

## 콘크리트 重力式댐의 自動安定解析

Automating Stability Analysis for Concrete Gravity Dams

金 治 弘\*  
Kim, Chi Hong

序言: 여기서 紹介하는 內容은 콘크리트 重力式댐 安定檢討에 많은 技術者 工學者들이 고생하여 時間과 많은 費用을 들여서 實施하고 있는 實情에 있는데 美國聯邦에너지 統制委員會(The Federal Regulatory Commission)가 支援하는 CG-DAMS라는 새로운 컴퓨터 코우드(Computer Code)\*에 대한 것인데 우리나라에서도 후기의 연락처를 참고로 해서 적극 활용함이 바람직하다.

이하 Peter R. Barrett씨와 Douglas I. Morris씨가 HYDRO·REVIEW誌, 1993年 6月號에 發表한 것을 옮긴 것이다.

背景: 美國의 非聯邦水力發電事業部門의 安全性과 安定度評價는 美國聯邦에너지 統制委員會(FERC)의 責任이다. 그러한 이유로 FERC의 認可가 난 各댐은 5年마다 그 構造物의 條件과 設計에 관하여 再評價하도록 되었다. 댐所有者는 FERC指導書에 의해 광범위의 複雜한 해석적 접근을 통하여 再評價를 하도록 되었다. 예를 들어 인가받은 자는 어떤 특수댐지점의 資料收集代身に 콘크리트 強度에 대하여 一般值를 쓸수 있다. 대부분의 경우 이 融通性의 缺陷이 安全性解析上 安全側을 取하는 것이 必要치 않다는 原因이 되고 있다.

더욱 實質的인 安全性結果를 얻기 위한 노력으로 FERC의 督勵와 함께 댐 所有者들은 1985年代에서는 댐 安全分析을 위해 그 構造物에서 實地資料를 收集하여 使用하기 시작했다. 그러나 데이터를 이용하는 것은 항상 容易하지는 않

다. 便宜的龜裂基礎分析法(The conventional cracked-base analysis method)은 댐과 基礎의 堅固性의 效果를 나타낼 수는 없다. 地點特定데이터를 써서 댐 安全性을 決定하기 위한 一般的인 有限要素 소프트웨어 프로그램은 利用이 可能하나 많은 操作, 專門的知識과 時間을 必要로 한다. 1987年代 初 댐 運營代表者들, 技術用役會社, FERC, 그리고 聯邦水力發電經營者들이 運營하고 있는 電力調查研究所(Electric Power Reserch Institute, EPRI)의 댐 安全諮問委員會에서는 在來式解析法과 有限要素法의 사이의 隔差를 줄이는 다리역할을 할 特別한 컴퓨터 코우드가 必要함에 同意하였다.

이어서 FERI는 San Diego에 ANATEC 研究會社라는 技術用役會社가 CG-DAMS를 開發하기 위해 設立되었다. 이 2次元 有限要素 컴퓨터 코우드는 安定解析過程을 自動化하였다. 手作業 소프트웨어에 의거 특수구조의 幾何學的要素들, 荷重(貯水池와 放水位標高를 入力命令에 따라) 그리고 댐지점의 댐 및 기초의 材質 등을 使用者가 입력을 指示하게 된다. 해석결과 는 쉽게 그래프와 表形式으로 提示되며, 龜裂發達의 豫測에도 쓸 수 있으며, 正常荷重狀態, 洪水時, 또한 地震時의 剪斷應力, 垂直應力 豫測에도 쓸 수가 있다.

뿐만 아니라, CG-DAMS는 FERC의 댐안정해석 요구사항에 答할 수 있도록 設計되어 있으며, 어느 댐소유자도 그지점의 특수조건을 반영하는 편의적 均열기초해석법 보다도 더욱 현

\* 水資源開發技術士, 工學博士, 前 成均館大工科大学 教授. (財) 韓國建設品質管理研究院 院長

실적 안정규제를 위한 것을 원하는 대로 이것은 유용하게 對處할 수 있다.

(\* computer code는 machine code와 같으며, 명령을 표현하는데 채용되고 있는 符號의 體系를 말한다. 실행할 수 있는 여러가지 動作은 數値의 function code에 의해 표현되고 모든 기억장소(store location)에는 番地가 割當되어 있어 거기에는 기억되고 있는 데이터가 address 지정되게 되어 있다. 이는 instruction code, instruction set, 또는 order code라고도 한다.)

### 1. 코오드의 特徵

CG-DAMS는 自動모델 生成: 댐체, 댐기초와 댐과 기초접촉면에서의 龜裂發生豫測을 위한 數學的모델: 그리고 算定結果評價를 위한 道具: 의 3가지의 特徵을 갖고 있다.

### 2.0 自動모델 生成

유한요소법해석에서 가장 지루한 작업은 하중에 대한 구조적 應答의 시뮬레이션을 얻기 위해 유한요소의 격자망(mesh)(입의의 요소로 유한개로 분할함)을 구축하는 일이다. CG-DAMS는 이 과정을 “도서관”모델(코오드안에 표준댐 단면을 저장)을 통하여 자동화한다. 이 “도서관” 모델은 많은 一般斷面을 擴大 또는 縮小할 수가 있다.

그림 1에 하나의 標準非溢流 댐을 規定하는 입력사항을 보여주고 있다. 이용자는 해석하여야 할 특정댐의 幾何學的情報를 컴퓨터 스크린에 적절하게 框안에 표고와 경사를 插入한다. 데이터를 넣은 뒤 프로그램은 즉시 댐 단면을 그려내어 그리하여 이용자가 눈으로 입력자료를 체크할 수 있다. 이 특징은 특히 기술자들에게 도움을 준다. 지금까지는 격자망 작성 과정에서 애라가 발생하여 이것을 찾느라고 많은 시간을 소비했든 것이다.

CD-DAMS는 표준 비일류 댐과 일류댐에 대하여 7가지의 “도서관”모델 단면을 쓸 수 있게 되어 있다. 또한 코오드는 格子網作成能力을 제공하기 때문에 이용자는 그들의 독특한 形狀

의 斷面에 대한 유한요소 모델을 生成할 수 있다.

이용자댐의 기하학적인 敘述이 끝나면 다음에는 댐본체, 댐기초, 댐체와 기초접촉면의 材質特性을 定義를 컴퓨터 入力 스크린에 넣게 된다. 이 스크린은 Machintosh와 Windows 스크린 形式과 恰似한 形式에 따른다. CG-DAMS는 不合理的 값으로 알게되면 代表的 값으로 代替하도록 되어 있어 關係되는 量과 單位를 넣어야 함을 提示해 준다.

만약에 基礎材質의 彈性係數와 같은 파라메타를 알지 못했을 때는 CG-DAMS 이용자는 파라메타 값을 變化시켜가며 敏感하게 解析을 履行할 수 있다. 이와같이 해서 댐에 대한 安全率計算에 있어 특수 파라메타의 影響을 決定할 수 있다. 예를 들어 만약에 岩石의 Young係數를 3百萬에서 2百萬으로 바꾸면 安全率은 2.3에서 2.2로 변한다. 그러므로 댐 所有者는 이 性質을 규명하기 위해 아주 많은 코어(core) 試料를 試驗할 必要는 없는 것이다. 그렇지만 안전율이 2.2로부터 2.8로 변했다면 이 特性결정은 매우 중요하다. CG-DAMS는 이용자에게 쉽게 이러한 解析을 遂行하고 記述을 할 수 있게 되어 있다.

幾何學的인 資料와 材質의 人力이 끝나면 利用者는 댐에 作用하는 外力을 定義할 準備를 하여야 한다. 外力條件으로는 貯水池水位(正常運營時와 可能最大洪水量時), 放水位標高, 댐의 堆積되는 泥土의 높이 및 密度, 必要에 따라서는 댐에 作用하는 水壓등이 包含된다. 外力들은 當初 設計時에 使用된 外力資料에 의해 決定된다. 그리고 난 후에 가령 最大可能降雨量에 의한 資料도 쓰게 된다. CG-DAMS는 그라피칼 디스플레이(graphical display)에 의해 利用者는 入力外力資料의 檢證을 할 수 있다.

CG-DAMS는 安定解析을 進行하면서 外力을 漸次的으로 또는 段階的으로 增加할 수 있다. 이 方法은 “段階的荷重法”으로 알려져 있으며 이용자는 貯水池 水位의 漸進的 增加에 대한 安定度도 檢討할 수 있다. 龜裂解析을 實施할

때에는 荷重을 徐徐히 添加하여야 한다. 그 理由는 最終龜裂發生은 荷重增加의 經路에 따르기 때문이다. 만약에 貯水池의 荷重이 最終最大荷重의 百分率로 增加시키기 보다는도 저수지 수위에 따른 증가하중일 때에는 이들 中間結果들은 單純解析으로 얻을 수 있을 것이다.

더더욱 여러가지 저수지수위에 대한 穩定應答은 이 “段階의 荷重法” 解析이 1回 實行으로 完成할 수 있다. 解析量의 減縮은 電算機에서 結論되고 用役費의 節減에 直結된다.

CG-DAMS는 揚壓力(담 下部의 水壓) 모델링 接近에 있어 3가지 方法을 제시한다. :-그 하나는 FERC의 水力計劃의 評價를 위한 工學的指針書(Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects)에 說明된 양압력특징에 接近하는 一般의 接近, -두번째는 콘크리트 重力式 담에 있어 龜裂속의 揚壓力推定에서 EPRI의 컴퓨터 모델인 CRFLOOD를 쓰는 接近, 이것은 FERC의 接近法보다 實際的이나 아직 어딘가 概括的인데가 있다. 이 접근법을 이용하기 위해서는 담안에 排水管의 크기와 配列間隔의 데이터가 必要하다. 또는 -담의 上端으로 부터 下端까지의 橫斷을 통해 피조메타(piezometer)를 設置하여 實施 揚壓力을 測定값을 읽어드리는 地點測定接近法이다.

CG-DAMS는 또한 任意 假想荷重을 통하여 地震時解析能力도 마련되 있다. 담 上流面에 作用하는 動水壓力은 美國 California대학(Berkeley에 있는)의 構造工學科의 A.K.Chopra博士에 의해 開發된 콘크리트 重力式담의 單純化된 地震抵抗解析法을 써서 計算된다. CG-DAMS에 入力되는 地震荷重入力데이터는 直接 많은 量을 單純化해서 넣게 되어 있고, 또한 그 地點의 特殊 地震震度を 要求하고 있다.(이것은 當初 담설계시에 美國土壤保全局의 地震 데이터가 좋은 資料源이다.) CG-DAMS는 모든 다른 입력파라메타를 計算한다.

거기에서 貯水池荷重에 대해서는 이용자는 어름, 담 築造후의 引張荷重, 溢流할 경우의 頂部 및 越流水脈荷重 같은 것을 1점에 作用하는

集中荷重으로 모델할 수 있다.

또다른 CG-DAMS의 특징은 熱荷重도 포함되 있다는 것이다. 그리하여 直接 應力解析에 熱應答結果를 連結한다. 熱源은 大氣氣溫 또는 콘크리트 養生中の 水和熱이 内部에 있게 된다. 이용자는 담본체 및 기초에 溫度를 指定할 수 있다. 熱荷重모델링을 위한 材質에는 熱傳達係數, 熱傳導率, 그리고 熱膨脹率이 포함된다.

CG-DAMS의 그래프입력 스크린을 써서 이용자는 複雜한 計算모델을 만들 수 있으며 1時間內에 材質 및 境界條件을 써서 計算을 끝낼 수 있다. 이것은 在來計算過程에서는 몇日이 要했든 것이다.

### 3.0 數學모델

다른 有限要素法 소프트웨어와 比較한 CG-DAMS의 가장 唯一한 特色은 龜裂의 모델링의 能力이 있는 것으로 이는 담본체와 기초의 接觸面 뿐만 아니라 담 또는 기초 内部의 龜裂도 生成하는 모델링이 可能한 것이다. CG-DAMS는 引張 및 壓縮荷重下에서 構造力學的 局部的 剛性에 대하여 균열 形成을 시뮬레이션하는 數學的 모델을 포함한다.

이 모델은 元來 Berkeley에 있는 California 大學의 Y.R.(Joe) Rashid가 1960年代에 最初로 開發한 “퍼져가는 균열”에 基礎를 두고 있다. 現在는 Rashid博士가 ANATECH研究會社의 社長으로 있다. “퍼져가는 균열”모델에서는 균열발생은 하나의 有限要素格子內에서 個個要素안에서 또는 格点에서 評價된다. 균열들은 材質內의 引張應力이 過剩되면 形成한다. 일단 균열이 형성되면 이들 균열은 해석을 통하여 追跡된다. 그리하여 適用荷重에 의거 균열이 아물든가 다시 균열이 발달하는가를 한다. 個個의 要素에서의 균열의 發生은 국부적인 應力-變形狀態에 의거 支配된다. 이 균열의 영향이 개개의 이웃 요소구역까지 퍼져가기 때문에 모델명이 그와같이 일켜졌다.

해석중에 일단 균열이 발생하면 균열을 통과하는 垂直應力은 零으로 減少되고 균열 周圍의

應力分布(그리고 이러한 하중)는 再計算된다. 이 再分布荷重을 구하기 위한 許容 外力을 漸次的으로 增加해 가며 구하게 된다. 댐과 岩石 接觸面에 沿한 均열에 대해서는 壓縮應力에 直交하는 剪斷力의 性質을 이용한다. 換言하면 接觸面에 대하여는 均열은 수직방향으로 작용한다고 모델에 定하고 壓縮應力은 높게 채택한다.

正確한 最終均열을 해석하기 위해서는 하중은 댐에 대하여 서서히 가하지 않으면 안된다. 이는 前述한 바와 같이 段階的荷重法에 의해 이루어진다. 代表的인 CG-DAMS 해석은 30 내지 40개의 中間解析法이 있다. 이용자는 이들 중에서 몇개만 安定解析과 應力圖를 얻기 위해 선택하면 된다. 이 증가해석법은 이용자에 의한 어떠한 내부작용을 요구하지 않는다. 貯水池, 放水位 및 揚壓力의 값은 저수지수심의 증가 또는 댐과 암석 안에 均열이 反映되어 自動的으로 변한다. 그러나 CG-DAMS의 한가지 問題點은 댐의 斷面을 2次元으로 假定했다는 것이다.

#### 4.0 算定結果評價를 위한 道具

CG-DAMS는 均열경향의 프롯트, 應력도, 그리고 偏奇상태의 프롯트를 分析結果로서 그려낼 수 있다. 그림 2는 洪水位時의 댐과 기초의 垂直應力分布를 보여주고 있다. 引張應力圈이 댐 뒷금치에서 댐암석 內部龜裂이 있음을 제시하고 있다. 이용자에 의해 指定하는 各增加段階에서 CG-DAMS는 計算된 댐-암석 내부의 均열길 이와 이에 따르는 滑動安定를 보여준다. 기초내의 破壞面의 自動評價方法이 現在 開發중에 있다. 또한 컴퓨터 코우드는 極限 入力資料와 解析結果를 순속히 참고할 수 있도록 綜合表를 作成해준다. 거기에서 또한 個個해석의 綜合表를 마련하므로써 그 表는 結果比較에 있어 有用하게 쓰여진다. 예를 들어 이용자가 같은 댐에서 5가지 排水位 또는 댐높이의 해석을 원하면 해석결과가 自動的으로 表로 마련된다.

#### 5.0 CG-DAMS의 利用에 關하여

CG-DAMS는 DOS操作 시스템下의 PC

386/486으로 稼動되는 메뉴에 의한 프로그램이다. 이 프로그램은 最小 4MB(Megabytes)의 RAM과 소프트웨어가 들어갈 空間과 “圖書館” 모델과 또한 同等한 橫斷이 들어가기 위해서는 最小限 25MB의 하아드 디스크(hard disk)가 必要하다. 또한 VGA 또는 超VGA 모니터가 스크린 그래픽 때문에 必要하다. 또한 HPGL (Hewlet Packard's graphic language)와 혹은 이와 互換性을 갖는 프린터가 있어야 한다. CG-DAMS는 EPRI 또는 ANATECH의 사용인가를 받아야 한다.

몇개의 利用機關과 用役會社 그리고 州政府 댐 安全管理協會에서 댐안정해석을 위하여 CG-DAMS를 쓰고 있다. 이용자들은 한결같이 CG-DAMS는 댐 내부와 기초 내부의 應력 발생을 표현이 더욱 실제적이라 인정하고 있다. 거기에서 FERC의 水力發電許可部署인 댐 安全檢査課의 幹部가 이 소프트웨어를 테스트해왔고 要求되는 댐 안정해석에 CG-DAMS使用을 받아들일 것이다.

後記 : CG-DAMS에 대한 質疑 및 詳細한 것을 알기 위해서는 下記住所를 利用하면 됩니다.

Mr. Peter R. Barrett  
Computer Aided Engineering Associates,  
398 Old Sherman Hill Road,  
Woodbury, CT 06798, Tel. (203) 263-4606

Mr. Douglas I. Morris  
ERPI  
3412 Hillview Avenue,  
Palo Alto, CA 94303, Tel. (415) 855-2924  
以上 2사람이 CG-DAMS에 관한 것을 소개한 분이고 CG-DAMS에 관한 질의는 다음의 분에게 하면 된다.

Mr. Hoss Fordian  
Senior Engineer  
ANATECH Research Corporation  
5435 Oberlin Drive,  
San Diego, CA 92121, Tel. (619) 455-6350

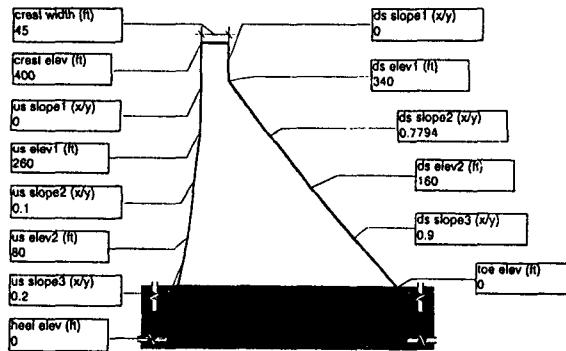


그림 1 이 그림은 CG-DAMS의 모델에 입력 스크린에 입력할 댐단면의 기하학적 정의를 보인 것이다. 입력파라메타는 댐단면에서 가장 표준적으로 맞도록 되었다. 이 모델은 30feet로부터 300feet이상에 쓸 수 있다. 데이터가 입력후로부터 CG-DAMS는 자동적으로 해석될 단면이 작성된다. 그림의 칸에 값이 이 단면을 설정하는 것이다.

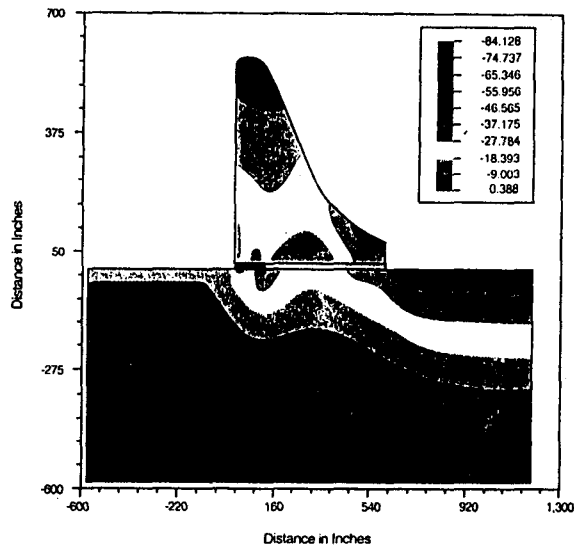


그림 2 이 그림은 저수지가 홍수위시의 댐 및 기초의 수직응력 콘타이다. 원래 색도로 표시되어 있는데 그림의 숫자는 pound/sq.inch.이다.