橋脚周邊 河床의 局部洗掘에 관한 實驗的 硏究

An Experimental Study for Local Scour of the Riverbed at Pier

李 元 煥*
Lee, Won Hwan
李 正 植**
Lee, Jung Sik
李 洪 來***
Lee, Hong Rae

Abstract

This study is an experimental analysis for local scour of the riverbed at pier. The basic equaiton with dimensionless elements(Pier Reynolds Number, Dimensionless Turbulence Intensity) is derived through dimensional analysis. After testing the goodness of fit of data, the coefficients are determined by multiple regression analysis.

In the region where the value of the attack angle is near 20 degrees, there exists a transition region where the slope of equation with Pier Reynolds Number changes from positive to negative and that of equation with Dimensionless Turbulence Intensity changes from negative to positive adversely.

As a result of testing the equation suggested on this study by using the data of the Institute of National Construction, it is found that the scour depth and width at pier can be predicted approximately.

要 旨

本 硏究는 橋脚周邊 河床의 局部洗掘에 관한 實驗的 解析으로서 洗掘에 관계되는 여러 요소를 次元解析에 의해 無次元化하여, 橋脚 Reynolds 數와 無次元 亂流强度로 나타내는 관계식을 유도하였으며 자료 檢定을 통하여 多重回歸分析으로 관계식의 係數를 구하였다.

迎角이 20°를 前後한 區間에서는, 橋脚 Reynolds 數와 洗掘量은 正比例에서 反比例로 無次元 亂流强度와 洗掘量은 反比例에서 正比例로 바뀌는 遷移區域이 存在하였다.

本 硏究에서 提案한 橋脚周邊의 洗掘幅과 洗掘深에 對한 관계식을 國立建設硏究所 資料로 檢定을 實施한 結果 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

*正會員·延世大學校 工科大學 敎授
**正會員·延世大學校 大學院 博士課程
***正會員·韓國建設技術硏究院 硏究員

1. 序　論

1.1 研究目的

河川에 設置된 橋脚周邊 河床에서 發生하는 洗掘은 構造物 自體의 安全을 위협하므로 여러가지 方法에 의해 洗掘의 特性을 찾아내고자 研究되어 왔다. 特히 局部洗掘은 水理現象이 매우 複雜하며 여러가지 要素에 의하여 支配된다. 즉 流速, 水深, 河床材料의 特性, 橋脚形態 및 配置 等에 따라 變化되며, 이러한 樣相은 2次元 흐름의 發達과 亂流의 進行, 渦流의 發達에 의하여 場所的으로 變化가 매우 複雜하다. 따라서 現在까지는 이 現象을 統一的으로 說明할 수 있는 理論과 정확한 解는 確立되어 있지 못하다[1~5]. 이런 理由로 橋脚에 依한 局部洗掘은 模型實驗에 의하여 주로 解析되고 있다[1,2,4~6].

그러나 旣存의 局部洗掘에 對한 式들은 서로가 상당한 差異를 보이고 있으며, 이는 模型과 原型에서 오는 差異點과 局部洗掘의 主 原因인 渦流의 정확한 解析이 未洽한 상태에서 오는 現象이라고 볼 수 있다[6]. 本 研究의 目的은 洗掘量에 對한 좀더 正確한 豫測을 할 수 있는 關係式을 提示하는데 있다.

1.2 研究動向

橋脚周邊의 흐름에 의한 洗掘에 對하여는 많은 實驗的인 研究가 행하여졌다. 1875年 Durand Claye가 最初로 實驗을 행한 후에 Keutner(1932年)가 洗掘의 特性에 對하여 實驗的 研究를 發表하였다. 石原藤次郎(1938年)[7,8]는 橋脚模型實驗을 通하여 橋脚의 形狀과 配置에 對한 洗掘現象을 檢討하였으며, 흐름의 偏重과 수직방향 速度分布의 變化에 의하여 發生되는 수평渦流에 의해 洗掘이 進行되어 감을 밝혔다. Laursen, E. M.[1,2]은 限界掃流力과 底面掃流力이 같게되는 狀態를 理論的으로 考察하였으며, 斷面縮小에 의한 洗掘에 對하여 研究하였다. Bata, G.(1960年)는 수직 速度分布가 橋脚周邊 河床 洗掘의 原因이 된다고 주장하였고, 洗掘은 橋脚지름의 3~6배 정도 크기로 橋脚의 上流쪽까지 存在한다는 것을 發表하였다. Knezevic, Bogic(1960年)도 여러種類의 模型砂와 流量을 變化시키면서, 最大洗掘深으로 나타내는 관계式을 제시하였고, Breusers(1964年)와 Larras, Jean(1963年)은 橋脚形態와 迎角 等을 고려한 實驗을 實施하였다. Shen, H.W., Schneider, V.R.(1969年)[3]은 橋脚周邊의 渦流와 亂流에 의하여 發達되는 掃流力에 注目하여 局部洗掘의 特性에 對하여 研究하였으며, 橋脚 Reynolds數로 洗掘深을 나타내는 모델式을 제안하였고 Dune效果에 따른 洗掘깊이의 變化에 對한 研究도 수행하였다. Fisher, E.E.(1980年)[5]는 流速에 따른 Froude數와 洗掘깊이와의 관계를 연구하였으며, Hughes, W.C.(1980年)[9]는 洗掘速度를 여러가지 河床材料로 實驗을 하였다. 洗掘防止方法에 對한 研究는 石原藤次郎[7,8], Laursen[1,2] 等이 實驗結果를 토대로 하여 防護工의 施工범위를 圖式化하였다. 吉川秀夫(1971年)[10]는 圓柱의 下端前面에 날개를 附着하여 下降流를 차단하는 方案을 提示하였다.

1.3. 研究方法

橋脚周邊의 局部洗掘은 橋脚의 크기와 形態, 흐름方向과의 關係, 河床材料의 特性 그리고 橋脚에 의하여 發生하는 亂流와 말굽형渦流의 複合的인 樣相으로 그 現象은 매우 複雜하다. 더구나 現在까지는 이 亂流와 橋脚前面의 下向흐름, 橋脚주변의 말굽형渦流에 對한 正確한 解析이 이룩되지 못한 실정이다. 따라서 本 研究에서는 다음과 같은 實驗的 方法에 의하여 洗掘現象을 考察하고자 한다.

1) 次元解析에 의하여 無次元量을 決定한다. 橋脚前面에서의 洗掘深과 洗掘幅은 下向流와 말굽형渦流에 의한 것이 主가 되므로 이 要素와 밀접한 관계가 있는 無次元量으로써, 橋脚 Reynolds數와 亂流의 解析에 利用되는 亂流强度를 平均速度로 나눈 無次元 亂流强度로 구성되는 基本式을 設定한다.

2) 實驗資料를 橋脚의 形態와 迎角의 크기別로 分類하여 洗掘深과 洗掘幅을 各各 橋脚 Reynolds數와 無次元 亂流强度로 回歸分析을 實施하여 相關關係를 分析한다.

3) 洗掘深과 洗掘幅에 對한 基本式의 係數를

多重回歸分析(Multiple Regression Analysis)에 의하여 各 CASE別로 求한다.

4) 提示된 관계式의 檢定은 1981年度에 發行된 國立建設硏究所資料[14]로 적합성 여부를 判別한다.

1.4. 制限事項

本 硏究에서는 橋脚에 依한 周邊河床의 局部洗掘만을 考察하였으며, 橋脚 Reynolds 數의 범위는 2,000~30,000이고 無次元 亂流强度의 범위는 0.006~0.3에서 硏究되었다.

2. 局部洗掘에 대한 基本理論

2.1. 洗掘의 分類

河川에서의 洗掘과 堆積은 自然的인 흐름의 變化에 의해 發生하며, 이로 인하여 土砂運送과 河床의 변화가 일어난다. 特히 橋脚에서 發生할 수 있는 洗掘形態는 다음과 같이 分類할 수 있다[1,8,11].

(1) 一般的인 洗掘(Genenal Scour)

橋脚의 有無에 관계없이 發生하는 흐름에 의한 洗掘을 말한다.

(2) 收縮洗掘(Contraction Scour)

橋脚에 의해 水路斷面의 縮小와 水路變動에 의한 洗掘을 말한다.

(3) 局部洗掘(Local Scour)

橋脚이나 橋臺周圍의 局部的 흐름에 의한 洗掘을 말한다.

2.2. 局部洗掘의 構造

橋脚주변의 흐름에서 주요한 特徵은 橋脚주위에서 發達하는 대규모의 渦流現象이라 할 수 있다. 渦流現象은 橋脚形態와 흐름상태에 의하여 左右되는 것이며, 이는 수직 速度分布와 壓力傾斜의 영향에 기인하는 것이며 3次元內에서 境界層의 분리로써 말굽형渦流를 形成한다. 말굽형渦流를 構成하는 흐름은 下向으로 전개되며, 이 때 渦流의 中心部에서는 회전속도를 증가시키게 된다(그림 1).

局部洗掘의 分類는 上流에서의 土砂流送의 有無에 따라 Clear Water Scour, Scour with Continuous Sediment Motion等으로 나눌 수 있으며(그림 2), 局部洗掘의 段階的 進行過程은 다음과 같다[8].

1) 主流에 의한 掃流過程

洗掘初期의 말굽형渦流는 弱하여 洗掘은 主로 流速이 큰 橋脚側部에서 掃流力의 증가에 따라 일어난다.

2) 말굽형渦流에 의한 洗掘孔의 發達過程

橋脚側面의 洗掘이 發達됨에 따라 서서히 말굽형渦流가 發達하여 洗掘은 앞으로 前進되어 진다.

3) 安定渦에 의한 洗掘過程

强力한 渦流에 의하여 洗掘孔內의 傾斜에 따라 土砂가 浮揚되어, 主流에 따라 輸送시키는 過程으로 橋脚前面의 洗掘이 커진다.

4) 堆積에 의한 흐름의 變化過程

後流地域에서의 堆積에 의하여 前面洗掘에 영향을 주어 洗掘現象을 變化시킨다.

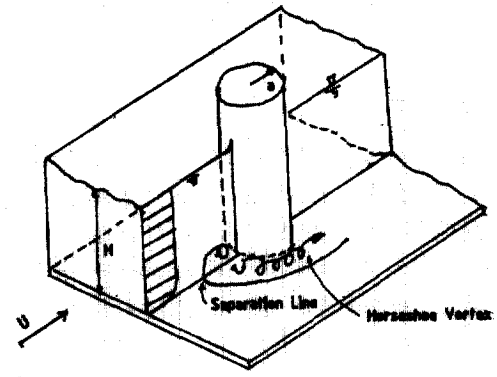

그림 1. 橋脚 주변의 흐름形態

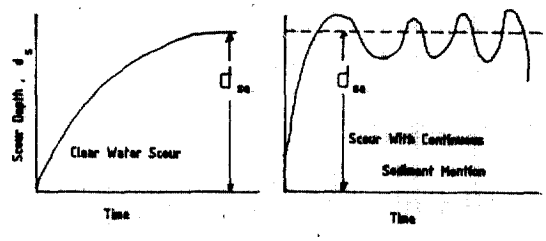

그림 2. 洗掘深의 時間에 따른 變化

3. 實驗方法

3.1 實驗裝置

實驗은 橋脚의 種類를 圓形, 半圓形, 4角形

等 세가지에 대하여 修行하였고 迎角도 여러가지 경우에 대해 實驗을 實施하였다. 模型砂의 선정은 백색규조토로 하였고, 河床바닥에서 약 15 cm 程度로 물다짐하여 表面을 정리하였다. 移動床模型의 標準斷面은 그림 3과 같으며 模型砂의 土性試驗 成果表는 表1과 같다.

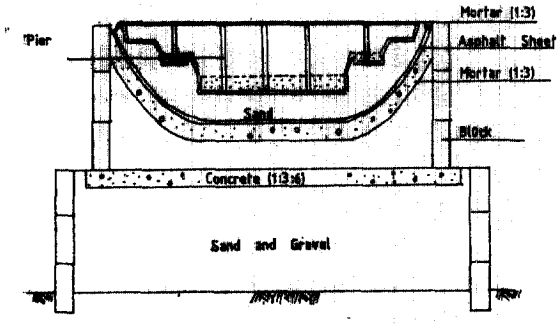

그림 3. 移動床 模型의 標準斷面

表 1. 模型砂 土性試驗成果表

시 료 종 류	비 중	단위중량 (t/m³)	공 극 율 (%)	평균입경 (mm)
규 조 토	1.54	0.66	57	0.42

3.2 實驗方法

實驗流量은 43.12 l/sec, 99.82 l/sec, 221.13 l/sec 等 세 種類를 通水하였으며, 通水時間은 河床變動의 변화상태가 안정될 때까지 通水하였다. 이 때 水深은 各 橋梁에 staff gauge를 設置하여 선정된 橋脚에서의 水深을 測定하였고, 流速은 선정된 橋脚에 의해 흐름이 흐트러진 곳의 直上流에서 소형 currentmeter로 測定하였다[3]. 洗掘量은 各 實驗流量을 通水한 後에 模型에 남은 물을 주의깊게 배제한 다음 洗掘深과 洗掘幅을 測定하였다.

4. 實驗結果分析

3.1 橋脚形態와 迎角의 크기에 따른 分類

橋脚의 形態가 橋脚에서의 局部洗掘에 미치는 영향은 實驗的 方法을 통해 잘 알려지고 있으며 橋脚軸과 흐름方向과의 사이角인 迎角의 영향에 對해서도 實驗的으로 考察되고 있다. 따라서 本 研究에서도 橋脚의 形態를 圓形, 半圓形, 4角形의 3種類로 細分하고 迎角도 0°~10°, 10°~20°, 20° 以上의 3種類로 區分하여 考察하였다. 迎角의 定義를 圖式化하면 그림 4와 같으며 橋脚의 形態와 迎角別 分類는 表2와 같다.

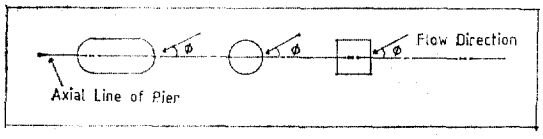

그림 4. 迎角의 定義

表 2. 橋脚의 形態와 迎角別 分類

교각의 형태	영각의 크기	분 류
원 형	0~10°	CASE Ⅰ-1
	10°~20°	CASE Ⅰ-2
	20° 이상	CASE Ⅰ-3
반 원 형	0~10°	CASE Ⅱ-1
	10°~20°	CASE Ⅱ-2
	20° 이상	CASE Ⅱ-3
4 각 형	0~10°	CASE Ⅲ-1

4.2 次元解析

橋脚의 局部洗掘에 영향을 미치는 要素는 여러가지가 있으나 이것들을 數式으로 整理하면 다음과 같다.

$$d_s = f(\phi, D, H, U, \nu, D_m, \rho, \rho_s, \sqrt{\overline{v}^2}, g, t) \quad (1)$$

여기에서

d_s : 最終洗掘深
ϕ : 橋脚의 形狀係數
D : 橋脚의 흐름方向에 대한 幅
H : 水深
U : 流速
ν : 動粘性係數
D_m : 平均粒徑
ρ : 물의 比重
ρ_s : 粒子의 比重
$\sqrt{\overline{v}^2}$: 亂流의 强度
g : 重力加速度
t : 通水時間

式(1)을 次元解析을 通하여 無次元量으로 정리하면 式(2)와 같다.

$$\frac{d_s}{D_m}=f\left(\phi, \frac{\rho U^2}{(\rho_s-\rho)gD_m}, \frac{D_m}{H}, \frac{\sqrt{\overline{V}^2}}{U}, \frac{DU}{\nu}, \frac{Ut}{D_m}\right) \quad (2)$$

式 (2)의 各項을 分析하여 보면

1) ϕ는 橋脚의 形態에 따라 各 式을 設定하므로써 생략할 수 있다.

2) $\frac{\rho U^2}{(\rho_s-\rho)gD_m}$은 土砂의 初期 움직임에 관계되는 Shields 係數[15,16,17]이며, 따라서 最終洗掘深 d_s에는 영향이 적다[3,4].

3) D_m/H는 수직速度分布에 영향을 미치는 要素[4]이나, 無次元 亂流强度 $\frac{\sqrt{\overline{V}^2}}{U}$가 速度分布와 水深에 관계되므로 생략할 수 있다.

4) DU/ν는 橋脚의 Reynolds 數이며 橋脚 局部洗掘의 主원인으로 알려진 말굽형 渦流와 관계가 있다[1,3,4].

5) $\frac{Ut}{D_m}$은 洗掘이 時間에 따른 變動을 나타내는 項[4]으로 最終洗掘量 硏究에서는 생략할 수 있다.

따라서 式 (2)는 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$d_s/D_m=f(DU/\nu, \sqrt{\overline{V}^2}/U) \quad (3)$$

여기에서 式(3)을 洗掘現象에 잘 적용되는 지수형[3,5,15]으로 변환시켜 洗掘深에 對한 基本式으로 設定하였다.

$$d_s/D_m=\alpha(DU/\nu)^{\beta}(\sqrt{\overline{V}^2}/U)^{\gamma} \quad (4)$$

洗掘幅에 對한 基本式도 同一한 方法으로 設定하면 다음과 같다.

$$d_w/D_m=\alpha'(DU/\nu)^{\beta'}(\sqrt{\overline{V}^2}/U)^{\gamma'} \quad (5)$$

여기에서, d_w : 最終洗掘幅

4.3. 實驗資料에 대한 檢定

實驗에서 얻은 資料는 여러가지 理由에서 誤差를 포함하고 있으므로 目的하는 바에 따른 限界異常率 즉, 棄却限界를 定하여 資料를 檢定하여야 한다.

本 硏究에서는 資料의 棄却判定을 T-test를 利用하여 實施하였으며[18], 특정표본(X_1, Y_1), $(X_2, Y_2), \cdots, (X_n, Y_n)$에 對한 $\hat{\beta}$와 $\hat{\alpha}$의 값은 다음과 같다.

$$\hat{\beta}=\frac{n\sum X_iY_i-(\sum X_i)(\sum Y_i)}{n\sum X_i^2-(\sum X_i)^2} \quad (6)$$

$$\hat{\alpha}=\frac{\sum Y_i-\hat{\beta}\sum X_i}{n} \quad (7)$$

母集團의 σ^2의 不偏推定値로써 S^2는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S^2=\frac{1}{n-2}\left\{\sum Y_i-\frac{1}{n}(\sum Y_i)^2-\frac{\hat{\beta}}{n}(n\sum X_iY_i-\sum X_i\sum Y_i)\right\} \quad (8)$$

標本 임의값 X_0에 대한 Y_0의 기대값은

$$E(\hat{Y}_0)=E(\hat{\alpha}+\hat{\beta}X_0) \quad (9)$$

이며, Y_0의 分散값은

$$S(\hat{Y})=S\sqrt{\frac{1}{n}+\frac{n(X_0-\overline{X})^2}{n(\sum X_i^2)-(\sum X_i)^2}} \quad (10)$$

와 같이된다. 有意水準 ε과 自由度 n−2를 利用하여 임의 값 X_0에 對한 $E(\hat{Y}_0)$의 上限값과 下限값은 다음과 같다.

$$P[\hat{Y}_0-t(\varepsilon/2, n-2)\cdot S(\hat{Y}_0)<E(Y|X=X_0)<\hat{Y}_0+t(\varepsilon/2, n-2)\cdot S(\hat{Y}_0)]=1-\varepsilon \quad (11)$$

따라서 資料가 이 조건을 만족하면 채택하고 이 조건을 벗어나면 기각한다.

本 資料의 檢定대상은 橋脚 Reynolds 數 (DU/ν)와 無次元 洗掘深(d_s/D_m)으로 택하여 檢定하였고, 信賴係數는 0.95로 實施하였다. CASE I-1의 檢定結果는 그림 5와 같다.

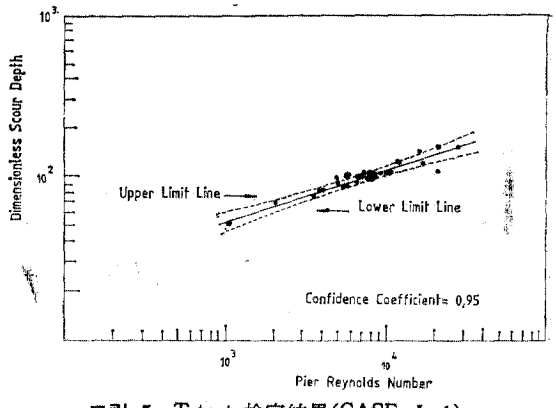

그림 5. T-test 檢定結果(CASE I-1)

4.4 洗掘量에 대한 解析

次元解析에 依하여 設定된 各 要素, 橋脚 Reynolds 數와 無次元 亂流强度가 洗掘深과 洗掘幅에 미치는 各各의 영향을 살펴보면 다음과 같다.

1) 無次元洗掘深, 洗掘幅과 橋脚 Reynolds 數와의 關係

各 CASE 別로 回歸分析을 實施하여 關係를 살펴보면 兩對數方眼紙상에서 迎角이 20° 이하인 범위에서는 無次元量과 橋脚 Reynolds 數가 서로 正比例하나, 迎角이 20° 이상인 범위에서는 反比例關係로 바뀐다. Shen, H.W.(1969年) 等이 發表한 直線水路 즉 迎角이 거의 0°에 가까운 상태에서 두 關係가 正比例로 나타난다는 것과 일치하며, 迎角이 커지면 反比例로 바뀐다는 것을 알 수 있다. 이러한 現象은 橋脚의 形態에 관계없이 同一하게 일어나고 있다(그림 6~그림 11).

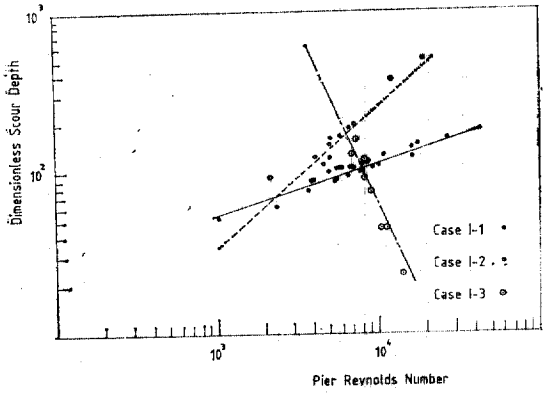

그림 6. 圓形 橋脚에서 迎角別 橋脚 Reynolds 數와 無次元 洗掘深과의 관계

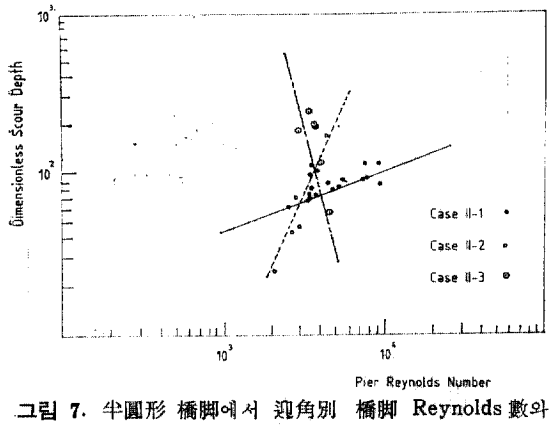

그림 7. 半圓形 橋脚에서 迎角別 橋脚 Reynolds 數와 無次元 洗掘深과의 관계

2) 無次元洗掘深, 洗掘幅과 無次元 亂流强度 橋와의 關係

無次元洗掘量과 無次元 亂流强度는 앞에서의 脚 Reynolds 數와 反對現象을 나타내고 있다. 즉 迎角의 크기가 20° 이하 범위에서는 서로 反比例하며 20° 이상 범위에서는 서로 正比例하고

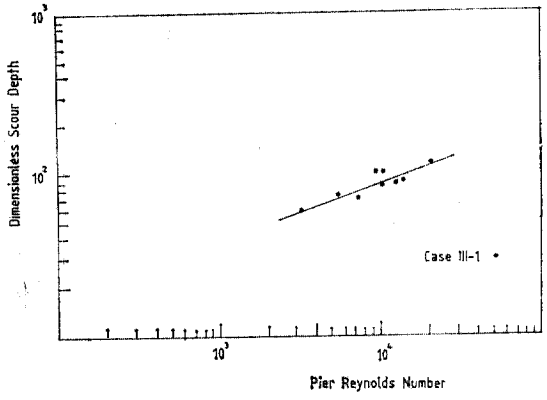

그림 8. 4角形 橋脚에서 迎角別 橋脚 Reynolds 數와 無次元 洗掘深과의 관계

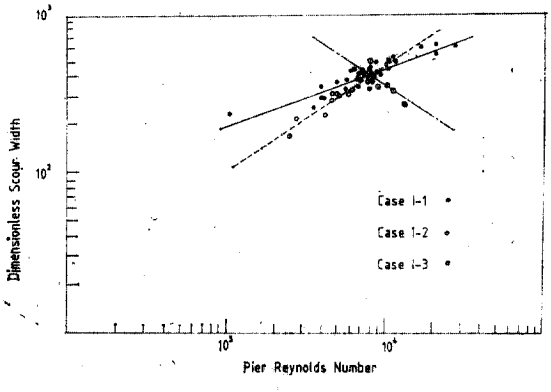

그림 9. 圓形 橋脚에서 迎角別 橋脚 Reynolds 數와 無次元 洗掘幅과의 관계

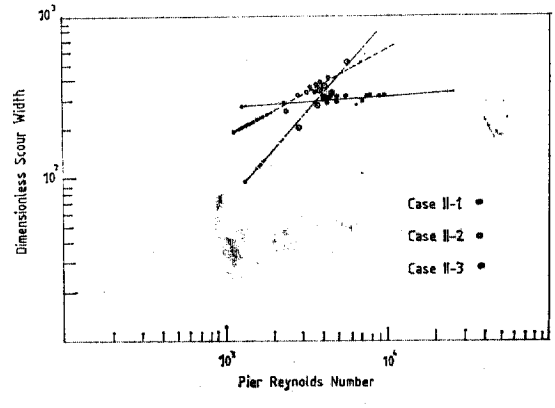

그림 10. 半圓形 橋脚에서 迎角別 橋脚 Reynolds 數와 無次元 洗掘幅과의 관계

있다. 따라서 迎角의 크기가 20°를 前後하여 無次元洗掘量에 미치는 無次元 亂流强度 및 橋脚 Reynolds 數의 遷移區間이 존재하는 것으로 思料된다(그림 12~그림 17).

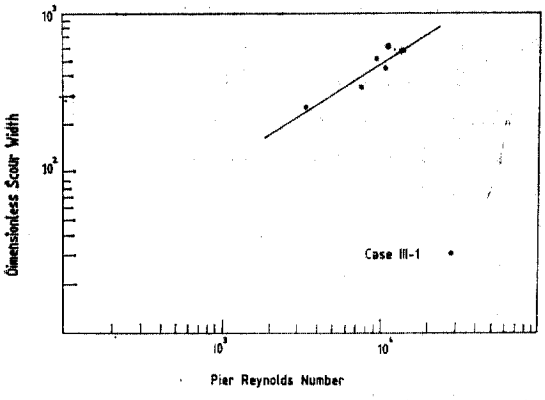

그림 11. 4角形 橋脚에서 迎角別 橋脚 Reynolds 數와 無次元 洗掘幅과의 관계

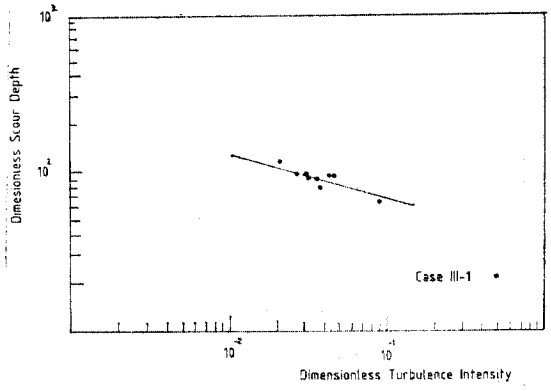

그림 14. 4角形 橋脚에서 迎角別 無次元 亂流强度와 無次元 洗掘深과의 관계

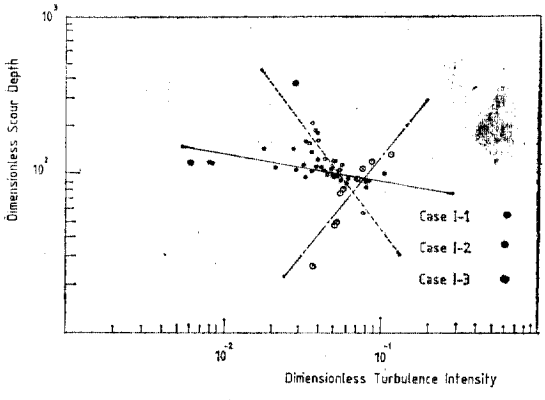

그림 12. 圓形 橋脚에서 迎角別 無次元 亂流强度와 無次元 洗掘深과의 관계

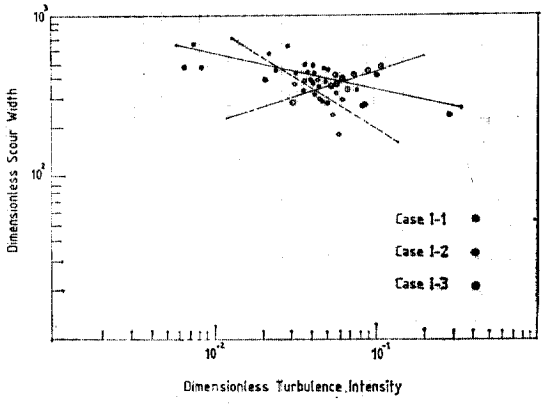

그림 15. 圓形 橋脚에서 迎角別 無次 元亂流强度와 無次元 洗掘幅과의 관계

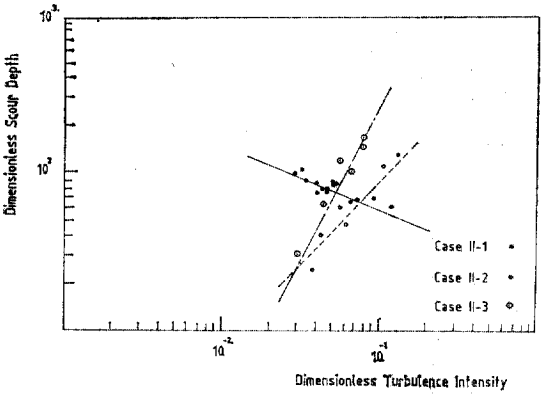

그림 13. 半圓形 橋脚에서 迎角別 無次元 亂流强度와無次元 洗掘深과의 관계

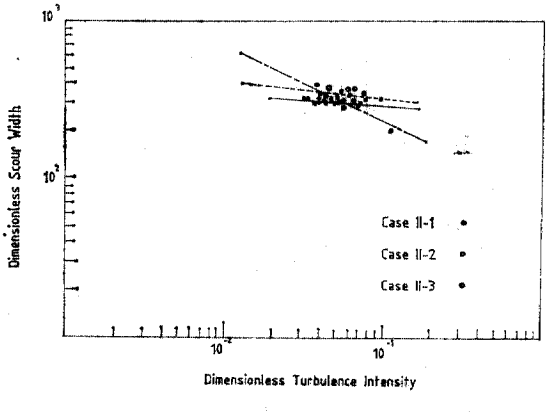

그림 16. 半圓形 橋脚에서 迎角別 無次元 亂流强度와 無次元 洗掘幅과의 관계

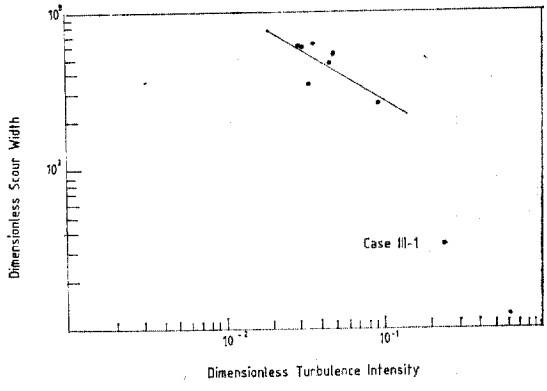

그림 17. 4角形 橋脚에서 迎角別 無次元 亂流强度와 無次元 洗掘幅과의 관계

無次元洗掘量과 橋脚 Reynolds 數 및 無次元 亂流强度와의 相關係數를 求하면 表 3과 같다.

表 3. 無次元洗掘量과 各 變數와의 相關係數

CASE \ 變數	無次元洗掘深		無次元洗掘幅	
	橋脚 Reynolds數	無次元亂流强度	橋脚 Reynolds數	無次元亂流强度
CASE Ⅰ-1	0.912	0.652	0.899	0.605
CASE Ⅰ-2	0.812	0.669	0.826	0.641
CASE Ⅰ-3	0.900	0.592	0.910	0.692
CASE Ⅱ-1	0.848	0.601	0.802	0.660
CASE Ⅱ-2	0.899	0.549	0.940	0.524
CASE Ⅱ-3	0.729	0.592	0.913	0.689
CASE Ⅲ-1	0.847	0.665	0.939	0.753

橋脚 Reynolds 數와 無次元洗掘量과의 相關係數가 無次元 亂流强度의 相關係數보다 크게 나타나고 있으며, 이는 난류해석시에 가정한 Prandtl의 혼합거리理論과 여러 가정사항에 의한 제약성 때문인 것으로 思料되며, 亂流의 特性만으로 渦流의 正確한 解析을 파악하는 데는 어려움이 있다는 것을 알 수 있다.

3) 洗掘深과 洗掘幅에 대한 關係式 決定

橋脚 Reynolds 數, 無次元 亂流强度와 無次元 洗掘量과의 關係를 多重回歸分析(Multiple Regression Analysis)에 의해 基本式(4)와 (5)의 係數 $\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'$ 를 求하여 關係式을 決定한다. 基本式 (4)와 (5)의 제수 및 상관계수는 表 4과 같다.

5. 比較考察

本 硏究에서 제안한 式들은 無次元量으로 構成되어 있어, 現場資料가 있다면 檢定을 實施하는데 보다 바람직한 檢定이 될 수 있으나, 現 우리나라에서 橋脚의 洗掘量에 對한 實 資料가 없는 關係로 建設硏究所資料 No.422에 收錄된 資料로 實施하였다. 이 資料는 本 硏究에서의 CASE I-1, CASE II-1, CASE III-1에 해당되며 結果는 表 5와 같다.

橋脚 Reynolds 數와 無次元 亂流强度의 범위를 살펴보면 無次元 亂流强度는 本 硏究의 제한 범위에 포함되며, 橋脚 Reynolds 數는 벗어나는 것이 있다. 洗掘幅은 제한범위에 관계없이 4角形 橋脚을 除外하고 잘 일치하였으며, 洗掘深은 제한범위 內에서 잘 일치하고 있다. 또한 백색규조토는 實砂보다 비중이 가벼우나, 實砂로 實驗한 檢定資料와 洗掘幅과 洗掘深이 잘 일치하고

表 4. 洗掘深과 洗掘幅에 對한 관계式의 係數와 相關係數

CASE \ Formula Coef.	$d_s/D_m=\alpha(DU/\nu)^{\beta}(\sqrt{\overline{V^2}}/U)^{\gamma}$				$d_w/D_m=\alpha'(DU/\nu)^{\beta'}(\sqrt{\overline{V^2}}/U)^{\gamma'}$			
	α	β	γ	Coef.Corr.	α'	β'	γ'	Coef.Corr.
CASE Ⅰ-1	2.104	0.355	0.034	r=0.926	2.928	0.416	0.033	r=0.908
CASE Ⅰ-2	0.726	0.902	− 0.053	r=0.825	2.241	0.377	− 0.239	r=0.843
CASE Ⅰ-3	8.938E+4	− 2.379	0.095	r=0.901	1.553E+2	− 0.607	0.037	r=0.911
CASE Ⅱ-1	1.713	0.363	− 0.012	r=0.859	9.117	0.074	− 0.012	r=0.812
CASE Ⅱ-2	1.176E−3	2.698	0.831	r=0.918	1.819	0.057	0.004	r=0.941
CASE Ⅱ-3	6.566E+7	− 4.543	− 0.302	r=0.742	3.838	− 0.480	0.196	r=0.926
CASE Ⅲ-1	0.798	0.755	0.603	r=0.880	0.742	0.851	0.295	r=0.954

있음을 알 수 있다.

表 5. 檢定結果表

교각형태	건설연구소 자료				본 연 구	
	교각 Reynolds수	무차원 난류강도	세굴심	세굴폭	세굴심	세굴폭
원 형	35775.1	0.0758	13.2	34.0	7.62	34.06
원 형	26108.8	0.0752	7.8	27.5	6.82	28.87
반원형	35446.2	0.0745	10.5	14.5	7.36	14.48
반원형	18256.2	0.0789	6.3	13.0	6.00	13.78
4 각 형	36811.5	0.0745	15.2	51.0	14.87	61.88

6. 結 論

本 硏究는 橋脚의 局部洗掘에 대한 實驗的 解析으로 局部洗掘을 惹起시키는 여러 要素 중에서 橋脚 Reynolds 數 및 無次元 亂流强度와 局部洗掘과의 關係를 分析하였다. 本 硏究에서 얻어진 結果는 다음과 같다.

1) 無次元洗掘量과 橋脚 Reynolds 數 및 無次元 亂流强度와의 各 相關性은 橋脚 Reynolds 數와의 相關性이 보다 높게 나타났다.

2) 無次元洗掘量의 關係式은 橋脚 Reynolds 數 및 無次元 亂流强度와의 관계에서 迎角이 20° 를 前後하여 천이구간이 존재한다. 즉 迎角이 천이구간보다 작으면 無次元洗掘量은 橋脚 Reynolds 數와 正比例하고 無次元 亂流强度와는 反比例하며 迎角이 천이구간보다 커지면 橋脚 Reynolds 數와 反比例하고 無次元 亂流强度와는 正比例한다.

3) 無次元洗掘深과 無次元洗掘幅에 대한 관계式의 係數를 各 CASE 別로 求하여 提示하였다.

참 고 문 헌

1. Laursen, E.M., "Scour at Bridge Crossing", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 26*, Feb., 1960, pp. 39~54.
2. Laursen, E.M., "An Analysis of Relief Bridge Scour", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 92, HY6*, May, 1966, pp. 17~37.
3. Shen, H.W., V.R. Schneider, "Local Scour around Bridge Pier", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No. HY6*, Nov., 1969, pp. 1919~1940.
4. Neill, C.R., discussion of "Local Scour around Bridge Pier", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 96, No. HY5*, May, 1970, pp. 1224~1227.
5. Fischer, E.E., S.C. Jain, "Scour around Bridge Pier at High Flow Velocity", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No. HY11*, Nov., 1980, pp. 1827~1842.
6. Federal Highway Administration Office of Research and Development *U.S. Dept. of Transportation, Scour around Bridge Piers, FHWA-RD-79-103.*
7. 石原藤次郎, 應用水理學(中 1), 丸善株式會社, pp. 82~88.
8. 石原藤次郎, 水工水理學, 丸善株式會社, pp. 111~133.
9. Hughes, W.C., "Scour Velocities in Ephemeral Channels", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No. HY9*, Sep., 1980, pp. 1435~1441.
10. 吉川秀夫, 福岡捷二, 岩間汎, 會小川久貴, "橋脚の洗掘りとその防止に關する考察", 土木學會論文報告集, 第194號, 1971, pp. 83~90.
11. Raudkivi, A.J., E. Robert, "Scour at Bridge Pier", *I.A.H.R., papers Vol. B*, 1982, pp. 277~285.
12. Graf, W.H., *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill Book Co., pp. 27~63.
13. Ruh-Ming Li, J.D. Schall, D.B. Simons, "Turbulence Prediction In Open Channel Flow", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY4*, Apr., 1980 pp. 575~587.
14. 建設部 國立建設硏究所, 水工構造物에 의한 河床洗掘에 關한 實驗的 硏究, No. 422, 1981.
15. Raudkivi, A.J., R. Ettema, "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, pp. 338~350.
16. Yalin, M.S., *Mechanics of Sediment Transport*, Pergamon Press, 1976, pp. 75~109.
17. 河村三郎, 土砂水理學 1, 森北出版株式會社, pp. 17~38.
18. 朴斗一, 申弘澈, 李貞馥, 應用統計學, 塔出版社, 1980, pp. 225~250.

19. Bansal, M.K., "Turbulent Dispersion In Natural Stream and Laboratory Channel", *I.A.H.R., Vol. 2*, 1973, pp. 39~48.
20. McQuivey, R.S., "Some Turbulence Measurements in Open-Channel Flow", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY1*, January, 1969, pp. 209~222.
21. Resch, F.J., "Hot-film Turbulence Measurements in Water-Flow", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY3*, Mar. 1970, pp. 787~800.
22. Mueller, "Turbulence Measurements Over a Movable Bed with Sediment Transport by Laser-Anemometry", *I.A.H.R., Vol. 1*, 1973, pp. 43~50.
23. Steven Bruk, "Transport Capacity of Tubulence Two-phase Flow", *I.A.H.R., Vol. 2*, 1969, pp. 357~369.
24. Sitki Bursali, "An Approach to vertical Sediment Distribution in Turbulent Flow", *I.A.H. R., Vol. 2*, 1973, pp. 49~56.
25. 安守漢, 水理學, 東明社, pp. 62~70.

(接受 : 1984. 11. 26)