

報青川內 橋脚設置에 따른 局部 洗掘深度의 算定

Scour Prediction at Piers in the Bo Cheong Stream

安相鎭*·崔桂澤**·金宗燮***·安昌鎭****

Ahn, Sang Jin · Choi, Gyu Woon · Kim, Jong Sub · Ahn, Chang Jin

Abstract

In this paper, the maximum scour depths at piers located in the Bo Cheong Stream, which is a tributary in the Geum River System, were calculated and compared using 24 local pier scour equations. The equations were classified as six groups by non-dimensional types of equations. The geometric data in the stream bed and pier data at San Seong, Yi Pyung and San Gye, which are IHP data collection stations, were utilized for applying the scour equations. The geometric data in the stream bed were obtained by analyzing the bed material sampled in three stations which are in the left side, middle and right side for stream direction. The maximum flow velocities at maximum flow depths which were measured from 1982 to 1991, were used as the hydraulic flow data. The pier data for predicting pier scour depths were measured in the fields. The maximum pier scour depths calculated using the equations were compared with the field scour depths measured in the streams or rivers in the world. Arunachalam, Shen-Karaki III, Jain-Fischer equations are selected as the proper local scour equations for predicting the maximum local scour depths at piers in the Bo Cheong Stream. Inglis-Lacey and Shen-Karaki II equations are applicable in case of rapid flows conditions in which Froude number is over 0.3. Froehlich, Laursen I, Laursen II, Neill, Melville equations are applicable in the slow flow conditions in which Froude number is less than 0.3. Blench equation or Inglis-Poona equation varies rapidly by changing Froude numbers. Therefore the equations should not be used without careful considerations in selecting the applicable ranges. The maximum local scour depths calculated using Sarma-Krishnamurthy, Ahmad, Coleman, Varzeliotis, Larras, Bata, Chitale, Venkatadri, Basik-Basamily-Ergun, U.S.G.S., Shen I equations are usually less than the scour depths measured in the fields.

요 지

本 研究에서 24개의 局部洗掘公式을 利用하여 錦江水系內 報青川에서의 橋脚設置에 따른 局部 洗掘深度를 算定하여 서로 比較하였는 바, 이때 24개의 局部洗掘公式들은 無次元化된 公式 形態에 따라 6개의 그룹으로 區分되었다. 局部 洗掘公式 適用資料로는 錦江水系內 IHP 代表測定地點인 산성, 이평, 산계 地點에 設置된 橋梁資料들과 實測된 河床資料들을 利用하였다. 河床資料들은 橋梁設置地點의 流向方向으로 좌안, 중앙부, 우안의 代表地點으로부터 試料를 採取하여 체가름 分析을 實施한 結果를

* 正會員 · 忠北大學校 工科大學 土木工學科 教授

博士過程 修了

** 正會員 · 韓國水資源公社 水資源研究所 責任研究員

*** 正會員 · 韓國水資源公社 水道開發處 課長, 忠北大學校 大

*** 正會員 · 忠北大學校 工科大學 土木工學科 講師 · 大學院

學院 碩士過程

使用하였으며, 水理學的 資料로는 1982년부터 1991년까지 IHP 資料로 觀測된 最大 洪水位 및 最大 洪水位일때의 流速을 利用하였으며 橋脚資料들은 現場에서 實測된 資料를 利用하였다. 또한, 추후 報 青川內 橋脚 設置에 따른 局部 洗掘을 檢討하기 위한 適切한 洗掘公式을 提案하기 위하여 報青川과 흐름條件이 類似한 河川에서 實測된 129개의 局部洗掘資料와 比較하였으며, 이를 통하여 Arunachalam 公式, Shen-Karaki III 公式, Jain-Fischer 公式이 報青川內 洗掘深度 算定을 위하여 比較的 適切한 公式으로 判斷되었다. 또한 Inglis-Lacey 公式과 Shen-Karaki II 公式은 Fr의 數가 0.3 이상인 比較的 빠른 흐름에서 適用이 可能하며, Froehlich 公式, Laursen I 公式, Laursen II 公式, Neill 公式, Melville 公式等은 Fr의 數가 0.3 이하의 比較的 느린 흐름에서 適用이 可能하고, Blench 公式이나 Inglis-Poona 公式은 Froude 數에 따라 變化가 상당히 커서 適用하지 않는 것이 바람직한 것으로 判斷되었다. 또한 Sarma-Krishnamurthy 公式, Ahmad 公式, Coleman 公式, Varzeliotis 公式, Larras 公式, Bata 公式, Chitale 公式, Venkatadri 公式, Basik-Basamily-Ergun 公式, U.S.G.S. 公式, Shen I 公式들은 實測된 局部 洗掘深度에 비하여 지나치게 적게 洗掘深度를 算出하는 것으로 나타났다.

1. 序 論

橋脚 周圍에서의 洗掘 現象은 流水의 흐름에 의하여 水路를 構成하고 있는 河床 材料가 移動 또는 除去됨에 따라 水路 斷面이 擴張되는 現象으로 定義할 수 있다. 이 現象은 흐르는 물에 의한 浸蝕 活動, 水路內 河床 掘鑿 現象 및 河川의 水路 斷面 으로부터 浸蝕된 材料의 運搬作用들을 포함한다. 따라서, 서로 다른 河床材料로 構成된 河川은 洗掘 比率에 차이가 있다. 非粘着性 土壤은 河床에 活動 하는 流體의 힘에 의해서 빠르게 浸蝕되는 반면에 粘着性土壤은 洗掘에 抵抗하는 힘이 非粘着性 土壤 에 비해 크다.

一般的으로 橋脚 주위의 洗掘은 上流로부터의 斷面變化에 의한 流水힘의 影響, 河床材料 狀態 및 上流로부터의 移動流砂의 存在여부 등에 따라 河床 上昇(aggradation) 및 下降(degradation)作用, 收縮 洗掘 및 局部 洗掘의 3種類로 分類된다.^(2,4,5,8) 河床 上昇 및 下降作用은 河川이나 流域 上流部內의 水理學的 및 河川形態學的 特性에 따른 變化에 크게 기인된다. 河床 上昇作用은 河川의 上流로부터 운 반된 材料의 堆積作用을 말하며, 반면에 河床 下降 作用은 河床침식에 의하여 낮아지는 作用을 포함한다. 收縮 洗掘은 自然 및 人工水路의 形態學的 變化에 기인하여 수로가 收縮되므로 일어나는 河床의 변화로 定義된다. 局部 洗掘은 橋脚, 橋臺, 突出部 및 둑이나 堤防과 같이 흐름을 방해하는 障礙物에

의한 지연으로 河床 變化의 結果를 가져오는 것으로 定義된다. 이 障礙物들은 흐름운동을 加速化시키고 주위의 河床物質(流砂)을 움직여 渦流(vortex)를 發生시킨다. 一般的으로 局部 洗掘에 의한 洗掘深度는 위의 두 가지 形態의 洗掘深度보다 큰 편이며 河川에 設置되어 있는 構造物에 가장 큰 影響을 주는 것이 바로 이 局部洗掘이다. 특별히 局部洗掘은 河川을 橫斷하기 위하여 設置된 橋梁의 下部 構造物인 橋脚의 安定에 크게 影響을 미치기 때문에 橋脚 設置時 局部 洗掘에 대한 安定性 檢討가 반드시 이루어져야 한다.

이와 같이 局部洗掘의 研究는 20世紀에 들어 交通量의 增加에 따른 橋梁의 增加와 더불어 많은 研究者들에 의하여 수행되어 왔다. 初期의 局部洗掘에 대한 研究의 대부분은 洗掘에 影響을 미치는 因子들의 力學的 舉動에 관한 研究였으며, 이어 洗掘影響因子들을 一定하게 限定시킨 實驗條件下에서 實驗을 實施하고 그 實驗結果를 그대로 利用하거나 回歸分析하여 最大 洗掘 深度 또는 平衡 洗掘 深度를 算出하는 研究로 이어졌다. 그러나, 橋脚設置에 따른 洗掘量은 水深, 河床材料, 流速等 河川內 水理學的 條件이나 地形學的 條件 等에 따라 크게 다르기 때문에 어느 限定된 實驗에 의하여 도출된 結果는 實驗條件과 同一하거나 類似한 河川에만 適用될 수 밖에 없었다. 이러한 短點을 補完하고 좀 더 精確한 洗掘資料를 얻기 위하여 Bata(1960), Neill(1965), Brauser(1970), Norman(1975), Melville(1975),

Zhuravlyov(1978), Chang(1980), Jarrett & Boyle (1986), Devoren(1985) 등은 實際 강 또는 河川에서의 洗掘深度에 대한 測定을 實施하여 보다 精確한 洗掘 公式을 導出하려고 試圖하였다. 그러나 이와 같은 實際 測定된 洗掘資料도 測定場所마다 幾何學的 및 水理學的 條件들이 다르기 때문에 이 實測 結果를 모든 곳에 그대로 適用하는 것은 問題가 있으며 가능한한 測定된 강 또는 河川과 水理學的 및 幾何學的 條件이 類似한 곳에 사용하는 것이 바람직하며, 또한 이와 같이 測定된 資料와 提案된 洗掘 公式을 동시에 適用한 후 두 結果를 比較分析하여 최종적으로 橋脚 設置 地點에서의 洗掘深度를 決定하는 것이 바람직하다.

따라서 本 論文에서는 國際水文計劃(IHP)의 代表 流域인 錦江水系 報青川流域內 3개 橋梁 設置地點의 水理學的 및 幾何學的 資料를 分析하여 그동안 여러 公式으로 提案되었던 洗掘公式들을 크게 6개의 group으로 分類하여 洗掘深度를 計算하고 이를 報青川의 흐름조건과 河床條件이 類似한 條件下에서 實測된 洗掘 深度와 比較를 통하여 報青川에서의 最大 洗掘深度 산정을 위한 適用 公式을 導出하고 追後 橋脚 設計 및 橋脚의 安全診斷에 利用되도록 하였다.

2. 局部 洗掘에 관한 理論的 考察

局部 洗掘을 解析的으로 취급하는 理論的인 接近 方法은 주로 渦流系에 基礎하고 있는데, 이와 같은 渦流系로부터 洗掘 現象의 力學的인 舉動을 적절하게 記述하기가 쉽지 않으며 실제로 適用하기가 상당히 어려운 실정이므로 더 많은 研究가 必要하다.

현재 알려져 있는 洗掘에 影響을 주는 渦流系를 크게 나누면 마계형 와류, 反流型 渦流 및 trailing 渦流로 區分되며, 이와 같은 渦流는 橋脚의 형상 및 자유흐름조건에 따라 전부 혹은 한, 두 가지 現象으로 나타난다.

馬蹄型渦流는 주로 橋脚前面에서 發生되는데, 橋脚設置로 인하여 水路바닥 또는 壁面에 3次元의인 分離를 일으키게 되며, 이 3次元의인 分離로 말미암아 馬蹄型 渦流가 發生한다.

反流型 渦流는 馬蹄型 渦流와는 반대로 橋脚自體

에 의해 發生되며 주로 橋脚後面에서 發生한다. 反流型 渦流는 橋脚 表面에서 일어나는 不安定한 剪斷層(shear layers)의 流體가 미끌어지거나 回轉하면서 形成된다.

Trailing형 渦流는 대개 물에 의해 완전히 잠긴 水中에서만 發生한다. 이 渦流는 3次元 橋脚의 尖頭部分과 接觸된 狀態에서 여러개로 分離된 漩渦들이 이루어진다.

2.1 馬蹄型 渦流系

馬蹄型 渦流는 橋脚의 정면에서 垂直降下되는 흐름과 關聯이 있다.⁽¹⁹⁾

馬蹄型 渦流는 橋脚주위의 停滯面에서 發生하는 下降흐름에 의한 影響으로 發生하는데 初期에는 그 크기가 상당히 작다. 이와 같이 形成된 渦流는 그 크기가 매우 急速하게 成長하고 또한 流體의 下向成分을 追加적으로 일으키며, 下流方向 흐름의 強度를 증가시킨다. 이와 같은 下流方向 흐름의 活動은 浸蝕中인 河床에 垂直의 젯트噴射와 같은 活動이며 세굴구멍의 發達에 따라 점차 아래로 移動하면서 구멍을 擴張시킨다. 洗掘活動이 시작되는 最初의 期間에는 橋脚 앞쪽에서 흐름에 의해 浸蝕되는 힘이 發生되고 이어 橋脚주위를 흐르는 加速화된 흐름이 더욱 큰 浸蝕을 일으키게 되며 결국, 洗掘은 완전한 渦流現象을 일으키기에 충분한 크기로 成長한다.

實際로 이와 같은 馬蹄型 渦流가 局部洗掘을 일으키는 가장 큰 原因중 하나로 알려져 있으며 流速이 增加함에 따라 이에 의한 影響이 점차 增加한다.

2.2 反流型 渦流系

停滯壓力은 障礙物을 통과하여 지나가는 흐름의 側面加速度를 일으킨다. 흐름의 側面加速度에 의해 일어나는 흐름의 分離現象은 本流의 境界面에서 反流型 渦流系의 現象을 일으킨다. Melville(1975)⁽¹⁹⁾는 色素의 혼적을 이용한 實驗에서 橋脚의 側面주위로 퍼져가는 馬蹄型 渦流의 힘은 反流型 渦流의 發生과 같은 頻度로서 水平 및 垂直으로 振動하며 進行한다는 사실을 알아내었다. 馬蹄型渦流가 比較的 弱하게 나타나는 예연돌출교각에서는 反流型渦流가 이 橋脚에서 支配的인 渦流現象이 될 수 있다. 그러나 反流型 渦流가 發生效때 局部洗掘은 馬蹄型 渦流 및

下向흐름이 支配인 渦流現象일 때보다 洗掘深度를 더 낮게 發達시키게 된다.⁽⁸⁾

이와 같은 反流型渦流를 發生시키는 原因으로 障礙物에 의해 分離된 地域의 가장자리에 위치한 流體粒子的 反轉運動의 現象을 나타내기도 하는데, Reynolds 數가 40보다 작은 흐름에서의 反流型渦流現象은 時間에 거의 獨立的이며 Reynolds 數가 40보다 큰 흐름에서의 와류현상은 對稱的이거나 非對稱의 特性을 가진 橋脚의 兩側面으로부터 河床을 점차적으로 洗掘시킨다. 反流系에서 渦流의 強度는 橋脚型狀 및 流速에 의해서 매우 크게 變化된다. 反流型 渦流系는 河床物質을 빨아들이는 진공청소기와 같은 活動을 하며 이 活動으로 말미암아 소용돌이가 일어나고 河床物質을 下流方向으로 運搬하게되어 결국 局部洗掘이 發生된다.^(3,15,16,23)

2.3 Trailing型 渦流系

앞절에서 言及한 바와 같이, trailing 渦流系는 橋脚의 尖頭部分과 側面의 서로 다른 壓力差에 기인한 反流區間내에서 形成된다. 이 現象은 예연돌출부의 가장자리가 만나는 서로 다른 壓力을 가진 두 表面에서는 어디서나 發生된다. 그러므로 橋脚의 幅이 壓力差를 일으킬만큼 충분하지 않으면 Trailing 渦流現象은 나타나지 않는다.^(3,15,16,23) 이와 같은 Trailing 渦流는 결국 障礙物의 設置로 인한 壓力差에 의한 循環強度(circulation)에 의하여 發生되며, 이와 같은 Trailing 渦流에 의하여 河床物質을 下流方向으로 運搬하게 되어 결국 局部洗掘을 誘導하게 된다.⁽²³⁾

3. 報青川內 洗掘算定을 위한 水理學的 資料

河川에서 洗掘深度算定을 위하여는 適用河川의 水理學的 資料 및 橋脚에 대한 資料가 必要하다. 水理學的 資料로는 크게 물의 흐름 資料와 河床材料에 관한 資料로 大別될 수 있는데 물의 흐름 資料로는 洪水時 水深과 流速, 이에 따른 후루드(Fr) 數 등이 있다. 현재 IHP의 代表流域인 錦江水系內 報青川은 流域面積 476 Km²와 河川延長 54 Km를 가진 錦江水系內 第 5支流로서 1982년부터 1991년까지 各種 水文資料가 測定되어 있다. 이와 같은 水文資料의 測定地點은 現在 橋梁이 設置되어 있는 산성, 이평 및 산계지점으로써 1982년부터 1991년까지 測定된 年度別 最大 水深 및 最大水深時에 現場에서 回轉式流速計를 使用하여 測定된 橋脚周圍에서의 流速과 이때의 流速에 대하여 計算된 Fr 數는 表 1~3과 같다.

表 1은 산성지점, 表 2는 이평지점, 表 3은 산계지점에서의 최대 수심 및 이때 測定된 流速을 나타내고 있는데 산성지점에서의 最大水深은 2.28m, 이평지점에서의 최대수심은 1.93m, 산계지점에서의 최대수심은 3.00m를 각각 나타내고 있다. 또한, 산성지점에서의 최대 Fr 數는 0.314, 이평지점에서의 최대 Fr 수는 0.379, 산계지점에서의 최대 Fr 數는 0.415를 나타내고 있다. 現在 設置되어 있는 3地點에서 橋梁을 지지하고 있는 橋脚 1개의 폭은 산성, 이평 및 산계지점에서 각각 0.9m, 1.7m 및 1.0m이며 橋脚의 높이는 5.5m, 3.2m, 2.7m이다. 또한 산성과

Table 1. The maximum flow depth and Froude number of each year at San Seong station

Year	Date	Max. Depth(m)	Veloc. (m/sec)	Fr. Number	Remarks
1982	9. 29	1.10	0.48	0.146	
1983	7. 20	2.09	1.11	0.245	
1984	7. 12	2.00	0.96	0.216	
1985	7. 80	2.10	0.84	0.185	
1986	6. 25	1.80	0.81	0.193	
1987	7. 16	1.87	0.82	0.192	
1988	7. 14	2.28	1.27	0.269	
1989	7. 20	2.20	1.33	0.286	
1990	7. 14	1.59	1.24	0.314	
1991	7. 23	1.30	0.66	0.185	

Table 2. The maximum flow depth and Froude number of each year at Yi Pyung station

Year	Date	Max. Depth(m)	Veloc. (m/sec)	Fr. Number	Remarks
1982	8. 21	1.14	0.66	0.197	
1983	7. 20	1.24	0.67	0.192	
1984	7. 12	0.72	0.73	0.276	
1985	7. 8	1.12	0.62	0.187	
1986	7. 16	0.96	1.12	0.365	
1987	7. 16	1.02	0.80	0.253	
1988	7. 14	1.84	1.61	0.379	
1989	7. 26	1.93	1.64	0.377	
1990	7. 14	1.50	1.02	0.266	
1991	7. 16	1.86	1.40	0.328	

Table 3. The maximum flow depth and Froude number of each year at San Gye station

Year	Date	Max. Depth(m)	Veloc. (m/sec)	Fr. Number	Remarks
1982	8. 28	1.54	1.51	0.389	
1983	7. 20	2.50	1.48	0.299	
1984	7. 13	1.94	1.70	0.389	
1985	7. 80	2.56	1.80	0.359	
1986	6. 25	1.26	0.65	0.185	
1987	7. 16	2.15	0.91	0.198	
1988	7. 14	2.70	1.98	0.385	
1989	7. 26	3.00	2.25	0.415	
1990	7. 14	1.99	0.97	0.220	
1991	7. 23	0.30	0.85	0.238	

산계지점에서 橋脚의 設置方向과 물의 흐름방향은 같은 方向으로 設置되어 있고 이평지점에서는 25°의 角度를 나타내고 있으며 橋脚의 形狀은 타원형을 나타내고 있다. 또한 洗掘算定에 必要한 河床材料의 特性을 파악하기 위하여 산성, 이평, 산계 3개지점의 流向方向을 中心으로 좌안, 중간 및 우안의 代表地 點을 택하여 試料를 採取하여 그림 1, 그림 2 및 그림 3과 같이 체가름분석을 實施하였으며, 3개지 점에서 採取된 河床材料의 比重은 각각 2.61, 2.58, 2.58이었다. 이에 의하면 報靑川내 比較的 上流에 位置한 산성에서의 하상재료의 평균입경은 1.5 mm 이고 산성지점과 산계지점의 중간에 위치한 이평지 점에서는 0.6 mm~0.8 mm이며 下流部인 산계지점

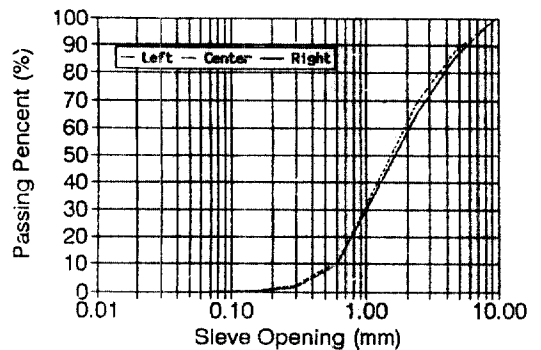


Fig. 1. Result of Sieve Analysis at San Seong Station

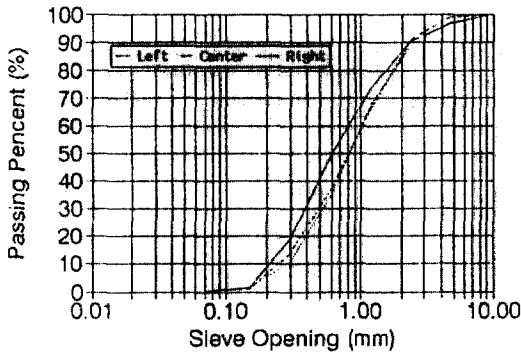


Fig. 2. Result of Sieve Analysis at Yi Pyung Station

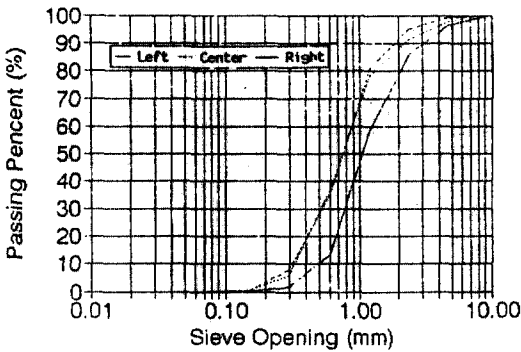


Fig. 3. Result of Sieve Analysis at San Gye Station

에서는 0.75 mm~1.0 mm에 이르고 있다.

4. 局部洗掘 公式의 選定

橋脚의 局部洗掘深度를 豫測하기 위하여는 渦流理論에 基礎한 解析的인 接近方法이 타당한 것으로 判斷되지만 渦流를 일으키는 原因이 多樣하며 또한 이들 原因들이 일으키는 渦流形成과 洗掘과의 關係를 公式로 나타내기가 어렵기 때문에 잘 利用하지 않고 實驗 또는 實測을 통하여 洗掘影響 因子들을 抽出하고 이들의 次元解析을 實施하여 無次元化한 公式들이 주로 利用되고 있다.

現在까지 洗掘에 影響을 미치는 主要한 水理學的 및 기하학적 因子들로는 아래와 같은 12개가 利用되고 있다.

$$ds = f(b, y, v, D_{50}, \sigma_g, \phi, \alpha, \gamma_s, t, g, \rho, \nu) \quad (1)$$

여기서, b 는 橋脚의 幅, y 는 橋脚 前面에서의 水深, v 는 平均流速, D_{50} 은 河床材料의 平均粒徑, σ_g 는 均等係數, ϕ 는 形狀係數, α 는 橋脚에 接近角度, γ_s 는 流砂의 水中單位重量, t 는 持續期間, g 는 重力加速度, ρ 는 물의 密度, ν 는 動粘性係數이다. 이들 因子들을 利用하여 洗掘深度를 無次元化하는데 가장 典型的으로 利用되는 因子는 橋脚의 幅 b 이다. 즉, 式 1의 左邊을 b 를 利用하여 無次元化하고 右邊을 각각의 因子들을 利用하여 無次元化하면 式 2와 같다.

$$\frac{ds}{b} = f\left(\frac{y}{b}, \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{D_{50}}{y}, \sigma_g, \phi, \alpha, \frac{Vt}{b}, \frac{\rho V_2}{\gamma_s \cdot D_{50}}\right) \quad (2)$$

이 중에서 密度 및 均等係數 因子들의 影響은 他 因子들에 비하여 洗掘에 對한 影響이 상당히 작은 편이므로 이를 除去하면 式 3과 같다.

$$\frac{ds}{b} = f\left(\frac{y}{b}, \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{D_{50}}{y}, \phi, \alpha\right) \quad (3)$$

式 3 중에서 形狀係數 및 橋脚에 接近하는 角度는 持續的으로 變化하는 因子라기 보다는 常數의 性格이 강하므로 이를 一定한 係數를 適用하여 정리하면 式 4와 같다.

$$\frac{ds}{b} = k \cdot K_1 K_2 \left(\frac{y}{b}\right)^a (F_r)^b \left(\frac{D_{50}}{y}\right)^c \quad (4)$$

여기에서, k, K_1, K_2 는 교각형상, 접근각도 등에 의한 계수이며, 첨자 a, b, c 등은 실험결과 등에 따라 상이한 값을 가진다.

지금까지 提案되어온 公式 中에서 式 4와 같이 表示되는 公式들로는 Blench, Arunachalam, Sarmakrishnamurthy, Jain-Fischer와 Froehlich公式이 있다.

또한 式 4에서 河床材料의 平均粒徑(D_{50})에 의한 洗掘深度의 影響이 比較的 작다고하면 式 4는 式 5와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{ds}{b} = k \cdot K_1 K_2 \left(\frac{y}{b}\right)^a F_r^b \quad (5)$$

이와 같이 表示되는 公式으로는 Inglis-poona, Ahmad, Coleman, C.S.U., Varzeliotis公式이 있다. 또

式 4에서 D_{50} 및 F_r 數에 의한 洗掘深度의 影響이 比較的 작다고 하면 式 5는 式 6과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{ds}{b} = k \cdot K_1 K_2 \left(\frac{y}{b}\right)^a \quad (6)$$

이와 같이 表示되는 公式으로는 Laursen I, Laursen II, Larras, Breusers, Neill, Melville 公式이 있다. 이와는 달리 洗掘深度를 無次元化할 때 橋脚의 幅보다는 橋脚前面에서의 水深에 의한 影響이 크다고 判斷하여 이를 利用하여 無次元化된 公式을 導出할 수 있다.

$$\frac{ds}{y} = f\left(\frac{b}{y}, \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{D_{50}}{y}, \phi, \alpha\right) \quad (7)$$

式 7을 式 4와 같은 形態로 나타내고 이중에서 橋脚의 幅에 의한 洗掘深度의 影響이 작다고 하면

$$\frac{ds}{y} = k \cdot K_1 K_2 (F_r)^b \left(\frac{D_{50}}{y}\right)^c \quad (8)$$

이와 같이 表示된 公式으로는 Inglis-Lacey, Bata 公式이 있다. 이중에서 河床材料의 平均粒徑(D_{50})에 의한 洗掘深度의 影響이 적다고 생각하면 式 8은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{ds}{y} = k \cdot K_1 K_2 (F_r)^b \quad (9)$$

이와 같이 表示된 公式으로는 Chitale과 Venkata-dri 公式이 있다. 式 9와는 달리 y 대신에 橋脚의 幅 b 를 사용하고 F_r 數 대신에 橋脚의 Re 數를 나타내는 Rep 나 橋脚의 Fr 數를 나타내는 Frp 를 利用할 수 있는데 이는 아래와 같이 表示된다.

$$\frac{ds}{b} = k \cdot K_1 K_2 (Rep)^a (Frp)^b \quad (10)$$

여기에서 Rep 는 橋脚의 幅을 이용하여 Vb/v 로 表示된 Re 數이며 Frp 는 橋脚의 幅을 利用한 Fr 數이다. 이와 같이 表示된 公式으로는 Basik-Basamily-Ergun, U.S.G.S., Shen I, Shen-Karaki I, Shen-Karaki II 公式이 있다. 이와같이 表示된 公式들을 정리하면 表 4 및 表 5와 같다.

위의 表에 나타난 式 중에서 y_r , q , b' 는 각각 re

gime 값이, 單位幅當 流量, 흐름 直角 方向에서의 橋脚의 幅을 나타내고 있다.

5. 實測 洗掘資料의 活用

앞장에서 言及된 대부분의 公式들은 實際 河川에서 實測하여 얻어진 結果가 아니라 주로 實驗室에서 制約된 條件下에 實驗을 實施한 結果를 利用하여 導出하였다. 그러나, 實驗室에서는 實際河川과 같이 不定流의 흐름이 아니라 定流상태의 흐름을 利用한다든지, 實際 河川에서는 河床材料가 均一하지 않음에도 불구하고 均一한 河床材料를 利用한다든지 하는 一定한 制約속에서 導出된 公式이므로 이를 實際로 利用하는 데는 많은 주의를 要한다.

또한 洗掘은 河川의 흐름 뿐만 아니라 河床材料의 크기, 밀도, 비중, 점성 등 여러 影響이 複合적으로 作用하는 현상이므로 實驗室에서 實際 現場을 제대로 구현하지 못한 狀態에서 導出된 公式이 많이 있으며, 여러 하천에서 보편적으로 利用하기 위하여 導出된 公式이 아니라 어느 特定한 하천 또는 강에 適用하기 위하여 導出된 公式도 많으므로 이들 公式들을 無分別하게 使用할 때는 實際 洗掘量보다 크게 洗掘量을 算出하여 橋脚의 基礎設計時 不必要한 經費가 소요되거나 실제 洗掘量보다 적게 洗掘量을 算出하여 이로인한 構造物 崩壞의 危險을 초래한 경우가 종종 있다. 實際적으로 1977年 10월부터 1979年 3월까지 미국 Arizona州에서는 橋梁 또는 道路에 상당한 被害를 준 4개의 大洪水를 經驗한 바 있어 Arizona 交通局과 美國 聯邦道路局(FHWA)에서는 1979年 6월에 20個所의 橋梁을 選定하여 洗掘에 관한 안전진단을 실시하였는데(ADT-FHWA, 1980), 이중에서 15개소가 洗掘에 대한 防止 施設을 하지 않을 경우 洗掘에 의한 潛在危險性이 있다고 診斷한 바 있다. 그러나, 國內에서는 既存 설치된 교각주위에서의 세굴에 관한 안전진단이 거의 實施되지 않고 있는 실정이므로 橋脚이 설치된 現場에 직접 現場調査를 실시하는 것이 바람직하나 이것이 여의치 못할 때에는 適用河川에 적합한 기존 洗掘 公式을 利用하여 세굴에 대한 전반적인 診斷을 실시하여 잠재위험성을 제거하는 것이 필요하다. 또한, 河川에 橋脚을 처음으로 設置할 때에도 기존 洗掘

Table 4. Equations of local pier scour (1)

Group	Eq.	Proposer	Proposal Equations
Group 1	Eq.4	Blench	$\frac{y + d_s}{y_r} = 1.8 \left(\frac{b}{y_r} \right)^{1/4}$
		Arunachalam	$\frac{y + d_s}{y_r} = 1.95 \left(\frac{b}{y_r} \right)^{1/6}$
		Sarma-Krishnamurthy	$d_s = F_r \left(1 + A_1 \frac{b^{1/3}}{y} \right) - 0.952 \frac{D^{1/3}}{y}$
		Jain-Fischer	$\frac{d_s}{b} = 2.0 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.5} (F_r - F_{rc})^{0.25}$
		Froehlich	$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3} (F_{rc})^{0.25}$ $\frac{d_s}{b} = 0.32 k_1 \left(\frac{b'}{b} \right)^{0.62} \left(\frac{y}{b} \right)^{0.46}$ $F_r^{0.20} \left(\frac{b}{D_{50}} \right)^{0.08} + 1$
Group 2	Eq. 5	Inglis-Poona	$\frac{d_s}{b} = 1.70 \left(\frac{q^{2/3}}{b} \right)^{0.78}$
		Ahmad	$\frac{d_s}{b} = \frac{y}{b} (4.77 F_r^{2/3} - 1)$
		Coleman	$\frac{d_s}{y} = 1.39 (F_r)^{0.2} \left(\frac{b}{y} \right)^{0.9}$
		C.S.U	$\frac{d_s}{b} = 2.0 k_1 k_2 \left(\frac{b}{y} \right)^{0.65} F_r^{0.43}$
		Varzeliotis	$\frac{y + d_s}{b} = 1.43 (q^{0.67} / b)^{0.72}$
Group 3	Eq. 6	Laursen I	$ds = 1.5 kb^{0.7} y^{0.3}$
		Laursen II	$\frac{b}{y} = 5.5 \frac{d_s}{y} \left[\left(\frac{d_s}{11.5y} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right]$
		Larras	$\frac{d_s}{y} = \frac{1.05k}{b^{0.25}} \left(\frac{b}{y} \right)$
		Neill	$\frac{d_s}{b} = 1.5 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3}$
		Melville	$11.5y = \frac{d_s}{\left(1 + \frac{0.182}{d_s/b} \right)^{0.589} - 1}$

Table 5. Equations of local pier scour (2)

Group	Eq.	Proposer	Proposal Equations
Group 4	Eq. 8	Inglis-Lacey	$d_s = 0.946 \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3} - y$
		Bata	$\frac{d_s}{y} = 10 \left(F_r^2 - \frac{3D}{y} \right)$
Group 5	Eq. 9	Chitale	$\frac{d_s}{y} = 6.65 F_r - 0.51 - 5.49 F_r^2$
		Venkatadri	$\frac{d_s}{y} = C \times F_r^2$
Group 6	Eq. 10	Basil-Basamily-Ergun	$d_s = 0.558b^{0.586}$
		U.S.G.S.	$d_s = 1.2 b^{0.8}$
		Shen I	$d_s = 0.000223(R_{ep})^{0.619}$
		Shen-Karaki II	$\frac{d_s}{b} = 11.0(F_{rp})^2$
		Shen-Karaki III	$\frac{d_s}{b} = 3.4(F_{rp})^{0.97}$

공식을 사용하여 세굴에 대한 檢討를 실시하는 실정인데 이때에도 교각 설치지점에 가장 적합한 세굴 공식을 채택하여 洗掘量을 算出하여야 過多設計로 인한 낭비나 과소설계로 인한 위험요소를 제거할 수 있다. 그러나, 기존에 提案된 公式들이 수십여개에 이르고 또한 이 公式들을 適用하여 算出된 洗掘深度도 상당한 차이를 나타내고 있으므로 교각 설치지점에 적합한 洗掘公式를 選定하는 것이 상당히 중요한 실정이다. 교각설치지점에서의 적합한 세굴 공식 선정의 한 방법으로는 실제 適用地點에서의 現場 洗掘深度 측정결과와 세굴공식들에 의하여 산출된 결과를 比較分析하여 각각의 하천에 적합한 세굴공식을 선정할 수 있다. 그러나 불행하게도 국내에서는 교각설치 현장에서 직접 측정된 세굴자료가 없는 실정이므로 本 研究에서는 적용하천과 유사한 기하학적 및 수리학적 특성을 가진 外國河川에서 現場 測定된 세굴자료를 適用河川인 報靑川에서 현장측정된 자료로 간주하여 最大 洗掘深度 算定을 위한 公式 채택자료로 활용코져하였다.

지금까지 橋脚이 설치된 실제현장에서 직접 洗掘量의 測定은 미국, 소련, 뉴우질랜드, 캐나다 등 선진 몇 개국에 국한되어 있는 실정이므로 本 研究에서

이 測定資料들을 長期間에 걸쳐 수집, 정리하였다. 이와 같이 수집된 實際現場에서의 洗掘資料들은 Ohau River, Red River, Atchafalaya River, Knik River, Valga Main Channel, Chirchik River, Dnieper River, Anu-Darya River, Ravy River 등 38개 하천의 224개 測定資料로 이루어져 있다. 그러나, 측정지점의 水理學的 및 기하학적 特性을 比較하여 本 結果 수리학적 및 기하학적 특성중 상당한 부분이 차이가 있는 실정이어서 이들 현상세굴 자료들을 本 研究에서 適用코져 하는 報靑川에서의 실측 洗掘資料로 간주하기는 어렵기 때문에 報靑川과 유사한 수리학적 및 기하학적 특성인자를 가진 현장 측정 자료를 선별하여 보청천의 실측 洗掘資料로 간주하였다. 이때에 구체적인 선별기준으로 Fr 數와 河床材料의 平均粒徑(D₅₀)을 利用하였다. Fr 數에 대하여는 1982년부터 1991년까지 報靑川내 洪水時 Fr 數의 최대치가 0.415임을 감안하여 이에 약 20%의 여유를 두어 Fr數가 0.5이하인 資料를 選擇하였다. 또한, 평균입경(D₅₀)에 대하여는 報靑川내 산성, 이평 및 산계지점의 河床材料의 平均粒徑이 각각 1.5 mm, 0.7 mm, 0.85 mm인 것을 감안하여 實測된 河床材料의 平均粒徑이 이와 유사한 河川에서 實測된 洗

掘測定資料를 選定하였다. 이와같은 선별기준에 의하여 실제 현장에서 측정된 總 224개 洗掘實測資料中 129개를 選別하였으며 이 實測된 洗掘結果를 보청천에서 현장측정된 세굴결과로 간주하여 報靑川에 適合한 局部洗掘公式를 채택하는 기준으로 활용하였다.

6. 洗掘算定公式의 適用 및 檢證

第4章에서 나타낸 6개 Group의 局部洗掘公式을 錦江水系內 報靑川에 適用하여 橋脚周圍에서의 局部洗掘深度를 算出하기 위하여 適用대상 橋脚으로써 산성, 이평 및 산계지점에 設置되어 있는 橋脚을 選定하였다. 그림 4~6은 각각 산성, 이평 및 산계

지점에서의 Group 1의 公式을 이용하여 算出된 最大洗掘深度와 觀測된 洗掘深度를 나타내고 있다.

그림 4-6의 凡例에 Field, Blench, Aruna, Sarma-K, Froeh, Jain-F는 각각 現場測定된 洗掘資料, Blench公式, Arunachalam公式, Sarma-Krishnamurthy公式, Froehlich公式 및 Jain-Fischer 公式을 나타낸다. 그림 4에서 보는 바와 같이 산성지점에서는 Arunachalam公式 및 Jain-Fischer公式을 利用한 洗掘深度가 現場에서 測定된 洗掘深度와 類似한 結果를 보여주고 있으며 Sarma-Krishnamurthy公式을 利用한 洗掘深度는 상당히 작은 洗掘深度를 보여주고 있고 Fr 數가 클수록 測定된 資料와의 차이가 크다. 또한 Blench公式을 이용한 最大洗掘深度는 現場測定 資料보다 크게 나타나고 있다. 그림 6의

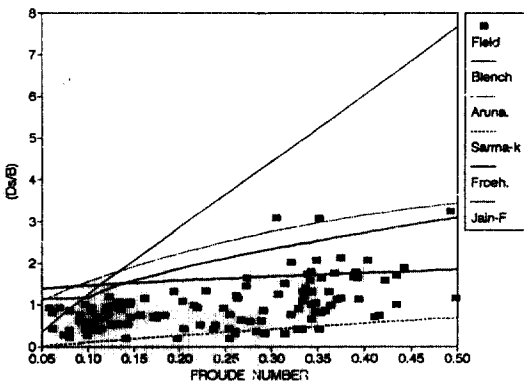


Fig. 4. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 1 at San Seong Station

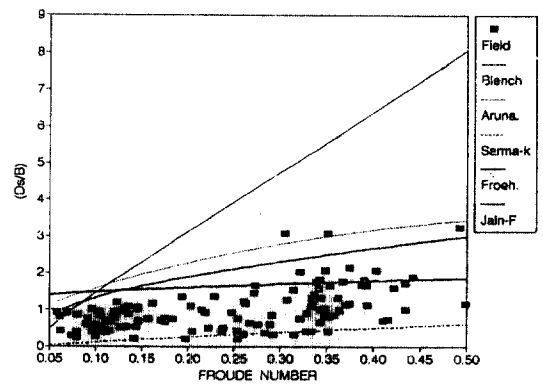


Fig. 6. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 1 at San Gye Station

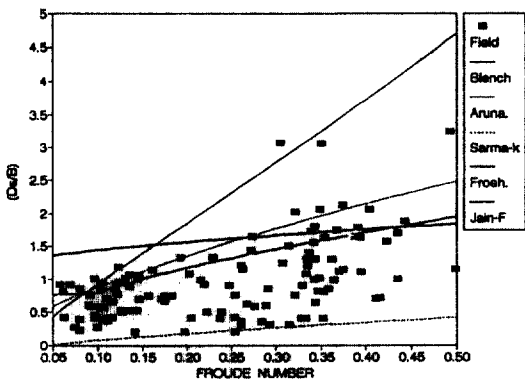


Fig. 5. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 1 at Yi Pyung Station

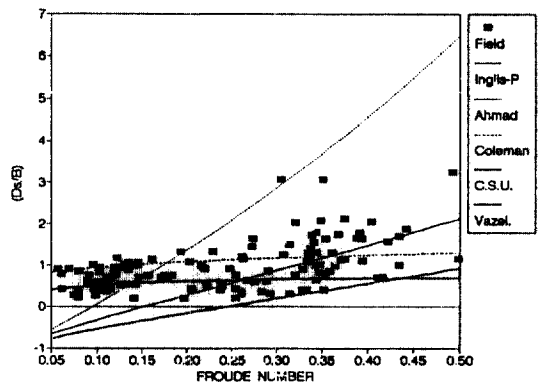


Fig. 7. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 2 at San Gye Station

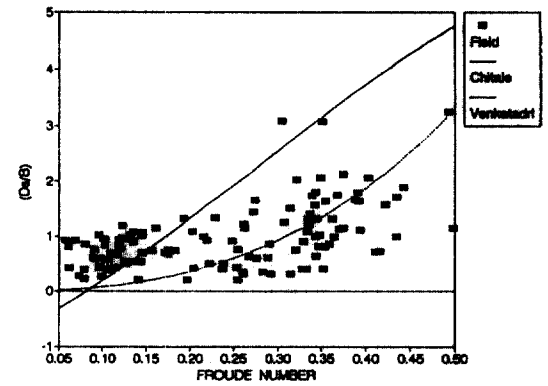
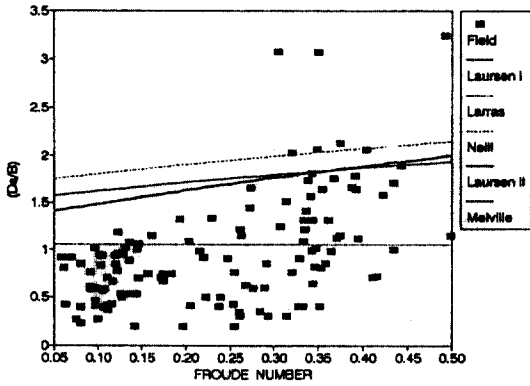


Fig. 8. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 3 at San Gye Station

Fig. 10. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 5 at San Gye Station

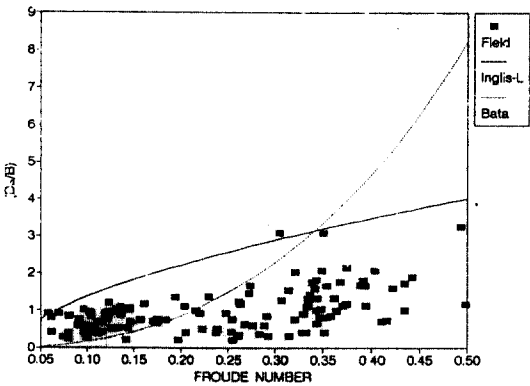


Fig. 9. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 4 at San Gye Station

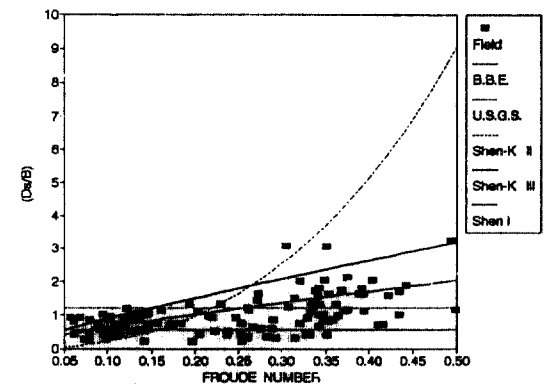


Fig. 11. Comparison of Maximum Scour Depths Calculated using Group 6 at San Gye Station

산계지점에서는 산성지점과 類似한 結果를 보여주고 있지만 그림 5의 이평지점에서는 Blench 公式에 의한 結果가 現場 測定資料와 가장 類似한 값을 보여주고 있으며 Arunachalam 公式과 Jain-Fischer 公式도 現場 測定資料와 상당히 일치된 洗掘深度를 보여주고 있다. 따라서 Group 1의 洗掘深度 公式에서는 橋脚의 幅이 1m 이하인 경우에는 Arunachalam 公式과 Jain-Fischer 公式을 利用하는 것이 바람직하며 橋脚 幅이 1.5m 以上일 경우에는 Blench 公式, Arunachalam 公式, Jain-Fischer 等을 利用할 수 있다.

Group 2~Group 6의 公式을 이용한 산계지점에서의 最大洗掘深度의 比較는 그림 7~그림 11에서

보여지고 있으며, 각각의 公式을 利用하여 算出된 最大洗掘深度의 값은 상당한 偏差를 보여주고 있다.

7. 結 論

橋脚 周圍에서의 洗掘現象은 馬蹄型 渦流, 反流型 渦流 및 Trailing型 渦流現象에 의하여 주로 生成되며 河床의 上昇 및 下降作用, 收縮洗掘 및 局部洗掘로 大別되며 이중에서 橋脚設置에 따른 影響은 주로 局部洗掘로 나타난다. 現在까지 橋脚周圍에서 洗掘深度를 算定하기 위한 많은 公式들이 提案되고 또한 利用되고 있는 실정이므로 本 研究에서는 既存 洗掘公式들을 無次元化한 洗掘影響 因子들의 기여

도에 따라 6個 Group으로 구분하였다. 洗掘深度算定을 위한 對象河川으로 IHP 代表流域인 錦江水系の 報青川을 選定하였으며 報青川内 산성, 이평, 산계의 橋梁設置地點을 採擇하였다. 河床材料의 平均粒徑 등은 流向方向으로 좌안, 중간, 우안의 代表地點으로부터 試料를 採取하여 체가름 分析을 實施한 結果를 使用하였으며, 水理學的 資料로는 1982년부터 1991년까지 觀測된 最大水深 및 最大水深일 때의 流速을 利用하였으며 橋脚資料들은 現場에서 實測된 資料를 利用하였다.

추후 報青川内 橋脚 設置에 따른 局部 洗掘을 檢討하기 위한 適切한 洗掘公式을 提案하기 위하여 報青川과 수리학적 및 기하학적 條件이 類似的한 河川에서 實測된 129個의 局部洗掘資料와 洗掘公式을 利用하여 算定된 最大洗掘量과 比較하였으며, 이를 통하여 Arunachalam 公式, Shen-Karaki III 公式, Jain-Fischer 公式이 報青川内 洗掘深度 算定을 위하여 比較的 適切한 公式으로 判斷되었다. Inglis-Lacey 公式과 Shen-Karaki II 公式은 Fr의 數가 0.3 以上인 比較的 빠른 흐름에서 適用이 可能하며, Froehlich 公式, Laursen I 公式, Laursen II 公式, Neill 公式, Melville 公式等은 Fr의 數가 0.3 以下の 比較的 느린 흐름에서 適用이 可能하고, Blench 公式이나 Inglis-Poona 公式은 Froude 數에 따라 變化가 상당히 커서 適用하지 않는것이 바람직한 것으로 判斷되었다. 또한, Sarma-Krishnamurthy 公式, Ahmad 公式, Coleman 公式, Varzeliotis 公式, Laras 公式, Bata 公式, Chitale 公式, Venkatadri 公式, Basik-Basamily-Ergun 公式, U.S.G.S. 公式, Shen I 公式들은 實測된 局部 洗掘深度에 비하여 지나치게 洗掘深度를 算出하는 것으로 나타났다.

謝 辭

이 研究는 1992年度 韓國科學財團 2年課題 研究費 支給에 의한 中間結果임을 밝혀둔다. 研究費를 支給해준 韓國科學財團에 感謝한다.

課題 番號 : 921-1300-001-2

참 고 문 헌

1. ADT-FHWA, A Study of Selected Waterway Brid-

ges in Arizona with potential Scour Related Foundation Problems, Arizona Department of Transportation and Federal Highway Administration, 1980.

2. Baker, C.J., "New Design Equations for Scour around Bridge Piers", *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, 1981, pp. 507-511.
3. Batchelor, G.K., An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1967.
4. Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen, H.W., "Local Scour around Cylindrical Piers", *J. of Hydraulic Research*, 1977, pp. 221-252.
5. Chee, R.K.W., Live-Bed Scour at Bridge Piers, School of Engineering Report No. 290, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand, 1982.
6. Copp, H.D., Johnson, J.P. and McIntosh, J.L., "Prediction Methods for Determination of Anticipated Depths of Local Pier Scour at Intermediate Bridge Piers", *Paper Presented at the 68 Annual, TRB meeting*, Washington D.C., 1988.
7. Duncan, W.J., Thom, A.S. and Young, A.D., *An Elementary Treatise on the Mechanics of Fluids*, Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, England, 1960.
8. Ettema, R., Scour at Bridge Piers, Report No. 216, Dept. of Civil Engineering, Univ. Of Auckland, Auckland, New Zealand, 1980.
9. FHWA, Scour at Bridges, Hydraulic Engineering Circular, No. 18, Washington, D.C., 1989.
10. FHWA, Interim Procedures for Evaluating Scour at Bridges, U.S., Dept. of Transportation, FHWA (Federal Highway Administration), Washington, D.C., 1988.
11. Froehlich, D.C., "Analysis of On-Site Measurements of scour at Piers", *Proceedings, ASCE National Hyd. Eng. Conferenc*, Colorado Springs, Co., 1988.
12. Jain, S.C., Maximum Clear-Water Scour Around Circular Piers, *J. of the Hydraulics division*, ASCE, Vol. 107, 1981, pp. 611-626.
13. Jain, S.C. and Fisher, E.F., Scour around Bridge Piers at High Flow Velocities, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 104, 1980, pp. 1827-1842.
14. Jarrett, E.D. and Boyle, J.M., Pilot Study for Collection of Bridge-scour Data, U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 86-4030, Denver, Co., 1986.
15. John, J.E.A. and Haberman, W.L., *Introduction to*

Fluid Mechanics, Prentice Hall, Inc., EngleWood Cliffs, New Jersey, 1980.

16. Keefer, T.N., McQuivey, R.S. and Simons, D.B., Stream Channel Degradation and Aggradation: Causes and Consequences to Highways, Report No. FHWA/RD-80/038, FHWA, Washington, D. C., 1980.
17. Laursen, E.M., Predicting Scour at Bridge Piers and Abutments, General report No. 3, Engineering Experiment Station, Univ. Of Arizona, Tucson, Arizona, 1980.
18. Laursen, E.M., "Scour at Bridge Crossings", *Transaction*, ASCE, Vol. 127, 1962, pp. 166-209.
19. Melville, B.W., Local Scour at Bridge Sites, Report No. 117, School of Engineering, Univ. Of Auckland, Auckland, New Zealand, 1975.
20. Raudkivi, A.J. and Ettema, R., "Clear Water Scour at Cylindrical Piers", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, 1983, pp. 338-350.
21. Raudkivi, A.J. and Ettema, R., "Effect of Sediment Gradation on Clear-Water Scour", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 103, 1977.
22. Richardson, E.V. and Richardson, J.R., Bridge Scour, Draft. Colorado State University, Fort Collins, Co., 1990.
23. Roper, A.T., A cylinder in a Turbulent Shear Layer, Ph. D. Dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Co., 1967.
24. Steling, J.J., "Comparison of Prediction Equations for Bridge Pier and Abutment Scour, TRR 950", *Second Bridge Engineering Conference*, Volume 2, Washington D.C. 1984, pp. 202-209.

(接受：1993. 1. 30)