

橋脚에서의 洗掘 및 Armoring에 관한 연구 (A Study on the Scouring and Armoring of the Bridge Piers)

金 相 駿 鮮 于 仲 皓

1. 序 論

흐름 內에 세워진 교각들은 그 흐름에 의한 세굴로 인해 피해를 입는 경우가 많으며 따라서 안전한 교각의 설계를 위해서는 세굴과 그 보호공법에 대한 지식이 요구된다. 세굴심에 영향을 주는 요소로서는 유체 및 흐름의 특성, 교각의 형상, 하상 입자의 특성 등을 들 수 있는데 이들 각 변수들의 정량적인 역할은 아직 충분히 밝혀지지 않은 상태이다. 특히 실제의 세굴현상을 파악하기 위하여 수리실험을 행할 경우에는 흐름의 상사와 더불어 流砂의 상사를 고려해야 하는데 流砂의 상사를 이루기 위해서는 모형의 크기, 측정범위에 따른 계측기기의 오차율, 모형사의 적합도 등 많은 難題에 부딪히게 된다. 본 연구는 어떠한 교각 주위에 새로운 교각을 세우게 되면서 그 신설 교각으로 인한 세굴영향을 수리모형을 통해 검토하고 아울러 교각의 보호공법중의 하나인 Armoring 공법에 대해 연구하고자 함을 그 목적으로 한다.

2. 測 量

연구의 대상지역은 그림 1에 나타난 바와 같이 교량 A, B 및 C線에 의해 일련의 교각군을 이루고 있는 지역이다. 여기서 흐름 방향에 연한 교각열은 상호간에 약 120 m 간격으로 있으며 하나의 교각열이 옆에 있는 교각열에 미치는 영향은 미미할 것으로 생각되고 따라서 모형실험은 하나의 교각열만을 선정하여 수행되었다.

조사 대상 지역 부근의 수심 및 세굴심의 측정은 음향측심기를 이용한 하천측량과 직접측량을 병행하였으며 그 결과는 그림 2 및 표 1 과 같다.

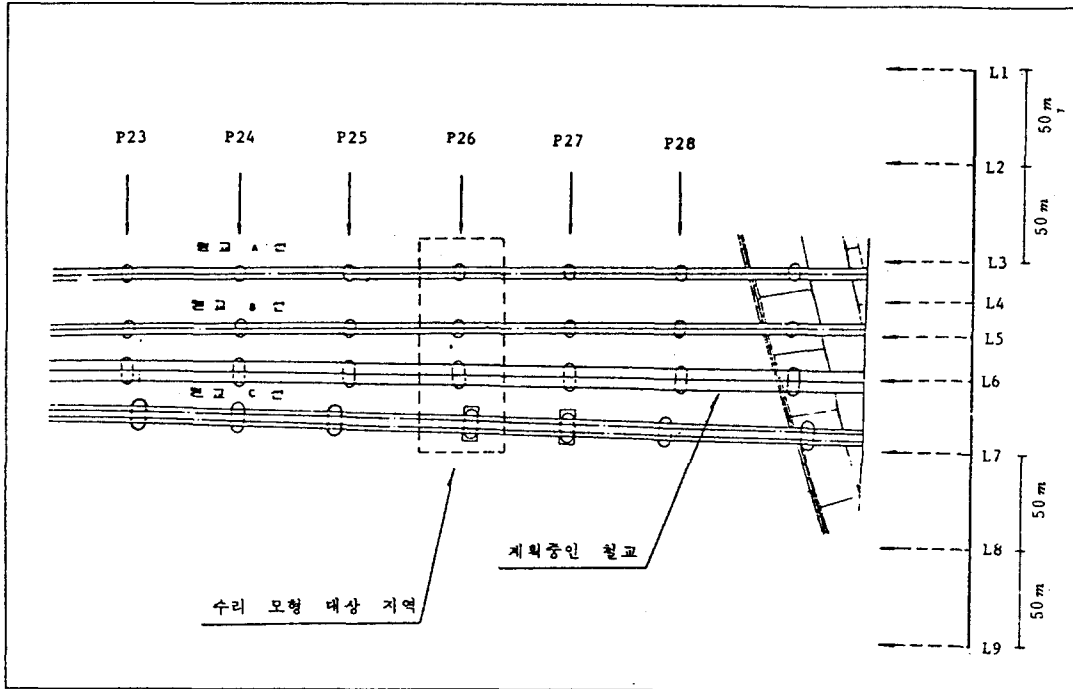


그림 1 조사 지역 평면도

표 1 교각 주변의 세굴심

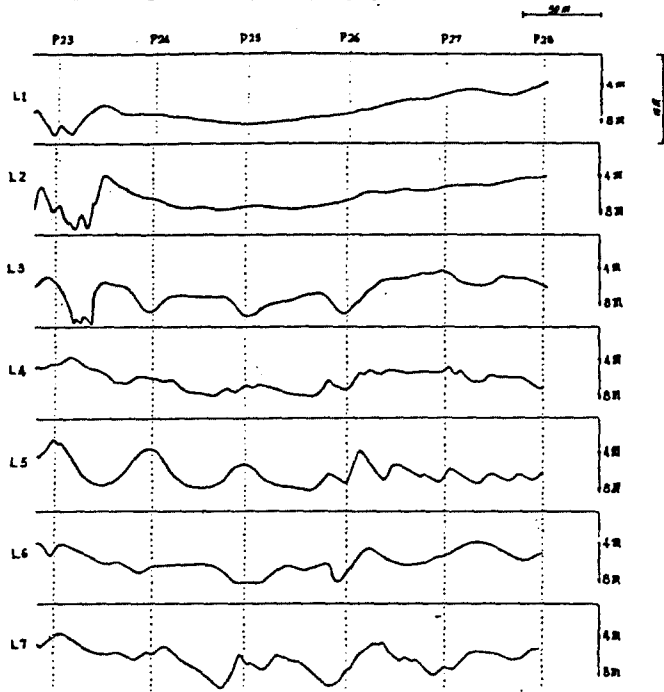
(단위 : m)

교각번호 횡단번호	P - 25	P - 26	P - 27
철교 A 선	3.7 4.8 2.5 3.4 ○ 0.4 1.8 0.4 0.8	4.3 3.2 3.1 3.4 ○ 1.0 1.4 0.4 0.5	- 2.3 - 3.7 - 3.5 - 4.0 ○ - 5.5 - 4.0 - 3.8 - 2.4
철교 B 선	- 1.4 - 1.4 - 2.0 - 2.4 ○ - 2.3 0.4 - 1.8 - 1.2	0.2 0.8 - 1.0 0.4 ○ 0.1 - 0.5 - 1.4 - 0.9	0.5 - 1.6 - 0.1 - 2.7 ○ - 1.3 1.5 - 3.4 - 1.3
철교 C 선	3.0 4.3 2.5 1.3 ○ - 1.5 1.5 0.0 0.8	0.6 1.7 1.8 1.7 ○ 1.3 0.0 - 0.5 - 1.0	0.2 2.9 0.8 0.7 ○ 0.4 0.3 0.0 - 0.2

註 : 上記의 수치는 1987年 7月 4日 측정된 결과임.
교각과 인접한 곳과 교각으로부터 2.5 m 떨어진 곳을 측정함.

단위 : m

그림 2 하천 측량 결과(위치는 그림 1 참조)



3. 相似律

이동상 모형실험에서는 흐름의 상사와 더불어 하상입자의 상사성도 고려하여야 한다. 개수로에서의 흐름의 상사는 일반적으로 Froude 상사율이 적용되고 있으며 하상변동에 대해서는 한계소류력, 침강속도, 유사량 등의 요인에 대한 상사성과 연관하여 별도 측면에서 고려된다.

본 모형실험의 경우 모형대상지역(原型)은 4개의 교각으로 되어 있는 교각군이며(그림 1) 실험실 조건으로서는 수로폭 1m, 적정최대유량 120 l/s 정도이다. 모형을 왜곡되지 않는 동일축척모형으로하고 전체 하폭에서의 최고유량인 37,000 CMS 時の 원형에서의 수심 17.18m, 유속 2.85 m/s에 대하여 Froude 상사율을 적용하면 가능한 최대 축척은 $L_r = 70$ 이며 이 때의 각 물리량의 비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{유량비 } Q_r &= L_r^{5/2} = 40,996, & \text{유속비 } V_r &= L_r^{1/2} = 8.366 \\ \text{시간비 } T_r &= L_r^{1/2} = 8.366, & \text{조도계수비 } n_r &= L_r^{1/6} = 2.03 \end{aligned}$$

한편 流砂粒子的 상사성은 여러가지 물리적인 요소를 고려해야 하는 難點이 있으며 아직까지 많은 학자들의 연구 대상으로 남아 있다. Gehrig(1967)은 이동상에 관한 상사를 결정방법으로서 다음 2개의 식

$$(F_{r*})_r ; L_r^{-1} h_r^2 d_r^{-1} \rho_r^{-1} = 1 \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{roughness} ; L_r^3 h_r^{-4} d_r = 1 \dots\dots\dots(2)$$

을 제안하였는데 여기서 F_{r*} 는 pier Froude number, L_r 은 수평 축척, h_r 은 수직축척, d_r 은 입자의 직경비, ρ_r 은 입자의 밀도비를 의미한다. 흐름의 상사법칙에서 $L_r = h_r = 70$ 으로 결정되었으므로 이를 식(1) 및 식(2)에 代入하면 $d_r = 70$, $\rho_r = 1$ 이다. 즉 모형사의 평균입경 d_m 은 원형 입자의 1/70이 되어야 하며 原型粒子的의 평균입경 (D_{50} 을 사용)은 1.5mm이므로 d_m 은 0.02mm가 된다. 그런데 평균입경 0.02mm의 모형사는 입자 상호간에 점착력이 크므로 모래질인 原型의 입자를 相似하기에는 부적당하리라고 생각되므로 본 실험에서는 原型의 입자보다 다소 가볍고 모래질의 성질을 간직할 수 있는 최소한의 입자인 규조토(비중 1.54, $D_{50} = 0.25$ mm)를 사용하되 流量을 증가시키는 방법을 사용하였다. 기존의 연구에 의하면 이러한 증가유량은 약 20%를 채택하고 있으며 본 실험에서도 20% 증가된 유량을 대상유량에 추가하였다.

4. 實驗裝置 및 實驗方法

수로는 폭 2 m, 깊이 1.5 m, 길이 30 m의 철제 직선 수로(그림 3 참조)로서 필요한 벽면 부분은 유리로 되어 있다. 물은 동력에 의해 재순환되며 수로 상류부에는 사각형의 위어를 설치하여 유량을 측정하도록 하였고 하류단에는 수심 조절용 수문을 설치하였다.

세굴을 측정하기 위한 수로는 길이 10 m로서, 철제수로 가운데 부분에 콘크리트로 제작하였으며 수로 중간부분에 모형사(규조토)를 깊이 20 cm, 길이 5 m로 깔아놓았다. 콘크리트 수로는 流入部를 완만하게 제작함으로써 위어에서 떨어져 철제수로를 거처온 흐름이 부드럽게 유입하여, 와류에 의한 교란효과가 최소화하도록 하였다. 한편, 교각은 PVC로 제작하였으며 기존의 교각군에 대한 실험의 경우에는 3개, 신설 교각이 첨가되는 경우에는 4개를 모형사 중간부분에 설치하였다.

실험 방법은 먼저 수로에 물을 서서히 유입시켜서 초기의 수면을 다소 높이 유지하고, 다음에 밸브를 조작하여 실험 유량을 위어를 이용하여 맞춘다음, 수로 하류 끝에 있는 수심 조절용 수문을 조작하여 수위를 조절하였다. 그리고 이와같은 상태를 2시간 동안 유지하여 通水하고 나서 서서히 배수하였다.

세굴심도의 측정은 point gage를 이용하여 육안으로 측정하였으며 scour hole 주변의 등고선을 그릴 수 있도록 5 cm 격자망 (원형에서 3.5 m)을 구성하여 각 격자점마다의 하상 표고를 측정하였다. 측정된 데이터는 원형에서 평균하상으로부터의 거리로서 환산되어 제시되었다.

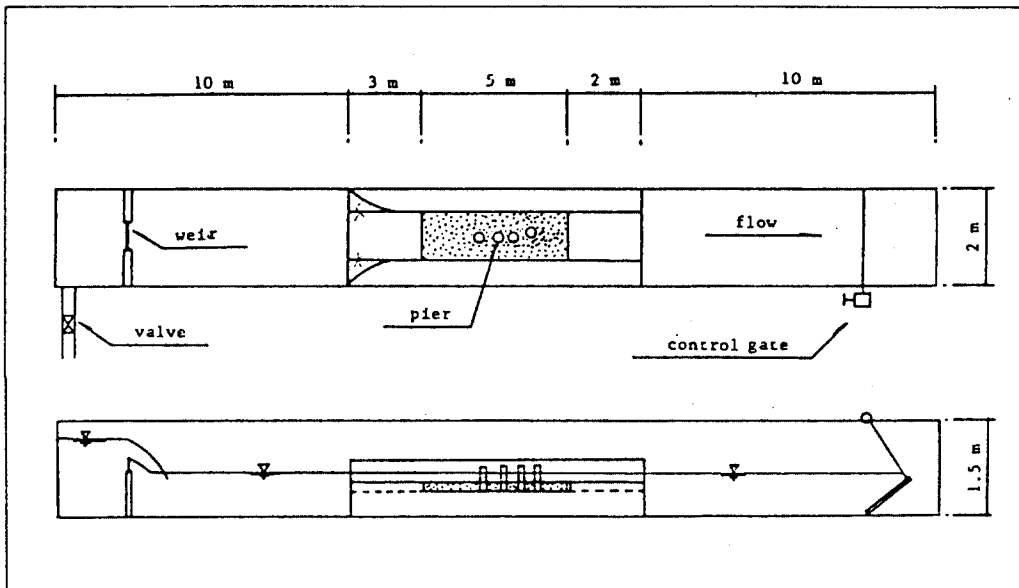


그림 3 모형의 평면도 및 측면도

5. 洗掘實驗 및 結果

對象流量 (하도 전구간에서의 유량)은 12,000, 25,000 및 37,000 CMS를 선정하였고 이 대상유량에 대한 원형 및 모형에서의 유량을 정리하면 표 2와 같다. Froude 상사율을 적용하여 ($L_r = 70$) 결정된 모형에서의 유량 Q_m 은 유입관에 설치된 밸브를 조절하여 위어에서의 월류수심을 맞추어 결정하고 수심 Y_m 은 수로 하류단에 설치된 수위 조절기를 이용하여 원하는 수심을 얻는다. 모형사의 조도계수는 0.015~0.02 정도로 생각되며 이는 원형의 조도계수의 약 1/2에 해당하고 따라서 Froude 상사법칙에 의한 조도계수비 ($n_r = L_r^{1/6} = 2.03$)를 만족한다. 그리고 유량비, 수심비 및 조도계수비의 성립은 자동적으로 유속비의 성립을 의미하며 이는 실험에 의해 확인되었다.

표 2 원형 및 모형의 유량, 수심, 평균유속

대상유량 (CMS)	원형			모형		
	유량 Q_p (CMS)	수심 Y_p (m)	유속 V_p (m/s)	유량 Q_m (l/s)	수심 Y_m (cm)	유속 V_m (cm/s)
12,000	1,610	10.9	2.10	39	15.6	25.1
25,000	2,500	14.2	2.51	61	20.3	30.0
37,000	3,420	17.2	2.85	84	24.5	34.1
12,000 × 1.2	1,930	12.2	2.27	47	17.4	27.1
25,000 × 1.2	3,000	15.8	2.69	73	22.5	32.2
37,000 × 1.2	4,100	19.1	3.06	100	27.3	36.6

모형실험에서 초기하상은 실제 현장에서 관측된 하상(실제하상)과 교각군 주위의 평균적인 하상고와 같은 수평하상으로 하는 2가지 경우로 구분하였고 교각군은 신설교각을 포함하지 않는 경우와 포함하는 경우, 그리고 대상유량은 이동상의 상사율을 보완하기 위해 20% 증가된 유량을 포함한다. 실험 결과는 각 교각에서의 최대 세굴심을 측정하여 표 3 및 표 4에 제시하였으며 세굴 평면도를 작성하여 세굴의 모양을 세굴 등고선으로 나타내었다(예:그림 4, 그림 5). 한편 흐름 방향으로 교각의 중심을 지나는 선을 따라 세굴 종단도를 작성하였다(예:그림 6).

표 3 기존 교각군에 대한 최대 세굴심 (단위: m)

초기하상	대상유량 (CMS)	교각구분		
		A	B	C
실제하상	12,000	4.76	4.55	5.60
	25,000	5.04	5.88	9.31
	37,000	5.95	5.95	9.80
수평하상	12,000	5.04	4.83	5.95
	25,000	5.60	5.67	9.24
	37,000	5.88	6.16	9.73
수평하상	12,000 × 1.2	5.18	5.11	7.14
	25,000 × 1.2	5.74	6.02	9.52
	37,000 × 1.2	6.37	6.44	9.87

표 4 신설 교각을 포함하는 교각군에 대한 최대세굴심 (단위: m)

초기 하상	교각구분 대상유량 (CMS)	A	B	신 설	C
	25,000	5.46	6.02	5.95	8.12
	37,000	6.37	7.00	7.14	8.75
수평 하상	12,000 × 1.2	5.32	5.25	5.25	7.77
	25,000 × 1.2	5.74	6.16	6.23	8.26
	37,000 × 1.2	6.51	7.07	7.07	8.82

그림 4 세굴 평면도 (단위: cm)
유량: 37,000 CMS × 1.2, 초기하상; 수평

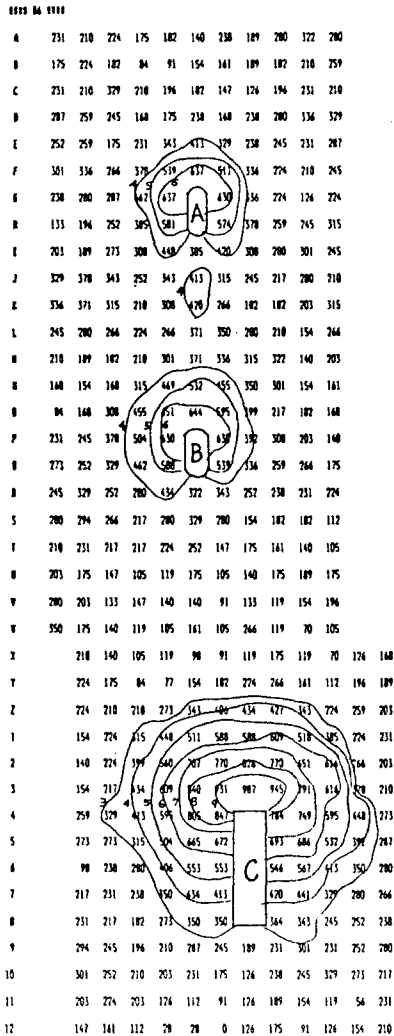
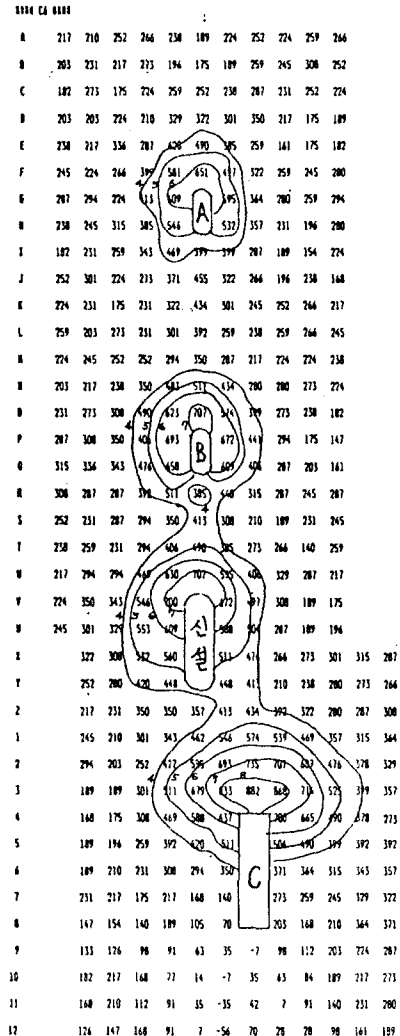


그림 5 세굴 평면도 (신설교각 포함, 단위: cm)
유량: 37,000 CMS × 1.2, 초기하상; 수평



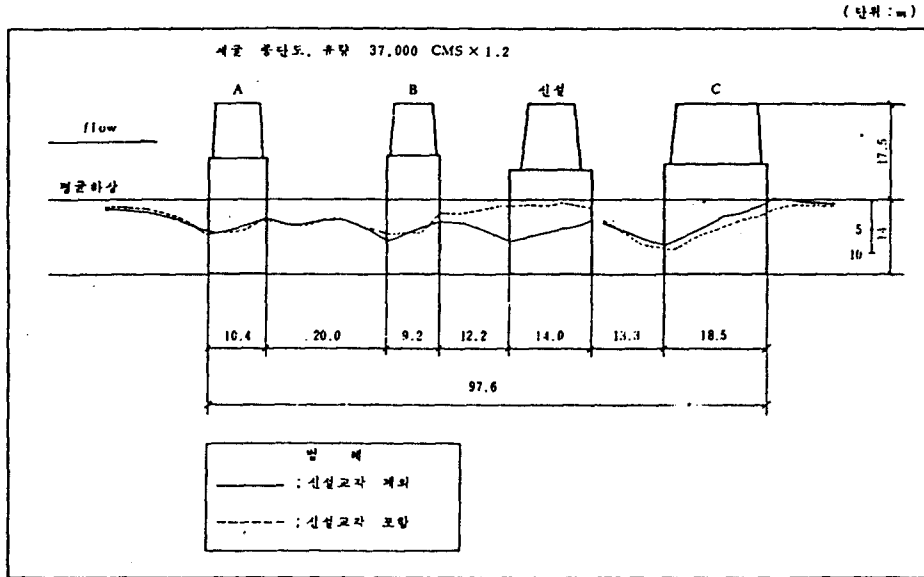


그림 6 세굴 중단도(유량: 37,000 CMS × 1.2)

6. Armoring 實驗 및 結果

하상 재료가 불균등 입경인 경우 비교적 낮은 유속에서 작은 입자는 움직이기 시작한다. 반면에 큰 입자는 그자리에 남아 있다. 이러한 재료분리 현상이 계속 일어나면 하상에는 굵은 입자만이 남게 되는데 이런 현상을 *armoring* 이라 한다. 교각의 세굴을 방지하기 위해 교각 주위에 하상재료보다 더 굵은 재료를 쌓아 세굴을 방지하는 보호공법은 바로 이러한 *armoring* 현상을 이용한 것이다. *armoring* 입자는 흐름에 의해 掃流되지 않을 만큼 크고 무거워야 하지만 하상재료가 빠져나가 소실될 정도가 되어서는 안되며 따라서 적당한 크기와 적당한 입도분포를 가져야 한다. 하나의 *armoring* 층이 이러한 상반된 조건들(즉 소실방지와 소류력에 대한 저항)을 만족시키기란 불가능할 경우가 많으므로 Terzaghi(1948)는 맨밑의 층에 입자가 작은 것을 깔고 그 위로 굵은 입자를 점차적으로 쌓아 올라가는 *inverted filter*를 고안하였다. 본 실험에서는 Terzaghi의 *inverted filter*를 교각 보호공으로 할 경우 그 포설 두께와 포설폭 및 포설입자의 직경 등을 결정하고자 하였다.

실험시료는 체가름을 한 여러가지 입경의 작은 자갈이나 굵은 모래를 사용하였다. 실험결과를 이용하여 보호공의 적절한 모양을 추정할 바를 그림으로 나타내면 그림 7과 같다.

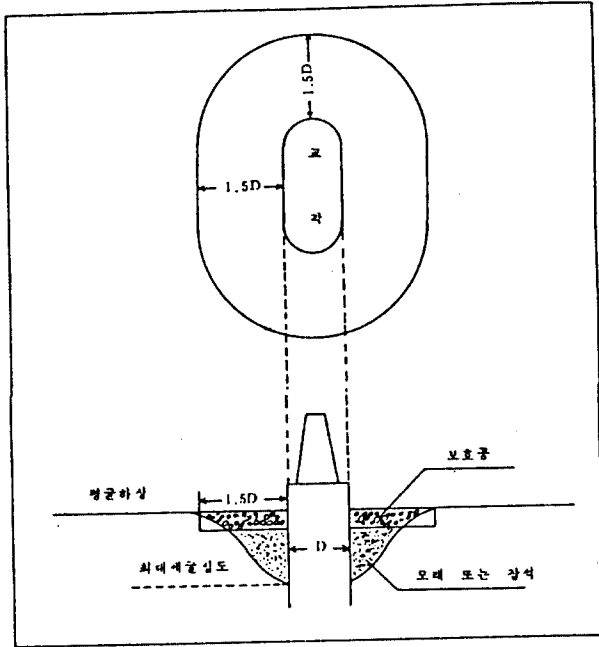


그림 7 보호층의 평면도 및 축면도

7. 結 論

본 모형실험에 의한 결론은 다음과 같다.

- 1) 규모토를 모형사로하여 교각에서의 세굴심이 구해졌으며 흐름 및 유사의 상사 법칙을 적용하여 실제 원형에서의 세굴심이 추정되었고 그 결과는 기존의 실험치 혹은 관측치와 유사함을 나타내었다.
- 2) 초기하상의 형태 즉 현재 하상의 실제모양으로 하였을 경우와 평균적인 수평 하상으로 하였을 경우, 최종 세굴심에는 큰 변화를 주지 않는 것으로 밝혀졌다.
- 3) 새로운 교각의 설치로 인한 주변교각의 세굴심의 변동은 過의 발생이나 유황의 변동에 의한 것이라기 보다는 하상의 변동상태에 의존하는 것으로 보여진다. 즉 신설 교각 앞쪽의 교각은 신설교각 세굴의 영향을 받아 세굴심이 다소 깊어졌으며 뒷쪽의 교각은 신설교각에서 세굴된 하상재료가 쌓여서 세굴은 오히려 감소하였다.
- 4) Armoring 층의 포설 두께와 포설폭이 결정되었다. Armoring 층은 한계 소류입자보다 굵은 것으로 하되 포설폭은 교각두께의 1.5배 이상, 포설두께는 예상 최대 세굴폭의 0.3배 정도가 타당한 것으로 나타났다.