

不均一斷面橋脚주위의 砂石洗掘 保護工

Riprap Scour Countermeasures around Nonuniform Bridge Piers

윤 태 훈* / 박 기 두**

Yoon, Tae Hoon / Park, Kidoo

Abstract

An experimental investigation was conducted to determine the effect of a nonuniform pier on the stability of riprap placed around bridge piers. A nonuniform pier is one of which the cross-sectional dimension varies over the length of the pier and comprises a cylinder of diameter b_p placed on a larger diameter of foundation b_f . Analysis of the experimental results showed that there exists a critical foundation height z_c , and the stability of riprap are significantly influenced by the height of foundation z . The critical height of foundation is defined as the height of foundation which has the same critical velocity to that of uniform pier without foundation, and it was found to be $z_c=0.8b_f$. For $z < z_c$, the foundation increases the stability of ripraps by intercepting downflow and by acting as a foundation upstream extension. For $z > z_c$, the stability of ripraps is reduced due to the enlargement effect of foundation and downflow along the foundation itself. The effects of nonuniformity of piers are presented and design equations are suggested.

keywords : scour countermeasures, nonuniform piers, footing, riprap, critical foundation height

요 지

교각과 기초로 구성되는 불균일단면교각 주위의 사석보호공의 거동에 관련된 인자들의 영향에 관한 실험결과가 기술된다. 불균일단면교각은 교각의 전 길이에 대한 단면이 일정하지 않고 직경 b_p 의 원주가 보다 큰 직경 b_f 인 기초에 설치된 구조이다. 사석보호공의 안정은 기초의 높이에 따라 크게 영향을 받으며 한계기초높이, z_c 가 존재함이 밝혀졌다. 한계기초높이는 균일단면교각의 한계유속과 같은 한계유속을 갖는 불균일단면교각의 기초높이로 정의되고 실험결과 $z_c=0.8b_f$ 로 밝혀진다. 기초높이가 z_c 보다 작으면 기초의 상류 방향으로 작용하여 사석보호공은 더 안정하게 되고, 기초높이가 z_c 보다 크게 되면 기초는 단면이 증대된 교각으로 작용하고 기초 자체의 하강류로 인하여 사석보호공은 불안정하게 되어 쉽게 움직이게 된다. 기초상단면적의 영향과 불균일단면교각의 사석보호공의 크기 결정방법이 또한 기술된다.

핵심어 : 세굴, 불균일단면교각, 기초, 사석, 한계기초높이

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engrg., Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
thyoon@email.hanyang.ac.kr

** 한양대학교 대학원 토목공학과 공학석사

Formerly graduate student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

1. 서론

교각의 하부구조는 그 대부분이 우물통, 케이슨 및 말뚝과 같은 기초 위에 교각을 설치하는 복합구조로 그 단면이 균일하지 않는 불균일단면교각 구조이다. 교각주위 세굴에 관해서는 많은 연구가 수행되어 왔으며 그 대부분은 균일단면교각에 관한 연구이고 불균일단면교각에 관한 연구는 그 수를 헤아릴 정도이다 (Chabert와 Engeldinger, 1956; Jones 등, 1992; Parola, 1996; Melville과 Sutherland, 1988; 윤 등, 1998).

교각주위 세굴보호공에 관한 연구는 비교적 최근에 활발해지기 시작되었다고 할 수 있다. 미국에서는 뉴욕 주의 1987년 Schoharie강, 1989년 테네시주 Hatchie 강, 1995년 캘리포니아주 Arroyo Pasajero강의 연속된 교량붕괴로 교각주위 세굴보호공에 관한 조사, 연구 개발이 이루어지게 되었고, 국내에서는 세굴보호공에 관한 연구가 비교적 활발하다고 할 수 있다.

세굴보호공에 관한 연구로는 보호공 설계식의 비교 연구(윤 등, 1996), 원형교각 세굴보호공(Yoon 등, 1999, 윤 등, 1998), 만곡수로 세굴 보호공(박 등, 1999), 돌망태 보호공(Yoon과 Kim, 1999) 등의 연구가 있다.

국외의 연구로는 불균일단면교각의 세굴(Melville과 Raudkivi, 1996), 사석보호공(Ruff와 Nickelson, 1993; Parola, 1993; Chiew, 1992, 1995; Lim과 Chiew, 1997), 케이블 연결 볼라 보호공(McCorquodale 등, 1993; Carlos 등, 1998), 희생말뚝 보호공(Paice 등, 1993; Melville 등, 1998) 등의 연구가 있다. 이들 연구는 균일단면교각에 관한 것이고 불균일단면에 관한 세굴보호공 연구는 아직 발표되지 않는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구의 목적은 수리실험을 통하여 불균일단면교각주위 사석보호공의 거동과 실제 설계에 적용 가능성을 제시하고자 함이다.

2. 실험장치와 방법

실험에 사용된 수로는 길이 20m, 폭 0.9m 및 깊이 0.4m인 순환식 가변경사 개수로이다. 수로길이의 중앙부에 길이 2m, 깊이 15cm의 받침을 설치하고 평균입경 $d_{50}=0.4\text{mm}$ 의 모래로 채워 정지상(clear water) 상태에서 실험이 가능하도록 했다. 유량공급은 15마력 펌프 2대를 이용했으며 유량측정은 직경 9.68cm의 공

표 1. 불균일단면교각의 제원

교각직경 $b_p(\text{cm})$	기초직경 $b_r(\text{cm})$	b_p/b_r	기초높이 z/b_r
15	50	0.3	0.2 0.4 0.8
20	50	0.4	0.2 0.4 0.6
3.0	50	0.6	0.2 0.4 0.6

표 2. 실험에 사용된 사석

번호	D_{p50} (mm)	σ (mm)
1	2.13	2.12
2	2.67	2.65
3	3.53	3.52

급관로에 설치된 수문을 이용한 오리피스 미터 ($Q=0.0944\Delta h$)에 의하였다. 불균일단면교각은 받침의 수로 중앙에 위치시켰으며 교각과 기초의 크기와 비는 표 1과 같다.

표 1에서 z 는 기초의 높이(그림 1)이다. 실험에 사용된 사석은 3종류로 표 2와 같다. 교각주위의 사석부 설치두께는 d_{50} 의 3배였으며, 범위는 교각주위 원형으로 그 직경은 기초직경의 5배로 하였다.

표 2에서 D_{p50} 는 사석크기의 중앙치, σ 는 사석크기의 표준편차이다. 수로의 흐름은 수로하류단 수문을 충분히 높은 상태에서 밸브를 조절하여 정해진 유량이 흐를 때까지 사석이 유실되지 않도록 유량을 완만하게 증가시키고 정해진 유량이 얻어지면 흐름의 변화가 무시될 정도로 수문을 서서히 내려 유속을 증가시켰다. 교각 측면부에서 사석입자가 3~4개가 일시에 이탈하

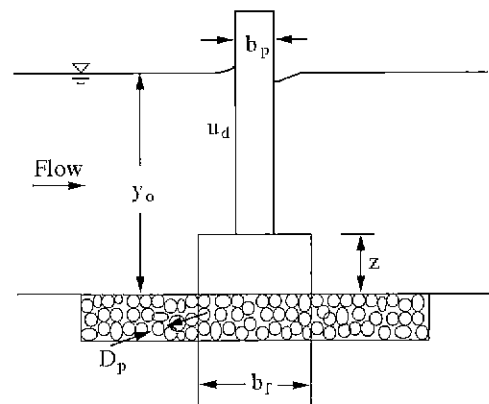


그림 1. 정의도

는 순간을 한계(또는 시동)상태로 정의하고 이때의 유량을 흐름단면적으로 나누어 한계(시동)유속 u_c 를 결정하였다. 이 경우 그 단면평균 유속이 한계유속과 같다고 가정된다.

본 실험에서 채택된 기초는 실제상황을 고려하여 기초상단이 하상과 같거나 보다 높은 경우이고 사석보호공의 부설면은 하상과 같은 경우에 한한다. 일반적으로 세굴시에는 하강류의 영향으로 교각 전면부에서 하상 입자가 이탈되기 시작하여 말굽형와(horseshoe vortex)에 의해 교각 측면의 하상입자가 이탈하고 일부는 부유상태로 하류로 흐르지만 대부분은 교각 후면부에 퇴적되게 된다.

사석보호공의 경우 사석입자는 일반적인 세굴과는 달리 말굽형와의에 의해 교각 측면에서부터 이탈하기 시작하여 이탈이 계속됨에 따라 교각 전면부와 후면부의 입자까지 이탈한다. 이 때 사석 상호간의 엇물림 효과에 의해 전단세굴(shear failure)이 일어날 수 있는 상태보다 더 큰 유속에서 이탈이 일어난다. 일단 이탈이 일어나면 엇물림 효과를 약화시켜 연쇄적인 이탈이 발생한다. 그러나 입자간의 엇물림 강도가 정확하게 일정하지 않다고 할 때, 좀더 작은 입자가 먼저 이탈하고 이 또한 엇물림 효과를 약화시키는 결과를 초래하였다. 앞서 한계상태를 정의할 때, 유량을 고정시킨 후 수문을 조절하여 유속을 증가시킴에 따라 교각 측면부에서 사석입자가 3~4개 한꺼번에 이탈하는 순간이라 한 바 있다. 이 한계상태는 바로 이 엇물림 효과가 약화되는 시점에 발생한다고 할 수 있다.

유량이 크고 수심이 큰 경우, 작은 사석은 측면부의 말굽형와의에 의한 이탈이 이루어지기 전에 교각 직후면부에 발생하는 후류에 의해 연직으로 상승과 하강을 반복하다가 이탈한다. 특히 교각 직경이 클수록 후류의

강도가 증가하므로 큰 사석에서도 이탈이 관측되기도 하였다. 이는 후류에 의한 직접적인 영향 외에도 교각 전면과 후면의 수심차이에 의한 정수압 차이와 후류를 발생시키는 요인이 되는 약리현상에 따른 압력차이에 의한 것으로 풀이할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 몇몇 예외적인 이탈에 대해서는 고려하지 않고 일관된 실험을 위해 하강류와 하강류의 강도에 따른 말굽형와의 강도에 의한 교각 측면부에서의 이탈만을 한계상태로 정의하여 실험을 수행하였다

3. 실험결과

3.1 한계유속의 변화

불균일단면교각주위에 부설된 사석보호공에 대한 한계유속은 균일단면교각의 경우(윤 등, 1998)와 같이 2개의 흐름영역으로 구분되는 양상은 같으나 그 크기는 다르게 나타났다.

그림 2에서 주목되는 사실은 기초상단의 높이 z 가 증가함에 따라 한계유속 u_c 가 감소하여 사석보호공은 작은 u_c 에서 이탈하여 안정성이 감소한다. 특별히 주목되는 점은 어느 하나의 기초높이 z 에서의 보호공의 이탈양상이 기초가 존재하지 않는 균일단면교각의 경우 ($z=0$)와 같게 되는 점이다.

3.2 기초높이 z 의 영향

Parola(1996)는 실험을 통하여 기초의 상류부분을 상류로 연장하는 경우 연장부분이 하강류를 차단하고 바닥보호역할을 하여 세굴심이 감소함을 보였다. 그림 3(b)와 3(c)에서와 같이 기초가 존재하는 불균일단면교각으로서 기초상단의 높이가 하상과 같거나 약간 높은 경우 기초상단은 하강류를 차단하고 하상을 보호하

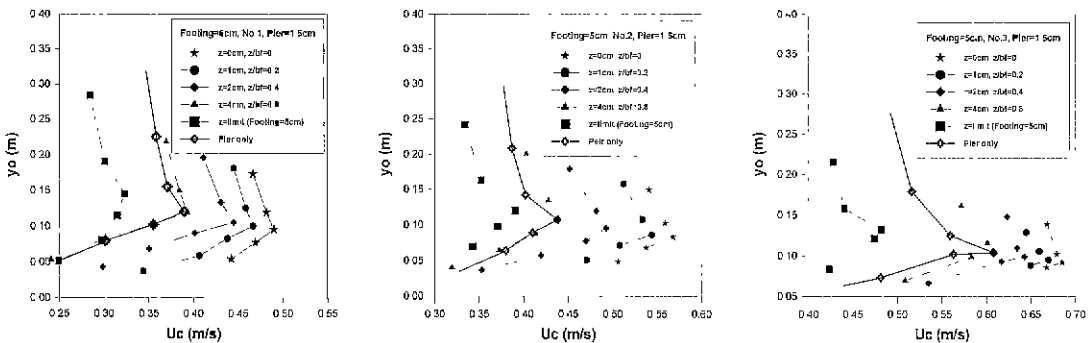


그림 2. 불균일단면교각의 수심에 대한 한계유속 ($b_0=1.5cm, b_1=5.0cm$)

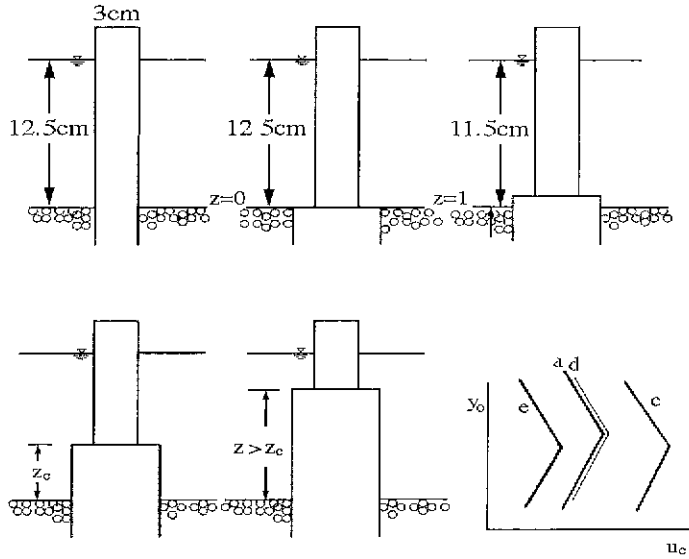


그림 3. 불균일단면교각의 사석보호공의 거동

여 사석보호공의 이탈이 시작되는 유속인 한계유속 u_c 를 증가시켜 사석보호공의 안정도는 증가하게 되고 기초는 보호공 역할을 하게 된다.

모든 교각은 케이슨기초, 말뚝기초 및 우물뚝기초와 같은 기초위에 건설된다. 이러한 기초의 상단표고가 하상과 같게 되는 경우도 있으나 하상보다 높게 되는 경우가 대부분이다. 이러한 경우 교각기초의 높이에 따라 기초주위의 세굴 및 보호공의 거동은 판이하게 다르게 됨이 예상된다.

기초상단의 높이가 하상과 같거나(그림 3(b)), 하상보다 약간 높은 경우(그림 3(c))에는 기초가 하강류를 차단하고 하상을 보호하여 한계유속 u_c 는 증가하여 하상은 안정하게 되고 기초는 보호공 역할을 하게 된다.

그림 3(c)에서 $u_c=0.56\text{m/s}$ 가 갖는 의미는 그림 3(a)의 $u_c=0.51\text{m/s}$ 에서 이동하는 사석이 그림 3(c)에서는 $u_c=0.56\text{m/s}$ 에서 이동하고, $u_c=0.51\text{m/s}$ 에서는 이동하지 않는다. 이는 기초의 존재로 하상이 더 안정해진 결과이다. 즉 그림 3(c)에서는 그림 3(a)에 부설된 사석과 동일한 크기의 사석을 움직이는데 $u_c=0.56\text{m/s}$ 이 필요하므로 그림 3(c)에서 $u_c=0.51\text{m/s}$ 에서 움직이는 사석은 더 작아지게 되어 그림 3(a)와 동일한 안정조건에서 보다 더 작은 사석의 사용이 가능하게 된다. 따라서 동일한 흐름조건(한계유속)에서 높이가 작은 기초가 설치되면 기초가 없는 경우보다

보호공사석의 크기를 감소시킬 수 있고 동일한 사석에 대해서는 더욱 안정하게 된다.

한편 기초 상류벽면(그림 3(c))에서 발생하는 하강류와 기초로 인한 단면증대는 하상물질의 이동을 증대시키나 이의 영향은 기초에 대한 교각하강류의 차단효과에 비하여 무시될 정도이다. 그러나 기초높이가 커지게 되면 교각에 의한 하강류는 기초에 의하여 차단되거나 기초에 의하여 발생하는 하강류와 기초로 인한 단면증대의 효과가 지배적이 되어 하상물질의 이동가능성은 증가한다.

기초의 높이 z 가 더 증가하면 기초 상류벽면에서 발생한 하강류와 단면증대의 영향이 크게 되어 하상물질은 쉽게 이동하게 되어 u_c 는 감소한다. 기초상단에 의한 교각의 하강류 차단 효과는 기초에 의한 하강류 및 단면증대 효과와 상반되는 효과를 갖고, 이들 두 효과가 같게 되는 기초높이를 생각할 수 있다. 이 높이를 한계기초높이 z_c 라 하면 이는 그림 3(a)의 경우와 같게 되어 구조물(기초)의 영향이 배제된다. 한계기초높이 z_c 는 기초가 없는 균일단면 교각의 한계유속과 같은 크기의 한계유속을 갖는 불균일단면교각의 기초상단높이로 정의될 수 있다.

z 가 한계기초높이 z_c 에 이르면(그림 3(d)) 양자의 효과는 상쇄되어 그림 3(1)에서 그림 7(a)와 그림 3(d)에 대한 곡선 a, d는 일치하게 된다. $z > z_c$ 가 되면(그

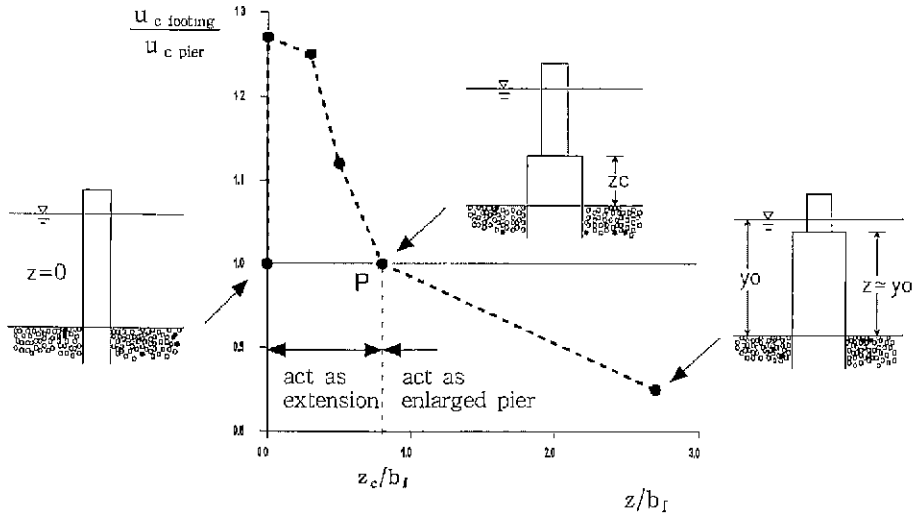


그림 4. 기초높이에 따른 한계유속

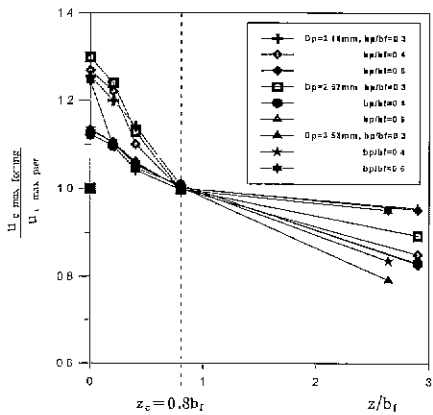


그림 5. 한계기초높이를 정의하는 기초높이-한계유속관계

림 3(e) u_c 는 더욱 감소하여 $u_c=0.48\text{m/s}$ 보다 작은 유속에서도 하상물질이 이동하게 되어 세굴에 취약하게 된다. 즉 불균일단면의 교각하부구조는 세굴에 대하여 기초만으로 저동을 하게 되어 기초에 의한 하강류와 단면 증대의 두 영향이 같이 작용하게 되어 하상물질은 낮은 한계유속에서도 이동하게 되어 사석보호공의 안정성은 감소한다.

위의 사실은 그림 4와 같이 정의될 수 있으며 종축은 균일단면교각의 최대 u_c 와 불균일단면교각에 대한

최대 u_c 의 비이다. 그림 4에서 P점은 한계기초높이 z_c 를 정의한다.

그림 3(f)와 그림 4에 관한 사실은 상이한 조건 (b_p/b_f , D_p)에 대한 한계상태를 나타내는 기초의 높이는 그림 5에서와 같이 실험으로 입증된다. 한계기초높이는 기초가 교각에 의한 하강류를 차단해서 보호공에 대한 안정효과를 갖는 최대높이라고도 정의될 수 있다. 따라서 기초의 높이가 한계기초높이 z_c 를 초과하면 보호공에 대한 안정효과는 감소하고 기초없이 교각만 있는 하부구조보다 안정도가 떨어지게 된다

최대한계유속의 향으로 한계기초높이를 정의할 경우 z_c/b_f 의 값은 그림 5로부터

$$z_c/b_f = 0.8 \quad (1)$$

이 됨을 알 수 있다.

$z > z_c$ 인 영역에서는 한계유속 u_c 가 균일단면교각에서의 한계유속 $u_{c, pier}$ 보다 작게 되므로 사석보호공의 크기는 교각만인 균일단면의 교각에서보다 커야 한다. 이 경우 단일단면의 교각보다 보호공의 안정도는 작게 되고 기초는 보호공안정에 악영향을 미친다. $z > z_c$ 인 영역에서는 u_c 가 균일단면 교각에서의 한계유속 $u_{c, pier}$ 보다 크게 되어 사석보호공의 크기는 균일단면의 교각보다 작아도 된다. 이 경우 기초상단은 하강류를 차단하여 보호공의 안정도는 균일단면 교각의 경우보다 크게 되고 기초는 보호공의 역할을 하게된다. 이러한 사실은

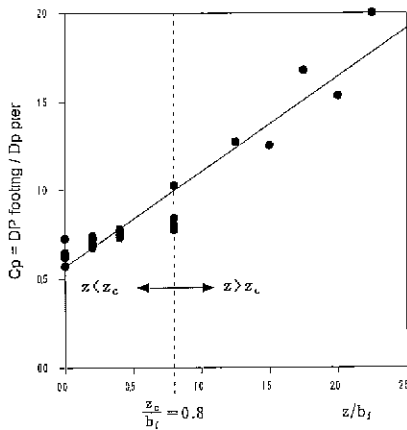


그림 6. 기초높이에 대한 균일단면교각의 사석직경과 불균일단면교각의 사석직경비와의 관계

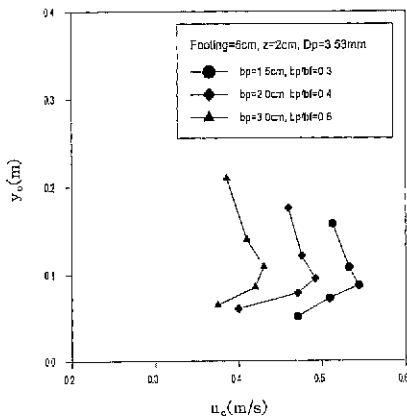


그림 7. 기초폭, 수심에 대한 한계유속

그림 6과 같이 실험결과로 입증된다. 따라서 그림 6은 균일단면교각에 대하여 선정된 사석 보호공의 크기를 불균일단면교각에 대한 사석크기로 환산하는데 이용할 수 있다.

3.3 교각과 기초의 폭 비(bp/bf)의 영향

b_p/b_f 가 감소하면 즉 교각에 비하여 기초가 크게 되면 한계유속 u_c 는 증가하여 보호공의 인정도는 증가하고 이는 b_p/b_f 의 감소는 기초상단면의 폭의 증가로 기초상류부분 연장과 같이 작용한 결과로 하강류 차단효과가 증가하기 때문이다. 기초상단의 높이가 하상과 같

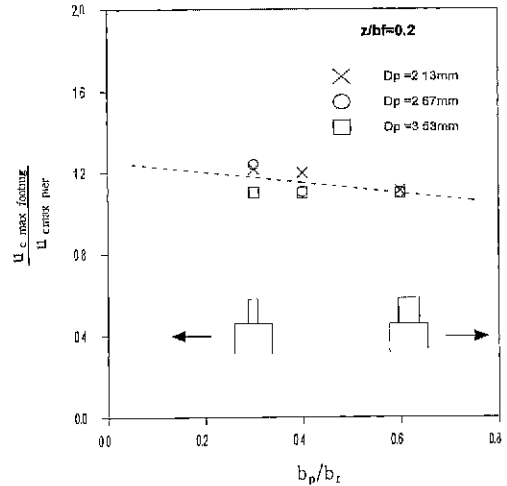


그림 8. 불균일단면비에 따른 한계유속

거나 약간 낮은 경우 Parola(1996)는 기초를 상류로 연장하면 세굴심의 감소효과가 증가하고 연장이 교각 직경의 2.5배일 때 세굴심은 거의 일어나지 않음을 밝혔다.

균일단면교각에 대한 편기에 따른 한계유속은 그림 7에서와 같이 편기가 증가함에 따라 즉 b_p/b_f 가 감소함에 따라 u_c 는 증가하여 기초상단면의 기초상류부분 연장의 역할이 증가함을 알 수 있다. 이를 $z/b_f=0.2$ 와 b_p/b_f 에 대하여 나타낸 것이 그림 8이다.

4. 불균일단면교각에 대한 사석직경 결정

사석보호공의 안정에 영향을 미치는 수리빈수는 사석의 직경 D_p 과 비중 S_s , 교각폭 b_r , 기초폭 b_b , 접근수심 y_b , 접근유속 u_b , 한계유속 u_c , 하상에서 기초상단까지의 높이 z , 그리고 사석부설폭 B 등이다. 그러나 이와 같이 많은 변수의 향으로 사석크기를 정의하는 것은 매우 어려우므로 불균일단면교각의 인자를 이용하여 균일단면교각에 대한 사석보호공의 크기를 보정하여 불균일단면교각에 대한 사석보호공의 크기를 결정하는 것이 고려될 수 있다.

그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 기초 없이 교각만 있는 균일단면교각의 경우에 비하여 기초가 있는 불균일단면교각의 경우에는 z/z_c 에 따라 u_c 는 증가 또는 감소한다. 이는 동일한 흐름조건에서 한계기초높이 z_c 보다 낮은 기초의 존재는 작은 사석보호공의 사용을 가능하게 한다. 그러나 기초높이 z 가 한계기초높이

z_c 보다 크게 되면 기초에 의한 하강류 차단효과보다 기초자체에 의한 하강류와 단면증대의 효과가 우세하여 세굴이 취약하게 된다 따라서 동일한 흐름조건에서 z/z_c 의 경우에는 보다 큰 사석보호공이 필요하다. 이를 사석보호공의 크기에 반영하기 위하여 기초높이 z 에 따른 한계유속 u_c 의 변화를 사석크기의 증가로 환산하여 기초가 없이 교각만 있는 경우의 사석크기 $D_{p, pier}$ 와 기초가 있는 경우에 대한 사석보호공의 크기 $D_{p, footing}$ 의 비 $D_{p, footing}/D_{p, pier}$ 를 z/b_f 항으로 나타낸 것이 그림 6이고 최적적합선의 회귀식은 다음과 같다

$$C_p = 0.56 + 0.53 \frac{z}{b_f} \quad (2)$$

그림 2에서와 같이 두 흐름영역에 대한 균일단면교각에 대한 사석크기 D_{p1} 과 D_{p2} 는 식 3, 식 4로 계산된다(윤 등, 1998).

$$D_{p1, pier} = 0.0485 \frac{u_c^{1.68} b^{0.20} y_o^{0.36}}{(S_s - 1)^{0.81} B^{0.40}} \quad (3)$$

$$D_{p2, pier} = 0.0272 \frac{u_c^{1.32} b^{0.24} B^{0.45}}{(S_s - 1)^{0.66} y_o^{0.36}} \quad (4)$$

$$D_{p, pier} = \max(D_{p1}, D_{p2}) \quad (5)$$

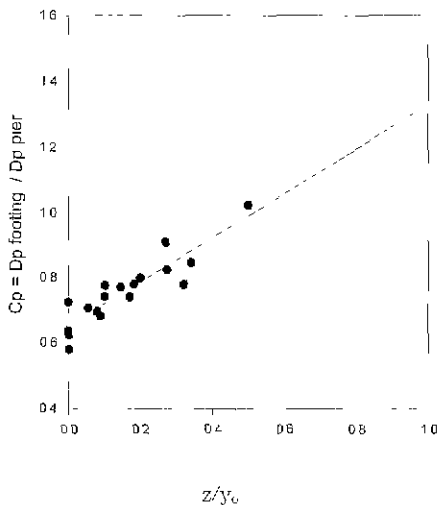


그림 9. 사석크기에 대한 무차원수($D_{p, footing} / D_{p, pier}$) 수심에 대한 기초높이(z/y_o)에 관한 차원수의 관계

z/b_f 에 대한 $C_p = (D_{p, footing}) / (D_{p, pier})$ 값을 그림 6 또는 식 2로부터 구하고 이를 계산된 균일단면교각에 대한 사석크기 D_p 에 곱하여 불균일단면교각에 대한 사석보호공 $D_{p, footing}$ 을 결정한다.

$$D_{p, footing} = C_p D_{p, pier} \quad (6)$$

5. 결 론

교각과 기초로 구성된 불균일단면교각 주변 사석보호공의 거동을 조사하기 위하여 수행한 수리실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

기초상단 표고가 하상과 같거나 약간 높은 경우에는 기초상단이 하강류를 차단하고 바닥보호기능을 가져 기초가 보호공의 안정성을 높인다. 그러나 기초상단의 높이가 증가하면 하강류 차단효과와 감소와 교각구조물 단면증대 영향으로 세굴보호공의 안정성은 감소한다. 높이가 계속 증가하면 어느 높이에서 감소효과와 증대효과가 같게 되고 이 높이를 한계기초높이라 한다. 한계기초높이 z_c 는 기초가 없는 균일단면교각과 같은 크기의 한계유속을 갖는 기초상단높이로 정의될 수 있다. 한계기초높이는 상이한 조건의 실험결과 $z_c = 0.8b_f$ 로 나타났다. 기초높이 z 가 한계기초높이보다 작으면 ($z < z_c$) 기초는 하강류를 차단하고 기초는 상류연장으로 작용하여 보호공의 안정성을 높인다. 반면에 $z > z_c$ 이면 교각에 의한 하강류 차단효과는 무시되고 교각의 단면증대효과로 나타나 보호공의 안정성은 감소된다. 교각단면에 대한 기초상단면적의 비 b_p/b_f 의 값이 감소하면 즉, 교각면적을 제외한 기초상단면적이 증가하면 하강류 차단효과와 교각상류 보호면적의 증가로 보호기능이 증가한다. 균일단면교각에 관한 자료를 이용하여 불균일단면 사석보호공의 크기결정이 가능하다.

참 고 문 헌

- 박용수, 심우배, 이상도, 송제우 (1999). "부정류에서의 원형교각주위 국부세굴 특성." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 632~637.
- 윤대훈, 윤성범, 윤광석 (1996). "교각세굴보호공의 기존 설계식의 비교분석." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 16권II-5호, pp. 411~420.
- 윤대훈, 윤성범, 오철승 (1998). "원형교각 세굴방지공의 사석결정식." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 18권, II-1호, pp. 13~22.

- 윤태훈, 남궁돈 (1998). “불균일단면이 교량세굴에 미치는 영향.” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 18권, II-6호, pp. 553~562.
- Carlos, Toro-Escobar, Richard, V., Jr., and Grary, P. (1998). “Cable-tied blocks as an alternative for protecting bridge piers against scour under mobile-bed conditions.” *Proceedings of The International Water Resources Engineering Conference*, ASCE. Vol.1, pp. 15~20.
- Chabert, J., and Engeldinger, P. (1956). “Etude des affouillements autour des piles des ponts.” *Laboratoire d’Hydraulique*, Chatou, France.
- Chiew, Y-M. (1992). “Scour protection at bridge piers.” *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE. Vol.118, No.9, pp. 1260~1269.
- Chiew, Y-M. (1995). “Mechanics of riprap failure at bridge piers.” *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.121, No.9, pp. 635~643.
- Jones, G.S., Kilgore, R.T., and Mistichelli, M.P. (1992). “Effects- of footing location on bridge pier scour.” *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE. Vol. 118, No. 2. pp. 280~289.
- Lim, Foo-Hoat, and Chiew, Yee-Meng (1997). “Failure behavior of riprap layer around bridge piers.” *27th Congress of Int. Assoc. for Hydraulic Research*, ASCE, Vol A., pp. 184~189.
- McCorquodale, J.A., Moawad A., and McCorquodale, A. C. (1993). “Cable-tied concrete block erosion protection” *Proc. Hydraulic Engineering '93*, San Francisco, CA., pp. 1367~1372
- Melville, B.W., and Raudkivi, A.J. (1996). “Effects of foundation geometry on bridge scour.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.122, No.4. pp. 203~209.
- Melville, B.W.. and Sutherland, A.J. (1988). “Design method for local scour at bridge piers.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, No 10, pp. 1210~1226.
- Melville, B.W.. Hadfield, A.C., and Lauchlan, C.S. (1998). “Sacrificial piles and Iowa vanes as piers scour countermeasures.” *Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference*, ASCE, Vol.1. pp. 39~44.
- Paice, C., Hey, R.D., and Whitbread, J. (1993). “Protection of bridge piers from scour.” *bridge management 2*. Thomas Telford, London. pp. 543~552.
- Parola, A.C. (1993). “Stability of riprap at bridge piers” *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE. Vol.119. No.10, pp. 1080-1093.
- Parola, A. C. (1996). “Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour.” *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE. Vol.122, No.1, pp. 35~40.
- Ruff, JF, and Nickelson, J.R. (1993). “Riprap coverage around bridge piers” *Proc. Hydraulic Engineering '93*, San Francisco, CA., pp. 1540~1545
- Yoon, Tae Hoon and Yoon, Sung Bum (1999). “Design of riprap to protect scour around circular piers.” *Proc. of 27th Congress of Int. Assoc. for Hydraulic Research*, ASCE, Vol A, pp. 178~183.
- Yoon, Tae Hoon and Kim, Dae Hong (1999). “Sack gabion as scour countermeasures at bridge piers.” *28th Congress of IAHR*, Graz, Austria, CD-Rom.

(논문번호 99-088/접수:1999.11.10/심사완료:2000.04.21)