

수도권 국도교량 세굴위험도 평가 및 등급화 사례 연구

A Case Study of Bridge Scour Vulnerability Evaluation and Prioritization for National Highway Bridges in the National Capital Region

박재현* · 김정훈** · 안성철*** · 이주형**** · 정문경***** · 곽기석*****

Park, Jae Hyun · Kim, Jeong Hun · An, Seong Chul · Lee, Ju Hyung · Chung, Moonkyung · Kwak, Kiseok

Abstract

Foundation failure due to bridge scour during floods is the leading cause of bridge failure. Performed were the evaluation of bridge scour vulnerability and prioritization on real bridges registered in the National Highway Bridge Inventory of the capital region. The case studies for 30 national highway bridges consist of site investigation including boring test, bridge scour analysis for the design flood, bearing capacity evaluation of the bridge foundation before and after scour, comprehensive evaluation of bridge scour vulnerability, and prioritization. Nine of 26 spread footing bridges showed the potential future vulnerability to scour with significant decrease in the bearing capacity of foundations due to scour and the remaining 17 spread footing bridges were expected to maintain their stability to resist the effects of scour. Three of 4 pile foundation bridges exhibited considerable decrease in the bearing capacity of foundation after scour.

key words : Bridge scour, Scour vulnerability, Prioritization, Bridge foundation, The national capital region

요 지

홍수 시 세굴로 인한 교량 기초의 파괴는 국내외적으로 교량 붕괴의 첫 번째 원인이다. 본 연구에서는 수도권 지역의 실제 국도교량에 대하여 세굴 위험도 평가 및 등급화를 수행하였다. 30개소 교량을 선정하여 지반 시추조사를 포함한 현장조사, 설계 홍수량에 대한 교량세굴 해석, 그에 따른 교량기초의 지지력 평가 및 위험도 분석을 하였고, 이를 바탕으로 교량세굴 위험도를 등급화 하였다. 위험도 평가 결과 직접확대기초 교량 26개소 중 9개소 교량이 장래 세굴 위험 가능성이 있는 것으로 나타났다, 나머지 17개소 교량은 안정한 수준으로 나타났다. 말뚝기초 교량 4개소 중 3개소의 교량이 유의할 만한 수준으로 지지력이 감소하는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 교량세굴, 세굴 위험도, 등급화, 교량기초, 수도권 지역

1. 서 론

교량 붕괴의 첫 번째 원인이 세굴로 인한 교량 기초의 파괴 임은 많은 연구를 통해 알려진 바와 같다(Shirole and Holt, 1991). 한국은 산지 지형이 많아서 하상 경사가 크며 강수량의 2/3이상이 하절기에 집중되어 홍수시 세굴 가능성이 매우 크다(여운광 등, 1999). 1990년대 중반 이후 홍수시 국내 하천의 세굴 및 하천의 불안정성으로 인한 교량 피해사례는 연평균 100여건에 육박하며, 그 피해액은 연간 2천억원에 달한다(행정자치부, 1995~2003). 이러한 피해는 대하천 보다 중·소규모의 하천에서 집중된다는 것이 특징이었으나, 최근 2002년과

2003년 집중호우 및 태풍 루사, 매미와 같은 이상 호우를 동반한 기상재해의 발생이 잦아짐에 따라 그 피해도 커져 갈수기에 흐름이 거의 없는 교량은 물론이고 국도상의 대규모 교량도 홍수시 세굴 등으로 인해 붕괴되는 사례가 늘게 되었다(곽기석 등, 2004). 하지만 지금까지의 국내 교량 안전진단은 주로 상판의 구조적 결함, 교각의 콘크리트 균열이나 평수시 기초부의 지반 상태 등에만 집중되고 있어 홍수 시 하천흐름에 의한 세굴 위험성은 사실상 간과되고 있으며, 교량기초의 세굴 위험도에 따른 합리적인 조사 및 유지관리와 홍수 시 체계적인 방재대책 수립이 힘든 실정이다. 따라서 홍수시 교량의 안정성 확보를 위해서는 면밀한 분석에 따른 정확한 세굴심

*정회원 · 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 선임연구원 (E-mail: jaehyeon@kict.re.kr)

**국토해양부 건설안전과

***서울지방국토관리청 도로공사과

****정회원 · 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 연구원

*****한국건설기술연구원 토질및기초연구실 책임연구원

*****정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 책임연구원

평가와 조사뿐만 아니라 국내 실정과 여건에 맞는 체계적인 교량세굴 유지관리 체계를 마련하는 것이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 수도권 지역 국도교량의 홍수 시 세굴에 대한 교량의 안정성 확보 및 효율적인 방재대책 수립을 위해서 실제 교량 현장에 대한 세굴 위험도를 평가하고 등급화 하였다. 먼저 수도권 지역 서울지방국토관리청 관내의 세굴 위험성이 잠재된 30개 국도 교량을 선정하여 지반조사를 포함한 상세 현장조사를 실시하였고, 설계 홍수량에 대한 교량세굴 해석을 수행하였으며, 그에 따른 교량기초의 지지력을 평가하고 위험도 등급을 결정하였다.

서울지방국토관리청 관내 교량은 수도권에 위치하여 그 사회·경제적 중요도가 클 뿐만 아니라 경기지역은 1996년, 1998년, 1999년 그리고 2006년 극심한 홍수피해를 입고 게릴라성 호우, 국지성 호우라는 신조어를 탄생시키기도 한 지역으로서 세굴의 잠재적 위험성이 크므로 전체 교량을 대상으로 정확한 세굴위험성 평가 및 종합적이고 체계적인 교량세굴 유지관리 대책이 필요한 지역이다.

2. 조사 우선순위 결정

교량의 세굴 양상은 하상재료, 지층 특성 등의 지반공학적인 영향인자와 홍수량, 유속, 수심 등 수리·수문학적 영향인자는 물론 교량의 구조적 특성에 모두 영향을 받기 때문에 현장에 따라 가변성이 매우 크다. 따라서 세굴 해석 및 교량의 안정성 평가 시 현장 상세조사를 통한 세굴 영향인자의 분석과 교량 기초 지지력의 엄밀한 평가와 함께 구조적 건전도 평가가 매우 중요하다. 그러나 이러한 모든 과정을 수행하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요되며 세굴 위험성이 낮은 교량까지 일괄적으로 상세조사를 실시하는 것은 비경제적·비효율적이다. 광기석 등(2006b)은 제한된 예산과 기간 내에서 합리적이고 효율적인 교량세굴 현장 상세조사를 실시하기 위한 간단하고 체계적인 조사 우선순위 결정 기법을 제안하였다.

교량세굴 조사 우선순위는 그림 1과 같이 국도유지건설사무소의 교량 하부구조 수중조사 보고서에 기록된 ㉠교량 하부구조의 세굴 위험성 여부, 교량관리시스템(bridge management system, BMS)에서 제공하는 ㉡교량기초 종류, ㉢일일평균교

통량(average daily traffic, ADT) 그리고 하천정비기본계획 보고서에 제시된 ㉣하상 경사 등 네 가지 정보로써 결정된다. 또한 조사 우선순위 분석 결과 일정 등급에 많은 수의 교량이 분포하여 세부 우선순위를 구분할 필요가 있을 경우 ㉤교량의 준공연도와 ㉥일일트럭교통량(average daily truck traffic, ADTT)을 차례로 적용하여 동일한 조사 우선순위 등급 내에서 순위를 세분화할 수 있다. 교량의 준공연도와 트럭교통량은 각각 교량의 노후화 정도와 과하중 재하 요인을 고려하기 위함이다. 이상의 교량세굴 현장조사 우선순위를 교량관리시스템에 등록된 강릉국도유지건설사무소 관내의 실제 모든 하천교량 112개소를 대상으로 적용한 결과 짧은 시간에 효율적이고 체계적인 분류가 가능함을 확인하였다(광기석 등, 2006a).

건설교통부 발행 교량현황조사서(2004)에 기록된 서울지방국토관리청 관내의 총 420개소 국도교량에 대하여, 다음과 같은 기준으로 사전 조사대상 교량을 선정하였다: ①교량세굴 설계변수를 확인할 수 있는 하천정비기본계획이 실시된 구간의 하천을 가로지르는 교량, ②하도 내에 교각이 1기 이상 존재하는 경간수 2이상 교량, ③상대적으로 세굴의 위험성이 큰 직접확대기초 및 말뚝기초 교량. 전체 교량 중 위의 기준에 부합되는 교량은 69개소이며 이들 사전조사 대상 교량에 대한 현장조사 우선순위 등급을 결정하여 향후 현장 시추조사를 포함한 현장 상세조사 및 세굴 평가, 기초의 위험도 평가 및 유지관리 대책마련을 위한 등급화 등 사례 연구를 실시하기 위한 최종 30개소의 교량을 선정하였다.

사전조사 대상 교량 69개소에 대한 교량의 기본 정보 및 조사 우선순위 관련 정보를 조사한 결과는 그림 2와 같다. 시·군별 대상 교량 수를 분석한 결과 가평군과 포천군, 남양주시에 위치한 교량이 각각 13개소, 11개소, 7개소로서 이들을 합하면 전체의 45%를 차지하였다. 즉, 한강수계의 지류가 발달한 경기 동부 지역의 교량이 많았다. 기초의 형식은 직접확대기초 교량이 56개소(81%), 말뚝기초 교량이 11개소(16%), 직접확대기초와 말뚝기초가 혼재된 교량이 2개소(3%)를 나타내었다. 평균일일교통량(ADT)의 경우 교통량이 많은 수도권의 특성상 10,000대/일 이상인 교량이 52개소(75%), 5,000대/일~10,000대/일의 교량이 20%를 차지하였다. 교량이 위치한 하천의 하상 경사를 기준으로 0.01~0.001의 중간정도

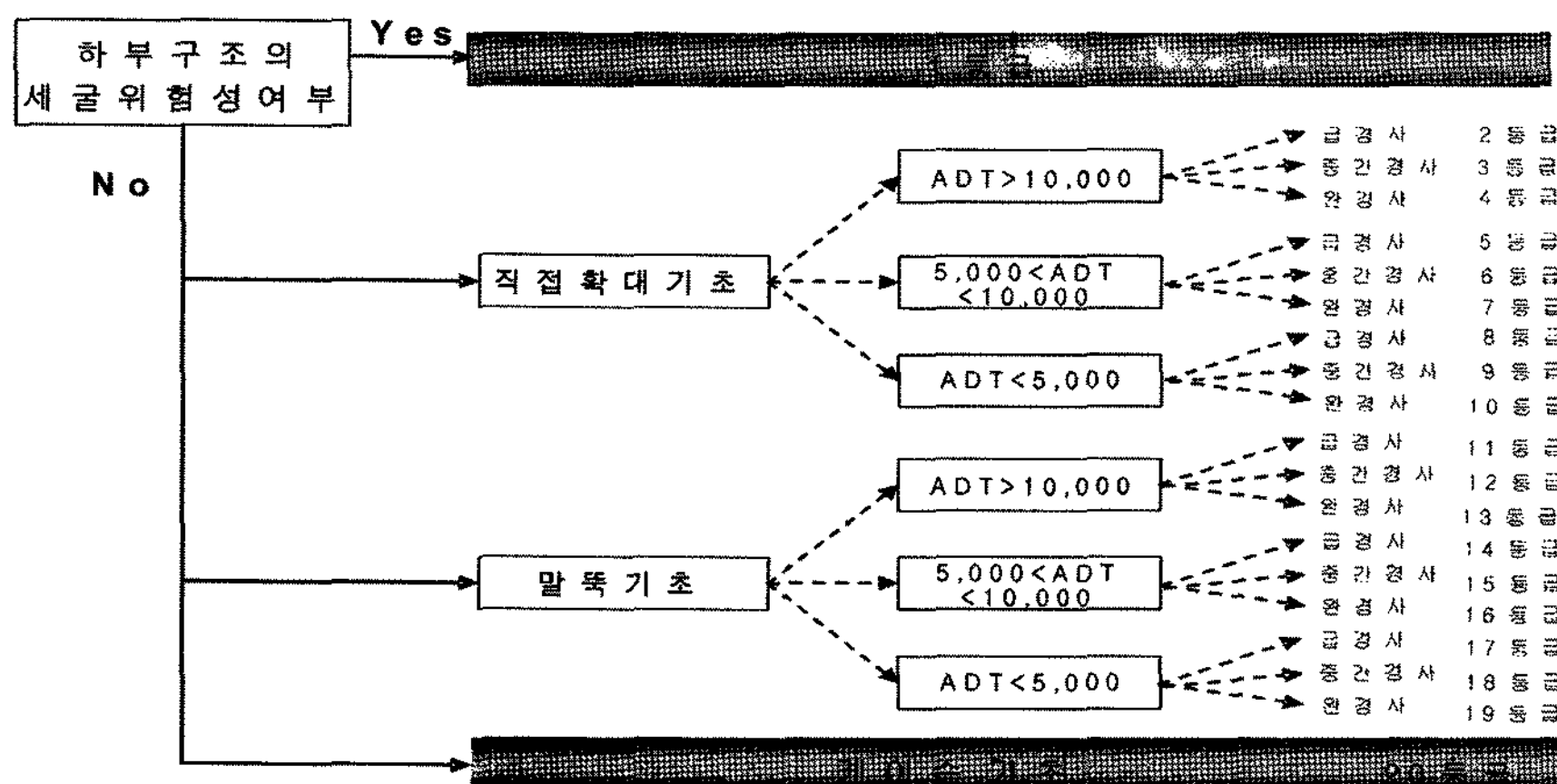


그림 1. 현장조사 우선순위 결정 기법

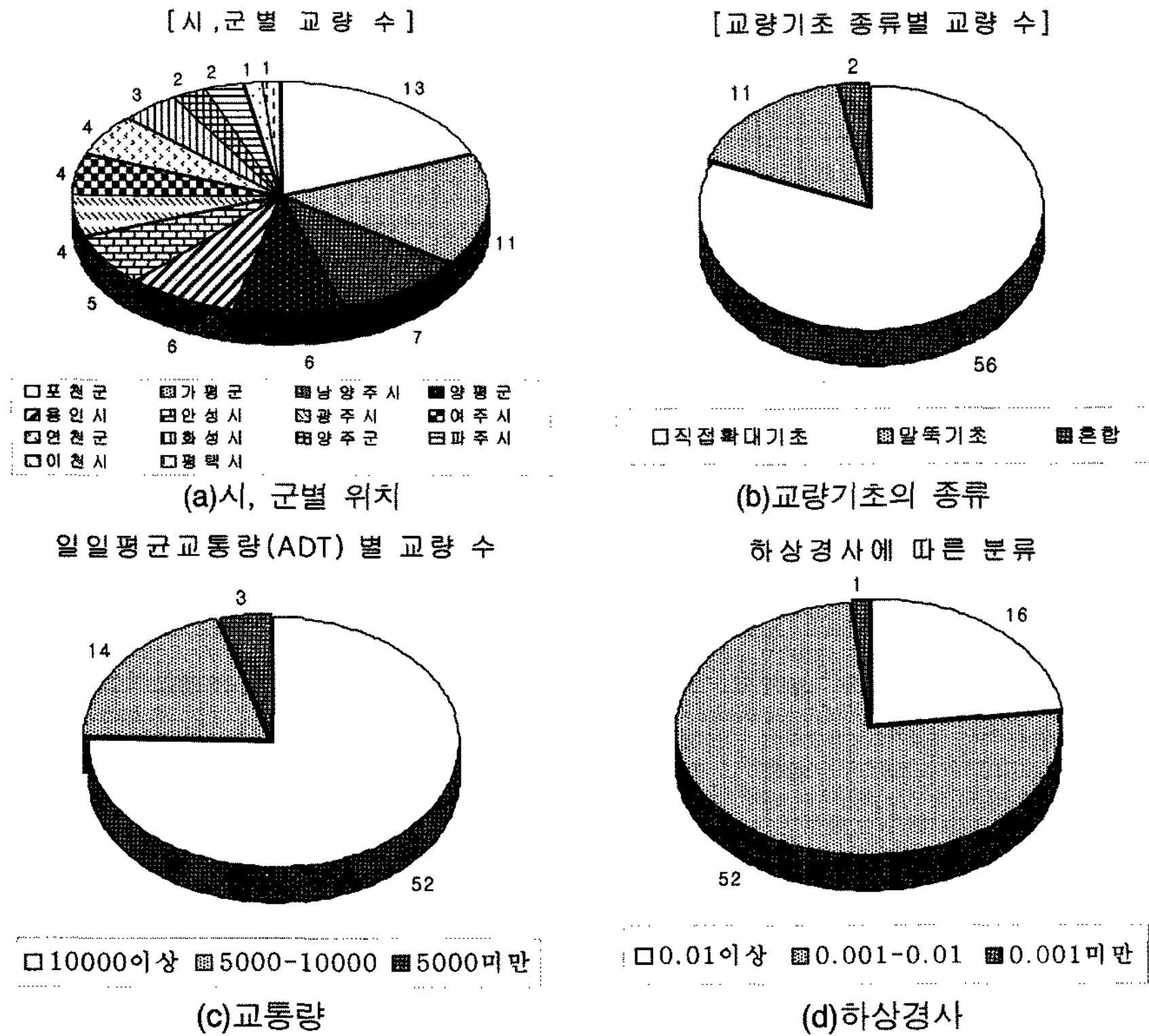


그림 2. 사전조사 대상 교량 분포 특성

경사인 교량이 52개소(75%), 0.01이상의 급경사인 교량이 16개소(23%)였다. 또한 2002년 교량 하부구조 수중조사가 실시된 서울지방국토관리청 관내 국도교량 중 기초 콘크리트 저면부 및 교각 주위 하상지반에서 세굴 및 침식으로 인한 유의할 만한 위험성이 보고된 교량은 없었으므로 69개소 사전조사 대상 교량의 하부구조 세굴 위험성 보고여부는 없는 것으로 판단되었다.

69개소 교량에 대한 사전조사 결과를 이용하여 조사 우선순위 분석을 실시한 결과를 그림 3에 나타내었다. 69개소 교량 중 약 78%인 54개소의 교량이 2등급~6등급의 상대적으로 높은 조사 우선순위를 나타내었는데, 이는 사전조사 대상 교량 중 80% 이상의 교량이 직접확대기초이며, 수도권에 위치한 지리적 특성상 대다수 교량의 교통량이 많았기 때문이다.

조사 우선순위를 바탕으로 사례 연구를 실시할 30개소의 교량을 선정하였다. 사례 연구 대상 교량은 중요도 측면에서 낮은 우선순위를 가지는 교량 길이 20m 미만의 소형 교량이 제외되었고, 대형 기초로서 연암층에 거치되어 상대적으로 세굴위험성이 낮은 교량 길이 300m 이상 교량 높이 15m 이상의 대형 케이슨 기초 형식의 교량이 제외되었다. 또한 다양한 현장 조건의 교량을 다수 포함시키기 위해서 동일 지역에 위치한 비슷한 규모의 동일 기초형식 교량이 제외되었다. 해안가 습지 상의 교량과 동일한 조사 우선순위 결과를 보이는 교량 역시 다수 제외되었다. 사례 연구를 위해 선정된 최종 30개소 교량은 표 1과 같다. 직접확대기초 교량이 26개소, 말뚝 기초 교량이 4개소이며, 일일평균교통량(ADT) 10,000대 이상 24개소, 5,000대~10,000대 6개소이다. 하상경사의 경우 0.01이상 급경사에 위치한 교량이 9개소이고 나머지 21개소는 모두 0.01~0.001의 중간정도 경사를 나타내었다. 대상

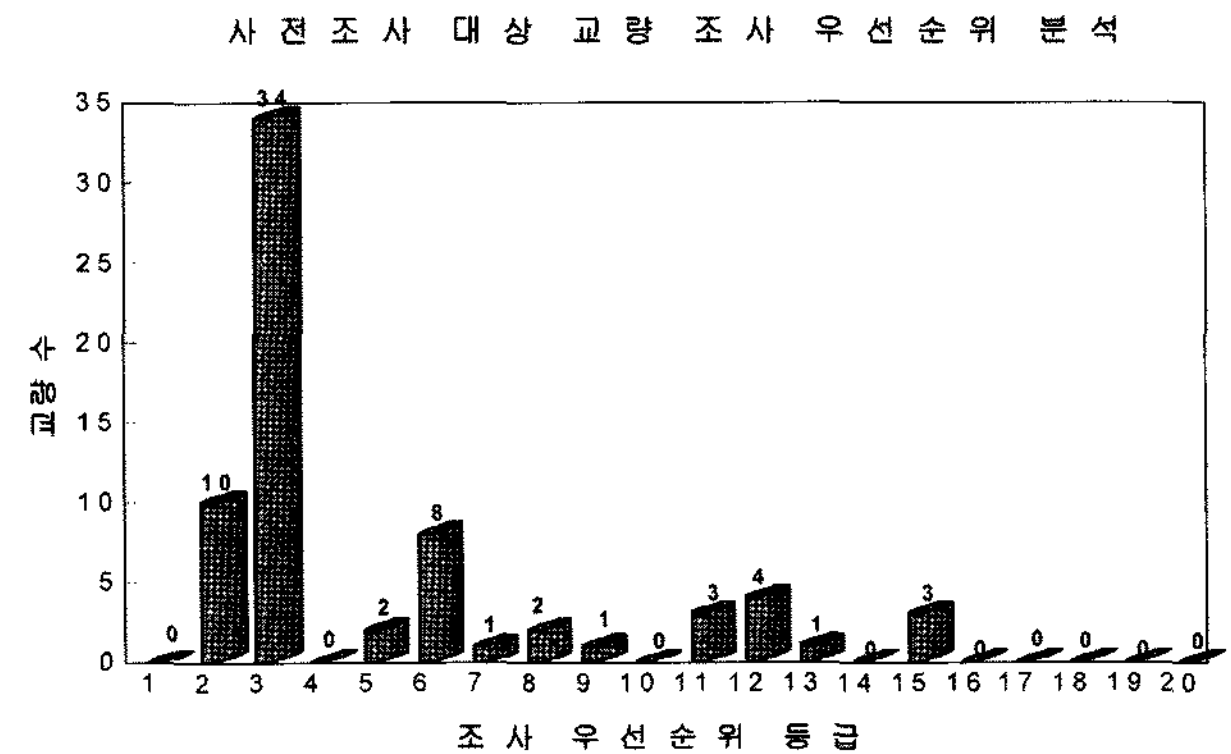


그림 3. 사전조사 대상 교량 조사 우선순위 분석

교량의 길이는 28m~300m로서 중소형에서부터 대형 교량이 선정되었다. 또한 경기 전역의 한강권역 10여개 주요하천에 위치한 교량이 선정됨으로써 수도권 전체의 전반적인 교량세굴 특성 파악 및 유지관리 대책마련을 위한 유용한 자료가 될 수 있으리라 판단되었다.

선정된 30개소 교량을 대상으로 현장의 세굴 영향인자 분석, 하상 시추조사를 포함한 현장 상세 지반 조사, 세굴심 평가를 위한 수리·지반 매개변수산정, 세굴심 해석, 교량기초의 지지력 평가를 실시하여 각 교량에 대한 세굴 위험도를 분석하였으며, 교량세굴 유지관리 체계를 위한 종합적인 평가를 실시하였다.

3. 현장 조사

선정된 30개 교량의 세굴 전, 후 위험도 분석을 실시하기 위해서 대상 교량에 대한 현장 조사를 실시하였다. 현장 조

표 1. 교량세굴 해석 및 위험도 평가 대상 교량

하천명 (하천코드)	번호	교량명	교량코드	국도 호선	기초형식	하상 경사	관리 사무소*	교량길이 (m)	준공년월	교통량 (ADT)	트럭교통량 (ADTT)	조사우선순위 등급 (등급 내 세부순위)
영평천 (1026240)	1	신백의교	25609	37	직접확대	0.002	12	300	1999.11	5674	55	6 (3)
	2	영중교	02525	43	직접확대	0.002	12	100	1992.12	20235	536	3 (3)
	3	제1도평교	02580	47	직접확대	0.008	12	60	1994.01	7337	612	6 (1)
	4	약사교	02583	47	직접확대	0.021	12	28	1992.01	5549	28	5 (2)
	5	서두교	02526	43	직접확대	0.021	12	30	1994.12	20235	536	2 (1)
곤지암천 (1024520)	6	곤지암교	00012	3	직접확대	0.006	11	62	1983.01	60015	2440	3 (1)
	7	구양교	00011	3	직접확대	0.011	11	115	1987.01	10491	2440	3 (4)
조종천 (1023960)	8	청평대교	25589	37	직접확대	0.004	12	125	1998.12	8415	273	6 (2)
	9	청평2교	02553	46	직접확대	0.004	12	200	1987.01	34125	1436	3 (2)
	10	조종교	25588	46	직접확대	0.003	12	151	1999.12	34125	1436	3 (15)
	11	다원교	25516	37	직접확대	0.003	12	151	1998.06	34125	1436	3 (13)
왕숙천 (1024740)	12	기장2교	25562	47	직접확대	0.014	12	40	1997.12	29819	3196	2 (3)
	13	기장3교	25563	47	직접확대	0.014	12	65	1997.12	29819	3196	2 (4)
	14	내각교	25547	47	직접확대	0.003	12	31	1993.12	40396	444	3 (6)
	15	내촌1교	25616	47	강재말뚝	0.012	12	85	1999.12	29819	3196	11 (2)
	16	내촌2교	25617	47	직접확대	0.012	12	105	1999.12	29819	3196	2 (6)
	17	신월교	25552	43	직접확대	0.004	12	90	1993.12	40396	444	3 (7)
	18	부평2교	25559	47	직접확대	0.009	12	40	1997.12	36619	2482	2 (5)
	19	신팔야교	25560	47	직접확대	0.009	12	55	1997.12	29819	3196	2 (2)
양지천 (1024310)	20	양지1교	25027	42	현타말뚝	0.013	11	62	1997.01	16984	531	11 (1)
	21	송문1교	25024	42	직접확대	0.008	11	80	1997.12	16984	531	3 (12)
	22	송문2교	25025	42	직접확대	0.008	11	70	1997.01	16984	531	3 (10)
북하천 (1022190)	23	추계1교	25029	42	직접확대	0.007	11	156	1997.01	16984	531	3 (9)
	24	추계2교	25030	42	직접확대	0.008	11	160	1997.01	16984	531	3 (11)
흑천 (1022460)	25	흑천교	25573	37	직접확대	0.002	12	190	1998.06	16980	816	3 (14)
안성천 (1120010)	26	보개교	00041	38	직접확대	0.003	11	70	1993.12	63580	1782	3 (5)
	27	마전1교	25012	38	직접확대	0.008	11	48	1997.01	63580	1782	3 (8)
곡수천 (1022070)	28	초현교	25095	37	강재말뚝	0.001	11	91	1999.05	7849	386	15 (1)
사탄천 (1022640)	29	고읍교	02459	6	강재말뚝	0.007	12	100	1992.07	38267	1040	12 (1)
	30	백현교	02476	37	직접확대	0.018	12	45	1992.01	8222	1130	5 (1)

*11 : 수원국도유지건설사무소, 12 : 의정부국도유지건설사무소

시는 각 교량의 사전 현장조사와 현장 지반조사의 순서로 수행되었으며, 사전 현장조사에서는 교량의 일반 현황, 교량제원 및 기초 형식, 교량이 위치한 하천 및 유역의 수리, 지형 특성을 파악하고 현재 교각의 세굴 피해 정도 및 세굴보호공 현황, 교량의 구조적 결함 정도를 조사하였다. 현장 지반조사에서는 시추작업을 통한 교량 기초 지반의 지층지질조사, 교량 및 하천의 종단면 측량, 하상재료의 입도분석과 교량이 위치한 하천의 수계, 산계, 지질망 등 교량세굴 및 하천안정성과 관련된 종합적인 분석을 실시하였다.

현장 조사를 통해 얻은 자료는 대상 교량 별로 정리하였으며, 교량의 일반현황 및 제원(표 2)과 하천 유역 특성(표 3), 하상 시추조사 결과(표 4), 하상재료의 입도분석 결과 및 교량 종단면도(표 5)의 예를 대상 교량의 하나인 내각교에 대해서 각각 나타내었다.

4. 세굴해석

4.1 수리 매개변수

홍수 시 교량 주위에서 발생하는 세굴심을 평가하기 위해서는 설계 빈도사상의 홍수에 대한 설계 홍수량, 접근 설계 유속, 설계수심 등 수리·수문학적인 인자들에 대한 정확한 평가와 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 대상 교량이 위치한 하천의 하천정비기본계획 보고서와 교량관리시스템(건설교통부, 2000)의 자료를 이용하여 세굴해석에 필요한 수리 매개변수와 교량기초의 제원을 확보하였다. 일반적으로 교량의 세굴검토는 100년 빈도 홍수량이 200 m³/sec 이하의 경우 50년 빈도 이상의 홍수사상을 선정하고, 100년 빈도 홍수량이 200 m³/sec 이상 2,000 m³/sec 이하의 경우 100년 빈도 이상의 홍수사상을 선정하며, 100년 빈도 홍수량이나 기

표 2. 교량의 일반현황 및 제원 (내각교)

교량 일반 현황								
행정구역	남양주시 진접면 내각리		관리청		서울청 / 의정부국도			
국도	의정부 국도47호선		교량코드		25547			
거리표	의정부국도 47호선 구리방향 13 km 지점 하행							
위경도	N : 37° 41' 58.4" E : 127° 10' 02.06" 하행 시점							
차선	왕복 4차선		교통량		40,396 대/일			
준공년월	1993. 12.		설계활하중		DB-24			
조사일자	2006년 6월		하천명		왕숙천			
교량 제원								
교장	31 m	교고	2.5 m	경간장	15.5 m	경간수	2	
교폭	19.5 m	흐름 유입각	0°	교각형상	원	교각폭	정면	1.0 m
							측면	1.0 m
기초형태	직접확대	기초폭	3.2 m	확대기초 근입깊이	2.5 m	측정 세굴심	변동 없음	
최대세굴 발생위치	상행 교각 1번째		특이점		장비 진입로 없음 교각배열 : 1열 4행			

표 3. 하천 유역 특성 (내각교)

하천크기	< 30 m	흐름특성	간헐적		계곡특성	< 30 m
	30~150 m		저평수위			30~300 m
	> 150 m		고평수위			> 300 m
범람원	< 2 × 하천폭	식생정도	< 50%		만곡정도 (sinuosity)	straight
	(2~10) × 하천폭		50~90%			meandering
	> 10 × 하천폭		> 90%			highly
합류부 (anabranch)	소하천 직상류 합류	하상경사	< 0.001		하상재료	자갈질 모래
			0.001~0.01			
			> 0.01			
단면축소유무	무	세굴 보호공	교각		없음	
			제방		없음	
수계망 (왕숙천 유역) 		산계 (왕숙천 유역) 		지질도 (왕숙천 유역) 		

왕 최대 홍수량이 2,000 m³/sec 이상일 경우에는 500년 빈도의 홍수량에 대해 수행하도록 규정하고 있다(건설교통부, 2005). 본 연구 대상 교량의 100년 빈도 홍수량은 신백의교와 흑천교를 제외하고 대부분 200 m³/sec 이상 2,000 m³/sec 이하의 범위에 있어 100년 빈도의 홍수량을 기준으로 세굴 해석을 위한 수리 매개변수를 산정하였으며, 그 결과를 지반 매개변수와 함께 표 6에 나타내었다.

100년 빈도 홍수사상에 대해서 분석된 각 교량에서의 접근 설계수심과 설계유속을 살펴보면 대체적으로 산간지역에 위치한 교량의 수심과 유속이 큰 것을 확인할 수 있다. 대표적인 산지 하천인 영평천에 위치한 영중교, 제1도평교의 설계

수심과 유속이 다른 교량에 비하여 크게 산정되었으며 이는 지형이 급경사이고 하천의 폭이 작으므로 짧은 시간에 많은 유량이 하천으로 유입되기 때문이다. 같은 하천에 위치한 신백의교의 경우 수심은 가장 깊지만 집수유역이 넓기 때문에 유속은 영중교와 제1도평교에 비해 상대적으로 느리게 나타났다. 반면, 하상경사가 크지 않은 하천의 하류에 위치한 신월교, 부평2교, 고읍교 등은 상대적으로 수심과 유속이 작게 산정되었다.

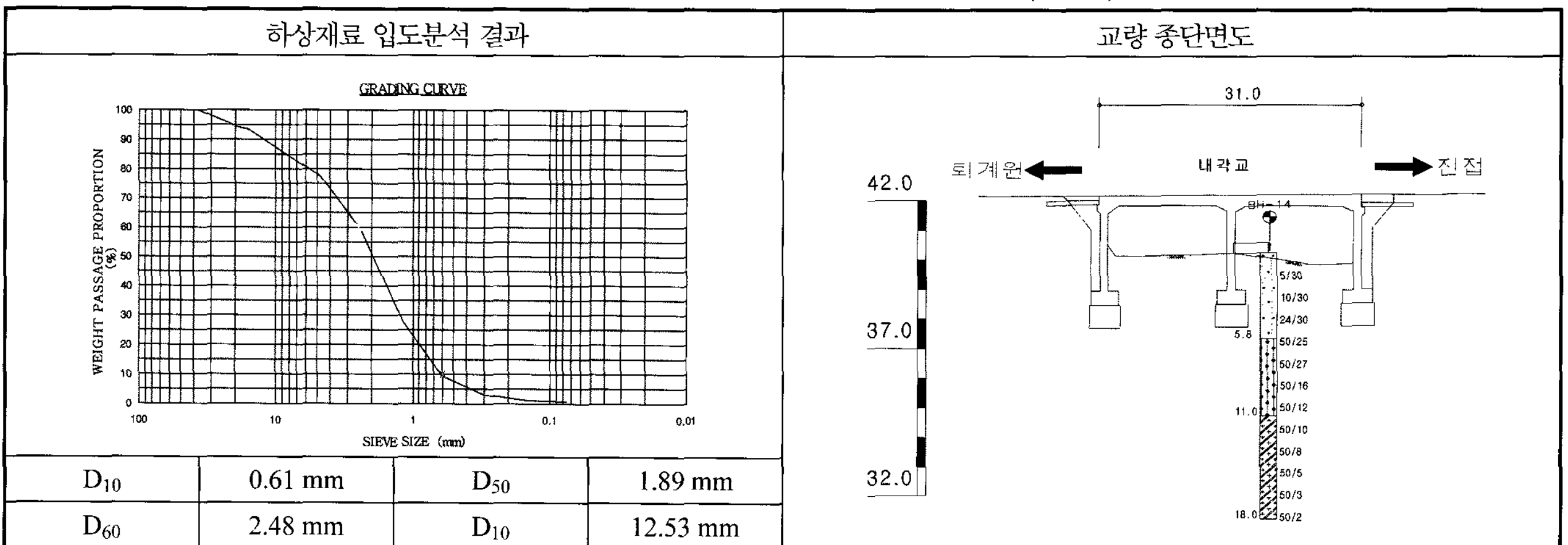
4.2 지반 매개변수

정확한 세굴 평가를 위해서는 교량이 위치한 하천의 수리

표 4. 하상 시추조사 결과 (내각교)

교량 위치		교량 전경			
심도	지층명	표준관입시험 결과			
0.0~5.8 m	자갈질 모래층	1.5 m	5/30	10.5 m	50/12
		3.0 m	10/30	12.0 m	50/10
5.8~11.0 m	풍 화 토	4.5 m	24/30	13.5 m	50/8
		6.0 m	50/25	15.0 m	50/5
11.0~18.0 m	풍 화 암	7.5 m	50/27	16.5 m	50/3
		9.0 m	50/16	18.0 m	50/2
시추 전경		시추 코아			

표 5. 하상재료의 입도분석 결과 및 교량 종단면도 (내각교)



· 수문 특성뿐만 아니라 하상 지형, 심도별 지층, 하상 재료 등 지반 특성에 대한 엄밀한 분석이 필요하다. 본 절에서는 시추조사를 포함한 상세 현장 지반조사를 통해 분석한 교량 하상 지반의 특징을 분석하였다. 현장 지반조사 결과 대상 교량의 하상 지반은 모두 조립토로 구성되었으며, 하상 재료의 특성과 통일분류법(unified soil classification system, USCS)에 의한 지반분류, 연암층의 심도 등을 표 6에 정리하였다.

하상 재료의 특성과 입경 및 입도분포는 세굴심 산정에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 입경이 큰 호박돌 지반의 경우 하상 재료의 피복효과(armoring effect)로 인해 하상 재료가 모래질인 경우보다 동일한 조건에서 세굴심이 줄어들게 된

다. 또한 연암은 단단하고 치밀하여 상대적으로 세굴 저항능력이 크므로 홍수 설계 빈도의 재현 기간 내에는 세굴이 발생하지 않는다고 가정할 수 있으므로, 예상 세굴심 내에 연암층이 존재하는 경우 이를 고려하여 세굴심을 산정하였다.

4.3 세굴심 산정

본 절에서는 앞에서 산정한 대상 교량의 수리 매개변수와 지반 매개변수를 적용하여 각 교량의 교각 세굴심을 산정하였다. 세굴심을 평가함에 있어 추가적으로 고려해야 할 사항은 교각 형상과 기초제원, 흐름 유입각 등의 교각 매개변수이다. 흐름에 노출된 교각은 세굴이 발생하는 근본 원인이므로 세굴

표 6. 수리 및 지반 매개변수 (100년 빈도 홍수 기준)

번호	교량명	수리매개변수					지반매개변수				
		홍수량 (m ³ /s)	하상경사	홍수위 (EL.m)	설계수심 (m)	설계유속 (m/s)	하상 주재료	입경 (mm)		하상재료분류 (USCS)	연암심도 (m)
								D ₅₀	D ₉₅		
1	신백의교	3,680	0.0015	54.95	8.05	3.30	호박돌	0.90	3.22	GP	2.0
2	영중교	1,930	0.0035	68.83	5.11	5.87	호박돌	1.89	26.30	GP	2.6
3	제1도평교	930	0.0097	163.17	4.11	4.22	호박돌	2.00	21.33	GW	0.2
4	약사교	220	0.0192	245.92	2.41	3.81	모래질자갈	2.03	10.26	GP	2.0
5	서두교	345	0.0103	95.81	3.64	3.74	호박돌	2.28	14.39	GP	N/A
6	곤지암교	775	0.0030	71.87	4.93	3.91	모래질자갈	1.24	18.16	GP	2.9
7	구양교	240	0.0097	93.53	3.47	3.23	모래질자갈	3.24	17.74	GP	7.0
8	청평대교	1,900	0.0023	38.34	11.78	3.79	모래질자갈	0.94	9.42	GP	2.3
9	청평2교	1,900	0.0023	38.34	8.88	2.00	호박돌	3.27	14.06	GP	1.8
10	조종교	1,810	0.0024	47.61	5.60	3.37	호박돌	2.14	15.67	GP	1.3
11	다원교	1,810	0.0020	58.05	7.50	2.92	호박돌	5.28	14.29	GW	3.4
12	기장2교	390	0.0143	132.05	4.43	3.71	모래질자갈	4.92	19.01	GW	2.1
13	기장3교	390	0.0143	137.90	3.85	3.04	호박돌	1.49	6.46	GP	2.6
14	내각교	1,480	0.0026	42.93	5.38	2.84	자갈질모래	1.89	12.53	SP	N/A
15	내촌1교	500	0.0105	112.78	3.80	3.48	호박돌	1.11	12.91	GP	14.5
16	내촌2교	390	0.0143	120.42	3.71	3.07	호박돌	3.48	14.96	GP	12.1
17	신월교	465	0.0042	29.46	3.61	2.10	호박돌	4.42	14.29	GW	7.3
18	부평2교	205	0.0114	67.54	3.21	1.66	모래질자갈	1.50	24.89	GP	7.5
19	신팔야교	205	0.0114	79.80	2.80	2.84	모래질자갈	0.85	16.41	GP	3.0
20	양지1교	145	0.0213	119.24	2.99	1.38	모래질자갈	1.62	11.17	GP	N/A
21	송문1교	305	0.0093	112.19	4.44	2.94	모래질자갈	5.97	27.10	GP	3.0
22	송문2교	305	0.0093	113.73	3.57	3.00	모래질자갈	0.63	9.93	GP	3.2
23	추계1교	370	0.0076	97.63	4.28	2.67	자갈질모래	2.21	17.62	SP	2.5
24	추계2교	370	0.0076	92.84	3.80	3.14	모래질자갈	3.10	11.25	GP	5.0
25	흑천교	2,277	0.0024	37.25	5.73	3.45	자갈질모래	0.70	2.31	SP	N/A
26	보개교	270	0.0030	34.22	2.51	3.50	모래질자갈	0.93	16.56	GP	N/A
27	마전1교	170	0.0030	56.85	2.16	2.32	모래질자갈	0.93	17.86	GP	8.2
28	초현교	590	0.0011	39.79	6.15	2.00	모래	1.61	4.39	SP	N/A
29	고읍교	650	0.0063	31.96	7.03	1.67	모래질자갈	1.09	5.41	GP	N/A
30	백현교	290	0.0173	62.42	2.62	2.12	호박돌	4.00	17.74	GP	N/A

심 예측에서 교각 매개변수는 주요 인자로 사용되고 있다. 대상 교량의 교각 매개변수는 교량관리시스템(건설교통부, 2000)과 교량 설계도면을 참고하였으며, 이를 표 7에 정리하였다.

수리 매개변수, 지반 매개변수, 교각 매개변수를 이용하여 대상 교량의 세굴심을 산정하였다(표 8; 그림 4). 교각의 국부세굴은 하천설계기준(건설교통부, 2005)에서 제시하고 있는 CSU 공식(Richardson and Davis, 2001), Froehlich 공식(1988), Laursen 공식(1960), Neill 공식(1973)을 이용하여 산정한 뒤 이들의 평균값을 예상 세굴심으로 하였다. 또한 예상 세굴심 내에 연암층이 존재할 경우 연암층 심도를 고려하여 예상 세굴심을 결정하였다.

지층 특성을 고려한 대상 교량의 예상 세굴심은 몇몇 교량을 제외하고는 대체로 1 m~5 m의 값을 나타내었다. 조립토에 대한 대표적 세굴심 공식인 CSU 공식으로 산정한 세굴심은 평균 세굴심과 비교하여 일정한 경향을 보이지는 않았다. 일

반적으로 CSU 공식의 경우 타 공식과 달리 조립질 하상재료에 의한 피복효과를 고려하기 때문에 하상재료의 입경이 큰 교량의 경우 세굴심이 작게 산정되는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서는 청평2교, 양지1교, 송문1교를 제외하고 대체적으로 평균 세굴심보다 큰 세굴심이 나타났다. 이는 대부분의 교량 기초가 단순 교각이 아니라 교각, 말뚝캡 및 기초로 이루어진 복합 구조물이며, 세굴심 산정 시 복합 구조물의 영향을 고려한 등가 교각폭과 등가 기초폭을 적용하였기 때문이다. 이러한 등가교각 해석은 복합구조 교각의 교량에 대해서 보다 정확한 세굴심을 도출하며 교량의 유지관리를 위하여 권장되고 있다(Richardson and Davis, 2001). 흐름유입각에 의한 영향이 크게 반영되는 Froehlich 공식에 의해 산정된 세굴심은 본 연구 대상 교량의 흐름유입각이 모두 0°로 나타나 일정한 경향성을 나타내지 않았다. Neill 공식은 여러 가지 매개변수 중 수심과 교각폭만을 고려하여 세굴심

표 7. 교각 매개변수

번호	교량명	교각형상	흐름유입각(°)	교각폭(m)	교각길이(m)	확대기초폭(m)	확대기초근입깊이(m)	말뚝길이(m)
1	신백의교	원형	0	2.5	2.5	8.4	4.00	-
2	영중교	원형	0	2.0	2.0	7.0	2.88	-
3	제1도평교	원형	0	1.0	1.0	3.0	2.00	-
4	약사교	사각형	0	0.7	9.5	2.5	2.17	-
5	서두교	타원	0	1.0	1.5	4.0	3.56	-
6	곤지암교	타원	0	0.5	16.8	1.8	3.63	-
7	구양교	타원	0	0.5	17.8	1.8	2.05	-
8	청평대교	원형	0	2.0	2.0	9.5	3.00	-
9	청평2교	원형	0	2.0	2.0	6.0	3.68	-
10	조중교	원형	0	2.0	2.0	7.0	3.18	-
11	다원교	원형	0	2.0	2.0	7.0	3.40	-
12	기장2교	원형	0	0.8	0.8	3.0	2.13	-
13	기장3교	원형	0	0.8	0.8	3.0	2.60	-
14	내각교	원형	0	1.0	1.0	3.2	2.47	-
15	내촌1교	원형	0	2.0	2.0	6.0	6.45	11.00
16	내촌2교	원형	0	2.0	2.0	6.0	5.10	-
17	신월교	원형	0	1.0	1.0	3.0	3.90	-
18	부평2교	원형	0	0.8	0.8	3.0	2.12	-
19	신팔야교	원형	0	0.8	0.8	3.0	1.91	-
20	양지1교	원형	0	1.2	1.2	4.0	3.22	4.68
21	송문1교	원형	0	1.2	1.2	4.0	2.88	-
22	송문2교	원형	0	1.2	1.2	4.0	2.91	-
23	추계1교	타원	0	1.3	3.5	4.0	3.47	-
24	추계2교	타원	0	1.3	3.5	4.0	4.93	-
25	흑천교	원형	0	2.0	2.0	5.0	4.00	-
26	보개교	사각형	0	0.7	17.5	2.5	1.84	-
27	마전1교	원형	0	1.5	1.5	4.5	2.47	-
28	초현교	원형	0	1.8	1.8	3.5	3.01	3.74
29	고읍교	원형	0	2.0	2.0	4.5	2.54	5.34
30	백현교	사각형	0	0.7	9.0	3.0	2.05	-

을 산정하며 수심이 크고 교각폭이 작을수록 세굴심이 크게 산정되므로 신백의교, 청평대교, 다원교, 신월교, 부평2교 등 수심이 크고 교각폭이 작은 교량들의 세굴심이 크게 산정되었다. 이상에서 설명한 바와 같이 각 세굴 공식에서 고려하는 매개변수의 종류와 그 영향정도가 상이하기 때문에 전체 교량에 대한 각 세굴공식의 세굴심 산정 결과가 일정한 경향성을 나타내지 않았다.

5. 세굴 전, 후 지지력 산정

대상 교량 30개소에 대하여 현장 상세조사 및 세굴해석을 통해 분석된 예상 세굴심을 이용하여 각 교량의 세굴 전, 후 기초 지지력을 산정하였다. 전체 교량 중 직접확대기초 교량이 26개소, 말뚝기초 교량이 4개소이며, 기초 제원과 예상 세굴심을 고려한 세굴 전, 후 기초의 지지력을 비교, 검토하였다.

직접확대기초 교량의 경우 식 (1)과 같이 실무 적용성이 높은 구조물기초설계기준(건설교통부, 2003)에서 제안하고 있는 Terzaghi 공식(1943)을 적용하였으며, 암반에 근입된 직접

확대기초의 경우 암반의 물성 및 강도를 고려하도록 하였다. 공식에 적용된 지반의 물성은 현장 시추조사 및 지반조사 결과를 이용하였다.

$$q_{ult} = \alpha c N_c + \beta \gamma_2 B N_\gamma + \gamma_1 D_f N_q \quad (1)$$

여기서, q_{ult} = 극한지지력(tf/m^2), c = 흙의 점착력(tf/m^2), γ_1 = 기초저면 상부 지반의 단위중량(t/m^3), γ_2 = 기초저면 하부 지반의 단위중량(t/m^3), α, β = 형상계수(표 9). N_c, N_γ, N_q 는 전반전단파괴에 대한 지지력계수로 식 (2)로써 정의된다.

$$N_c = \cot \phi \left[\frac{e^{2(2\pi/4 - \phi/2)\tan \phi}}{2\cos^2(45 + \phi/2)} - 1 \right]$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left[\frac{K_p}{2\cos^2 \phi} - 1 \right] \tan \phi$$

$$N_q = \left[\frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)\tan \phi}}{2\cos^2(45 + \phi/2)} \right] \quad (2)$$

표 8. 교량별 세굴심 산정 결과

번호	도로 호선	교량명	기초 형식	확대기초 근입깊이(m)	말뚝길이 (m)	하천설계기준 공식 세굴심 (m)					연암층고려 예상세굴심(m)
						CSU	Froehlich	Laursen	Neill	평균	
1	37	신백의교	직접	4.00	-	8.46	8.22	6.91	8.62	8.05	2.00
2	43	영중교	직접	2.88	-	9.59	7.28	5.24	7.04	7.29	2.60
3	47	제1도평교	직접	2.00	-	4.14	2.87	2.82	3.21	3.26	0.20
4	47	약사교	직접	2.17	-	3.18	2.16	1.79	2.11	2.31	2.00
5	43	서두교	직접	3.56	-	4.26	3.15	2.86	3.44	3.43	3.43
6	3	곤지암교	직접	3.63	-	1.05	0.57	1.08	0.78	0.87	0.87
7	3	구양교	직접	2.05	-	0.93	0.49	0.91	0.71	0.76	0.76
8	37	청평대교	직접	3.00	-	9.48	8.82	8.38	9.69	9.09	2.30
9	46	청평2교	직접	3.68	-	5.00	5.04	5.67	6.27	5.50	1.80
10	46	조종교	직접	3.18	-	7.40	6.75	5.36	6.99	6.63	1.30
11	37	다원교	직접	3.40	-	6.87	6.30	5.96	7.21	6.59	3.40
12	47	기장2교	직접	2.13	-	3.42	2.31	2.62	2.81	2.79	2.10
13	47	기장3교	직접	2.60	-	3.31	2.53	2.58	2.90	2.83	2.60
14	47	내각교	직접	2.47	-	3.36	2.64	3.05	3.21	3.07	3.07
15	47	내촌1교	말뚝	6.45	11.00	4.33	3.40	3.01	3.64	3.59	3.59
16	47	내촌2교	직접	5.10	-	5.99	5.39	3.99	5.46	5.21	5.21
17	43	신월교	직접	3.90	-	2.20	1.72	2.08	2.20	2.05	2.05
18	47	부평2교	직접	2.12	-	2.51	2.38	2.37	2.78	2.51	2.51
19	47	신팔야교	직접	1.91	-	3.13	2.50	2.23	2.69	2.64	2.64
20	42	양지1교	말뚝	3.22	4.68	3.09	3.45	2.30	3.75	3.15	3.15
21	42	송문1교	직접	2.88	-	2.20	2.98	2.90	3.55	2.90	2.90
22	42	송문2교	직접	2.91	-	3.99	3.35	2.71	3.54	3.40	3.20
23	42	추계1교	직접	3.47	-	4.08	3.49	3.10	3.93	3.65	2.50
24	42	추계2교	직접	4.93	-	3.13	2.27	2.43	2.69	2.63	2.63
25	37	후천교	직접	4.00	-	5.90	5.13	4.51	5.44	5.24	5.24
26	38	보개교	직접	1.84	-	3.40	2.51	1.97	2.37	2.56	2.56
27	38	마전1교	직접	2.47	-	4.25	4.20	2.71	3.95	3.78	3.78
28	37	초현교	말뚝	3.01	3.74	3.76	3.60	3.92	4.36	3.91	3.91
29	6	고읍교	말뚝	2.54	5.34	4.32	4.74	4.13	5.62	4.70	4.70
30	37	백현교	직접	2.05	-	2.87	2.41	2.01	2.50	2.45	2.45

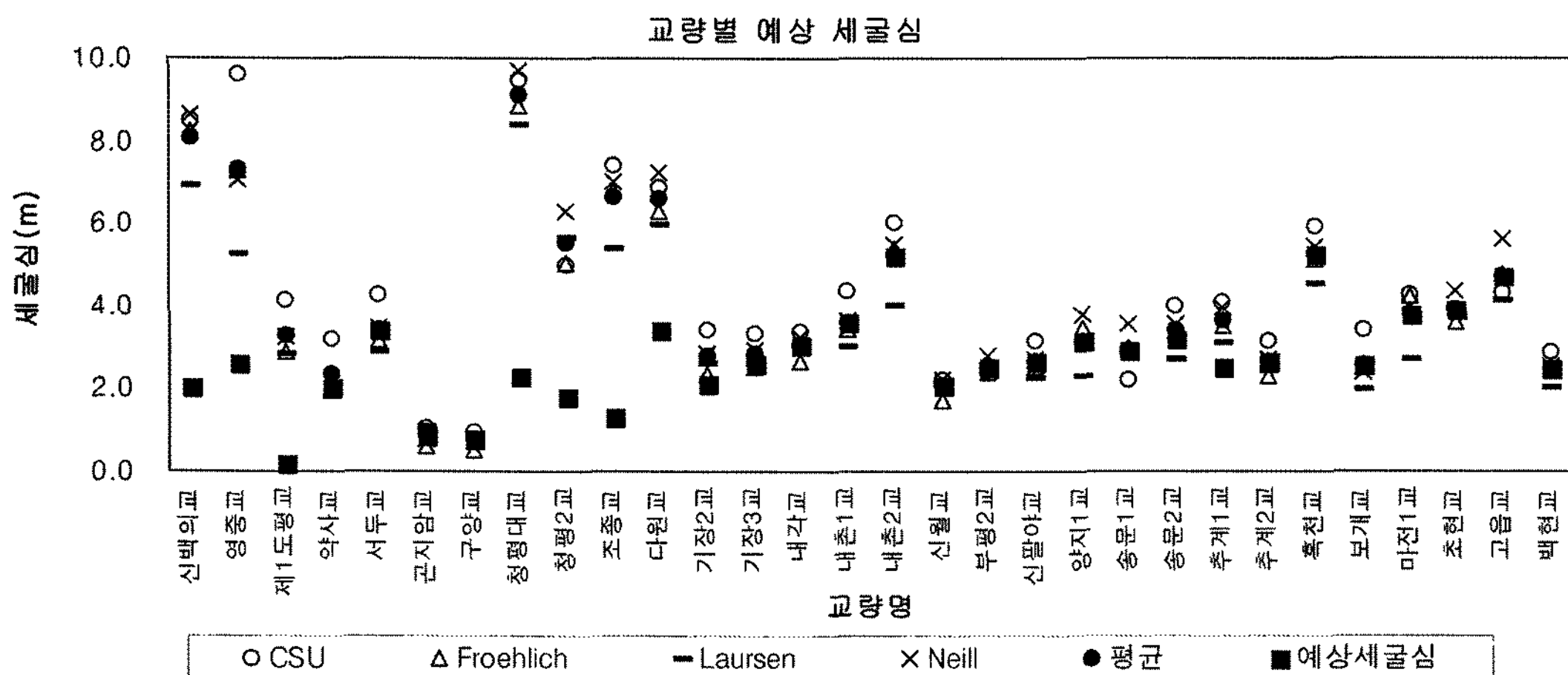


그림 4. 교량별 예상 세굴심

여기서, ϕ = 흙의 내부마찰각, K_p 는 일반적으로 수동토압계수를 적용한다. 암반에 근입된 직접확대기초의 경우 식 (1)의 지지력계수 대신 암석시편에 대한 삼축압축시험에서 구한 내부마찰각(ϕ)을 이용하여 식 (3)으로써 암반의 지지력계수를

산정한 뒤 암석시편의 점착력(c)을 이용하여 극한지지력(q_{ult})을 산정하고 암질지수(rock quality designation, RQD)를 적용하여 최종적으로 식 (4)와 같이 암반근입 직접확대기초의 극한지지력을 구할 수 있다(Bowles, 1997).

$$N_q = \tan^6\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$N_c = 5 \tan^4\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$N_\gamma = N_q + 1 \quad (3)$$

$$q_{ult-rock} = q_{ult}(RQD)^2 \quad (4)$$

표 10은 식 (1)을 적용하여 직접확대기초 교량의 세굴 전, 후 기초의 극한지지력 산정 결과이며, 표 11은 기초가 암반에 근입된 교량(신백의교, 영중교, 제1도평교 등)에 대하여 식(4)를 적용하여 극한지지력을 산정한 결과이다. 표 10에서 암반에 근입된 교량은 그렇지 않은 교량에 비해 기초의 지지력이 전반적으로 큰 것을 알 수 있으며, 표 11에서 암반 지지력 계수와 암질지수를 이용하여 산정한 지지력은 표 10의 Terzaghi 공식으로 산정한 지지력에 비해 2%~50%의 수준으

표 9. Terzaghi 공식의 기초형상계수

형상계수	연속기초	원형기초	정사각형기초	직사각형기초*
α	1.0	1.3	1.3	1 + 0.3B/L
β	0.5	0.3	0.4	0.5~0.1B/L

*B: 확대기초의 폭(m), L: 확대기초의 길이(m)

표 10. 직접확대기초 교량 세굴 전, 후 극한지지력 평가

번호	교량명	기초근입심도 (m)	연암심도 (m)	예상세굴심 (m)	극한지지력(tf/m ²)		
					세굴전	세굴후	감소(%)
1	신백의교	4.00	2.00	2.00	4549.2	4419.3	2.86
2	영중교	2.88	2.60	2.60	4099.8	3930.9	4.12
3	제1도평교	2.00	0.20	0.20	3837.4	3789.4	1.25
4	약사교	2.17	2.00	2.00	3076.1	2930.0	4.75
5	서두교	3.56	N/A	3.43	1281.1	1036.6	19.09
6	곤지암교	3.63	2.90	0.87	3054.2	2997.7	1.85
7	구양교	2.05	7.00	0.76	213.8	164.4	23.11
8	청평대교	3.00	2.30	2.30	4508.8	4286.3	4.93
9	청평2교	3.68	1.80	1.80	4065.7	3948.7	2.88
10	조종교	3.18	1.30	1.30	3968.4	3883.9	2.13
11	다원교	3.40	3.40	3.40	3980.3	3759.4	5.55
12	기장2교	2.13	2.10	2.10	442.4	306.0	30.83
13	기장3교	2.60	2.60	2.60	3051.3	2882.4	5.54
14	내각교	2.47	N/A	3.07	301.3	N/A	100.00
16	내촌2교	5.10	12.10	5.21	584.4	N/A	100.00
17	신월교	3.90	7.30	2.05	1266.5	1133.3	10.52
18	부평2교	2.12	7.50	2.51	270.2	N/A	100.00
19	신팔야교	1.91	3.00	2.64	1090.5	N/A	100.00
21	송문1교	2.88	3.00	2.90	3302.4	3107.5	5.90
22	송문2교	2.91	3.20	3.20	1239.9	N/A	100.00
23	추계1교	3.47	2.50	2.50	3418.6	3250.4	4.92
24	추계2교	4.93	5.00	2.63	3508.0	3379.5	3.66
25	흑천교	4.00	N/A	5.24	471.6	N/A	100.00
26	보개교	1.84	N/A	2.56	231.3	N/A	100.00
27	마전1교	2.47	8.20	3.78	483.4	N/A	100.00
30	백현교	2.05	N/A	2.45	261.8	N/A	100.00

로 작게 나타났다. 이는 암반에 근입된 직접확대기초 교량의 대부분이 암반의 암질지수가 13%~54%로 낮게 산정되었기 때문이다. 반면, 청평대교, 청평2교, 다원교, 추계1교 등 경암에 근입되어 암질지수가 높게 평가된 교량의 경우 식 (4)로써 산정한 지지력이 Terzaghi 공식으로 산정한 지지력과 비슷하거나 더 큰 지지력을 나타내었다. 따라서 암반에 근입된 직접확대기초의 지지력 산정 시 Terzaghi 공식 또는 암반 지지력 계수 및 암질지수를 이용하는 공식 모두를 적용하여 그 결과를 비교, 분석한 뒤 기초 암반 근입심도, 암반 특성, 교량의 안정성 등을 종합적으로 검토하여 전문가의 공학적 판단에 의해 지지력을 결정해야 할 것이다. 두 가지 지지력 공식 모두 세굴로 인한 지지력의 감소율은 비슷하게 나타났다.

직접확대기초 교량의 세굴 전, 후의 지지력 변화를 살펴보면, 내각교, 내촌2교, 부평2교 등 9개 교량은 세굴 발생으로 인해 기초 주변의 지반이 모두 유실되어 기초의 지지력을 100% 상실하는 것으로 나타났다. 또한 서두교, 구양교, 기장2교, 신월교의 4개소는 세굴로 인해 지지력의 10%~30%를 상실하는 것으로 나타났다. 이들 교량은 기초가 모래질 자갈 및 풍화토등 상대적으로 세굴에 대한 저항성이 작은 지반에 근입되어 있고 예상 세굴심이 기초의 근입심도보다 컸기 때문이다. 나머지 교량들은 0.2m~3.43m의 세굴심에 따라 기초 상부 지층이 유실되고 지지력이 약 5% 이내로 감소하였고, 이 교

표 11. 암반 지지력 계수를 이용한 직접확대기초 교량 세굴 전, 후 지지력 평가

번호	교량명	기초근입심도 (m)	연암심도 (m)	암질지수 (%)	극한지지력(tf/m ²)		
					세굴전	세굴후	감소(%)
1	신백의교	4.00	2.00	23	418.9	403.4	3.71
2	영중교	2.88	2.60	30	630.0	595.6	5.46
3	제1도평교	2.00	0.20	45	1354.3	1332.2	1.63
4	약사교	2.17	2.00	54	1538.5	1442.0	2.77
6	곤지암교	3.63	2.90	18	173.3	169.2	6.27
8	청평대교	3.00	2.30	62	4998.4	4804.9	2.42
9	청평2교	3.68	1.80	77	7081.9	6925.0	3.87
10	조종교	3.18	1.30	36	894.3	869.5	2.22
11	다원교	3.40	3.40	91	9753.0	9339.0	4.24
13	기장3교	2.60	2.60	27	380.8	352.9	7.32
21	송문1교	2.88	3.00	27	412.2	380.0	7.81
23	추계1교	3.47	2.50	60	3681.5	3544.4	3.72
24	추계2교	4.93	5.00	60	103.9	98.9	4.73

량들은 연암층이 지표 근처에 존재하고 기초가 연암층에 근입되어 홍수 시 세굴이 발생하더라도 기초의 지지력 변화는 작으며 교량 기초는 안정한 수준을 유지할 것으로 예상되었다.

말뚝기초의 지지력은 실무 적용성이 높은 구조물기초설계 기준(건설교통부, 2003)에서 제안하고 있는 다음의 두 가지 공식을 적용하여 산정하였다: ①정역학 지지력공식, ②표준관입시험 N치를 이용한 Meyerhof 경험식(1976). 두 공식은 각각 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$Q_u = (\sigma_v' N_q + c N_c) A_p + \Sigma f_s A_s \quad (5)$$

여기서, Q_u 는 말뚝 극한지지력(tf), σ_v' 는 말뚝 선단 깊이의 유효상재압(tf/m²)(한계관입깊이 = 20B, B = 말뚝직경(m)), N_q , N_c 는 깊은기초의 지지력계수, c 는 말뚝지지층의 점착력(tf/m²), A_p 는 말뚝 선단 지지면적(m²), A_s 는 말뚝 주면적(m²), f_s 는 단위면적당 최대주면마찰력(tf/m²)(= $\alpha c_u + K_s \sigma_v' \tan \delta$), α 는 부착력계수, c_u 는 주면지반 비배수전단강도(tf/m²), K_s 는 말뚝면에 작용하는 법선토압계수(= 1.4(1 - sin ϕ)), δ 는 말뚝과 주변 흙 사이의 마찰각(= 20°)이다.

$$Q_u = m N_{60}' A_p + n \overline{N}_{60}' A_s \quad (6)$$

여기서, Q_u 는 말뚝 극한지지력(tf), $m = 3 \left(\frac{L_b}{B} \right) \leq 30$, $m N_{60}' \leq 1,500 \text{ tf/m}^2$, L_b 는 말뚝의 지지층 근입 깊이(m), A_p 는 말뚝 선단 지지면적(m²), A_s 는 사질토 지반에 근입된 말뚝의 겉면적(m²), N_{60}' 은 말뚝 선단부근의 N 값, \overline{N}_{60}' 은 말뚝 주면부 사질토 지반의 평균 N 값, $n = \frac{1}{5}$, $n \overline{N}_{60}' \leq 10 \text{ tf/m}^2$ 이다.

두 가지 지지력 공식에 의한 말뚝기초 교량의 세굴 전, 후 지지력 결과는 표 12에 나타내었다. 말뚝기초의 경우 세굴 발생에 의한 지지력 감소는 주면마찰력과 말뚝 선단부 유효상재압의 감소에 의한 것이며, 이러한 지지력 감소율은 정역학 지지력공식의 경우 최대 약 62%, Meyerhof 경험식의 경우 최대 약 13% 미만인 것으로 나타났다. 정역학 지지력공식은 말뚝제원과 표준관입시험 N치뿐만 아니라 토질강도정수(내부마찰각, 점착력) 및 기초상부 지반의 유효상재압에 의해 지지력이 결정되므로 세굴 발생 시 선단부 지지력과 주면부

지지력이 모두 감소되어 세굴 후 지지력 감소율이 크게 나타났다. 반면, Meyerhof 경험식은 말뚝길이와 직경 등 제원과 표준관입시험 N치로써 지지력을 결정하므로 정역학 지지력공식에 비해 세굴로 인한 지지력의 감소량은 적게 나타났다. 말뚝기초 교량 4개소 중 초현교와 고읍교의 경우 말뚝길이 짧고 확대기초의 근입심도보다 예상 세굴심이 크게 산정되어 세굴로 인한 지지력의 감소량이 크게 나타났다. 직접확대기초와 마찬가지로 말뚝기초 교량 역시 기초의 제원과 지반 특성, 세굴량에 따라서 기초의 세굴 위험성이 커질 수 있음을 확인하였다.

6. 교량세굴 위험도 평가

대상 교량에 대한 세굴 위험도 평가는 설계 빈도 사상의 홍수량에 대한 세굴해석을 통해 면밀히 분석된 예상 세굴심과 현장 지반 특성 및 교량기초의 제원 등을 고려한 세굴 전, 후 기초의 지지력 분석을 통해 가능하다. 광기석 등(2006b)은 수리학적 영향 인자와 세굴 안정성 해석에 필수적인 기초-지반 시스템의 지지력 개념 및 지반공학적 영향 인자를 모두 고려할 수 있는 다학제적 개념의 교량세굴 위험도 평가기법을 개발, 제안하였다. 이는 홍수 시 세굴로 인한 교각과 기초, 지반의 거동 분석뿐만 아니라 기초-지반의 지지력 변화량과 안전율을 고려함으로써 교량기초의 안정성을 해석적으로 정량화할 수 있다.

세굴로 인한 교량기초의 위험도 등급체계는 예상 세굴심과 기초 근입심도의 대소비교를 통해 크게 두 부분으로 나눌 수 있다: ①세굴심(Y_s)이 기초의 근입심도(Y_p)와 같거나 큰 경우($Y_s \geq Y_p$), ②세굴심(Y_s)이 기초의 근입심도(Y_p)보다 작은 경우($0 \leq Y_s < Y_p$). 첫 번째 경우는 기초저면에서 발생한 세굴로 인해 기초-지반 시스템의 지지력이 완전히 소실되는 경우로서 설계 사상의 홍수에 대해서 교량이 심각한 위험성을 내포함을 의미하므로 이를 위험도 등급 1순위로 정의하였다. 두 번째 경우는 기초-지반 시스템의 지지력이 세굴로 인해 일부 감소되어 교량이 부분적으로 피해를 입는 경우로서, 다음 식(7)과 같이 세굴 전, 후의 지지력 비를 이용하여 위험도를 정

표 12. 말뚝기초 교량 세굴 전, 후 지지력 평가

번호	교량명	확대 기초 심도 (m)	말뚝제원(m)		예상 세굴심 (m)	평균 N치		정역학 지지력공식 극한지지력(tf)			Meyerhof 경험식 극한지지력(tf)		
			직경	길이		선단	주면	세굴전	세굴후	감소(%)	세굴전	세굴후	감소(%)
15	내촌1교	6.45	0.4	11.0	3.59	50	50	138.9	131.8	5.1	326.7	326.7	0
20	양지1교	3.22	0.4	4.68	3.15	50	44	122.7	72.5	40.9	136.0	136.0	0
28	초현교	3.01	0.4	3.74	3.91	11	9	22.7	8.6	62.0	47.3	45.2	4.3
29	고읍교	2.54	0.4	5.34	4.70	30	38	100.0	39.3	60.7	164.0	143.4	12.6

량적으로 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{q_{ult}^{(normal)}}{q_{ult}^{(scour)}} = \frac{q_a S.F. normal}{q_a S.F. scour} = \frac{S.F. normal}{S.F. scour} \quad (7)$$

여기서, μ 는 교량세굴 위험도, q_{ult}^{normal} 는 세굴 전 극한지지력, q_{ult}^{scour} 는 세굴 후 극한지지력, q_a 는 허용지지력, $S.F. normal$ 는 세굴 전 안전율(safety factor), $S.F. scour$ 는 세굴 후 안전율이다. 세굴이 전혀 발생하지 않는 경우 지지력의 변화가 없으므로 위험도(μ)는 1.0이며, 세굴이 발생하게 되면 세굴 발생 후 지지력이 감소하게 되어 위험도(μ)는 1.0보다 커지게 된다. 일반적으로 교량기초의 지지력 설계시 안전율 3.0을 적용하므로 세굴 전 기초-지반 시스템의 지지력 안전율은 3.0($\mu=1.0$)이며, 세굴이 진행됨에 따라 안전율이 2.0($\mu=1.5$) 또는 1.0($\mu=3.0$)으로 감소하게 된다. 기초-지반 시스템의 지지력 감소로 인한 안전율의 변화를 기준으로 교량의 세굴 위험도 등급을 구분할 수 있으며, 안전율이 2.0이상인 영역을 안전한 4순위, 안전율이 1.0이상, 2.0 미만인 영역을 3순위, 그리고 안전율이 1.0 미만인 영역을 2순위로 정의하였다. 예상 세굴 심 및 기초-지반 시스템의 지지력으로써 정의되는 교량세굴 위험도 등급 체계는 그림 5와 같다.

예상 세굴심 및 기초-지반 시스템의 지지력으로써 평가한 교량세굴 위험도 등급은 현장 상세조사 및 현재 세굴 진행 상태 분석을 통해 재조정될 수 있다. 현장 상세조사 결과 예상 세굴심에 비해 현장 세굴 진행 정도가 심각하여 대책이 요구되는 경우 위험도 등급은 상향 조정해야 하며, 기초 저면이 드러나거나 침하 등으로 인해 매우 위험한 상태로 시급한 대책이 요구되는 경우는 예상 세굴심의 결과에 상관없이 0순위 등급을 부여하여 즉시 대책을 마련할 수 있도록 한다. 반면에 예상 세굴심에 비해 현장 교량기초 상태가 양호하고 세굴 위험도가 낮게 분석되는 경우 잠재적 세굴 가능성을 고려하여 해석적 결과로 나타난 위험도 등급을 유지하도록 한다. 기초에 대한 정보가 없는 교량의 경우는 U 등급으로 분류하여 독립적으로 위험도를 평가하여 유지관리 될 수 있도록 하였다.

본 연구의 대상 교량 30개소에 대한 세굴 전, 후 기초의 지지력 분석 결과에 따른 교량세굴 위험도 평가 결과는 표 13, 표 14에 나타내었다.

직접확대기초 교량은 단단한 지층에 건설되고 상대적으로 작은 근입심도를 가지기 때문에 작은 세굴심의 발생으로도 기초의 지지력 감소량은 많아질 수 있다. 기초가 연암 이상

의 단단한 지반에 근입되어 있지 않고 예상 세굴심이 기초의 근입심도보다 큰 내각교, 내촌2교, 부평2교 등 9개소의 경우 지반의 유실로 인해 기초의 지지력이 모두 소산되는 결과를 보였다. 이들 9개소 교량의 위험도 등급은 1순위로서 설계 빈도 사상의 홍수 발생 시 기초의 안정성이 심각하게 위험해질 것을 예상할 수 있다. 기초가 암반에 근입된 교량 14개소의 경우 암반 점착력에 의한 지지력 요소가 상대적으로 커서 세굴 발생으로 인해 감소된 지지력이 기초의 전체 지지력에 큰 영향을 미치지 못하므로 지지력 안전율은 2.5 이상으로서 위험도 등급 4순위의 안정성을 나타내었다. 직접확대기초 교량의 세굴 전, 후 지지력 변화 양상은 그림 6(암반 미근입 교량), 그림 7(암반 근입 교량, Terzaghi 공식 적용)과 같다.

말뚝기초 교량은 기초의 근입심도가 깊으므로 세굴 발생 시 기초의 연직 지지력은 직접확대기초에 비해 상대적으로 안전한 것으로 인식되고 있다. 그러나 양지1교, 초현교, 고읍교와 같이 확대기초의 근입심도에 비해 예상 세굴심이 상대적으로 큰 경우 정역학 지지력공식으로 산정한 지지력은 세굴로 인해 그 감소율이 유의할 만큼 크게 나타났고 위험도 순위도 3순위로 높게 평가되었다. 또한 일정 길이 이상 말뚝 기초가 흐름에 노출되어 횡방향 유수압 및 충격하중에 의해 기초와 확대기초의 접합부는 위험한 상태에 놓일 수 있다. 따라서 지지력 평가를 통한 교량의 위험도 등급 순위와 함께 정기적인 현장조사를 통해 기초가 흐름에 노출되는 위험한 상황을 미연에 방지해야 할 필요성이 있을 것이다. 말뚝기초 교량의 세굴 전, 후 지지력 변화 양상은 그림 8과 같다.

본 연구의 세굴해석에 적용된 세굴심 공식들이 대체로 세굴심을 과대평가 하는 것으로 알려져 있으며, 단단한 사질토

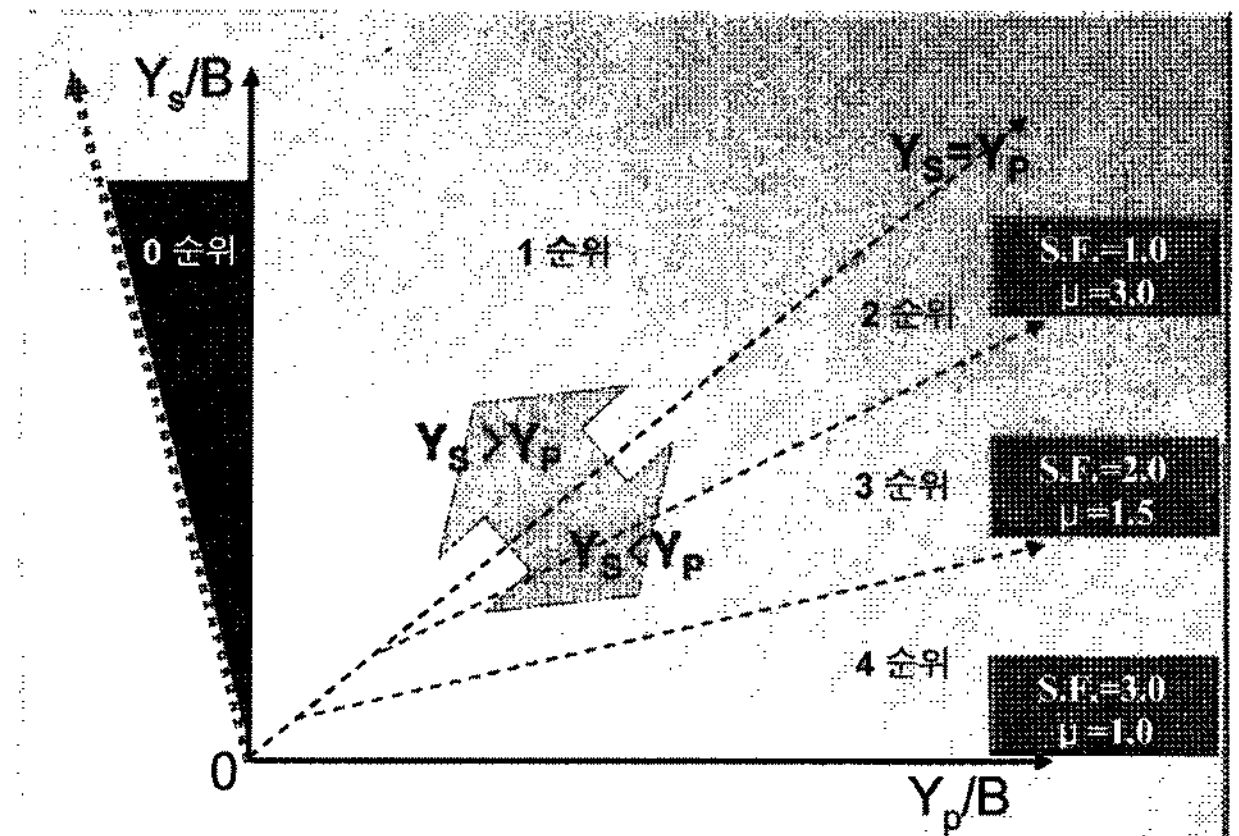


그림 5. 교량세굴 위험도 등급 체계(곽기석 등, 2006c)

층이나 세립토가 함유된 지층의 경우 시간효과로 인해 실제로 예상 세굴심 보다 작은 크기의 세굴이 발생할 수 있다. 그러나 기초의 안전성을 지속적으로 확보하려는 교량세굴 유지관리의 목적을 위해서 본 연구에서는 세굴공식에 의해 산정된 예상 세굴심을 그대로 적용하였고 연암층 상부의 지층은 모두 세굴이 발생할 것으로 가정하였다. 또한, 해석적 연구에 의해 분석, 평가된 교량세굴 위험도 등급의 실무 적용시 현장 상세조사를 통해 세굴 진행 상태를 파악하고 유역의 잠재적 세굴 가능성 분석 등 전문가의 공학적 판단을 종합하여 유지관리 대책을 수립해야 하며, 필요 시에는 기 평가된 3순위, 4순위의 상대적으로 안전한 교량에 대해서도 위험도 등급을 상향 조정하고 적절한 대책 및 응급복구를 통해 기초와 교량전체의 위험을 미연에 방지해야 할 것이다.

7. 결 론

본 연구에서는 서울지방국토관리청 관내 수도권 국도 교량의 홍수 시 세굴에 대한 안정성 확보 및 효율적인 방재대책 수립을 위해서 전체 대상 교량 중 69개소의 교량세굴 조사 우선순위를 분석하였으며, 이를 바탕으로 30개소 실제 교량을 선정하여 교량의 세굴 위험성을 평가하였다. 사례 연구 대상 30개소 교량은 현장 지반조사와 설계 홍수량에 대한 교량세굴 해석을 실시하였고 세굴에 따른 교량기초의 지지력 변화를 엄밀하게 분석하였다. 분석된 세굴 전, 후 교량기초 지지력의 변화 양상을 바탕으로 교량세굴 위험도를 정량화 하였고 세굴 위험도 등급을 평가하였다. 본 연구에서 도출한

표 13. 직접확대기초 교량세굴 위험도 평가

번호	교량명	예상세굴심 (m)	Terzaghi 공식					암반 지지력계수 적용 공식				
			극한지지력(tf/m ²)		위험도 (μ)	안전율 (S.F.)	위험도 등급	극한지지력(tf/m ²)		위험도 (μ)	안전율 (S.F.)	위험도 등급
			세굴전	세굴후				세굴전	세굴후			
1	신백의교	2.00	4549.2	4419.3	1.03	2.91	4	418.9	403.4	1.04	2.89	4
2	영중교	2.60	4099.8	3930.9	1.04	2.88	4	630.0	595.6	1.06	2.84	4
3	제1도평교	0.20	3837.4	3789.4	1.01	2.96	4	1354.3	1332.2	1.02	2.95	4
4	약사교	2.00	3076.1	2930.0	1.05	2.86	4	1538.5	1442.0	1.07	2.81	4
5	서두교	3.43	1281.1	1036.6	1.24	2.43	4	-	-	-	-	-
6	곤지암교	0.87	3054.2	2997.7	1.02	2.94	4	173.3	169.2	1.02	2.93	4
7	구양교	0.76	213.8	164.4	1.30	2.31	4	-	-	-	-	-
8	청평대교	2.30	4508.8	4286.3	1.05	2.85	4	4998.4	4804.9	1.04	2.88	4
9	청평2교	1.80	4065.7	3948.7	1.03	2.91	4	7081.9	6925.0	1.02	2.93	4
10	조종교	1.30	3968.4	3883.9	1.02	2.94	4	894.3	869.5	1.03	2.92	4
11	다원교	3.40	3980.3	3759.4	1.06	2.83	4	9753.0	9339.0	1.04	2.87	4
12	기장2교	2.10	442.4	306.0	1.45	2.08	4	-	-	-	-	-
13	기장3교	2.60	3051.3	2882.4	1.06	2.83	4	380.8	352.9	1.08	2.78	4
14	내각교	3.07	301.3	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
16	내촌2교	5.21	584.4	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
17	신월교	2.05	1266.5	1133.3	1.12	2.68	4	-	-	-	-	-
18	부평2교	2.51	270.2	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
19	신팔야교	2.64	1090.5	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
21	송문1교	2.90	3302.4	3107.5	1.06	2.82	4	412.2	380.0	1.08	2.77	4
22	송문2교	3.20	1239.9	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
23	추계1교	2.50	3418.6	3250.4	1.05	2.85	4	3681.5	3544.4	1.04	2.89	4
24	추계2교	2.63	3508.0	3379.5	1.04	2.89	4	103.9	98.9	1.05	2.86	4
25	흑천교	5.24	471.6	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
26	보개교	2.56	231.3	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
27	마전1교	3.78	483.4	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-
30	백현교	2.45	261.8	0.0	N/A	0.00	1	-	-	-	-	-

표 14. 말뚝기초 교량세굴 위험도 평가

번호	교량명	확대기초 심도(m)	예상 세굴심 (m)	말뚝노출 길이(m)	정역학적 지지력공식					Meyerhof 경험식				
					극한지지력(tf)		위험도 (μ)	안전율 (S.F.)	위험도 순위	극한지지력(tf)		위험도 (μ)	안전율 (S.F.)	위험도 순위
					세굴전	세굴후				세굴전	세굴후			
15	내촌1교	6.45	3.59	0.0	138.9	131.8	1.05	2.85	4	326.7	326.7	1.00	3.00	4
20	양지1교	3.22	3.15	0.0	122.7	72.5	1.69	1.77	3	136.0	136.0	1.00	3.00	4
28	초현교	3.01	3.91	0.90	22.7	8.6	2.64	1.14	3	47.3	45.2	1.05	2.87	4
29	고읍교	2.54	4.70	2.16	100.0	39.3	2.54	1.18	3	164.0	143.4	1.14	2.62	4

결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 서울지방국토관리청 관내 국도교량 30개소에 대한 교량 세굴 위험도 평가 결과 직접확대기초 교량 26개소 중 연암에 근입되지 않은 9개소의 교량이 재현기간 100년 빈도의 홍수 발생 시 세굴로 인해 지지력을 상실할 가능성이 큰 위험도 등급 1순위로 나타났으며, 나머지 17개소 교량은 연암 이상의 단단한 지층에 근입되었거나 예상 세굴심이 작게 산정되어 세굴 전, 후 지지력 감소량이 적고 위험도 등급 4순위로 나타났다. 말뚝기초 교량은 세굴에 대한 지지력이 상대적으로 안정한 것으로 인식되고 있으나 본 연구결과 대상 교량 4개소 중 3개소의 교량이 유의할 만한 지지력 감소율을 보이며 위험도 등급 3순위로

나타났다.

(2) 본 연구에 적용된 교량세굴 위험도 결정기법은 세굴 발생에 따른 교각-기초-지반 통합 시스템의 지지력 개념에 기초하여 수리학적 영향인자는 물론 지반공학적 영향 인자를 모두 고려할 수 있는 다학제적 평가 방법이다. 예상 세굴심과 지지력 분석 등의 결과를 이용하여 해석적 분석을 통해 위험도 1순위~4순위를 결정하며, 현장 상세조사 와 현재 세굴진행 상태를 통해 위험도 순위를 상향조정할 수 있다. 또한 응급대처가 필요한 교량과 기초에 대한 정보를 알 수 없는 교량의 경우 각각 별도의 대책마련 및 관리가 되도록 하였다.

(3) 직접확대기초 교량에 대한 지지력 분석은 구조물기초설계

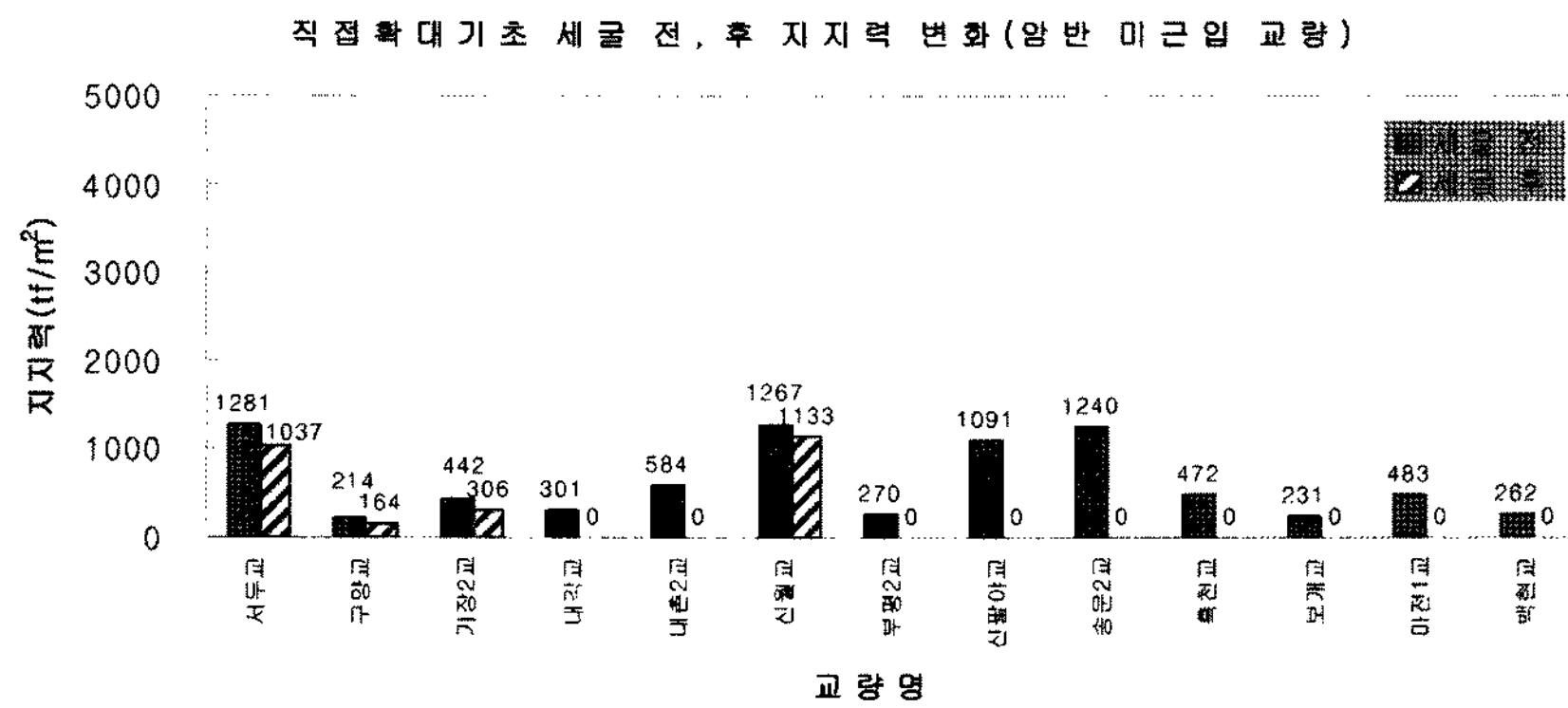


그림 6. 직접확대기초 교량 세굴 전, 후 지지력 변화(암반 미근입 교량)

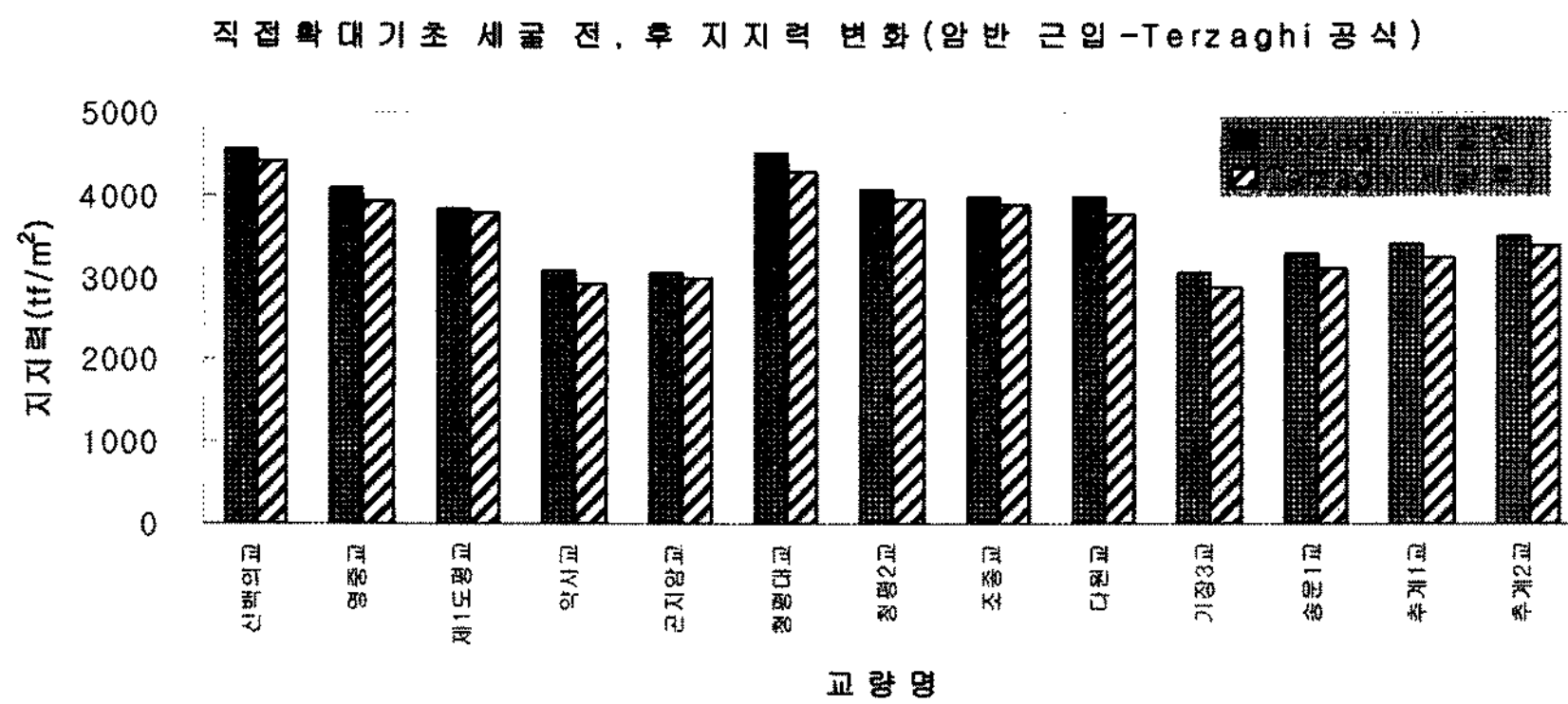


그림 7. 직접확대기초 교량 세굴 전, 후 지지력 변화(암반 근입 교량, Terzaghi 공식 적용)

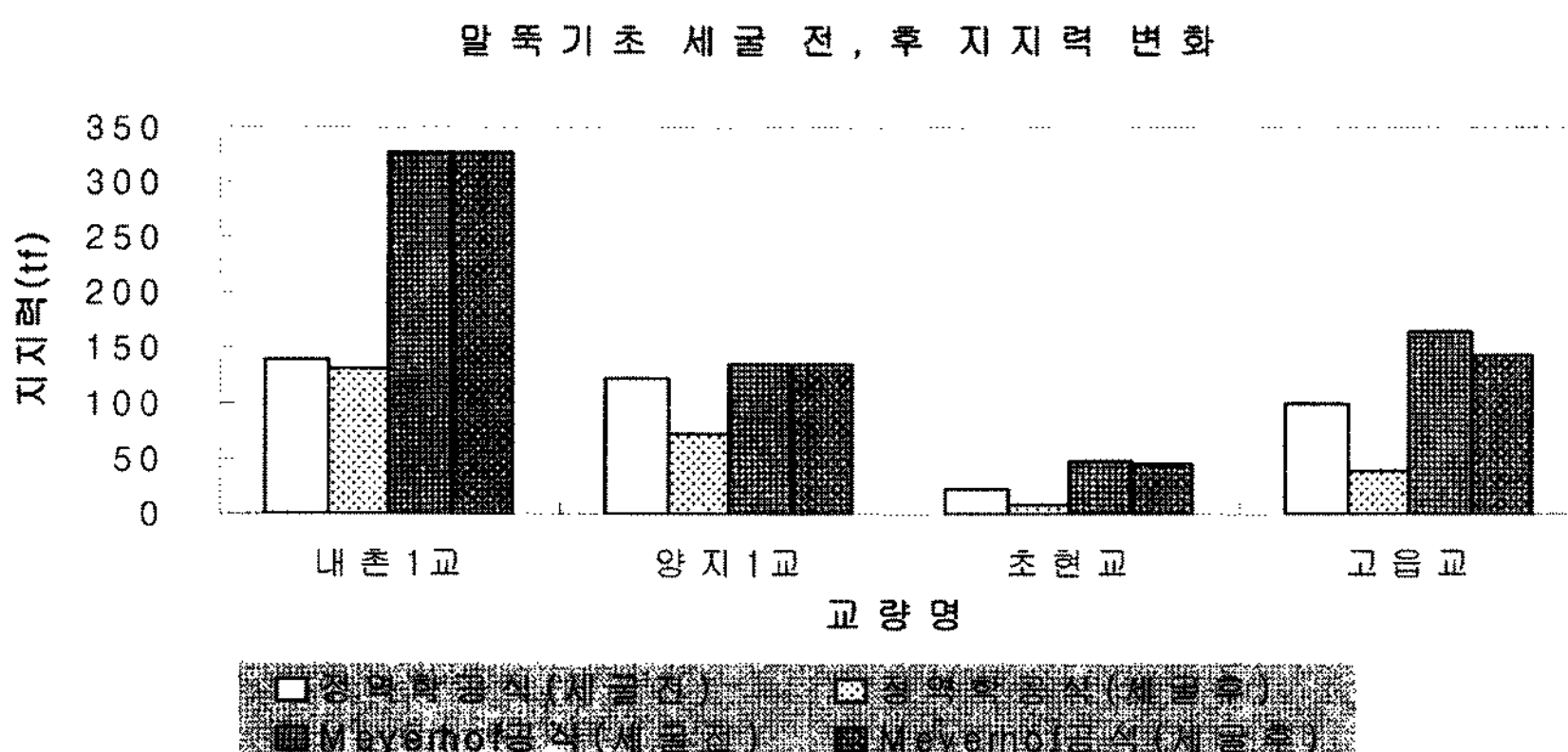


그림 8. 말뚝기초 교량 세굴 전, 후 지지력 변화

기준에서 제안하고 있는 Terzaghi 공식을 적용하였으며 암반층에 근입된 교량에 대해서는 암반 지지력계수와 암질지수를 이용하여 지지력을 분석하고 그 결과를 Terzaghi 공식의 결과와 비교하였다. 암질지수가 50%이하로 낮은 경우 Terzaghi 공식으로 산정한 지지력이 더 크게 나타났고 암질지수가 60% 이상 높은 경우 암반 지지력계수와 암질지수를 적용한 지지력이 더 크게 산정되었다. 그러나, 두 가지 공식으로 분석한 세굴 전, 후 지지력의 감소율은 비슷하게 나타났다.

- (4) 말뚝기초 교량에 대한 지지력 분석은 구조물기초설계기준에서 제안하고 있는 정역학 지지력공식과 Meyerhof 경험식을 적용하였다. 정역학 지지력공식을 적용한 결과 세굴 발생 시 유효상재압과 주변부 마찰력이 감소하여 최대 약 62%의 지지력 감소율을 나타내었으며, Meyerhof 경험식을 적용한 결과 주변부 마찰력만 일부 감소하여 세굴 발생 시 최대 약 13% 미만의 지지력 감소율을 나타내었다.
- (5) 현장 지반조사 결과를 바탕으로 하천설계기준에서 제안하고 있는 조립토에 대한 네 가지 세굴 공식(CSU 공식, Froehlich 공식, Laursen 공식, Neill 공식)을 적용하여 사례 연구 대상 교량에 대한 교량세굴 해석을 실시하였다. 네 가지 공식에 의해 산정된 세굴심의 평균값을 산정하여 예상 세굴심으로 선정하였으며 세굴 저항능력이 큰 연암층 이상의 단단한 지층을 고려하여 예상 세굴심을 결정하였다. 대상 교량의 예상 세굴심은 대체로 1m~5m로 나타났으며, 각 세굴공식에 의한 전체 교량의 세굴심은 일정한 경향성을 나타내지 않았다.
- (6) 서울지방국토관리청 관내 국도교량 중 사전조사 대상 69개소에 대해서 교량세굴 조사 우선순위를 분석한 결과 전체의 78%인 54개소의 교량이 2등급~6등급의 상대적으로 높은 조사 우선순위를 나타내었다. 이는 사전조사 대상 교량 중 81%인 56개소의 교량이 직접확대기초이며, 수도권에 위치한 지리적 특성상 대다수의 교량이 교통량이 많기 때문이다. 간단한 교량 정보를 이용하여 분석된 조사 우선순위는 제한된 비용과 시간 조건에서 교량세굴 현장 조사의 합리적인 결정 기준이 될 수 있다.

본 연구 결과 분석, 평가된 교량의 세굴 위험도 등급은 현장 상세조사 및 주기적인 모니터링을 통해 전문가의 공학적 판단을 종합하여, 체계적이고 효율적인 교량세굴 유지관리 대책수립을 수립하는 데 논리적이고 객관적인 기준이 될 것이다. 또한 향후 홍수 시 적합한 방재대책 수립에 적극 활용될 것이며, 교량의 안정성 확보에 이바지하여 궁극적으로 국가예산 절감에 기여할 수 있을 것이다.

건설교통부 (2000) '99 교량관리시스템(BMS) 운영 및 유지관리 - 일반국도상 교량 구조물도.

건설교통부 (2003) 구조물기초설계기준.

건설교통부 (2004) 교량현황조사서.

건설교통부 (2005) 하천설계기준.

곽기석, 박재현, 윤현석, 우효섭 (2006) 교량세굴 위험도 결정 및 유지관리 시스템 개발(II) - 시스템 검증. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2B호, pp. 197-208.

곽기석, 박재현, 정문경, 우효섭 (2006) 교량세굴 위험도 결정 및 유지관리 시스템 개발(I) - 시스템 개발. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2B호, pp. 187-195.

곽기석, 이주형, 박재현, 정문경, 조삼덕, 우효섭 (2004) **교량기초 장수명화 기술 개발**. 연구보고서, 건기연 2004-034, 한국건설기술연구원.

곽기석, 이주형, 박재현, 정문경, 조삼덕, 우효섭 (2006) **교량기초 장수명화 기술 개발(최종보고서)**. 연구보고서, 건기연 2006-085, 한국건설기술연구원.

여운광, 강준구 (1999) 우리나라 중소 하천의 세굴특성 조사연구 (1). **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제1호, pp. 41-47.

행정자치부 (1995~2003) **재해연보**.

Bowles, J.E. (1997) *Foundation Analysis and Design. Fifth Ed.*, McGraw-Hill Companies, Inc.

Froehlich, D.C. (1988) Analysis of Onsite Measurement of Scour at Piers. *Proc., National Hydraulic Engineering Conference*, ASCE, Colorado Springs, CO., U.S.A.

Laursen, E.M. (1960) Scour at Bridge Crossings. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 86, No. HY2.

Meyerhof, G.G. (1976) Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 102, No. GT3, pp. 197-228.

Neill, C.R. (1973) *Guide to Bridge Hydraulics*. Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Canada.

Richardson, E.V. and Davis, S.R. (2001) *Evaluating Scour at Bridges*. Hydraulic Engineering Circular No. 18, Fourth Ed., FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Shirole, A.M., and ... P.C. (1991) Planning for a Comprehensive Bridge Maintenance Program, *Transportation Research Record*, No. 1290, pp. 137-142.

Terzaghi (1943) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York.

논문접수일 : 2007년 12월 07일
 심사의뢰일 : 2007년 12월 07일
 심사완료일 : 2008년 01월 09일