

河口 締切區間內에서의 流體運動

Considerations On Fluid Motion in And Around Closure Gaps

Dr. J. J. Dronkers* 李 根 模**
keun mo Lee

紹介의 글

Netherland가 干拓事業으로 有名한 곳이라
는 것은 잘 알려져 있는 事實이다.

1930年代에 完工한 長長30餘km의 Zuid zee
防潮堤가 그렇고, 1956年 差工 지금도 工事中
에 있으며 1978年度 完工目標로 事業施行中이
며 世界最大干拓事業으로서 工事費가 約 1兆
2千億원인 Zeeland Delta Project 等으로도
이를 잘 수 있다.

위의 Delta Project 調査 및 施工을 통해서
그들의 干拓技術이 더욱 더 發展되어 가고 있
는 것이다. 우리도 錦江平澤地區事業과 榮山
江地區事業을 비롯한 많은 大團地開發事業을
施行 推進하고 있거니와 이 事業에는 干拓事
業이 많이 포함되어 있어 그 技術理論의 需要
는 急增되어 가고 있다. 이에 Netherland
Delta Project를 통해서 얻은 干拓事業 河口
締切工事に 關聯된 理論과 技術을 整理한 論
文들을 紹介하는 것도 뜻이있는 일이라 생각
하며 다섯개의 論文을 翻譯 紹介한다.

여기에서는 河口締切區間에서의 潮流運動을
取扱하기로 한다.

<要 約>

Netherlands 三角洲 開發計劃에 있어서 가장 어
려운 工事中의 하나가 河口締切이다. 이 論文에서
는 最終締切地點에서의 여러 가지 水理現象에 關한
一般的인 事項을 記述하였다. 이 因子들은 締切區
間에서의 潮流運動, 締切工事 期間中の 區間內部 및
附近에서의 流速變化, 그리고 이들을 計算하는 方

* 荷蘭干拓專門家

** 農業振興公社 調査設計部

法等이다. 特別히 潮流運動과 土質力學의 相互關係
가 重點의으로 다루어졌다.

1. 緒 言

河口締切에 있어서 基本的인 關心事는 물과 土粒
子の 相互作用이다. 따라서 流體力學과 土質力學이
河口締切研究에서 가장 重要한 部門이 되는 것이다.
潮流運動은 流砂 運搬의 原因이다. 이는 河床의 構
造 및 形態에 變化를 주며 窮極的으로는 다시 潮流
形態에 影響을 준다.

河口가 締切되면 潮流運動은 이 地域에서 큰 變
化를 받게되며, 河床에 影響을 주는 것은 勿論이러
니와 때에 따라서는 河道側壁에까지 影響을 끼치게
된다. 또 이 影響은 流水의 水面에만 局限되는 것
이 아니며 流體의 深部까지도 影響을 주게된다. 河
床變化와 水頭壓變化에 따라 空隙水가 壓力變化를
받게 되면 그 地下水는 언제든지 運動을 始作하게
된다. 即, 물의 有効壓力 變化가 있을 때는 언제나
地下水의 運動이 誘發된다는 것이다. 이 運動은 그
相互作用이 매우 複雜하다. 그러나 우리가 주어진
條件에서 흙의 性質을 充分히 理解하고 있다면 이
들은 그렇게 어려운 問題로 臺頭되지는 않을 것이
다. 이러한 觀點에서 볼때 流體運動에 對하여 얻을
수 있는 知識은 境遇에 따라 큰 差異를 보일 수가
있는 것이다. 물의 均質性에 比하여 土壤은 그렇지
가 않다. 粒子別 有効壓力, 空隙水壓, 初期密度 等
의 흙의 性質은 不規則한 變化가 있고 測定에 依
하여 正確하게 決定하기가 어렵다. 反面에 우리가
알고저하는 물의 性質들은 實用目的에 適合한 程度
까지의 充分히 正確한 測定이 可能하다. 그러나 亂
流狀態 流體의 統計的인 性質 等 微視的 運動에 關
하여는 相當한 正確度까지의 測定은 亦是 어려운
問題로 되어 있다.

흙의 性質에 對한 知識의 缺乏은 流體運動과 흙

의性質相互作用에 關한 豫測을 困難하게 하며 河口縮切時 流體運動이 涌의 粒子運動에 어떤 影響을 주는가에 對하여 正確하게 알기는 거의 不可能에 가까운 일이다.

우리가 河口縮切工事を 計劃할 때에는 이 不確實性이 考慮되어야 하며 우리의 研究도 可能한 한 이 不確實性에 焦點을 두고 있는 것이다. 이 論文의 主題目이 河口縮切時의 潮流運動의 決定이고, 土質力學의 分析을 爲한 充分한 紙面의 割愛가 없어 이 分野에 對한 더 깊은 研究와 充分한 討議는 困難한 것임을 밝혀준다.

2. 一般의인 潮流運動의 特徵

우리가 河口를 縮切하여 바다와 陸地部로 分離하거나 바다에서 防潮堤에 依하여 두개의 潮流區域으로 나눌때 가장 重要한 考慮事項은 이 防潮堤의 建設이 現在의 潮流運動에 얼마만한 影響을 주는가를 調査研究해야 한다는 點이다.

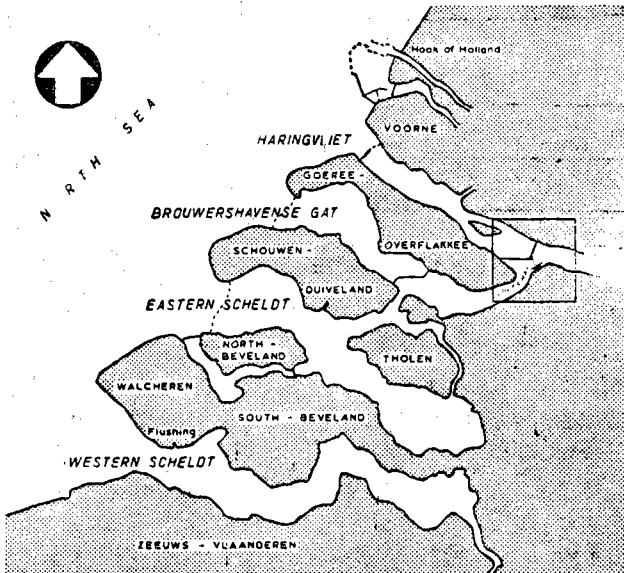


Fig 1. 삼각주에 완성된 댐과 축조 중인 댐

따라서 影響을 받는 區域의 境界를 調査하여 두고 이 潮流 影響을 河口縮切水理計算에 모두 反映시켜야 한다.

첫째로 初期와 終期의 潮流運動 形態가 研究되어야 하는 것이다. 即 河口縮切前과 縮切期間中의 豫想되는 流體運動의 過度期的 現象을 거쳐 防潮堤建

設 完功後의 潮流運動 形態를 研究하게 되는 것이다.

初期形態의 潮流에 關하여는 潮位, 潮流速 等을 可能한 限 正確하게 測定決定하여야 한다. 이는 後에 Chezy係數와 같은 水理媒介變數 決定에 使用되고 또한 潮流運動機構의 誘導 및 統制에 必要하게 되는 것이다. 河口縮切後 潮流形態의 豫則決定에는 Electric Model, Hydraulic Model 方法等 여러 가지 手段이 쓰이고 있다. 이들은 크거나 작거나 間에 事實에 立脚한 運動機構에 基礎를 두고 있다. 따라서 이 機構를 誘導하기 爲하여는 주어진 條件下에서의 實驗이 必要하게 된다. 潮流計算과 Electric Model은 그 決定되는 要素들이 數字로 表示되는 一種의 Mathematical Model로 볼 수 있다. 反面 Hydraulic Model 實驗에 있어서는 實驗基礎에 따른 抵抗要素와 같은 것이 考慮되며, 縮尺에 따라서는 河道의 斷面같은 것이 再生되어 反映되는 등 더욱 充實한 情報로서 補完되는 등의 利點을 가지고 있다. 이와같은 方法은 前述한 方法보다 더 正確한 流體運動을 再生시킬 수가 있다. 이러한 利點을 最大한 活用하기 爲하여 Delft 水理實驗研究所에서는 여러개의 巨大한 Hydraulic Model이 建設되어 運營되고 있다(水平縮尺 1:300, 垂直縮尺 1:100). 이러한 Model은 두말할 것 없이 그 建設費用이 高價임으로 이의 建設着手 以前에 우리의 調査研究目的에 充分히 符合할 수 있는 것인지의 詳細한 計劃까지 檢討해야 한다. 이 Model을 通해서 江과 河道에서의 充分히 正確한 潮流運動의 解析을 求할 수가 있다.

우리는 이러한 計算을 時間次元을 無視한 一次元의 計算이라고 부른다. 바다에 있어서 水平面上의 二次元 潮流計算에 關聯된 우리의 知識과 經驗도 急速히 發展되어 가고 있다. 새로운 한 方法이 Leendertse에 依하여 開發된바 있다.

海水部에서 三角洲開發計劃에 關聯된 防潮堤建設前後의 諸水理現象計算은 各種 河口縮切에 있어서 大端히 重要한 事項인 것이다. 우리들은 이 計算에 對하여 이미 有用한 結果值을 얻은 바 있고 이러한 計算들은 將次 潮流 Hydraulic Model Test 必要性에도 影響을 주게 될 것이다.

終期의 潮流形態 決定을 爲하여는 어떤 境界條件을 導入해야 할 必要性이 있게 된다. 이 境界條件의 導入은 特別히 어려운 問題點을 包含하고 있는

것은 아니다. 그러나 現在狀態의 河床을 河口 締切 後期에도 그대로 活用할 수 있는지에 對하여는 疑心스러운 點이 있다.

河口締切 工事期間이 數個月 以上の 長期間이 아니고 豫備工事에서 河床에 大端히 큰 影響을 주지 않는 境遇라면 大部分의 河道는 現狀態로 維持된다고 보아도 無關할 것이다. 그러나 締切工事期間中에는 防潮堤建設 地點과 그 附近 適當한 範圍까지 는 重要한 變化가 일어날 수도 있는 것이다.

終期의 潮流가 計算되면, 一般의 縮切工事 期間中에 일어날 수 있는 潮流現象은 初期와 終期 사이의 補插方法에 依하여 計算될 수 있다는 事實이 發見되었다. 그러나 河口締切에서의 最終締切段階에 이르는 동안 一次線型的인 計算이 可能한지의 與否에 關하여는 疑心스러운 바가 있다. 一般의 縮切은 一次線型關係는 아니다. 初期의 潮流運動의 變化는 마지막 段階의 變化에 比하여 더 늦은 漸進的

인 變化를 보이고 있다.

첫째로 干潮나 滿潮時의 流出入 潮流總量은 縮切 區間斷面 通過時 極히 적은 流量의 減小만을 보이므로 이 區間에서의 流速은 區間이 좁아져감에 따라 比例의 增加하게 된다. 이는 바꾸어 말하면 縮切區間 바로 近處에서의 潮流運動은 갑작스러운 變化를 이르게 되는 것이다. 縮切區間으로부터 相當히 떨어진 거리에서의 潮流運動變化는 아주 서서히 일어난다. 通常 防潮堤 延長의 1/4만 開放되었을 때까지는 全體의인 潮流運動의 變化는 눈에 띄지 않는다.

3. 縮切區間內에서의 潮流運動

防潮堤의 縮切區間을 통한 流出入 潮流量은 그 兩側의 潮流에 關係되며 또한 區間幅의 크기의 影響을 받는다. 縮切區間을 통하여 最高潮位의 地點으

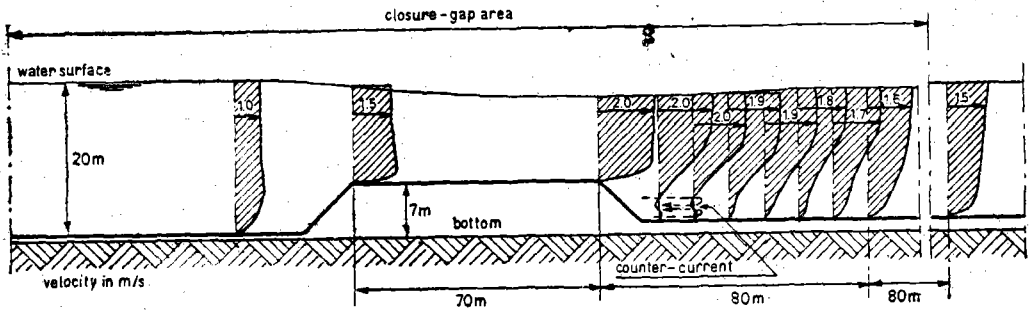


Fig. 2. 閉塞間을 갖은 Sill에서의 體積구간의 수직면 상에서의 유속분포 도

로부터 물이 흘러 가장 큰 流速을 보이는 地域이 存在하며 이 區間을 加速區間이라고 부른다.

萬一 廣頂堰이 存在한다면, 即 堰의 幅이 河口締切 區間 Sill까지의 水深보다 넓다면 그 加速區域은 Sill의 끝 下流部까지가 될 것이다. [Fig. 2]

萬一 흐름이 常流(Sub-Critical)라면, 即 그 流速이 \sqrt{gd} 보다 작은 境遇에는 Sill의 下流部에서 最高流速을 나타낼때도 있다. 이는 流體가 縮切區間 斷面을 通過하여 흐름때 流體의 收縮現象에 起因되는 것이다.

이 收縮現象은 縮切區間 下流部에 강한 渦流을 生成시킴으로서 縮切區間 그 自體는 더 下流部로 옮겨지며 점점 좁아지게 되는 것이다. 이 現象은 또한 縮切區間 下流部 河床의 Sill에 比한 相對的인 높이에 따라 다르게 나타난다. 萬一 Sill의 높이가 높으면 물은 깊은 深度로 擴散될 수가 있기 때

문이다.

sill 下流部 傾斜面에 發生되는 水平軸의 渦流가 또한 이에 影響을 주기도 한다. 또 sill의 粗度狀態가 이 現象에 影響을 끼치는 重要한 要因이 되는 수도 있다.

흐름이 限界流速의 흐름인 境遇, 即 流速이 \sqrt{gd} 와 같은 값을 가질 때에는 最大流速 地點은 Sill의 堰體의 下流部가 된다. 萬一 Sill이 銳堰인 境遇에는 最大流速이 [Fig. 3]과 같이 Sill의 頂部 m後方

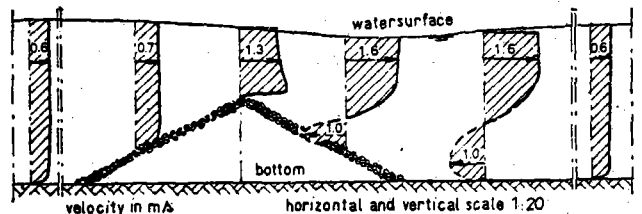


Fig. 3. 예언을 갖은 Sill에서의 수직면 상의 유속분포 도

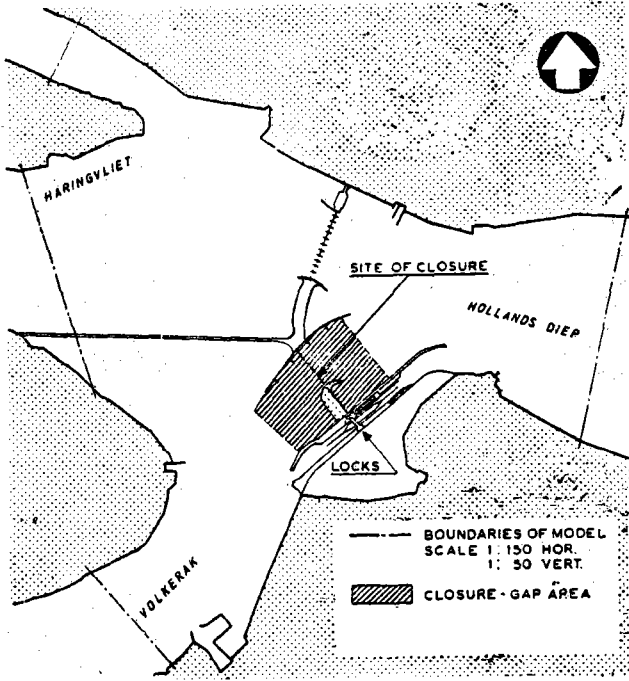


Fig 4. Volkerak의 水理計算 Model 區域의 위치(Fig. 1에서 사각형 구간 참조)

에서 일어난다. 또 Sill이 미끈한 表面을 가지고 있는 境遇에는 sill의 傾斜面을 急流하는 Jet流(diving Jet)가 생기게 된다.

潮流가 締切區間을 通過한 後에는 潮流速이 차차 減少된다. 即 減速區間이 存在하며 이 現象의 結果로서 渦流와 亂流가 增加된다. 그러나 締切區間에서 相當히 멀리 떨어진 곳에서는 潮流運動은 다시 初期의 狀態로 돌아가게 된다. 이 距離는 感潮河川의 全區域이 다시 完全히 貯溜되기까지 潮流速이 減速되는 手段 如何에 따라 다르다.

締切區間이 形成됨에 따라 그 區間과 邊邊에서의 潮流速이 締切區間 形成前에 比하여 變化를 받는 區域을 앞으로는 締切區間地域(Closure gap area)이라고 부르기로 한다. 그리고 이 締切區間 地域에 對해서 細心한 觀察을 하기로 한다. 이 區域內에서 水位가 第一 낮은 地點은 加速이 減速으로 바뀌는 곳이다. 干潮때에는 滿潮때의 反對方向으로 潮流가 흐르고 干潮때나 滿潮때의 締切區間地域에 作用하는 힘은 [Fig 4]와 같이 兩側으로 同一한 範圍까지로 미친다고 볼 수가 있을 것이다.

締切區間이 좁아짐에 따라 潮流速이 빨라지고 潮流速增加에 따라 締切區間地域의 範圍가 넓어짐으로

이 區間을 正確히 表示하기는 困難하다. 이 締切區間地域은 防潮堤 兩側에 防潮堤에 나란한線을 그어그幅을 表示(예를들어 300m 등)하고 締切區間에서의 流速(예를들어 3~4m/sec 등)과 區域밖에서의 流速(예를들어 1m/sec 등)를 記載하여 한눈으로 이를 읽을 수 있도록 한다. 이 締切區間地域의 範圍는 區間的 모양과 區間크기에 따라 變한다. 이 區域밖에서의 亂流現象은 數百m의 範圍에 걸쳐서 區間이 形成되기 以前에 比하여 더 強한 狀態로 남아있게 된다. 그리고 이 또한 區間的 模樣에 따라 變化된다. Hydraulic Model實驗의 主要目的의 하나가 바로 이 區間的 模樣을 어떻게 定해야 締切區間地域面積이 最少로 되며 또 亂流가 가장 弱한 狀態로 制限되겠느냐 하는 것이다.

그리고 潮流흐름의 型은 締切區間的 位置가 當初흐름의 位置에 比하여 어떻게 變化되었느냐에 따라 달라진다. 이 區間的 形成으로 因하여 潮流의 加速또는 減速現象이 나타나는 以外에도 橫流(Cross Current)

가 發達되게 되며 이 橫流가 最小限으로 일어나도록 締切區間的 位置를 定하는 것이 大端히 重要한 것으로 되어 있다. 이 橫流는 區間的 收縮現象을 促進시키므로 可能한限 이의 發生을 制止시켜야 한다.

潮流에 作用하는 摩擦력은 工事期間中の 締切區間 斷面의 變化和 바닥을 保護하는 手段으로 使用된 物質에 따라 다르다. 實際로 河床이 水平인 境遇는 當初 防潮堤가 築造되기 前의 潮流는 그 크기와 方向에 있어서 一次元의 運動으로 考慮할 수 있다. 이때는 垂直斷面의 流速分布와 流速減少에 따른 亂流運動은 潮流計算에의 그 影響을 無視해도 좋다.

그러나 潮流運動方向으로 流速變化가 없다고 하더라도 締切區間斷面이 좁아져감에 따라 垂直速度分布가 큰 變化를 보이는 境遇는 二次元의 潮流運動으로 考慮하여 分析에 臨해야 한다. 이는 Sill을 차츰 높혀가며 締切할 때(但 Sill의 높이를 水平으로 全區間에 고르게 쌓아 갈때) 볼수있는 境遇이다. 그러나 Sill을 높히는 作業過程이 全區間에 걸쳐 水平으로 고르게 進行되지 않는 境遇이거나 締切區間的 極值의 影響을 받아 潮流에 收縮影響을 주게 되는 境遇와 또 締切區間을 통하여 潮流 運動方向에

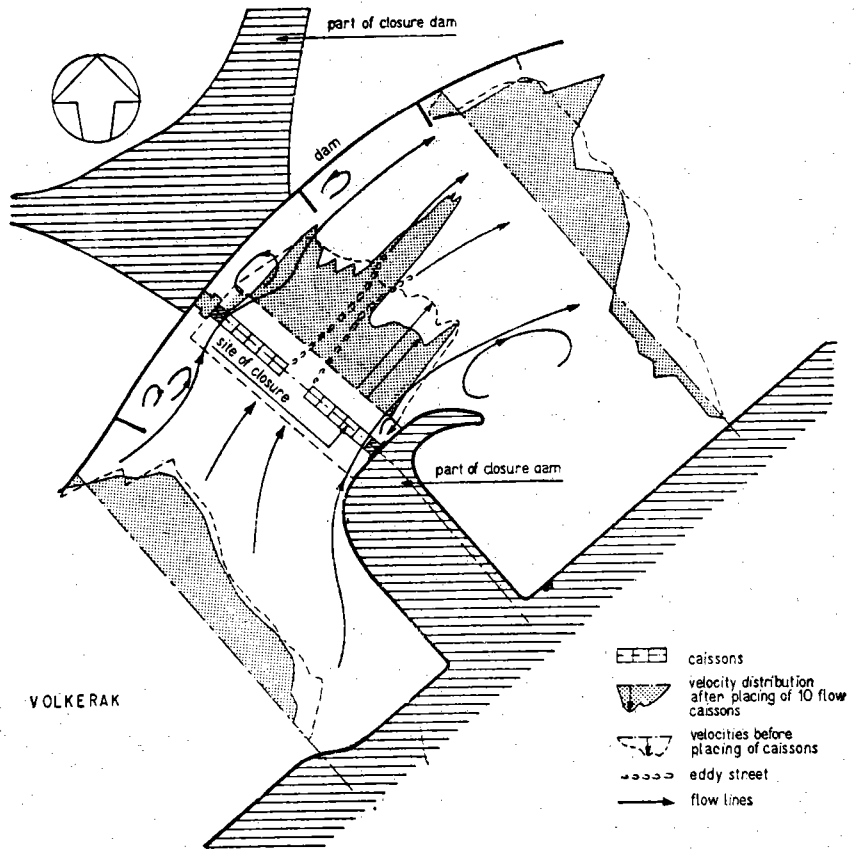


Fig 5. Sill 위의 12개 케이슨중 10개를 설치한 전후의 volkerak 체질구간에서 수평면 상의 유속분포 예

變化가 있는 境遇는 三次元 運動으로 보아야 한다.

潮流가 二次元 또는 三次元運動일 境遇는 潮流運動의 副次的 影響이 나타나기도 한다. Sill이 充分히 높은 때에는 Sill 傾斜面 前後에 渦流(Counter-current)가 생기고 이 渦流의 軸은 潮流運動方向과 直角으로 交叉된다. 卽, 垂直面上에서 回轉運動이 일어나는 것이다.

萬一 締切區間 斷面이 좁아짐에 따라 斷面下流部에서 收縮現象이 일어난다면 締切區間內에는 渦列(Vortex)이 形成된다. 特히 不連續 過度區間에서 이 渦流가 生成되고 이들은 減速區域으로 繼續되어 간다. 이 渦流는 大端히 安定되어 있고, 完成된 堤防 下流部에서의 물의 流入을 遮斷하는 效果를 가지고 있어 Fig. 5와 같은 潮流形態를 보이게 한다. 이 渦는 生成源으로부터 繼續해서 發生된다. 또 이 渦列은 完成된 堤防 下流部에서 물의 運動을 誘發시킨다. 卽 水平面上에서 回轉하며 渦의 가장자리에서 가장 큰 流速를 가지는 逆流(Counter-current)를

誘發시키는 것이다.

때에 따라서는 締切區間內에서의 潮流運動도 安全하게 二次元的 問題로 다룰 수도 있다. 例를 들면 Caissons에 依하여 區間이 締切되는 工事와 같은 境遇가 이에 屬한다. [勿論 極限의 境遇에선 이 때도 三次元 問題로 나타날 수도 있다.

防潮堤 工事中 河床과 潮流의 變化의 豫測은 前段階에서 觀測된 情報에 依하여 計算된 結果에 基礎를 두고, 또 이 豫測된 값은 後에 實際測定된 變化值와 比較하여 다음 段階豫測에 反映 發展시켜야 한다. 萬一 實際測定된 값이 豫測計算되었던 結果值와 差異를 보인다면 이는 더 正確한 情報에 依하여 修正되어야 하며 다음 段階 豫測에 活用되어야 한다.

潮流測定을 爲한 計器를 適合한 位置에 設置하여야 함은 勿論이고, 暴風과 같은 異狀條件下에서도 그 測定이 可能토록 自動自記式 計器일 것이 要請된다. 計器設置適地로서는 河道를 따라 締切區間地

城境界地點 등이 無難할 것이다. 比較的 넓은 縮切區間地域(1000m幅以上 等)에서 二次元 潮流形態에 큰 變化가 豫想되는 境遇에는 縮切區間地域兩側 即 밑물影響地域과 上물影響地域에 各 各 計器를 設置하는 것이 좋다. 그리고 우리의 計算은 垂直潮流에 對하여 얻은 結果值 情報와도 相關시킬 수 있도록 考慮되어야 한다. 潮流速이 第一 큰 斷面에 對하여는 그 詳細한 流速斷面을 얻을 수 있는 潮流速測定이 必要하다. 이 潮流速斷面은 流量資料와 함께 河道洗掘 程度를 決定하는 重要한 要素로 되는 것이다. 可能하다면 極히 制限된 收縮現象이 일어나고 있는 Sill 위의 斷面에 對하여도 그 潮流速斷面을 測定해 두면 좋을 것이다. 渦流가 存在하는 地域에서의 潮流速測定은 相當히 어렵고 그 測定結果值은 不正確한 것이 보통이다. 위에 言及한 것 이상의 더 細密한 流速測定은 主로 研究目的으로만 쓰인다. 例를 들면 流速分布 및 縮切區間地域內에서 亂流程度를 決定하는데 쓰인다. 逆流과 渦流에서의 流速分布狀態를 아는 것은 重要한 일의 하나이다.

4. 縮切區間內 流體運動方程式을 決定짓는 힘에 對한 說明

一次흐름의 形態, 即 河床이 實際로 水平인 境遇의 흐름에 對하여는 長波에 關한 一般式들이 適用된다. 그리고 이 河川에 對하여는 그 斷面の 어느 時點에 있어서의 平均潮流速이 모든 水理計算의 基礎가 되는 것이다. 힘의 方程式은 基本的으로 慣性이 重力과 摩擦力에 비기도록 되어 있는 것이다.

慣性은 두個의 項으로 區分되며 하나는 주어진點에서 時間에 따른 速度變化에 의한 힘이고 다른 하나는 Bernoulli項으로서 流線을 따른 速度變化에 의하여 發生되는 주어진 時點에서의 힘이다. 위에서 言及되었던 河床이 水平인 境遇의 流線方向을 따른 速度는 潮流運動中 發生하는 潮流 Prism을 채우거나 비우는 現象에 따라 變한다.

縮切區間地域에서 Bernoulli힘은 Sill의 높이와 型에 依하여 影響을 받는다. 이는 Sill이 流路方向을 反映시키기 때문이다. 河床 下流部 傾斜 部分의 流體運動을 誘發시키는 흐름과 힘은 逆流에 依하여 影響을 받는다. 그러나 Sill이 廣頂堰의 形態로 存在할 때 Sill에서의 Bernoulli힘은 加速區域의 始發地點에서 第一 크다. Sill의 높이를 높이는 等 流路斷面이 좁아지면 이 現象은 더욱더 뚜렷해진다. 比較的 좁은 縮切區間地域의 貯溜가 Bernoulli項 크

기에 미치는 影響은 縮切區間 斷面縮少에 따라 加速되는 流體運動에 依한 큰 影響에 比하면 이를 無視할 수 있는 程度이다. 또 局部的인 慣性에 對해서도 마찬가지로 適用할 수 있다.

萬一 縮切區間의 深度가 變化되거나, 또는 流路斷面이 좁아지는 境遇에는 이중 어느하나이거나 또는 兩者는 Bernoulli項에 漸增의 影響을 주는 要素가 된다. 또 潮流가 Sill을 通過해서 흐름때의 摩擦力은 流速分布의 變化와 河床保護手段으로 投入된 物體의 粗度에 依하여 增加된다. 높은 Sill의 境遇에는 最大摩擦力은 頂上에서 일어난다. 摩擦의 크기는 計算이 可能하고 縮切區間의 深度가 깊으면 摩擦要素는 無視해도 좋다. 이러한 現象들은 減速區域에서는 더욱 더 複雜하다. 이 減速區域에서의 Bernoulli힘은 加速區域의 것에 反對로 된다. 그러나 그 크기는 亂流의 增加가 Energy 放出의 原因이 된다는 事實에 依하여 크게 左右된다. 이러한 亂流增加의 影響은 潮流運動을 抵止하는 附加의 摩擦로 考慮된다. 그리고 이 摩擦抵抗은 河床保護手段과 洗掘 等으로 因한 斷面變化에 따라 크기를 달리 한다. 이 크기는 水面勾配測定에 依하여 經驗의 由로 決定되며 縮切에 關한 Hydraulic Model Test의 目的中에 하나가 이를 決定하기 爲한 것이다.

以上에서 縮切區間을 흐르는 潮流에 影響을 끼치는 要素에 對해서 簡略히 論述한 것이고 이제부터 常流일때의 運動方程式을 위에서 論한 要素들을 包含한 式으로 表示하기로 한다. 限界流速때의 方程式은 이와 크게 다르며, 이에서는 論하지 않기로 한다.

5. 公式說明

一次元흐름에 對한 流體運動 方程式은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g|u|u}{c^2 a} \dots\dots\dots(1)$$

또 連續方程式은

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

二次元흐름에 對한 流體運動 方程式은 水平方向

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\xi_s}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots(3)$$

垂直方向

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g + \frac{\xi_s}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots (4)$$

連續方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

위에서 u 는 速度의 水平方向(x 軸) 成分이고 w 는 速度의 垂直方向(z 軸) 成分이다.

또

- h : 水位 (m) C : chézy 係數
- a : 深度 (m) A : 流路斷面 (m^2)
- b : 貯溜幅 (m) Q : 流量 (m^3/sec)
- ρ : 密度 (kg/m^3) g : 重力加速度 (m/sec^2)
- t : 時間 (sec)

(3), (4)式에서 亂流에 依한 剪斷應力은 係數 ξ 을 包含하는 項으로 表示되어 있다. 係數 ξ 는 一般的으로 x 와 z 에 依하여 決定된다. 依에서 ξ 는 式에 包含되어 있는 다른 要素에 比하여 그 變化가 極히 緩慢하다고 假定한다. 그리고 (3), (4)式은 流體運動에 關한 亂流과 渦流의 影響을 研究하기 爲하여 많이 簡素化된 것임을 밝혀준다. 渦流가 既히 存在하고 있지 아니한 流體에 對하여는 摩擦이 없는 限 새로운 渦流가 生成되지 아니한다.

x 와 z 가 縮尺이 다르다는 點에서 係數 ξ 는 兩 方向으로 各各 다른 값을 가진다. 例를 들어서 縮切區間 兩側의 垂直潮流는 式(1), (2)에 初期條件과 境界條件을 反映시켜야 한다. 지금까지의 說明은 一次元 流體運動에 關한 것이었다.

二次元 運動에 對해서는 縮切區間 兩側의 垂直潮流 以外에도 河床과 水面에서의 速度成分, 境界條件을 式 (3), (4), (5)에 反映시켜야 한다.

이 方程式은 Computer를 使用하여 各境遇別로 Numerical Method에 依하여 解를 求해야 한다.

$\frac{\partial u}{\partial t} = 0, \frac{\partial w}{\partial t} = 0$ 라고 假定할 수 있을 때에는 問題는 極히 簡單해진다. 이때에는 縮切區間 兩側에 어떤 水位에 따르는 流體運動이 된다고 假定하는 定常流의 計算으로 되는 것이다. 三次元 流體運動의 境遇에는 널리 알려져 있는 三次元 Navier Stokes 方程式을 考慮해야 한다. 式 (3), (4), (5)은 特殊한 境遇이다. 實質的인 問題로 縮切區間이 아주 작은 때에는 이들은 더 簡單한 型으로 變形이 可能하다. 縮切區間을 通해서 흐르는 流量計算公式도 簡單한 型으로의 誘導가 可能하다. 依은 公式은 式 (1)의 單

純化型이 될 것이며 이는 運動方程式에서 w^2 에 比例하는 摩擦力이 重要하다고 하더라도 縮切區間에서는 方程式의 Bernoulli項이 다른 項에 比하여 優位에 선다고하는 基礎위에서 이루어지는 것이다. 이는 例컨대, 縮切區間地 域內에서의 潮流速이 2m/sec 以上이고 區域밖에서 1m/sec이거나 그 以下인 境遇인 것이다. 潮流速은 縮切區間 斷面 各地點別로 그 크기가 다르다. 이는 흔히 넓은 區間에서 있는 現象으로 縮切區間幅을 따라 勾配가 存在하는 境遇이다. 實際問題에 있어서는 우리는 두가지 量에만 關心이 있다. 即縮切區間에 있어서의 最大流速(u')과 最大潮流量(Q)인 것이다. 後者は 흔히 河幅 b 로 나눈 單位幅當의 潮流量으로 表示한다. 이 값들은 洗掘作用과 關聯해서 重要的 뜻을 가지는 것이다. Caissons 工法에 依하여 縮切할 境遇는 潮流의 變化때의 潮流速이 大端히 重要하다.

潮流量 Q 는 縮切區間 兩側에서의 潮流運動을 決定하는 重要的 要素이다.

u 를 어떤 時點 t 에서 縮切區間 斷面 A 를 通하여 흐르는 潮流의 平均流速이라고 하자.

第4節에서 論한 單純化에 따라 式 (1)로부터 다음 關係式을 誘導할 수 있다.

$$u = \sqrt{2g} \Delta h \quad \Delta h = \text{縮切區間內에서의 水位降下量}$$

$$Q = A \sqrt{2g} \Delta h$$

그러나 이 式들을 適用하는 데는 몇가지 難點이 있다. 우리는 當初 設計된 縮切斷面을 알고 있으나 總潮流量을 알기 爲하여는 有效斷面을 따로 알아야 한다. 設計斷面의 一部는 有效斷面으로 되지 않는 境遇도 있기 때문이다. 그리고 이로 因하여 될 程 떨어진 地點에서 流速의 變化를 이르기게 되는 것이다. 또 4節에서 說明한 바와 같은 Sill의 抵抗이 流體運動에 影響을 끼치는 것이다. 이 影響은 係數 μ 에 依하여 吸化되어 버린다. 水位差의 測定은 縮切區間 斷面에서만 그칠 것이 아니고 縮切區間地 域境界에 設置된 計器에 依하여 縮切區間地 域全體의 Profile에 걸쳐서 測定하여야 한다. 縮切區間에서의 潮位測定은 相當히 어려운 일中的 하나이다. 이런 觀點下에서 係數 μ 는 새로운 係數 φ 로 代置된다. 이 φ 는 加速區域과 減速區域에서의 潮位差를 包含한 式이다.

最終으로 適用될 公式은

$$Q = \varphi A' \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

時間 t 에 있어서의 流速은

$$u = \varphi' \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

$h_1(t)$, $h_2(t)$ 는計器에 의하여測定한潮位이고이
차는十이다.萬一—가나올때는順序를바꾸어
計算한다.(밀물·썰물)

ϕ 와 ϕ' 는다른값을가지며縮切區間の流速分布
에따르기때문이다.

縮切計劃樹立段階에서는 ϕ 와 ϕ' 의값은알수가
없다.따라서初期의 ϕ 와 ϕ' 의값은같은것으로
假定하여縮切區間斷面に適用하여計算한다.다

만過去經驗에依하여얻은값중當面한
問題의與件과같은條件의資料가蒐集되
어있다면이를本計算에活用하면좋은것
이다.流出量 Q 는 A' 의여러값에해당되
는값을計算하여준다.公式에포함된 ϕ
와 ϕ' 는實驗室에設置된Hdraulic Model
實驗에依하여決定하여이Model은縮尺
이1:30에서1:60程度이며이縮尺으로
는歪曲現象이일어나지않는다.

當初 A' 에對하여計算된 ϕ 의값은Profile
 $\phi A'$ 에相應하는것이다.요즘의潮流量 Q
의計算은Computer에依하여計算된다.

이方法에依한定常潮流計算은區間을호
르는潮流量計算과並行된다. ϕ 와 ϕ' 는縮
切工事がCaisson工法에依하거나또는在來式方法
인漸進的인縮切에依한方法에依한것인가를不問
하고各縮切區間斷面마다다른값을가지게된다.같은
區間에對해서도工事進行中이값은繼續變한다.

그러나縮切區間이水門이열려져있는狀態로
있는Caissons에依하여縮切될때는特殊한境遇로
取扱된다.이條件에서열려진水門에對한 ϕ 와 ϕ'
의값은縮切區間이全部열려있을때의값과큰
차이를보인다.(Fig. 5 참조)

열려져있는部分에서의 ϕ 의값은比較的크며1에
서크게벗어나지않는다.또열려져있는Caisson에서
의 ϕ' 의값은Caisson內에流入되는물의形態에따
라0.8이거나이보다작은값을보인다.이 ϕ 와 ϕ' 의
값은必히水理模型實驗에依하여決定하여야한다.

6. 土質力學問題에關聯된考慮事項

이論文序頭에서指摘된바와같이潮流運動의
增加되는힘은地盤에覺亂을招來한다.이潮流速
增加에따라일어나는直接影響은洗堀이며이에
對하여도別途로詳細하게取扱될것이다.이洗堀
作用이야말로Dam設置地盤에危險을주는要素가
되며Dam그自體가潮流에전들어낼수있다고하

더라도地盤이弱화되면그危險을避할수가없을
것이다.이러한點에서Netherland三角洲地域에
存在하는細部粒子別性質은大端히重要한것이다.

初期狀態모래의密度는이러한問題를決定짓는
重要한要素의하나인同時에精密性的尺度이기도
하다.

所謂“限界密度”에해당되는疏空率의限界値가
存在할것이다.

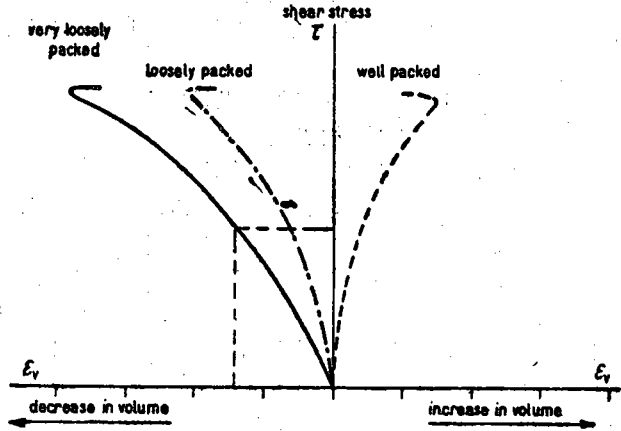


Fig 6. 초기밀도가 다른 모래에서 外力에 의한 전단력과 체적과의 관계

萬一自然狀態에 있는土壤의空隙率이이限界
値보다크면이는느슨한狀態로壓密되어있다고
한다.그리고이런狀態의土壤에剪斷應力이作用
하면그體積은減少될것이다.空隙은물로가득
차있으므로作用된壓力에對한有效應力을減衰
시키고,따라서剪斷抵抗을減少시키면서砂土物體
內部에作用된壓力은砂土物體內部에蓄積된다.
充分한量의물이空隙에서 빠져나가기 시작하면
空隙水壓力은減少되고有效應력과剪斷抵抗은또
한번蓄積된다.높은空隙水壓力期間中剪斷抵抗
値는 높은값을보이며그結果로砂土體는Sliding
을보이거나液化狀態로된다.洗堀作用은構造物
基礎地盤의미끌어짐現象을促進시킨다.Caissons을
設置하는作業과같이過重한壓力의갑작스런變
化는大端히危險한것이다.이는過重한壓力을
받은空隙수가짧은時間內에갑작스럽게外部로
빠져나갈수없기때문이다.即水中의應力이充
분히빨리減衰될수없기때문이다.

또Sill下流部傾斜面의洗堀된部分에갑작스런
Sliding이일어나도똑같은結果가招來된다.그러
나空隙率이限界値와같거나이보다작은값을가
질때는危險은훨씬줄어든다.이때에는剪斷應力

이 作用하자마자 空隙體積이 增加하고 그 結果로서 剪斷抵抗 또한 增加하기 때문이다.

따라 設計를 할때에 이 限界密度는 꼭 알아 두어야 한다. 이러한 數値는 Delft 土質力學 實驗室에서 測定된다. 試驗은 掘鑿에 依하여 얻은 砂土 Sample을 乾燥시킨 후 剪斷應力을 0으로부터 차츰 增加시키면서 體積變化를 얻는 方法으로 進行된다. 卽 이 砂土의 初期密度로부터 더 以上の 體積減少를 보이지 않는 空隙率을 찾아내기 爲해서 密度를 變化시켜 보는 것이다.

Delft 土質力學 實驗室에서는 土壤의 比抵抗値와 이에 該當되는 地下水 比抵抗値 比較에 基礎를 둔 空隙率 測定方法을 開發했다. 測定器具는 Sounding rod에 附着시켜 使用한다. 또 이와 비슷한 方法으로 實驗室에서 限界密度 測定이 이루어지고 있으며 이는 壓密程度가 다른 包和된 砂土의 比抵抗과 이와 同質의 물의 比抵抗을 測定比較하는 것이다.

이러한 方法으로 空隙率과 電氣抵抗 測定値와의 關係를 決定하고 實際野外에서 測定된 比抵抗値로부터 空隙率을 換算하는 것이다. 이렇게 하여 初期密度가 決定된 以後에 限界密度와 比較하게 되는 것이다.

이는 砂土體의 程度를 計測化하는 것에 그치지 않고, 特히 어떤 程度의 應力에 견디어 낼수 있는 나하는 點과 그 應力에 어느 程度 빠르기로 反應을

보이느냐의 問題를 計量化하는 것이다. 이는 우리가 締切工事に 있어서 흙의 初期應力과 Sill의 設置 및 洗堀影響으로 오는 超過加重壓力 以後의 變化된 應力을 알아야 한다는 問題點을 지니고 있는 것이다. 이러한 問題를 計算方法에 依하여 解決하려는 努力이 지금 進行中에 있다. 이 計算은 Delft 工大에서 高度화된 Sample에 依하여 그 內容을 彈性體等方質, 中級の 砂土로 하고 洗堀 Pit는 半無限地域에 圓弧의 模型으로하여 進行되고 있다.

마지막으로 다음 몇가지 事項에 對하여 言及하기로 한다. 지금까지 流體運動과 土質力學 計算에서 說明된 變數들은 實際問題에서 일어날 수 있는 複雜하고 많은 要素中에서 그 몇개만 反映되었던 것이다. 例를들면 流體運動 問題의 方程式에서 亂流原理가 包含되지 아니하였으며 또 土質力學問題에서는 應力과 張力成分의 變化가 考慮되지 아니하였다. 아니면 Tensor나 確率의 問題가 適用되지 않으며 안된다. 또 이들 利用의 制限事項에 對하여는 土質力學에서의 適用制限이 流體力學의 制限事項보다 더 크다.

特히 土質力學 分野에서는 充分한 條件보다는 어떤 傾向이 發見되고 있다. 當分間은 實際問題 解決 및 設計應用에 있어서 모든 制限事項을 그대로 許用할 수 밖에 없는 것이다.