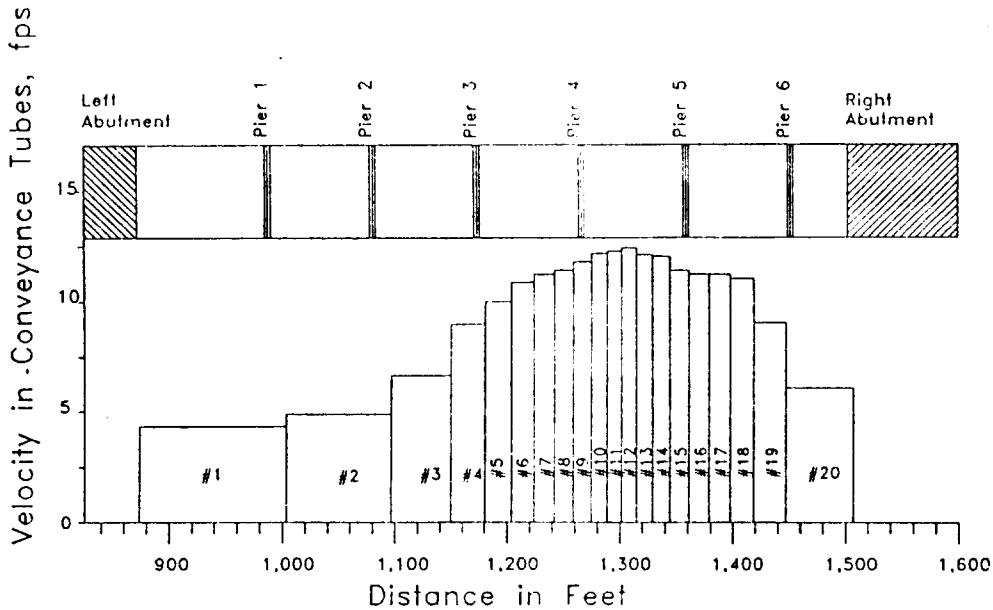


Figure 13. Velocity distribution at bridge crossing

이상의 분석결과로부터 교량지점에서 하도는 연직방향으로 비교적 안정하고 장기적인 하상상승이나 저하의 가능성은 극소일 것이라는 결론을 얻었다. 그렇지만, 하도는 횡방향으로 불안정하다는 증거가 있다. 이 점은 총세굴을 평가할 때 고려할 필요성이 있다.

4.4.4 세굴분석법의 평가

이 문제에서 세굴성분은 독립적으로 발달할 것이라고 가정한다(Method 1). 그러므로 수축세굴과 국부세굴은 WSPRO모형에서 얻어진 수리 특성치를 사용하여 계산된다. 고정상 기하학적 형상은 수정되지 않는다. 그러나 경우에 따라서는 수축세굴이 클 때(대략 5ft 이상 일 때), 교량개구부의 국부유속은 수축세굴결과 상당히 감소 될 수 있다. 이 때에는 수축세굴을 반영하여 고정상 수리모형이 수정 될 수 있으며 교량 개구부의 수리 특성은 WSPRO를 이용하여 다시 계산 될 수 있다. 수축계산을 한 후에 국부세굴을 계산한다. 보통은 이 방법(Method 2)이 필요하지 않다.

4.4.5 단계 4A :

주하도의 수축세굴은 이동상이라는 것이 결정되었다. 다음 계산은 하상물질 이송유형과 계수 k_1 을 결정한다. 계산에 필요한 모든 수리 변수값은 Table 6에 주어져 있다. 하상물질의 D_{50} 에 대한 한계 유속은 Neill식으로 구하였으며, 이 경우에 실제 유속과 비교해 볼 때 흐름은 이동상이 될 것이다.

접근수로의 동수반경 R :

$$R = \frac{A_c}{WETP} = \frac{3467 \text{ ft}^2}{400 \text{ ft}} = 8.67 \text{ ft} \quad (24)$$

하상의 평균전단응력 τ :

$$\begin{aligned}\tau &= \gamma R S = (62.4 \text{ lb/ft}^3)(8.67 \text{ ft})(0.002) \\ &= 1.08 \text{ lb/ft}^2\end{aligned}\quad (25)$$

접근수로의 전단속도 V_* :

$$V_* = (\tau/\rho)^{0.5} = (1.08/1.94)^{0.5} = 0.75 \text{ ft/s} \quad (26)$$

하상물질의 $D_{50} = 2.0 \text{ mm} = 0.0066 \text{ ft}$

침강속도, $w = 0.9 \text{ ft/s}$ (Figure 3으로 부터)

그러므로

$$\frac{V_*}{w} = \frac{0.75}{0.9} = 0.83 \quad (27)$$

이상에서 $k_1=0.64$ 인 것을 알 수 있으며, 하상물질 이송유형은 부유사와 소류사가 혼합된 상태라는 것을 의미한다.

접근수로 단면의 주하도의 유량(Q_1)은 접근수로단면의 총통수능의 비로부터 구해진다 :

$$Q_1 = Q(K_1/K_{total}) = 30,000 \text{ cfs} \left(\frac{680,989}{1,414,915} \right) = 14,439 \text{ cfs} \quad (28)$$

마찬가지로, 교량에서 주하도의 유량(Q_2)도 교량단면에 대한 통수능의 비로부터 결정한다 :

$$Q_2 = Q(K_2/K_{total}) = 30,000 \text{ cfs} \left(\frac{392,654}{433,451} \right) = 27,176 \text{ cfs} \quad (29)$$

평균수심, y_1 은 접근수로단면의 주하도의 동수반경과 같다 :

$$y_1 = \frac{3,467 \text{ ft}^2}{400 \text{ ft}} = 8.67 \text{ ft}$$

Laursen의 이동상식을 이용하여 세굴심을 구한다.

즉,

$$\frac{y_2}{y_1} = \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^{6/7} \left[\frac{W_1}{W_2} \right]^{k_1} \quad (30)$$

$$\frac{y_2}{8.67} = \left[\frac{27,176}{14,439} \right]^{6/7} \left[\frac{400}{380} \right]^{0.64} = 1.78 \quad (31)$$

$$\therefore y_2 = 1.78 \times 8.67 \text{ ft} = 15.4 \text{ ft} \quad (32)$$

주하도의 수축세굴심, y_s 는 :

$$y_s = y_2 - y_1 = 15.4 \text{ ft} - 8.67 \text{ ft} = 6.7 \text{ ft} \quad (33)$$

위에서 구한 수축세굴심은 크기 때문에 보조안전교량을 설치하여 교량개구부를 확장함으로써 세굴심을 최소화 시킬 수 있을 것이다(Method 2의 적용가능성). 그러나 여기서는 위의 수축세굴심을 수용하고 계속되는 국부세굴심의 계산을 설명하고자 한다.

4.4.6 좌측 홍수터의 수축 세굴계산

좌측교대와 교량개구부의 좌측저수로 호안사이의 홍수터에서는 정지상수축세굴이 발생할 것이다. 홍수터의 하상물질은 흙이지만, 식생으로 피복되어 있기 때문에 홍수터의 상류로부터 후퇴부교량개구부(set-back bridge opening)로 하상물질 이송이 없을 것이다(정지상 세굴조건).

계산에 필요한 수리 변수값은 WSPRO에서 구해지며 Table 7에 주어져 있다.

정지상 수축세굴심의 계산 (식(18)):

교량의 수축단면의 수심, y_2

$$\begin{aligned} y_2 &= \left[\frac{Q^2}{(120 D_m^{2/3} W_{setback}^2)} \right]^{3/7} \\ &= \left[\frac{(2823.6 \text{ cfs})^2}{(120)(0.0083 \text{ ft})^{2/3}(211 \text{ ft})^2} \right]^{3/7} \\ &= 4.67 \text{ ft} \end{aligned} \quad (34)$$

좌측홍수터 접근수로 단면의 수심, y_1 :

$$y_1 = \frac{A}{\text{TOPW}} = \frac{(4049 \text{ ft}^2)}{(992 \text{ ft})} = 4.08 \text{ ft} \quad (35)$$

따라서, 교량개구부의 좌측홍수터의 정지상세굴심, y_s

$$y_s = y_2 - y_1 = 4.67 \text{ ft} - 4.08 \text{ ft} = 0.59 \text{ ft} \quad (36)$$

4.4.7 단계 5: 교각 국부세굴심의 계산

교각은 WSPRO모형에서 얻어진 최대수심과 유속에(Table 8) 따라 변동될 가능성이 많다는 것이 예견된다. 그러므로 교각세굴은 하나에 대해서만 계산을 수행하고 나머지 교각에도 똑같이 적용하는 것으로 가정한다. 이 가정은 유심선이 이동하기 쉽고 하도의 횡방향 이동 가능성이 있기 때문에 적당하다.

교각세굴계산

교각세굴의 계산대상이 되는 푸르드수(F_r)는 동일 통수능 구간번호, 12의 수리특성치에 대한 것이다.

$$\begin{aligned} F_{r1} &= \frac{V}{(g y_1)^{0.5}} = \frac{12.43 \text{ fps}}{[(32.2 \text{ ft/s}^2)(9.21 \text{ ft})]^{0.5}} \\ &= 0.72 \end{aligned} \quad (37)$$

흐름방향이 교각방향과 같으므로

$$K_1 = K_2 = 1.0 \quad (38)$$

평탄하상일 때

$$K_3 = 1.1 \quad (39)$$

CSU식 (20)으로부터

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left[\frac{a}{y_1} \right]^{0.65} F_{r1}^{0.43} \quad (40)$$

$$\frac{y_s}{9.21} = 2.0(1.0)(1.0)(1.1) \left[\frac{5\text{ft}}{9.21\text{ft}} \right]^{0.65} (0.72)^{0.43}$$

$$= 1.28$$
(41)

$$\therefore y_s = 1.28 \times 9.21 \text{ ft} = 11.8 \text{ ft}$$

유입각에 대한 보정

위의 계산은 교각이 흐름방향과 일치한다고 가정하였다(유입각 < 5°). 그러나 교각이 5° 이상 경사각을 가졌다면 y_s/y_1 는 K_2 를 사용하여 조정이 이루어져야 한다.

10°의 경사각을 가정하면,

$$\frac{L}{a} = \frac{40\text{ft}}{5\text{ft}} = 8$$
(42)

Table 5에서 $L/a=8$ 과 경사각 10°일 때 $K_2=1.67$ 을 얻는다.

$$\frac{y_s}{9.21\text{ft}} = 1.67 \times 1.28 = 2.14$$
(43)

따라서,

$$y_s = 2.14 \times 9.21 \text{ ft} = 19.7 \text{ ft}$$

4.4.8 단계 6 : 총세굴심의 도시와 평가

최종단계로 교량횡단면상에 세굴심의 계산결과를 도시하고 신중하게 평가한다(Figure 14). 계산에 대하여 흐름방향과 일치한 교각세굴에 대해서만 도시하였다. 국부세굴공의 상부폭은 $2.8y_s$ 를 채택하였다.

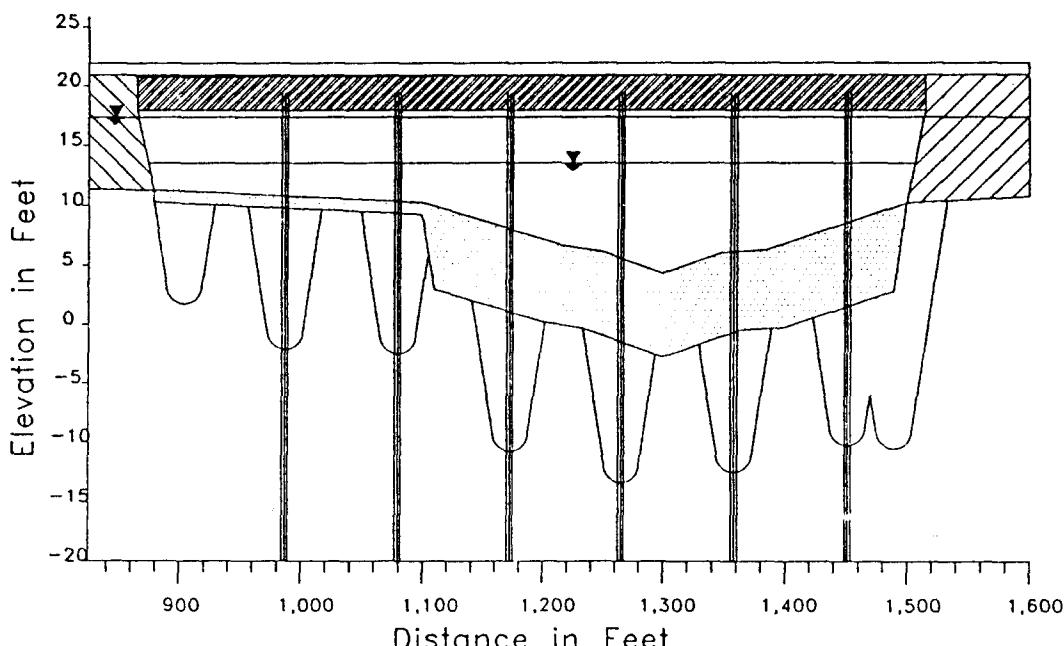


Figure 14. Plot of total scour for example problem

세굴계산결과의 평가는 신중히 하여야 한다. 본 예에서, 홍수터 교각의 총세굴심이 하도에서 보다는 작지만, 이것이 홍수터 교각의 기초를 좀더 높은 높이에 설치할 수 있다는 것을 뜻하지는 않는다. 하도와 유심선의 이동 가능성 때문에 모든 교각은 최대 총세굴에 대비하여 설치되어야 한다. 총세굴도는 또 여섯 번째 교각과 우측 교대 사이에 세굴공의 중복가능성이 있다는 것을 보여 준다. 하도의 횡방향 이동 가능성은 교각세굴에 역효과를 줄 것이다. 이것은 횡방향 이동이 교각과 흐름사이에 경사각을 만들기 때문이다. 이 문제는 원형교각을 사용하여 최소화 시킬 수 있다. 또 다른 대안은 교량 개구부를 통한 흐름에 일치시킬 수 있는 도류제(guide bank)를 설치하는 방안이 될 것이다.

4.4.9 일반 설계과정의 완료

계산예는 3장의 단계 1~6을 마쳤다. 계속해서 설계는 대홍수에 대한 안정성 검토를 하는 3장의 단계 7과 8까지 진행되어야 한다. 본 예에서는 이것은 제외되었다.

5. 기존 교각에 대한 세굴취약성 평가

5.1 서 론

세굴되기 쉬운 하천을 횡단하는 기존 교량은 홍수에 대한 취약성과 세굴에 대하여 취약한가 여부를 알기 위한 평가를 수행하여야 한다. 평가작업은 다음 사항에 대한 공학적 판단을 내릴 수 있는 전문적이고 경험있는 기술자로 구성된 다분야별 공동팀(interdisciplinary team)이 수행하여야 한다:

1. 교량 세굴평가를 내리기 위한 우선순위 결정
2. 실내와 현장에서 수행될 세굴평가의 범위
3. 교량이 세굴피해에 취약한가; 즉, 교량이 세굴한계교량(scour-critical bridge)인가.
4. 교량이 세굴에 덜 취약하도록 별도의 세굴방지대책을 적용할 것인가.
5. 해당 교량에 대하여 어떤 방법이 가장 적당하고 경제적인가.
6. 세굴방지대책을 설치하는 우선 순위
7. 세굴한계교량에 대한 조사자료수집(monitoring)과 검사계획(inspection schedule)
8. 교량을 보수하고 교체하거나 또는 적당한 장기대책이 마련될때까지 교량과 대중을 보호하기 위한 잠정적인 처리방안

5.2 평가과정

기존 교량의 세굴에 대한 취약성을 평가하기 위한 프로그램의 개발과 시행을 위하여 다음과 같은 과정을 추천한다.

단계 1. 수로위에 설치된 교량을 3가지 상태로 나눈다:

- (1) 위험도 낮음
- (2) 세굴이 일어나기 쉬움
- (3) 미확인 기초

세굴붕괴에 취약한 특정 교량은 즉각적으로 확인되어야 하며 관련된 세굴문제가 지적되어야 한다. 세굴이 일어나기 쉬운 취약한 교량은 [(2)형] 다음과 같은 교량이다.

- a. 현재 세굴이 진행중이거나 과거의 기록으로보아 과거 홍수기에 세굴이 문제가 되었던 교량
- b. 설계상 세굴에 취약성이 있는 침식성 하천위의 교량
- c. 활동성이 강한(aggressive) 수로위의 교량으로 다음과 같은 특성을 가진다.
 - 장기적인 하상상승이나 저하가 진행중
 - 하안 횡방향 이동이나 침식이 상당한 경우
 - 하상경사가 급하거나 유속이 빠른 경우
 - 교량부근의 하상골재채취 작업중
 - 홍수피해를 입은 도로와 교량의 기록이 있는 경우
- d. 다음과 같은 불리한 흐름특성이 있는 하천구간에 설치된 교량
 - 하천이 합류하는 지점 가까이에 있을 때
 - 하천의 만곡이 심한 곳에 있을 때
 - 충적선상지에 있을 때

단계 2. 다음 사항을 지침으로 삼아 사전 예비조사를 통하여 세굴이 일어나기 쉬운 교량과 미 확인 기초를 가진 교량의 우선순위를 정한다.

- a. 큰 홍수시에 교량의 붕괴나 피해를 입을 가능성
- b. 교량이 속한 도로의 기능상 분류와 교량붕괴시 이동하는 대중의 안전과 수송 시스템에 미치는 영향

단계 3. 단계 2에서 분류된 교량에 대하여 세굴에 대한 실내평가와 현장평가를 실시한다[이에 대해서는 FHWA(미 연방도로청)의 지침에 따른 별도의 작업이 필요함].

단계 4. 단계 2의 실내와 현장검토를 거쳐 세굴한계상태로 확인된 교량에 대하여 세굴문제를 해결할 다음과 같은 실행계획을 세운다.

- a. 교량이 교체되거나 세굴방지책이 설치될 수 있을 때까지 대중을 보호할 잠정적 실행계획으로 다음 항목들이 포함된다.
 - 사석공과 같은 임시적인 세굴방지대책을 적절하게 설치하는 것
 - 세굴방지대책이 설치될 때까지 홍수기의 세굴한계교량의 조사와 홍수후의 검사계획 및 필요하다면 교통의 차단계획
 - 위험정도에 따라 즉각적인 교량교체나 영구적 세굴방지책의 설치

5.3 세굴평가 작업의 시행

1. 세굴평가작업의 제 1단계는 수집된 자료의 실내검토를 통하여 하천의 안정성과 교량기초가 대홍수(Q_{500} 또는 $1.7 \times Q_{100}$)에 견디기에 적절한가를 평가하는 것이다.
2. 평가작업을 할 때는 규격용지(worksheets)를 사용하는 것이 현장검토와 실내검토를 할 때 일관성을 유지할 수 있고 검토결과를 서류작성하여 정리하는데(documenting) 좋을 것이다.
3. 수 많은 교량을 올바르게 평가할 수 있는 효율적인 과정을 개발하기 위하여 평가를 실시하

는 논리적인 작업순서를 세워둘 필요가 있다. 이 순서는 세굴이 분명히 문제가 되지 않는 교량을 골라내는데 이용될 것이다. 원래의 교량설계에 대한 적당한 수리학적 검토자료가 시행되어 보관되어 있는 곳에서는 이러한 자료를 이용하여 세굴추정을 확인하거나 재계산 할 수 있다. 수리학적 자료가 없는 곳에서는 세굴심을 다시 계산하여야 할 것이다. 그런 경우에는 “최악의 경우 분석법(worst-case analysis)”을 제안한다. 교량기초가 최악의 조건에 적당하다면 교량은 만족스럽다고 판단할 수 있다. 최악의 경우 분석법에서 세굴에 문제가 있다고 하면, 추가적인 현장분석과 실내분석 작업이 이루어 져야 한다.

5.4 최악의 경우 분석법

최악의 경우 분석법을 실시하는 지침은 다음과 같다.

5.4.1 수면고

교량에 따라서는 하천의 수면고에 관한 자료수집이 불가능할지도 모른다. 이 때에는 수문학적 면적, 집수면적, 홍수빈도와 추정오차를 사용하여 수심을 추정한다. 여기서 얻어진 수심-유량관계는 개략적인 세굴심을 추정하는데 이용될 수 있다.

5.4.2 장기적인 하상상승과 저하

대개 장기적인 종단하상변화는 평가하기 어려울 것이다. 중요한 정보는 교량조사자, 유지담당자 혹은 교량지점과 하천의 거동에 익숙한 사람들의 기록과 지식이다. 하상상승이나 하상저하가 문제라면, 대개는 그 지역에 그런 현상이 발생하는 어떤 조짐이 있을 것이다. 예를 들면, 상당한 기간에 걸쳐 교량조사자가 작성한 교량지점의 횡단면도는 하상고에 대한 장기적인 경향을 보여줄 것이다. 하천이 활동적이라고 알려져 있고 상당한 하상상승/하상저하 또는 횡방향 하도이동이 일어나고 있는 곳에서는 현장조사가 실시되어야 한다.

5.4.3 평면형상변동(planform change)

사행천의 이동위치, 섬의 형성, 전체적인 하천형상과 같은 평면적 변동의 중요성을 평가한다는 것은 보통 실내에서는 이루어 질 수 없다. 교량조사자와 교량관리자가 작성한 기록이나 사진은 초기 실내평가를 위하여 하천의 본성에 대한 어떤 통찰력을 줄 수 있다. 하천의 연도별 항공사진은 분석작업에 지극히 중요한 가치가 있다. 궁극적으로는 하천의 평면형상변동이 교량에 얼마나 위해를 줄 것인가에 관한 공학적 판단이 내려져야 한다.

5.4.4 수축세굴

하천의 주하도와 홍수터를 지나는 유량을 알고 있거나 추정할 수 있는 곳에서는 4장의 식을 이용하여 수축세굴을 계산할 수 있다. 최악의 경우 분석법은 홍수터위를 흐르는 합리적인 최대유량의 추정과 이에 따른 수축세굴의 계산을 내포하고 있다.

5.4.5 교각 국부세굴

4장의 방법을 이용하여 교각의 국부세굴을 구한다.

6. 세굴방지대책

6.1 서 론

세굴방지대책은 교량 건설후 교량이 세굴로 인한 피해나 붕괴에 취약하지 않도록 하는 조치이다.

6.1.1 신설교량

신설교량에 대해서는 세굴방지책이 3장과 4장에서 이미 언급되었다. 간단히 세굴피해를 최소화 하는 최선의 방법에는 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) 불리한 홍수흐름양상을 피할 수 있는 교량위치 선정
- (2) 흐름에 대한 장애를 최소로 하도록 교량요소의 유선형화
- (3) 세굴에 안전한 기초설계
- (4) 사석이나 기타 방지대책이 필요치 않도록 교량기초를 충분히 깊게 설치

6.1.2 기존 교량

기존 교량에 대해서 세굴로부터 교량을 보호할 수 있는 대안들을 대략적인 공사비의 순서로 나열하면 다음과 같다:

- (1) 세굴심을 조사하여, 과도할때는 교량 폐쇄
- (2) 교각에 사석을 설치하고 계속적인 현장조사
- (3) 도류제 설치
- (4) 하도개수공사
- (5) 교량기초의 강화
- (6) 낙차공 등의 설치
- (7) 보조 안전교량의 시공이나 기존교량의 길이확장

이러한 대안들은 안전한 수리공학적인 실현성을 감안하여 평가되어야 한다.

기존의 세굴한계교량을 보호하기 위한 실행계획을 세울때는 다음 절에서 논의되는 4가지 사항이 고려되어야 한다.

6.2 조사자료수집(monitoring), 감시 및 세굴한계교량의 폐쇄가능성

홍수기간과 홍수가 지난후에도 세굴한계교량의 자료를 수집하는데 특별한 관심을 기울여야 한다. 교량의 실행계획에는 교량을 폐쇄하는 시기에 관한 지침 등을 포함하여 교량감시자에게 특별 지시사항이 들어 있어야 한다.

실행계획 자료수집을 추진할 때 다음 항목들을 고려하여야 한다.

- (1) 교대와 교각에 대한 과거의 회전운동 또는 기초침하에 관한 자료

- (2) 계속적인 교량감시기간중에 얻어진 하천횡단면의 변동분석에 근거한 하상저하율, 상승률 또는 횡방향 이동량, 하천 평면형상의 스케치, 항공사진 등에 관한 자료
- (3) 홍수기와 그 이후에 하상고를 측정하는 절차와 장비
- (4) 교량 교통통제를 시행해야 하는 최대 허용세굴심, 홍수량, 수위에 대한 지침
- (5) 정상적인 유속과 수위 또는 유량보다 더 커서, 교량폐쇄가 가능한 과다세굴을 처리하는 보고절차
- (6) 교량에서 정확한 측정이 불가능한 깊은 하도에서 하상고의 확인에 관한 지침
- (7) 사석, 수제와 같은 기존의 방지대책을 검사하는 지침
- (8) 검사결과를 서류작성하는 양식 및 절차와 필요할 때 후속대책에 관한 지침
- (9) 세굴심 경고장치의 설치

6.3 임시대책

홍수기간중 교량의 조사자료 수집중에 세굴로 인한 붕괴가 임박한 상황이 일어날지 모른다. 그러나 교통량이나 대체 노선의 부족, 교량을 사용하는 긴급차량 등의 필요성 때문에 홍수기간중 교량을 폐쇄하는 것이 불리할 수도 있다. 사석공과 같은 임시적인 세굴대책을 세워서 급박한 폐쇄의 필요성을 완화시킬 수 있을 것이다. 홍수기간중의 조사자료 수집과 홍수후의 감시와 연계하여 교량에 설치된 임시대책은 교량을 폐쇄하지 않고 대중의 안전에 대비할 수 있을 것이다.

6.4 세굴대책의 시공순위계획 수립

공학적인 세굴평가 조사는 서로 다른 교량지점에 대한 세굴대책설치에 대한 우선순위와 시공순위가 마련될 수 있도록 세굴한계교량의 붕괴위험성을 지적하여야 한다. 어떤 경우에는 검사결과 교각의 확대기초가 부분적으로 세굴된 것이 밝혀진 곳과 같이 위험이 분명해 질 수 있다. 즉각적인 시공이 당연하다. 어떤 경우에는 즉각적인 시공필요성이 분명하지 않아서 그에 대한 신중한 상황판단이 내려져야 한다. 후자에 대한 예로는 하천의 사행성이 교대를 점차로 잠식해 가고 있는 경우이다. 사행의 이동률과 이것이 교대와 그 기초에 미치는 효과와 연계된 위험도에 따라 판단이 내려져야 한다.

6.5 세굴방지대책의 유형

세굴방지대책에 관한 설계절차와 특정지점에 이것을 적용하는 기준과 함께 일반적으로 사용되는 세굴방지대책에 관한 개략적인 사항이 다음에 제시되었다.

적절한 방지대책은 하천횡단지점의 상태에 대한 현장평가와 실내평가를 통하여 최선이 되도록 선정된다.

6.5.1 교각의 사석공

현재의 지식은 실험에서 수행된 연구결과에 기초를 두고 있으며 현장실측에 의한 검정은 거의 없는 실정이며, 특히 교각에 있어서는 더욱 그렇다. 교각주위의 흐름난류나 유속은 시간이 지나면 큰 돌이 이동할 만큼 충분한 크기를 가지고 있다. 난류와 빠른 유속으로 인하여 교각의 사석

이 이탈되어 교량이 붕괴된 일도 있었다. 이러한 것은 대개 한 번의 호우기간에 일어나지 않고 일련의 홍수의 결과로 발생한다. 그러므로 사석이 교각주위에 세굴방지용으로 놓여 진다면, 사석이 안정적인가를 확인하기 위하여 매 홍수마다 교량에 대한 조사자료수집과 감시가 이루어져야 한다.

교각의 사석크기 결정

사석은 기존교량에 대한 교각의 항구적인 세굴방지대책이 아니며 신설교량에 대해서 사용되는 것이 아니다.

사석의 직경(담수일 때 ft로 표시됨)을 구하기 위하여 Ishbash공식을 사용하여 사석의 크기, D_{50} 을 구한다.

$$D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{(S_s - 1)2g} \quad (44)$$

여기서,

D_{50} : 사석의 중앙입경, ft

K : 교각형상계수로 교각의 전면형상이 반원형일때는 $K=1.5$ 이고, 직사각형일때는 $K=1.7$ 이다.

V : 교각상의 유속, ft/s

S_s : 사석의 비중 (보통 2.65)

g : 중력가속도 ($=32.2 \text{ ft/s}^2$)

V 는 하도의 평균유속(Q/A)에 계수를 곱하여 구한다. 계수는 직선균일구간에서 제방에 가까운 교각일때의 0.9로부터 만곡부의 흐름중심부에 있는 교각일때의 1.7까지 범위를 가진다.

(1) 사석 포설폭은 교각면으로부터 수평방향으로 재어 적어도 교각폭의 2배이상 설치한다.

(2) 사석총의 상단은 하상고와 같은 높이에 둔다. 사석을 하상총속에 깊이 설치할수록 이탈할 가능성이 더욱 적어질 것이다. 사석총의 바닥을 하상면에 두는 것은 바람직하지 못하다. 사석공이 세굴조절용으로 사용되는 모든 경우에 교량은 홍수가 지난후에 조사자료가 수집되고 검사를 받아야 한다. 사석총의 상단이 하상고보다 낮아서 사석이 매립되는 것은 조사자가 사석의 일부 또는 전부가 이탈되었는지 여부를 파악하는데 어려움이 있으므로 불리하다는 점에 유의할 필요가 있다. 그러므로 사석총의 상단을 하상고와 같은 높이로 할 것을 권한다.

- a. 사석총의 두께는 사석직경(D_{50})의 3배 이상이어야 한다.
- b. 상황에 따라 사석을 여과천(filter cloth)이나 여과자갈총위에 설치한다. 그러나 입도분포가 잘 된 사석이 사용된다면 여과층이 꼭 필요한 것은 아니다.
- c. 사석의 최대크기는 D_{50} 의 2배 보다 더 커서는 안된다.

6.5.2 도류제(guide bank)

도류제의 설치목적은 홍수터위의 흐름이 교량의 주하도로 돌아가는데 막고러운 천이구간을

제공하는 것이다. 도류제는 또 상류에 있는 최대세굴지점을 이동시키는 작용을 하고 교량개구부를 통한 흐름을 정리해 주는 역할을 한다.

6.5.3 하천 개수공사

하천의 흐름을 안정시키고 조절하는 다양한 대책이 가능하다.

a. 하상이 상승하는 하천에 대한 대책:

- 상류의 수로를 수축하여 교량을 통하여 세굴이 일어나도록 하는 것
- 퇴사지로 사용될 상류댐의 건설
- 주기적인 하도 청소

b. 하상저하 하천에 대한 대책에는 낙차공의 설치와 기초의 보강 등이 있다.

c. 하천의 사행으로 인한 하천의 횡방향을 조절하는 대책에는 교량기초에 접근하는 유입각을 최소로 하고 적당한 수로를 따르도록 교량을 통한 흐름방향을 조절하기 위하여 하안을 따라 수제를 설치하는 방법이 있다.

6.5.4 구조적 세굴방지대책

구조적인 방법은 훨씬 더 많은 비용이 들어 가지만 대체로 사석공과 같은 방법보다 적극적인 세굴에 대한 보호대책이다.

6.5.5 낙차공의 설치

하상을 안정시키고 하상저하영향에 대처하기 위하여 교량에 낙차공을 설치할 수 있다.

6.5.6 보조안전교량의 설치나 교량의 길이를 확장하는 방법

매우 불안정한 제방이 있는 장소에서는 교량부근의 하도제방을 안정시키려고 시도하는 것보다 교량을 확장하는 것이 공사비면에서 효과적일 수 있다.

7. 세굴심 계측장치

세굴조사자료수집(scour monitoring)은 세굴에 대한 적당한 대책이라고 생각된다. 세굴조사자료수집은 세굴이 일어나고 있는 시간에 하상고를 구한다는 면에서 검사(inspection)와는 구별된다. 개념은 단순하지만 홍수기에 세굴조사자료수집은 깊은 수심, 빠른 유속, 턱도, 유목, 난류 및 얼음 때문에 제약을 많이 박는다.

과거의 측정기술은 케이블과 추를 이용하여 세굴공을 탐침하기 위하여 눈금이 새겨진 막대를 이용하는 것과 같은 기계적이고 수동적인 방법이었다. 최근에는 교량교각의 세굴을 측정하고 조사자료를 수집할 수 있도록 보다 새로운 기술과 과거기술을 접합하는 방법이 개발되고 있다.

다음은 교각세굴을 측정하고 조사자료수집용으로 현재 사용중이거나 장래에 이용가능한 가장 유망한 기술과 장비를 소개한다.

지구물리적장비

홍수후에 유속이 감소되어 토사가 세굴공에 재퇴적된다(되메움(infilling)이라고도 부른다). 이런 물질은 가끔 부근의 세굴되지 않은 물질과 다른 밀도를 가지므로 세굴된 실제범위는 밀도변화가 생기는 경계층을 결정함으로써 측정될 수 있다.

되메움이 발생한 후에 세굴을 측정하는데 이용될 수 있는 세가지 물리적도구는 다음과 같다.

- 지반침투레이다(ground penetrating radar)
- 조절변환기(tuned transducer)
- 색도측심기(color fathometer)

이 방법은 각각 장·단점을 가지고 있다. 그렇지만 이들을 올바르게 이용한다면 아주 짧은 시간동안에 의미있는 자료를 얻을 수 있다.

지반침투레이다(GPR)

GPR은 지상이나 비교적 얕은 수중(25ft 이하)에서 높은 해상도, 연속적인 지표하 종단도를 얻는데 이용된다. 이 장비는 80~800MHz 전자파를 지표하에 발신하고 신호가 지표하로 되돌아 가는 2개의 경로 소요시간(travel time)을 측정하고 신호가 수신기로 되돌아 가는 2개의 경로 소요시간을 측정한다.

전자에너지가 물리적 성질이 다른 두가지 물질사이의 경계층에 도달했을 때 에너지의 일부는 지표면으로 반사해서 돌아오고, 일부는 감쇠되어 더 깊은 층으로 전달된다. GPR의 침투깊이는 신호가 전달되고 신호의 주파수가 전달되는 물질의 전기적 성질에 따라 좌우된다.

GPR은 transmitter, receiver, high dencity taperecorder and player for storage of records와 antenna로 구성되어 있으며 가격은 대략 \$50,000이다.

조절변환기(tuned transducer)

조절변환기와 색도측심기는 둘 다 음파의 전송과 수신을 통하여 작동하는 지진시스템이다. 지진신호의 일부는 두 층사이의 음향임피던스(acoustical impedance)의 변화가 있을 때 반사되어 표면으로 돌아온다. 두가지 장비가 음향측심기(fathometer)와 구분되는 주요변수는 주파수이다. 조절변환기와 색도측심기는 해상도가 떨어지고 침투는 더 잘 이루어 지는 저주파 신호(20KHz)를 가지고 있다. 조절변환기의 가격은 대략 \$25,000이다.

색도측심기(color fathometer)

색도측심기는 반사된 신호를 수치화하는 변동주파수 지진시스템이다. 이 시스템은 데시발로 된 반사신호를 측정하여 색도변화에 일정한 데시발변화를 지정해 줌으로써 다른 경계층 사이를 구분한다. 반사된 신호에서 데시발의 변화는 밀도, 간극비와 중앙입경에 관계가 있으므로 지표하의 경계층을 확인하고 정의하는 것이 가능하다.

흑백측심기(black and white fathometer)

흑백측심기는 매우 연약한 뺨이외에는 하도침투가 불가능하더라도 이것은 여전히 하도바닥을

정의하는 우수한 도구로 생각된다. 그래픽레코더는 사용하기 쉽고 가격이 저렴하고 신속하게 정확한 하상단면을 제공해 준다. 그래픽 기능이 가능한 200KHz측심기의 가격은 대략 \$1,000이다.

음파측심기(sonic fathometer)

음파측심기는 세굴의 조사자료를 수집하기 위하여 교각이나 교대에 부착할 수 있다. 이 장비는 data logging과 telemetering capability 기능을 가지고 있다. 이 장비는 얼음, 유목이나 고농도의 연행공기를 가진 홍수에는 사용이 제한 되지만, 교각에서 세굴을 모니터하고 측정하기 위하여 음파측심기를 사용하는 것은 기술적으로 타당하고 다양한 교량에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

측심막대(sounding rod)

측심막대의 사용은 하상에 놓여 있는 막대가 세굴이 진행됨에 따라 연직으로 미끄러지게 되는 방법을 포함하고 있다. 막대는 본질적으로 세굴이 진행됨에 따라 연직방향으로만 이동하도록 제한되어 있다. 세굴심은 수동으로 채거나 data logging기술을 사용하여 챌 수 있다. 위에 설명한 측심막대는 세굴모니터링 장비로 사용될 수 있지만 예산 최대세굴심에 따라 제한을 받는다. 따라서 막대의 길이는 세굴진척에 따라 정확하게 추적할 정도의 길이가 요구된다.

매립이나 탑입막대 측정장치

이런 종류의 장비는 세굴이 일어날 것으로 예상되는 위치에서 하도속에 매립하거나 탑입된 연직지지대에 올려 놓여 있거나 부착될 수 있는 모든 측정장치를 말한다. 하도와 물의 경계를 감지함으로써 세굴진행을 모니터하거나 측정할 수 있다.

이런 종류의 측정장비로 세굴을 측정하기 위하여 여러 가지 기술이 이용될 수 있지만 대부분은 실험개발단계에 있다. 기술적인 사항으로는 온도와 전기 콘덕턴스, 미끄러지는 박판(sliding collar), 혹은 지지대의 외부에 올려 놓은 압전기 띠(piezo-electrical strip)나 텁스위치(tip switch)와 같은 감지기 등이 있다.

참고문헌

1. Hydraulic Engineering Circular No.18, (1993), "Evaluating scour at bridges, 2nd Ed.," FHWA -IP-90-017, FHWA, U.S. Department of Transportation.
2. Stevens, M.A., Gasser, M.M. and Saad, M.B.A.M., (1991), "Wake vortex scour at bridge piers," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.117, No.7
3. 도로교 표준시방서 (1992년 개정판) (1992), 건설부
4. Standard Specifications for Highway Bridges, 15th Ed., (1992), AASHTO
5. 最新橋梁設計・施工ハンドブック, (1990), 建設産業調査會(日本)
6. 하천시설기준, (1993), 건설부
7. 하천공사표준시방서, (1994), 건설부
8. 이정규, (1995), "세굴에 대비한 교량설계기준의 필요성," 한국수자원학회지, Vol.28, No.6
9. 여운광, (1995), "국내의 세굴에 의한 피해현황," 한국수자원학회지, Vol.28, No.6
10. 행주대교 가설공사 사고원인조사 및 대책기술용역 최종보고서, (1992. 12), 건설부 서울지방국토관리청

부 록 A

별개의 세굴분석법(Method 2)

이 방법은 3장의 단계 3에서 논의된 대로 수축세굴이 상당할 때 장점이 있다. 이것은 수축세굴과 국부세굴이 상호종속관계에 있다는 전제에 근거하고 있다. 이 방법 자체로 추정된 국부세굴은 수리적 변수의 예상변화량과 수축세굴로 인한 매개변수에 근거하여 결정된다.

상호작용을 통하여, 수축세굴과 하도수리량은 국부세굴이 계산되기 전에 평형에 이르게 된다. 이 방법에 대한 일반적인 접근법은 다음과 같다:

- 기존의 입지조건에 맞추어 고정상 조건에 대하여 자연하도의 수리량을 추정한다.
- 이 사용법의 절차와 어떠한 역사적 자료에 근거하여 예상되는 단면과 평면형상변동을 추정한다.
- 예상되는 단면과 평면형상에 근거하여 자연하도수리량을 조정한다.
- 시산할 교량개구부를 선정하고 교량수리량을 계산한다.
- 수축세굴을 추정한다.
- 수축세굴을 반영하기 위하여 자연하도수리량을 수정한 다음 다시 하도수리량을 수정한다. 수정된 하도수리량이나 하상고 변동에 상당한 변동이 일어나지 않을 때까지 반복과정을 되풀이 한다(상당한 변동은 유속, 수심 또는 하상고가 5% 이상일 때이다).
- 앞서 수정된 교량과 하도수리량과 수축세굴을 고려하여 얻은 매개변수를 사용하여 국부세굴을 계산한다.
- 총세굴심을 구하기 위하여 예측수축세굴심 아래 국부세굴심을 연장시킨다.

부 록 B

예제 세굴문제의 WSPRO 입력값과 출력값

WSPRO INPUT AND OUTPUT FOR EXAMPLE SCOUR PROBLEM

INPUT DATA FOR CHAPTER 4 EXAMPLE PROBLEM

```
1 T1      SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
2 T2      CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
3 T3      HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
4 *
5 Q      30000
6 SK      0.002
7 *
8 XS      EXIT 750 * * *.002
9 GR      0,19 100,15 200,11 500,10.75 900,10 1100,9.0 1215,5.5
10 GR     1250,4.9 1300,3.05 1350,4.85 1385,5.1 1500,9.0 1700,10
11 GR     2100,10.75 2400,11 2500,15 2600,19
12 N      0.042 0.032 0.042
13 SA      1100 1500
14 *
15 XS      FULLV 1400
16 *
17 BR      BRDG 1400
18 BL 1    650 1100 1500
19 BD      4 22
20 CD      3 50 2 22
21 AB      2
22 PW      5.65 30
23 N      0.042 0.032
24 SA      1100
25 *
26 AS      APPR 2100
27 *
28 HP 2 BRDG 13.82 * * 30000
29 *
30 HP 1 BRDG 13.54 1 13.54
31 *
32 HP 2 APPR 17.36 * * 30000
33 *
34 HP 1 APPR 17.36 1 17.36
35 *
36 EX
37 ER
```

OUTPUT

```
1 1
2 WSPRO      FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
3 P060188      MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
4
5     *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
6
7     T1      SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
8     T2      CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
9     T3      HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
10    *
11    Q      30000
12   *** Q-DATA FOR SEC-ID, ISEQ =           1
13   SK      0.002
14   *
15 1
16 WSPRO      FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
17 P060188      MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
18
19     SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
20     CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
21     HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
22     *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
23
24   *** START PROCESSING CROSS SECTION - "EXIT "
25   XS EXIT 750 * * *.002
26   GR      0,19 100,15 200,11 500,10.75 900,10 1100,9.0 1215,5.5
27   GR      1250,4.9 1300,3.05 1350,4.85 1385,5.1 1500,9.0 1700,10
28   GR      2100,10.75 2400,11 2500,15 2600,19
29   N      0.042 0.032 0.042
30   SA      1100 1500
31   *
32
33   *** FINISH PROCESSING CROSS SECTION - "EXIT "
34   *** CROSS SECTION "EXIT " WRITTEN TO DISK, RECORD NO. = 1
35
36   --- DATA SUMMARY FOR SECID "EXIT " AT SRD = 750. ERR-CODE = 0
37
38   SKEW    IHFNO    VSLOPE      EK      CK
39   .0      0.        .0020      .50      .00
40
41 X-Y COORDINATE PAIRS (NGP = 17):
42   X      Y      X      Y      X      Y      X      Y
43   .0    19.00    100.0    15.00    200.0    11.00    500.0    10.75
44   900.0    10.00    1100.0    9.00    1215.0    5.50    1250.0    4.90
45   1300.0    3.05    1350.0    4.85    1385.0    5.10    1500.0    9.00
46   1700.0    10.00    2100.0    10.75    2400.0    11.00    2500.0    15.00
47   2600.0    19.00
48
49 X-Y MAX-MIN POINTS:
50   XMIN    Y      X      YMIN      XMAX    Y      X      YMAX
51   .0    19.00    1300.0    3.05    2600.0    19.00    .0    19.00
52
53 SUBAREA BREAKPOINTS (NSA = 3):
54   1100. 1500.
55
56 ROUGHNESS COEFFICIENTS (NSA = 3):
57   .042  .032  .042
58 1
59 WSPRO      FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
60 P060188      MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
61
62     SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
63     CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
64     HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
65     *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
66
67   *** START PROCESSING CROSS SECTION - "FULLV"
68   XS FULLV 1400
69   *
70
71   *** FINISH PROCESSING CROSS SECTION - "FULLV"
```

72 *** NO ROUGHNESS DATA INPUT, WILL PROPAGATE FROM PREVIOUS CROSS SECTION.
 73 *** CROSS SECTION "FULLV" WRITTEN TO DISK, RECORD NO. = 2
 74
 75 --- DATA SUMMARY FOR SECID "FULLV" AT SRD = 1400. ERR-CODE = 0
 76
 77 SKEW IHFNO VSLOPE EK CK
 78 .0 0. .0020 .50 .00
 79
 80 X-Y COORDINATE PAIRS (NGP = 17):
 81 X Y X Y X Y X Y
 82 .0 20.30 100.0 16.30 200.0 12.30 500.0 12.05
 83 900.0 11.30 1100.0 10.30 1215.0 6.80 1250.0 6.20
 84 1300.0 4.35 1350.0 6.15 1385.0 6.40 1500.0 10.30
 85 1700.0 11.30 2100.0 12.05 2400.0 12.30 2500.0 16.30
 86 2600.0 20.30
 87
 88 X-Y MAX-MIN POINTS:
 89 XMIN Y X YMIN XMAX Y X YMAX
 90 .0 20.30 1300.0 4.35 2600.0 20.30 .0 20.30
 91
 92 SUBAREA BREAKPOINTS (NSA = 3):
 93 1100. 1500.
 94
 95 ROUGHNESS COEFFICIENTS (NSA = 3):
 96 .042 .032 .042
 97 1
 98 WSPRO FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
 99 P060188 MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
 100
 101 SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
 102 CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
 103 HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
 104 *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
 105
 106 *** START PROCESSING CROSS SECTION - "BRDG "
 107 BR BRDG 1400
 108 BL 1 650 1100 1500
 109 BD 4 22
 110 CD 3 50 2 22
 111 AB 2
 112 PW 5.65 30
 113 N 0.042 0.032
 114 SA 1100
 115 *
 116
 117 *** FINISH PROCESSING CROSS SECTION - "BRDG "
 118 *** CROSS SECTION "BRDG " WRITTEN TO DISK, RECORD NO. = 3
 119
 120 --- DATA SUMMARY FOR SECID "BRDG " AT SRD = 1400. ERR-CODE = 0
 121
 122 SKEW IHFNO VSLOPE EK CK
 123 .0 0. .0020 .50 .00
 124
 125 X-Y COORDINATE PAIRS (NGP = 13):
 126 X Y X Y X Y X Y
 127 865.4 18.00 878.7 11.34 900.0 11.30 1100.0 10.30
 128 1215.0 6.80 1250.0 6.20 1300.0 4.35 1350.0 6.15
 129 1385.0 6.40 1500.0 10.30 1500.0 10.30 1515.4 18.00
 130 865.4 18.00
 131
 132 X-Y MAX-MIN POINTS:
 133 XMIN Y X YMIN XMAX Y X YMAX
 134 865.4 18.00 1300.0 4.35 1515.4 18.00 865.4 18.00
 135
 136 SUBAREA BREAKPOINTS (NSA = 2):
 137 1100.
 138
 139 ROUGHNESS COEFFICIENTS (NSA = 2):
 140 .042 .032
 141
 142 BRIDGE PARAMETERS:
 143 BRTYPE BRWDTH LSEL USERCD EMBSS EMBELV ABSLPL ABSLPR
 144 3 50.0 18.00 ***** 2.00 22.00 2.00 *****

```

145
146 DESIGN DATA: BRLEN LOCOPT XCONLT XCONRT
147           650.0    1. 1100. 1500.
148
149          GIRDEP BDELEV BDSLP BDSTA
150           4.00 22.00 ***** *****
151
152 PIER DATA: NPW = 1 PPCD = 0.
153   PELV PWDTH     PELV PWDTH     PELV PWDTH     PELV PWDTH
154   5.65 30.0
155 1
156 WSPRO      FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
157 P060188     MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
158
159          SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
160          CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
161          HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
162          *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
163
164 *** START PROCESSING CROSS SECTION - "APPR "
165   AS APPR 2100
166   *
167   HP 2 BRDG 13.82 * * 30000
168
169 *** FINISH PROCESSING CROSS SECTION - "APPR "
170 *** NO ROUGHNESS DATA INPUT, WILL PROPAGATE FROM PREVIOUS CROSS SECTION.
171 *** CROSS SECTION "APPR " WRITTEN TO DISK, RECORD NO. = 4
172
173 --- DATA SUMMARY FOR SECID "APPR " AT SRD = 2100. ERR-CODE = 0
174
175   SKEW   IHFNO   VSLOPE      EK      CK
176   .0     0.     .0020       .50     .00
177
178 X-Y COORDINATE PAIRS (NGP = 17):
179   X      Y      X      Y      X      Y      X      Y
180   .0    21.70   100.0  17.70   200.0  13.70   500.0  13.45
181   900.0 12.70  1100.0 11.70  1215.0  8.20   1250.0  7.60
182   1300.0 5.75  1350.0 7.55  1385.0  7.80   1500.0 11.70
183   1700.0 12.70 2100.0 13.45  2400.0  13.70   2500.0 17.70
184   2600.0 21.70
185
186 X-Y MAX-MIN POINTS:
187   XMIN   Y      X      YMIN      XMAX   Y      X      YMAX
188   .0    21.70  1300.0  5.75   2600.0  21.70   .0    21.70
189
190 SUBAREA BREAKPOINTS (NSA = 3):
191   1100. 1500.
192
193 ROUGHNESS COEFFICIENTS (NSA = 3):
194   .042   .032   .042
195
196 BRIDGE PROJECTION DATA: XREFLT XREFRT FDSTLT FDSTRT
197           ***** ***** ***** *****
198 1
199 WSPRO      FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
200 P060188     MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
201
202          SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
203          CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
204          HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
205          *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
206
207
208
209 VELOCITY DISTRIBUTION: ISEQ = 3; SECID = BRDG ; SRD = 1400.
210
211   WSEL     LEW     REW     AREA      K      Q      VEL
212   13.82   873.8  1507.0  3286.9  470494.  30000.  9.13
213
214 X STA.     873.8   1003.3   1096.9   1150.0   1180.3   1203.9
215 A(I)        346.5    305.9    225.0    166.6    149.6
216 V(I)        4.33     4.90     6.67     9.00    10.03
217

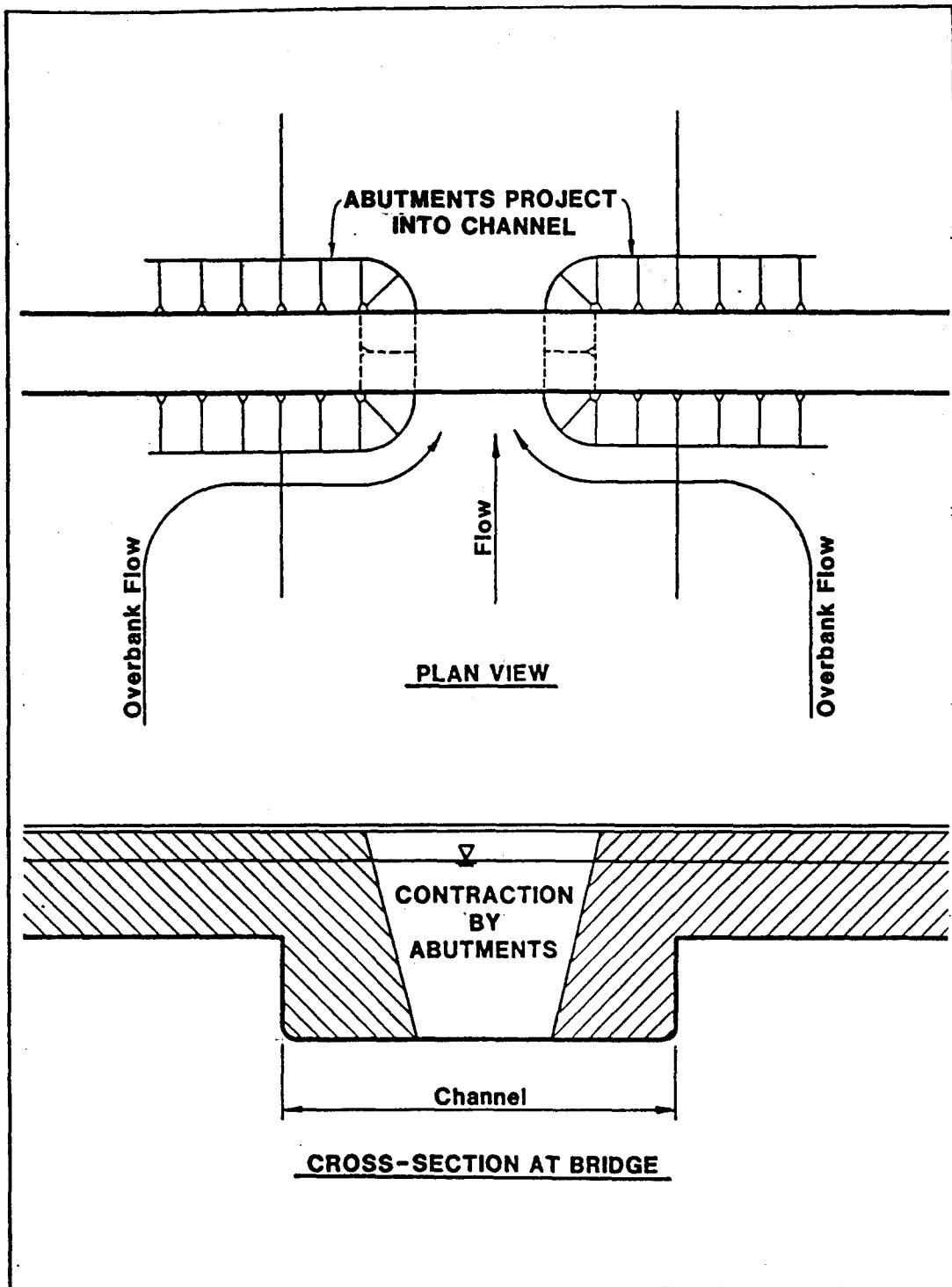
```

218 X STA. 1203.9 1223.7 1241.9 1259.0 1274.4 1288.4
 219 A(I) 137.8 133.3 131.0 126.9 123.1
 220 V(I) 10.89 11.26 11.45 11.82 12.18
 221
 222 X STA. 1288.4 1301.6 1314.7 1329.0 1344.3 1361.3
 223 A(I) 122.0 120.7 123.8 124.5 131.2
 224 V(I) 12.29 12.43 12.11 12.05 11.43
 225
 226 X STA. 1361.3 1379.0 1397.3 1418.7 1447.3 1507.0
 227 A(I) 133.2 133.3 141.9 165.3 245.2
 228 V(I) 11.26 11.25 10.57 9.07 6.12
 229 1
 230 *
 231 HP 1 BRDG 13.54 1 13.54
 232 1
 233 WSPRO FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
 234 P060188 MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
 235
 236 SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
 237 CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
 238 HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
 239 *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
 240 CROSS-SECTION PROPERTIES: ISEQ = 3; SECID = BRDG ; SRD = 1400.
 241
 242 WSEL SA# AREA K TOPW WETP ALPH LEW REW QCR
 243 1 600. 40797. 226. 226. 5553.
 244 2 2510. 392654. 406. 407. 35385.
 245 13.54 3110. 433451. 632. 634. 1.16 874. 1506. 36279.
 246 1
 247 *
 248 HP 2 APPR 17.36 * * 30000
 249 1
 250 WSPRO FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
 251 P060188 MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
 252
 253 SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
 254 CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
 255 HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
 256 *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
 257
 258
 259
 260 VELOCITY DISTRIBUTION: ISEQ = 4; SECID = APPR ; SRD = 2100.
 261
 262 WSEL LEW REW AREA K Q VEL
 263 17.36 108.5 2491.5 11565.0 1414915. 30000. 2.59
 264
 265 X STA. 108.5 416.1 623.7 798.5 951.8 1077.6
 266 A(I) 978.0 823.0 752.7 711.6 658.1
 267 V(I) 1.53 1.82 1.99 2.11 2.28
 268
 269 X STA. 1077.6 1158.1 1204.1 1241.5 1274.0 1301.7
 270 A(I) 506.1 373.9 346.5 327.0 309.8
 271 V(I) 2.96 4.01 4.33 4.59 4.84
 272
 273 X STA. 1301.7 1330.6 1363.3 1399.1 1443.3 1522.7
 274 A(I) 318.4 327.1 340.0 368.6 502.7
 275 V(I) 4.71 4.59 4.41 4.07 2.98
 276
 277 X STA. 1522.7 1646.7 1803.5 1977.8 2184.8 2491.5
 278 A(I) 649.2 727.8 749.9 820.2 974.5
 279 V(I) 2.31 2.06 2.00 1.83 1.54
 280 1
 281 *
 282 HP 1 APPR 17.36 1 17.36
 283 1
 284 WSPRO FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
 285 P060188 MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
 286
 287 SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
 288 CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
 289 HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
 290 *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08

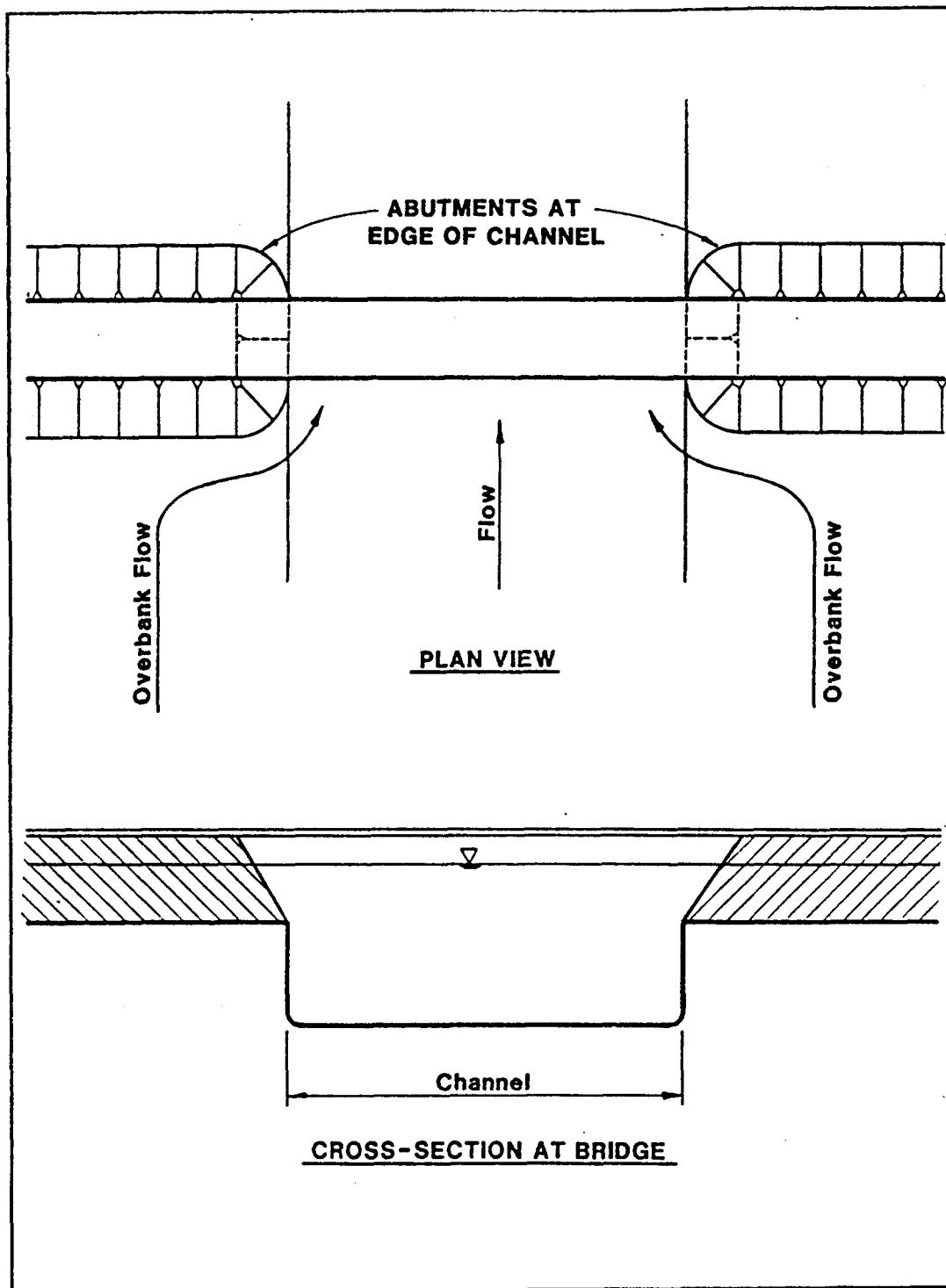
291 CROSS-SECTION PROPERTIES: ISEQ = 4; SECID = APPR ; SRD = 2100.
 292
 293 WSEL SA# AREA K TOPW WETP ALPH LEW REW QCR
 294 1 4049. 366963. 992. 992. 46430.
 295 2 3467. 680989. 400. 400. 57923.
 296 3 4049. 366963. 992. 992. 46430.
 297 17.36 11565. 1414915. 2383. 2383. 1.53 108. 2492. 117067.
 298 1
 299 *
 300 EX
 301
 302 +++ BEGINNING PROFILE CALCULATIONS -- 1
 303 1
 304 WSPRO FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - U. S. GEOLOGICAL SURVEY
 305 P060188 MODEL FOR WATER-SURFACE PROFILE COMPUTATIONS
 306
 307 SCOUR EXAMPLE #2 - HYPOTHETICAL EXAMPLE
 308 CONTRACTION, PIER, AND ABUTMENT SCOUR CALCULATIONS
 309 HEC-18 - EVALUATING SCOUR AT BRIDGES
 310 *** RUN DATE & TIME: 09-10-92 10:08
 311
 312 XSID:CODE SRDL LEW AREA VHD HF EGL CRWS Q WSEL
 313 SRD FLEN REW K ALPH HO ERR FR# VEL
 314
 315 EXIT :XS ***** 161. 6692. .57 ***** 13.14 11.86 30000. 12.57
 316 750. ***** 2439. 670723. 1.83 ***** ***** .62 4.48
 317
 318 FULLV:FV 650. 161. 6706. .57 1.30 14.44 ***** 30000. 13.88
 319 1400. 650. 2439. 672489. 1.83 .00 .01 .62 4.47
 320 <<<<THE ABOVE RESULTS REFLECT "NORMAL" (UNCONSTRICTED) FLOW>>>>
 321
 322 APPR :AS 700. 161. 6700. .57 1.39 15.84 ***** 30000. 15.27
 323 2100. 700. 2439. 671817. 1.83 .00 .00 .62 4.48
 324 <<<<THE ABOVE RESULTS REFLECT "NORMAL" (UNCONSTRICTED) FLOW>>>>
 325
 326 <<<<RESULTS REFLECTING THE CONSTRICTED FLOW FOLLOW>>>>
 327
 328 XSID:CODE SRDL LEW AREA VHD HF EGL CRWS Q WSEL
 329 SRD FLEN REW K ALPH HO ERR FR# VEL
 330
 331 BRDG :BR 650. 874. 3107. 2.69 2.01 16.23 13.27 30000. 13.54
 332 1400. 650. 1506. 432822. 1.86 1.07 .00 1.05 9.66
 333
 334 TYPE PPCD FLOW C P/A LSEL BLEN XLAB XRAB
 335 3. 0. 1. .734 .076 18.00 650. 879. 1500.
 336
 337 XSID:CODE SRDL LEW AREA VHD HF EGL CRWS Q WSEL
 338 SRD FLEN REW K ALPH HO ERR FR# VEL
 339
 340 APPR :AS 650. 108. 11574. .16 1.02 17.52 14.56 30000. 17.36
 341 2100. 697. 2492. 1416461. 1.52 .28 -.02 .26 2.59
 342
 343 M(G) M(K) KQ XLKQ XRKQ OTEL
 344 .722 .430 811434. 891. 1521. 17.08
 345
 346 <<<<END OF BRIDGE COMPUTATIONS>>>>
 347 ER
 348
 349 1 NORMAL END OF WSPRO EXECUTION.

부 록 C

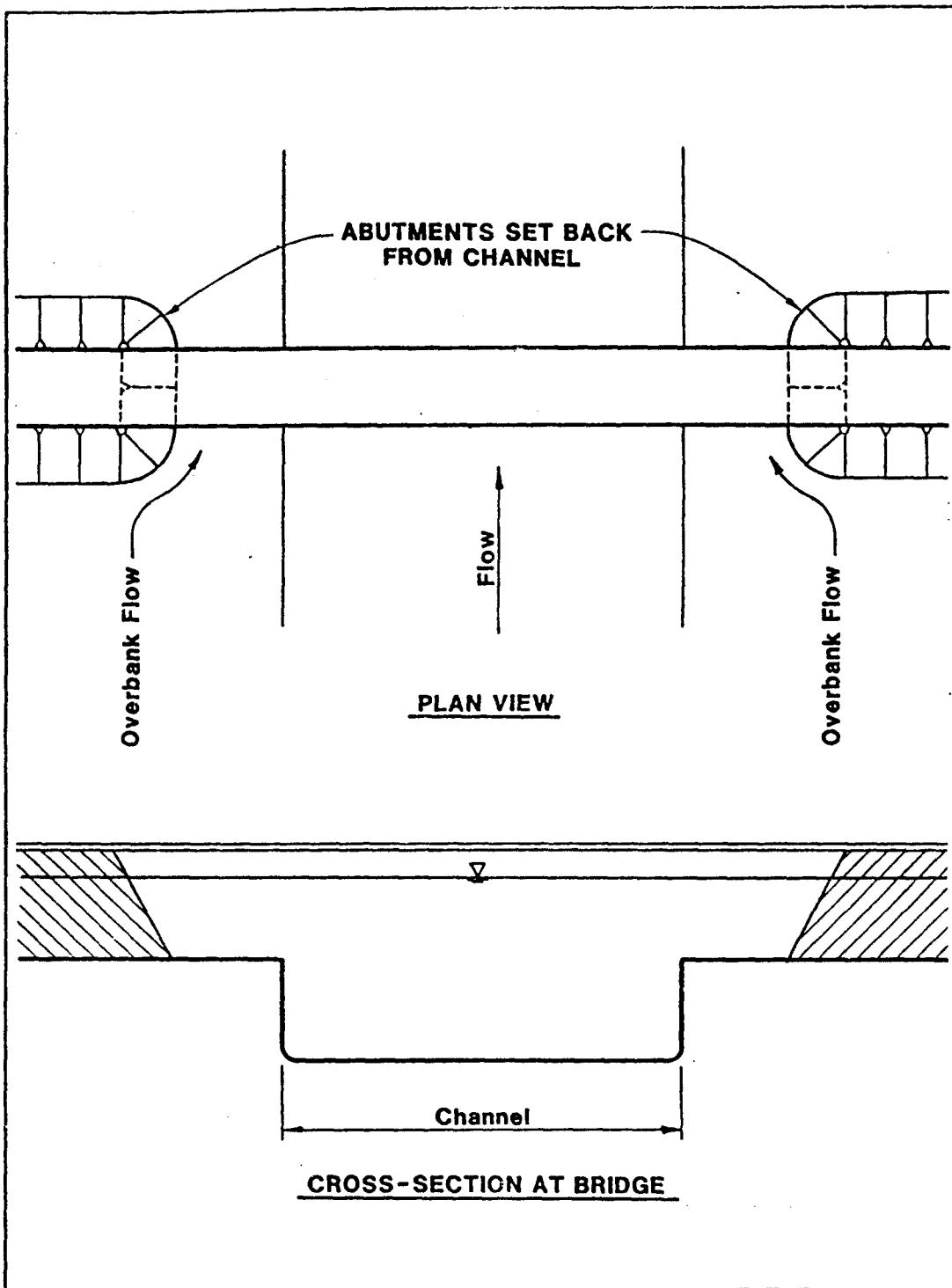
수축세굴에 관한 4가지 유형 설명도



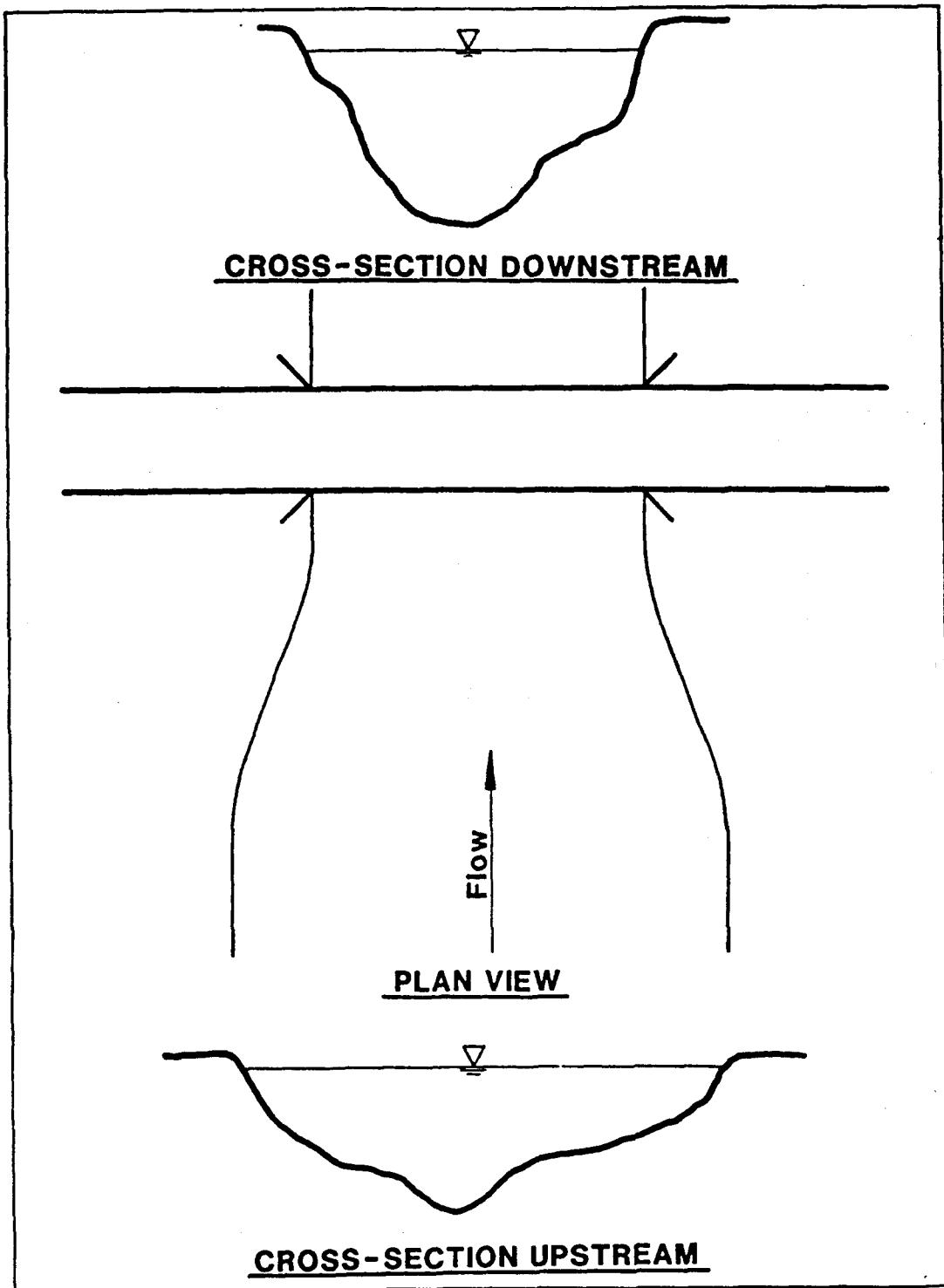
CASE 1A: ABUTMENTS PROJECT INTO CHANNEL



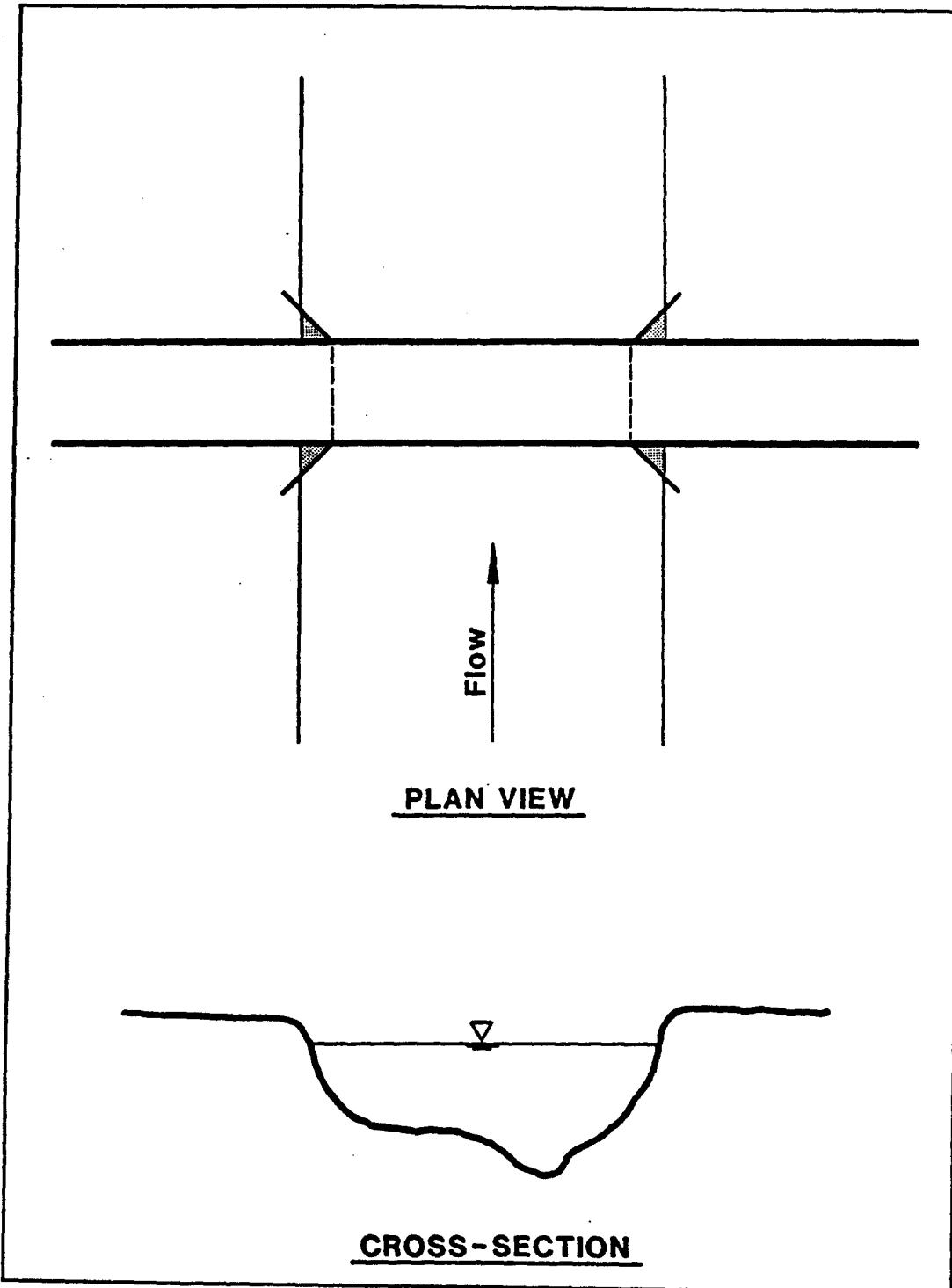
CASE 1B: ABUTMENTS AT EDGE OF CHANNEL



CASE 1C: ABUTMENTS SET BACK FROM CHANNEL

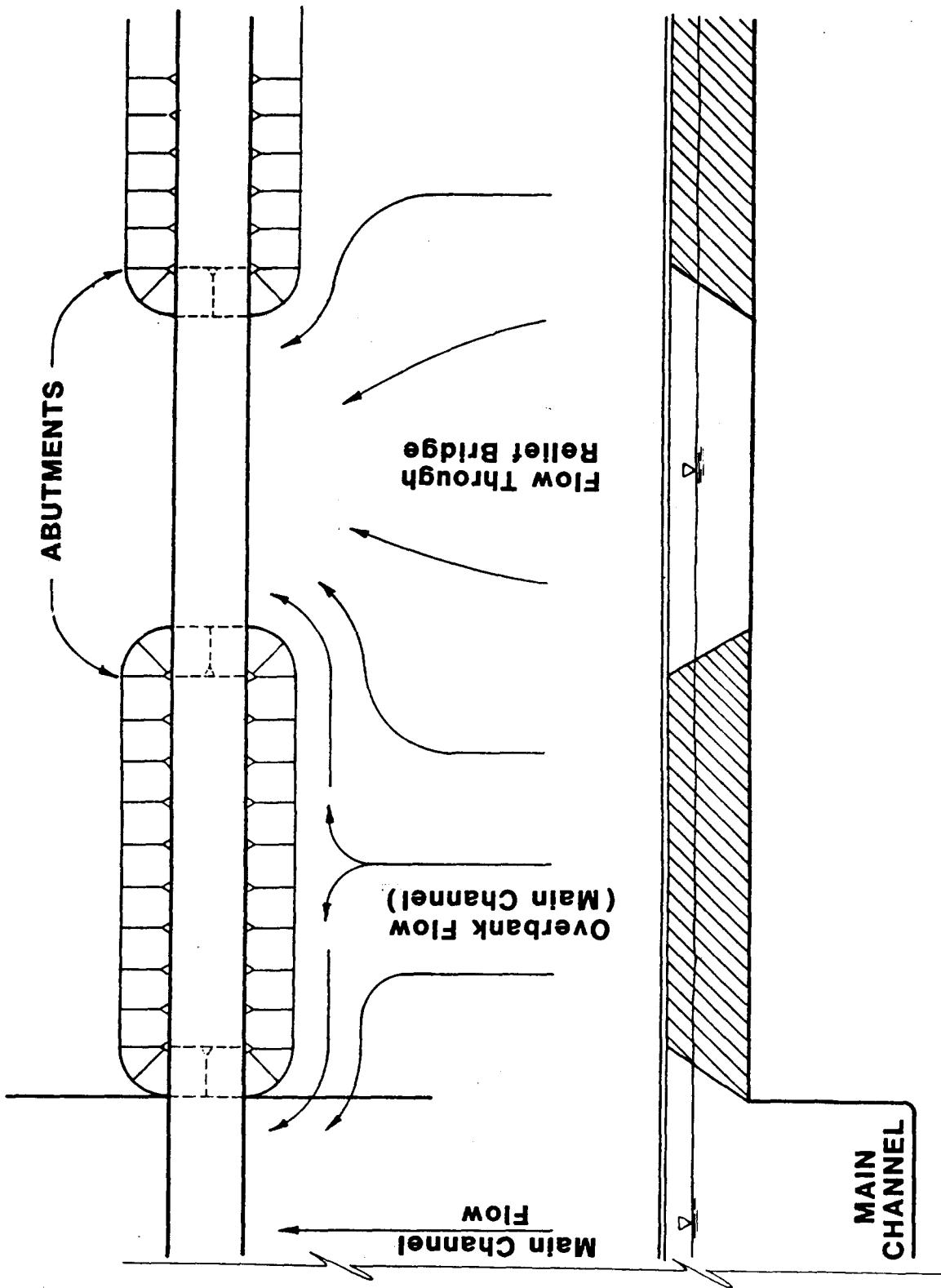


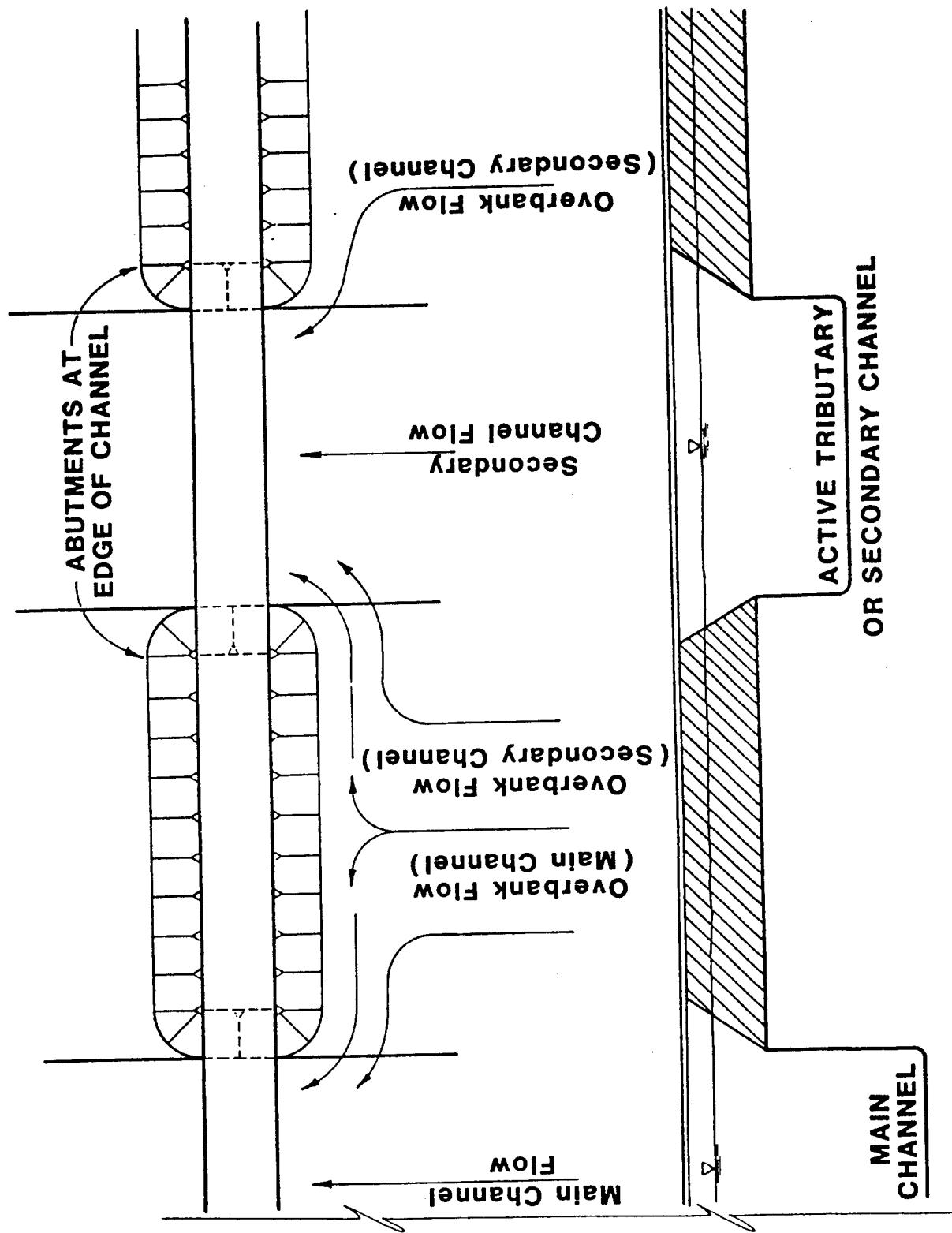
CASE 2A: RIVER NARROWS



CASE 2B: BRIDGE ABUTMENTS CONSTRICT FLOW

CASE 3: RELIEF BRIDGE OVER FLOODPLAIN





CASE 4: RELIEF BRIDGE OVER SECONDARY STREAM