

세굴로 인한 교량기초의 위험도 평가

Evaluation of the Vulnerability of Bridge Foundations to Scour

곽기석¹⁾, Kiseok, Kwak, 박재현²⁾, Jaehyun Park, 이주형³⁾, Juhyung, Lee, 정문경⁴⁾, Moonkyung, Chung, 김종천⁵⁾, Jongcheon, Kim

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology
- 4) 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology
- 5) 건설교통부 도로환경과 사무관, Road Environment Division, Ministry of Construction and Technology

개요(SYNOPSIS) : A methodology is developed to evaluate the vulnerability of bridge piers to scour and to help establish effective disaster measures, taking into account the locality and scour characteristics in Korea. Based on the bearing capacity of bridge foundation-ground integrating system changed by scour, this methodology is able to prioritize bridge foundations reflecting on the geotechnical factors as well as hydraulic ones. The bridge foundation vulnerability to scour is categorized into 7 groups considering the concise information of the bridge foundation-ground integrating system. A case study of implementing this method which includes the analysis of the scour depth and evaluation, and categorizing the scour vulnerability of bridge foundation is presented.

주요어(Key words) : bridge scour, foundation-ground system, bearing capacity, scour vulnerability, prioritization

1. 서론

교량 파괴의 주요 원인이 세굴로 인한 교량 기초의 파괴임은 많은 국내외 연구를 통해 알려진 바와 같다(Shirhole 과 Holt, 1991). 국내의 교량세굴 연구는 최근 들어 조사, 해석 및 설계, 보호공 관련 요소기술 등을 중심으로 활발히 진행되고 있는 추세이지만 세굴로 인한 교량기초의 거동 분석 및 기초-지반으로 이루어진 통합 시스템의 위험도 평가에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 교량의 안정성 확보를 위해서는 면밀한 분석에 따른 정확한 세굴심 평가뿐만 아니라 세굴에 따른 기초의 지지력 변화 및 위험도 평가 체계를 마련하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 효율적이고 체계적인 세굴대책을 마련하기 위한 일환으로 국내 특성을 고려한 세굴의 발생에 따른 기초-지반 통합 시스템의 위험도 결정기법을 개발하였다.

2. 교량세굴 위험도 결정 기법

2.1 세굴로 인한 교량기초의 위험도

교량세굴의 해석 및 기초의 위험도 평가에 있어 기존 연구는 교량 구조물의 형식과 제원, 수리학적 영향 인자에 치중하여 지반공학적 세굴 영향 인자에 대한 연구는 상대적으로 미흡하였다. 최근 들어 세굴로 인한 교량기초 문제의 중요성이 인식되어 기초의 지지력 산정 및 호안, 사면의 안정성 등의 문제에 지반공학적 접근이 시도되고 있다. 그 예로써, 교량기초의 세굴 위험성 평가에 있어 지반 공학적 인자들의 중요성이 해석적으로 밝혀진 바 있으며(De Falco 등, 1997), 세립토에 대한 세굴 해석시 시간 효과와 지반 특성을 고려할 수 있는 방법이 개발되어 적용되고 있다(Briaud 등, 1999; 콕, 2002). 실제로 심각한 세굴이 발생하면 기초와 지반의 지지력은 급속히 낮아지며 교각은 큰 변위를 일으키고 회전하여 교량 구조물 전체의 안정성이 크게 위협 받는다. 즉, 교각의 한계 상태는 기초와 지반의 한계 상태에 의해서 결정된다고 할 수 있다.

최근 De Falco 와 Mancini(1998)는 교각의 위험도 수준을 평가할 수 있는 간단한 방법을 제안하였으며, 세굴심, 기초 근입깊이, 기초 폭 등의 간단한 변수들의 함수로 정의되는 세 가지 위험도 수준(high, medium, low)을 제안하였다. 이탈리아의 일부 교량에 대하여 이 방법을 적용한 결과는 그림 1과 같다(Y_s =세굴심(m), Y_p =기초 근입깊이(m), B =기초 폭(m)).

그림 1의 그래프를 보면 세굴심이 기초 근입깊이보다 큰 고위험도(high vulnerability)영역에 교량들이 집중적으로 분포하고 있는 것을 알 수 있는데, 이 영역은 세굴심이 기초 근입깊이 보다 큰 경우로서 실제 교량이 존재할 수 없는 부분이다. 또한 이 결과에 근거하여 세굴 대책을 세운다면 과다 비용이 소요될 것이므로 De Falco 와 Mancini(1998)가 제안한 위험도 평가 방법은 수정될 필요성이 있다.

본 연구에서는 세굴 발생으로 인한 기초-지반 통합 시스템의 지지력 개념을 도입한 교량세굴 위험도 평가 방법을 개발하였다. 이는 홍수시 세굴의 발생으로 인한 교각과 기초, 지반의 지지력 평가에 기초하고 있으며, 하상 지반의 세굴과 기초-지반 통합 시스템의 지지력을 좌우하는 가장 중요한 인자들은 기초의 형식과 제원, 지반의 물리, 역학적 특성 및 하천 흐름의 수리·수문학적 특성이라는 개념을 바탕으로 하였다. 즉, 교량 현장의 상세조사 및 세굴 해석을 통해 면밀히 분석된 예측 세굴심과 그에 따른 지반의 지지력 감소, 교량 기초의 형식과 제원, 현재의 세굴상태 등을 종합적으로 고려하여 교량세굴 위험도 등급을 결정한다.

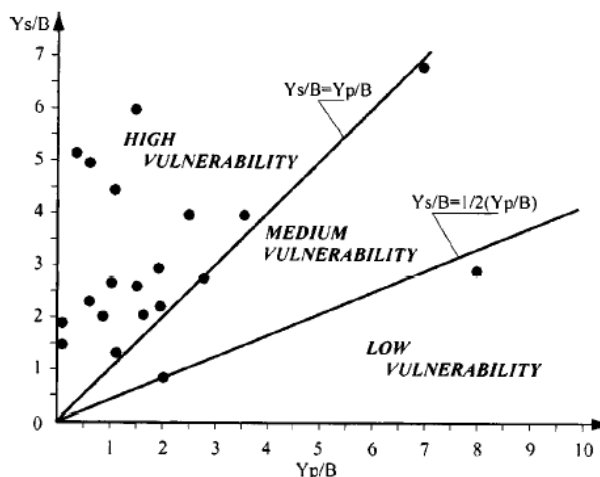


그림 1. 교각 위험도 분석 결과(De Falco and Mancini, 1998)

2.2 교량세굴 위험도 결정 기법

세굴심의 예측은 지반특성에 맞는 적합한 세굴 공식을 적용하고, 현장의 수리, 수문 조건에 맞는 설계 유속 및 수심, 홍수량 등을 적용하여 이루어진다. 이렇게 결정된 예측 세굴심에 의한 기초의 지지력 저하는 하상 지반 재료와 기초의 종류에 따른 지지력 공식을 사용하여 구할 수 있다. 직접확대기초에 대한 지지력 공식은 Terzaghi와 Peck(1967)이 제안한 띠기초에 대한 식을 적용하며 지지력 계수값은 Vesic(1975)이 제안한 값을 적용한다. 또한 기초-지반 시스템의 지지력 평가를 단순화시키기 위해서, 포화된 중간 조밀도의 사질토($\phi=30^\circ$)에 근입된 얇은 기초의 극한 지지력 공식을 적용한다. 깊은 기초에 대한 극한 지지력 공식은 Meyerhof(1976)가 제안한 방법을 적용하며, 점성토에 대한 주면 마찰력은 λ 방법(Vijayvergiya 와 Focht, 1972)을 사용하여 산정한다. 기존 연구 결과, 기초의 길이에 대한 폭의 비(L/B) 및 편심하중, 지반의 비균질성은 기초-지반 시스템의 지지력 평가 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(Federico 등, 2003).

위의 방법으로 세굴 발생에 따른 기초-지반 시스템의 지지력을 구할 수 있으며 이 값과 세굴 발생 전의 지지력을 비교하여 교량세굴 위험도 값을 구한다. 위험도 값(μ)은 다음 식으로써 결정되며, 이를 바탕으로 교량세굴 위험도 등급을 평가한다.

$$\mu = \frac{\text{세굴발생 전의 극한 지지력}}{\text{세굴발생 후의 극한 지지력}} = \frac{q_u^{(normal)}}{q_u^{(scour)}} \quad (1)$$

기초-지반 시스템의 지지력 공식은 기초의 폭(B) 및 근입깊이(세굴발생 전 : Y_p , 세굴발생 후: $Y_p - Y_s$)를 변수로 포함하고 있으며, 식 (1)은 기초의 폭(B)으로 정규화시킨 기초의 근입깊이($\frac{Y_p}{B}$)와 예측 세굴심($\frac{Y_s}{B}$)으로 나타낼 수 있다. 정규화된 기초의 근입깊이와 정규화된 예측 세굴심을 각각 X, Y축으로 하는 평면 좌표에 위험도 값을 표시할 수 있으며, 위험도 값을 기준으로 그림 2와 같이 기초-지반 시스템의 세굴 위험도 등급을 구분할 수 있다.

그림 2의 그래프에서 기울기가 2.0 보다 큰 직선 즉, $\frac{Y_s}{B} > 2 \frac{Y_p}{B}$ 인 영역을 위험도 1등급이라고 결정하고, 기울기가 1.0과 2.0인 두 직선 사이의 영역을 위험도 2등급 이라고 결정한다. 현실적으로 기초 근입깊이보다 세굴심이 커지면 교량이 파괴되기 때문에 $\frac{Y_s}{B} > \frac{Y_p}{B}$ 인 조건을 만족하는 교량은 존재하지 않지만, 본 연구에서는 설계 홍수량에 대해 평가된 예측 세굴심을 기준으로 현재의 잠재적인 세굴 위험성을 평가하고 향후 홍수시 세굴 발생에 따른 효율적인 대책 마련 및 유지관리를 수행하기 위해서 설계 홍수량에 대해서 해석된 예측 세굴 심은 기초 근입깊이보다 커질 수 있음을 고려하였다.

해석된 예측 세굴심이 기초 근입깊이보다 작은 영역은 기초-지반 시스템의 지지력이 0보다 큰 경우이다. 설계상 일반적인 기초-지반 시스템의 지지력 안전계수는 3.0 이므로 세굴 발생 전 기초-지반 시스템의 지지력 안전계수(S.F.)는 3.0으로 가정할 수 있으며 세굴이 발생하여 지지층이 얇아짐에 따라 안전계수 값은 감소될 것이다. 한편, 기초-지반 시스템의 극한 지지력은 안전계수와 허용 지지력(q_a)의 함수이고 동일 교량기초에 대해 세굴 발생 전과 후의 허용지지력은 같으므로 식 (1)은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\mu = \frac{q_u^{(normal)}}{q_u^{(scour)}} = \frac{q_a S.F. normal}{q_a S.F. scour} = \frac{S.F. normal}{S.F. scour} \quad (2)$$

따라서, 위험도 값(μ)은 세굴발생에 따른 기초-지반 지지력 안전계수의 변화에 따라 달라지며 예측 세굴심이 기초 근입깊이보다 작은 영역은 표 1과 같이 세 등급의 위험도로 분류할 수 있다.

이상에서 설명한 교량세굴 위험도 등급은 현장 상세조사 및 조사 당시의 세굴 진행 정도를 분석하여 최종 결

정된다. 현장 상세조사 결과 예측 세굴심에 비해 현장 세굴 상태가 심각하여 대책이 요구되는 경우 위험도 등급을 상향 조정해야 하며, 매우 위험한 상태로 인해 시급한 대책이 요구되는 경우는 예측 세굴심과 기초-지반 시스템의 지지력 위험도에 상관없이 0순위 등급을 부여하도록 한다. 반면에 예측 세굴심에 비해 현장 교량 기초 상태가 양호하고 세굴 위험도가 낮게 분석되는 경우는 잠재적 세굴 가능성을 고려하여 해석된 위험도를 유지시키도록 한다. 기초에 대한 정보가 없는 교량의 경우 U 등급으로 분류하여 독립적으로 관리하도록 된다. U 등급을 제외한 이상에서 설명한 6등급의 위험도 등급 체계는 그림 2와 같다.

표 1. 교량세굴 위험도 등급($\frac{Y_s}{B} < \frac{Y_p}{B}$ 인 경우)

μ	세굴발생후 지지력 안전율(S.F.)	위험도 등급
$3.0 \leq \mu$	$0 \leq S.F. < 1.0$	3등급
$1.5 \leq \mu < 3.0$	$1.0 \leq S.F. < 2.0$	4등급
$1.0 \leq \mu < 1.5$	$2.0 \leq S.F.$	5등급

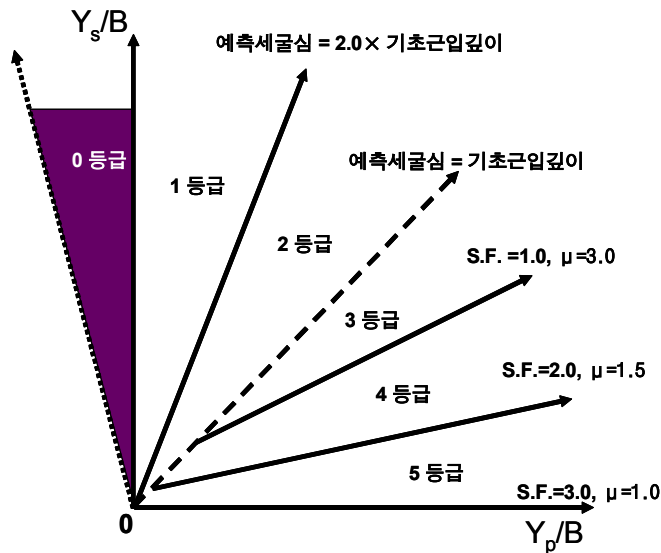


그림 2. 교량세굴 위험도 등급 체계

3. 위험도 등급 결정 예제

이상에서 설명한 세굴로 인한 기초-지반 시스템의 위험도 등급 결정 기법에 대한 적용성을 분석하기 위해서 깊은기초(말뚝기초)와 직접확대기초를 가진 교량에 대해서 위험도 등급 결정 기법을 적용하였다. 계산에 사용된 설계변수는 표 2와 같으며, 모래지반 하상에 대한 세굴심은 하천설계기준(2002) 및 도로교 설계기준(2003)에서 권장하고 있는 CSU 공식의 결과를 예측 세굴심으로 결정하였으며, 점성토 지반 하상에 대한 세굴 설계공식은 도로교 설계기준(2003)에서 권장하고 있는 SRICOS 방법을 적용하였다. 깊은기초(말뚝기초)와 직접확대기초의 지지력 산정 공식은 각각 Meyerhof 공식(1976)과 Terzaghi 와 Peck의 띠기초 공식(1967)을 적용하였다.

표 2. 세굴심 산정을 위한 설계변수 및 예측 세굴심

말뚝 기초			직접확대기초		
구 분	설계변수		구 분	설계변수	
교각 및 기초	교각 폭	1 m	교각 및 기초	교각 폭	1 m
	교각 형상	원형		교각 형상	원형
	기초 폭	0.4 m		기초 폭	3m
	기초 근입깊이	20 m		기초 근입깊이	4.5m
하상지반 (사질토)	중간입경	1.8 mm	하상지반 (사질토)	중간입경	1.8 mm
	최대입경	25 mm		최대입경	25 mm
	마찰각	30°		비배수전단강도	2.0 kg/cm ²
	점착력	0		한계전단응력	30 N/m ²
	포화단위중량	2.0 t/cm ³		포화단위중량	2.0 t/cm ³
	심도 0 - 20m	사질토		심도 0 - 4.5m	점성토
	심도 20m 이하	풍화암		심도 4.5m 이하	풍화암
흐 림	수로 형상	직선수로	흐 림	수로 형상	직선수로
	하상 형태	평탄하상		하상 형태	평탄하상
	흐림 접근각	0°		흐림 접근각	0°
	접근 수심	12.4 m		접근 수심	12.4 m
	최대접근유속	4 m/s		최대접근유속	4 m/s
예측세굴심	9.77 m (CSU Eq.)		예측세굴심	4 m (SRICOS)	

직접확대기초의 경우 일반적으로 지지층이 지표에서 얇은 위치에 존재할 경우 설치하게 되고 깊은기초의 경우 상대적으로 심도가 깊은 위치에 지지층이 존재할 경우 설치하게 되므로 두 기초에 대한 지층분포를 달리하였다. 점성토에 대한 교각세굴심 예측 방법인 S-SRICOS방법(곽, 2002)을 적용한 결과 직접확대기초의 예측 세굴심은 4m 였으며, 사질토 하상에 대한 교각세굴심 해석을 실시한 결과 말뚝기초의 예측세굴심은 9.77m 이었다. 이상과 같은 조건과 설계변수를 적용하여 기초-지반 시스템의 지지력 해석을 수행하고 위험도 등급을 평가하였다. 직접확대기초가 설치된 지반의 경우 기초 하단부 상부의 지반이 거의 모두 세굴 되어 지지력이 크게 감소한 결과 위험도는 3등급으로 결정되어 높은 위험도를 보였고, 말뚝기초가 설치된 지반의 경우 9.77m가 세굴 되어 그 만큼의 주면 마찰력이 감소한 결과 위험도는 4등급으로서 결정되었다. 따라서, 직접확대기초의 경우 지지력이 크게 감소하여 안전율이 낮아진 것을 알 수 있고 말뚝기초의 경우도 세굴 발생에 따른 주면마찰력의 감소량이 적지 않음을 알 수 있다.

표 3. 세굴 발생 전, 후의 기초의 지지력

구 분	공식	지지력		안전율
직접확대기초 (Terzaghi, 1967)	$q_u = cN_c + qN_q + 0.5BN_\gamma$	세굴 전	118.54 t/m ²	3.00
		세굴 후	29.70 t/m ²	0.75
말뚝기초 (Meyerhof, 1976)	$Q_u = Q_p + Q_s$ $Q_p = A_p q_u = A_p (cN_c^* + qN_q^* + \gamma DN_\gamma^*)$ $Q_s = \sum p \Delta L f$	세굴 전	60.30 t	3.00
		세굴 후	39.69 t	1.97

4. 결 론

최근 들어 국내 교량세굴에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 세굴로 인한 기초-지반 시스템의 위험도 평가와 함께 이에 대한 지반공학적 세굴 영향 인자에 대한 연구는 미흡하였다. 본 연구에서는 교량의 안정성 확보 및 효율적인 방재대책 수립을 위해 국내특성을 고려한 세굴로 인한 교량 기초-지반 시스템의 위험도 평가 기법을 제안하였다. 교량세굴 위험도 결정 기법은 세굴 발생에 따른 기초-지반 통합 시스템의 지지력 개념에 기초하고 있으며 수리학적 영향 인자는 물론 지반공학적 영향 인자를 모두 고려한 교량세굴 위험도 평가가 가능하다. 이러한 평가 기법에 기초하여 사질토 지반 하상에 설치된 말뚝기초와 점성토 지반에 설치된 직접확대기초에 대한 예제를 통해서 위험도 등급 결정 기법의 적용성을 분석하였다.

향후 국내의 수리, 수문 특성 및 지반 특성을 효과적으로 고려할 수 있으며 신뢰성이 높은 교량세굴 위험도 등급 체계를 완성하기 위하여 다양한 사례연구를 통한 수정, 보완 작업이 필요할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부(2002), **하천설계기준**
2. 건설교통부(2003), **도로교 설계기준**
3. 광기석(2002) “S-SRICOS 방법: 점성토지반의 교각세굴깊이 예측,” **한국지반공학회 논문집**, 제 28권, 제 2호, pp. 13~21.
4. Briaud, J.L., Ting, F., Chen, H.C., Gudavalli, S.R., Perugu, S. and Wei, G.(1999) “SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.4, ASCE, Reston, Virginia, U.S.A., pp. 237-246
5. De Falco, F., Gentile, M., and Mancini, M.(1997) “Hydraulic Vulnerability Due to Scour at Bridge Piers and Monitoring Systems. The Italian Railways Experience” , *C.I.S.M. Course on Hydraulic Phenomena in Proximity of Bridges*, Udine, Italy
6. De Falco, F., and Mancini, M.(1998) “A Procedure to Estimate Hydraulic Vulnerability of Bridge Foundations, Italian Railways” , *Internal Rep.*, Rome
7. Federico F., Silvagni G., Volpi F.(2003) “Scour Vulnerability of River Bridge Piers,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.10, ASCE, Reston, Virginia, U.S.A., pp. 890-899
8. Meyerhof, G.G.(1976) “Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations,” *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, A.S.C.E., Vol. 102, No. GT3, pp.197-228
9. Shirole, A.M. and Holt, R.C.(1991) “ Planning for a Comprehensive Bridge Safety Assurance Program” , Washington D.C., *Transportation Research Record* No. 1290, pp. 137-142
10. Terzaghi, K., and Peck, R.B.(1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, New York
11. Vesic, A.S.(1975) “Bearing Capacity of Shallow Foundations” , *Foundation Engineering Handbook*, F. Winterkorn, ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 121-147
12. Vijayvergiya, V.N., and Focht, J.A.Jr.(1972) “A New Way to Predict Capacity of Piles in Clay” , *Proc. 4th Annual Offshore Technical Conference*, Vol. 2, pp. 865-874