

1999 年集集地震による 石岡ダム の被害要因に関する一考察

杉村淑人¹・野中樹夫²・森 敦³・劉 銘崇⁴・藤田亮一⁵

¹正会員 工博 水資源開発公団 栗原川ダム調査所 (〒378-0051 群馬県沼田市上原町 1619 番地)

²正会員 工修 水公団試験研究所 構造解析研究室 (〒338-0812 埼玉県浦和市大字神田 936 番地)

³正会員 Ph. D. 日本技術開発株式会社 地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町 5 丁目 33-11)

⁴正会員 工博 日本技術開発株式会社 地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町 5 丁目 33-11)

⁵正会員 工修 日本技術開発株式会社 地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町 5 丁目 33-11)

本論文は、1999 年 9 月 21 日の台湾集集地震により被害を受けた石岡ダムに見られた損傷の特徴について述べるとともに、堤体コンクリートのひとつに生じた柱基部断面をダム軸方向に沿って斜めに貫通する大きな亀裂に着目して、その発生メカニズムについて考察したものである。地震時のダム構造物と周辺地盤の挙動について仮説を立て、その検証解析を行った結果、表層地盤の水平方向の動きとダム構造の特殊性が、着目した損傷の要因である可能性が示された。

Key Words : Chi-Chi Earthquake, Shin-Kang Dam, push-over analysis, seismic damage

1. はじめに

1999 年 9 月 21 日に発生した台湾集集地震で、ほとんど前例のないコンクリートダムの被害が発生した。被害を受けた石岡ダムは、堤高 25m、堤頂長 357m の重力式コンクリートダムである。図-1 に石岡ダムの全体一般図を示すが、正面図には損傷の特徴も概略示している (損傷の形態から Zone1~Zone3 に分類)。石岡ダムは、大規模な地盤のずれにより右岸側の一部 (2 径間分 : Zone 3) が崩壊したのに加え、全体的な支持地盤の不均一な隆起により堤体天端位置が一様ではなくなった (堤体柱 P9 から P15 あたりの中央部が盛り上がったような状態)。石岡ダムの各構造部位が受けた損傷の主たる要因は、地盤の隆起・移動といった変動であったことは紛れも無い事実である。しかしその一方で、部分的な損傷の特徴には、地震による構造物の振動が影響を及ぼした可能性を示唆するものも見られた¹⁾。その可能性のひとつとして、右岸側の P1~P7 堤体 (Zone 1) では、管理橋と堤体柱間の支承部および越流部に目立った損傷は見られず、堤体柱下端周辺のダム軸方向に沿った両面に水平亀裂が見られた。その中で、P2 堤体 (堤体高さが変化する位置) は損傷程度が最も激しく、構造安全上の致命的被害を受けた。本論文は、調査結果にもとづいた石岡ダムの損傷の特徴について述べるとともに、上記の致命的な損傷を受けた P2 堤体の被害要因について、現場調査にもとづく地震時の挙動に関する仮説を踏まえて、プッシ

ューオーバー解析を行い、想定しうる損傷メカニズムについて考察したものである。

2. 石岡ダムの被害状況とその特徴

(1) 断層と地盤の変状

図-2 は、小長井ら²⁾による石岡ダム周辺において地表に出現した断層の位置と、地盤変状の変位量や方向などを示したものである。図中の A 断層が通っていた埤豊橋の落橋部では、南東側の地盤が 5~6m 上昇するとともに右横ずれ現象を呈し、石岡ダムの右岸周辺に約 10m の異常隆起があった。東西方向の走向を呈する B 断層が石岡ダムの左岸約 220m 地点を通っている。石岡ダム右岸側の洪水吐き S17、S18 付近には、C 断層 (南側が北側に比較し約 10m 上昇、左横ずれ約 3.5m) の存在が推定されている。

(2) 石岡ダム本体の損傷

石岡ダムの損傷をその形態に着目して図-1 に示したように分類した。以下にそれぞれのについての特徴を記述する。

1) Zone 1 : P1~P7 堤体間

P1~P7 堤体においてダム軸方向の柱両面下端の施工継ぎ目に沿った水平亀裂が多く見られたが、越流部には目立った亀裂は認められなかった。特に P2 堤体に着目する

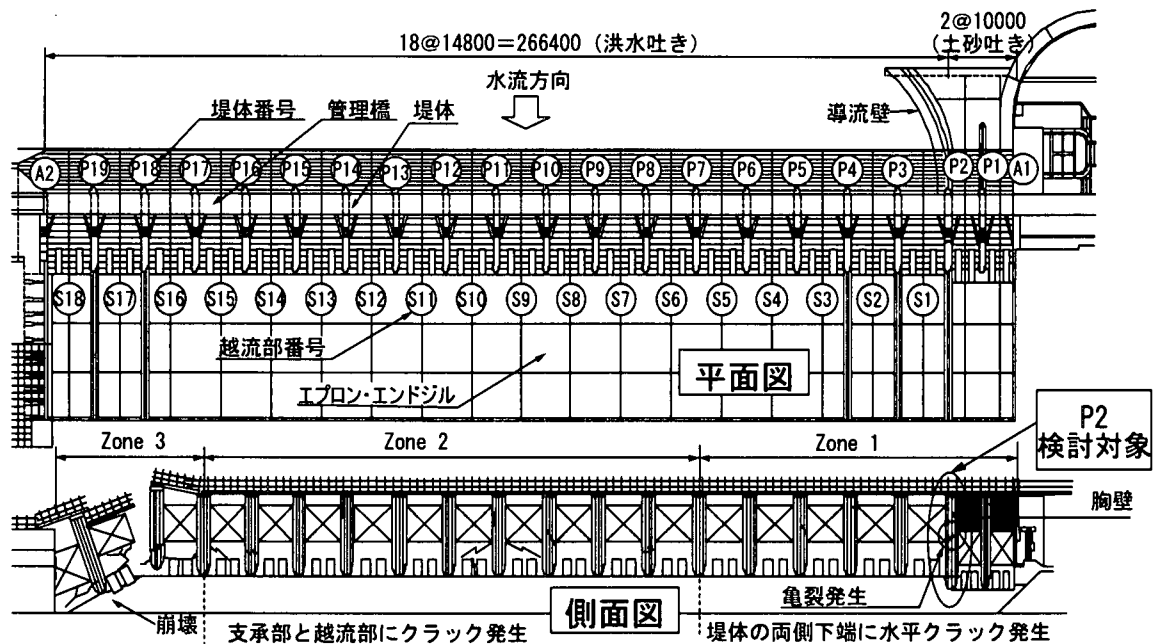


図-1 石岡ダム全体一般図と
損傷の特徴に着目したゾーン分け

と、柱部分に左岸側から右岸側に右下がりに貫通する鋭角で大規模な亀裂が生じていた（図-3）。なお、越流部と管理橋支承部には明瞭な損傷は認められなかった。

2) Zone 2 : P7～P17 堤体間

P7～P17 堤体間の越流部には大量の亀裂が発生したが、堤体柱には目立った水平亀裂は認められなかった。洪水吐き S6～S11 の越流部では、横継ぎ目の開口幅が 40～50mm に達していた（上流側で開口、下流側で開口なし）。支承部の損傷として、P9～P12、P15、P16 堤体柱上端の支承部周辺のコンクリートに変状があった。

3) Zone 3 : P17～A2

洪水吐き S16～S18 の間は、断層の通過によりダム構造が倒壊・沈下し、10m 程度の段差が生じた。

なお、上述の堤体の損傷および地盤隆起の影響で、土砂吐き S2 ゲートと洪水吐きの S1、S8、S10、S15、S16 ゲートは地震後に開閉制御が不可となった。

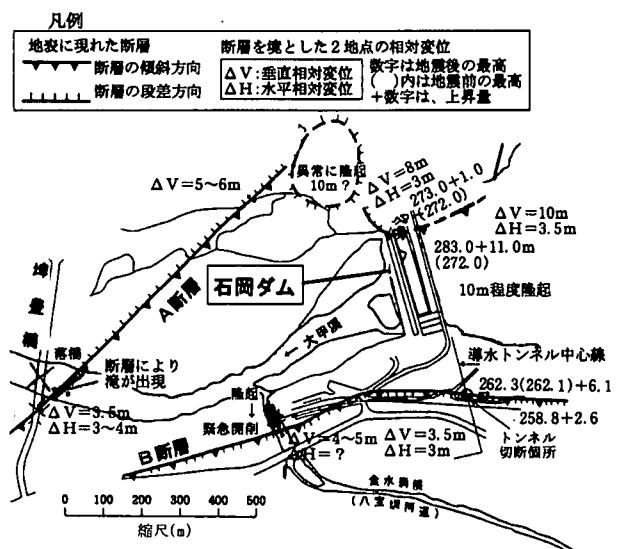


図-2 石岡ダム周辺の断層と地盤変位
<文献1)の図を一部修正>

3. P2 堤体柱の損傷メカニズムの推定

P2 堤体は、地盤隆起の影響がほとんどない Zone 1 に位置する。しかし、地震動による揺れの影響により堤体に損傷が生じた可能性があった。その根拠として、以下が考えられた。

- ① P1～P7 堤体柱側面に見られるひび割れは、その状態から曲げひび割れであると考えられ、堤体に水平方向の力が作用したと推測できる。
- ② ダム軸に沿った柱両側面でひび割れが発生しており、正負交番の力を受けた可能性が考えられた。

一方、P2 堤体柱の損傷は図-3 に見られるように、Zone 1 の他の堤体柱とは明らかに異なり、かつ致命的

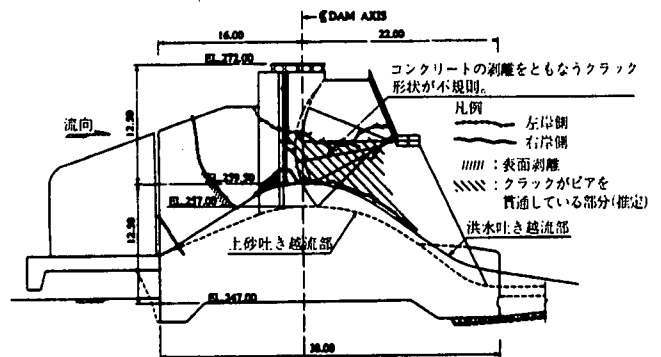


図-3 P2 堤体部の損傷¹⁾

であった。P2 堤体柱は、右岸側が土砂吐き、左岸側が洪水吐きなため、柱の長さが両側で2.5m程度異なっている。左岸側から右岸側に右下がりに貫通する鋭角で大規模な亀裂は、その方向性から、左岸側から右岸側に向かって柱が押されたことで生じたものと考えられた。P2 堤体柱に見られる特徴は、上述の損傷形態だけではなく、柱の全高の半分以上を占める P1～P2 間の胸壁の存在である（図-1 の正面図参照）。先の亀裂は、胸壁の下側あたりから進行して柱の反対側まで貫通していた。また、同様な胸壁は A1～P1 間にも設置されているが、P1 には同様な損傷はなかった。

上記の構造的特性を勘案して P2 堤体柱の損傷を吟味すると、地震による動きの中で、左岸側から右岸側に胸壁が押されて水平移動するのに伴い、柱下端が倒れ込むように P3 堤体側（右岸方向）に傾斜するといったせん断挙動を呈した可能性が考えられた。

4. 検証解析とその評価

(1) 検証解析の概要

前記した P2 堤体柱の損傷メカニズムに関する仮説の検証を目的として、平面骨組モデルを用いたダム軸方向のプッシュオーバー解析を行った。解析ケースとその着目点を表-1 に、解析に用いたモデルのイメージを図-4 に示す。ダム構造体にはり要素、胸壁にプレート要素を用いた。解析に考慮する非線形特性は、①橋脚の曲げモーメント～曲率関係（バイリニアはり要素）、②固定支承の水平力～変位関係（水平力が支承の最大抵抗力に達した時点で頭打ちとなるバイリニア型の非線形弾性モデル）、③桁の衝突（非線形ばね要素）²⁾、の3つである。このうち②の支承の最大抵抗力は、図-4 に示すようなコンクリートの押し抜きせん断抵抗として算出し、初期剛性は支承アンカーボルトのせん断剛性とした。荷重（震度）あるいは強制変位は、左岸側から右岸側に向かって漸増させた。なお、上部構造および下部構造のコンクリート強度は $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$ 、鉄筋強度は $\sigma_{sy}=282\text{N/mm}^2$ とした。

(2) 解析結果

P2 堤体柱の下端に発生した大規模亀裂はせん断破壊によるものと考えられたため、前記した3ケースのプッシュオーバー解析の結果を、発生せん断力に着目して図-5 のように整理した。同図の各解析ケースによる、P2 堤体柱下端周辺の断面に発生するせん断力と、断面が有するせん断耐力の関係から以下のことがわかる。

①震度入力の場合 I とケース II の結果から、どちらもせん断耐力に余裕があり、壁のないケース II の方が大きなせん断力を発生している。

表-1 解析ケースと着目点

ケース	胸壁	地震荷重	解析の着目点
I	有	震度	震度を一方向に漸増载荷していき、損傷に及ぼす慣性力の影響について評価する。
II	無	震度	I との比較より、胸壁の存在が損傷に及ぼす影響について評価する。
III	有	A1 強制変位	A1 のみに強制変位を与え、I と比較することで慣性力が損傷に及ぼす影響について評価する。

②壁を考慮したケース I とケース III の結果から、後者の強制変位入力の場合に、強制変位量がわずかに 8mm 程度で、堤体柱の胸壁より低い所で発生せん断力がせん断耐力を上回る。

また、ケース I とケース II の解析結果において、特に Zone 1 にある P2 以外の堤体柱の発生曲げモーメントと降伏モーメントを比較した。その結果、震度 0.3～0.4 程度で柱下端付近が降伏相当の損傷レベルに到達していた。

(3) 評価

Zone 1 における損傷状況をみると、P2 に損傷が集中しており大きなせん断貫通亀裂が発生していた。上記の3ケースの中でこの状態に近いのは、ケース III の強制変位を与えた場合であった。図-6 には、胸壁のある P2 堤体柱と隣接する壁のない P3 堤体柱の強制変位入力に対する変形を比較して示した。同図から胸壁が P2 柱の曲げ変形を著しく拘束し、柱下端部にせん断破壊を生じるモードを呈していることがわかる。一方で、P2 以外の堤体柱には曲げひび割れと思われる損傷があり、この状態に近いのは震度入力したケース I と II であった。しかも、弾性震度相当で 0.3～0.4 程度であり、これは石岡ダム近傍の強震記録 ($A_{max}=362\text{gal}$)³⁾ から求めた弾性震度 0.6～0.8（減衰定数 5% 相当の加速度応答スペクトルのピーク範囲）の半分程度で、それほど大きくはなかった。

すなわち、石岡ダムの Zone 1 に見られた堤体の損傷は、i) P2 堤体柱で推定された左岸側から右岸側に向かっての地盤の圧縮力（インパクト⁴⁾）に伴い左岸側アバットが胸壁を押し出す作用に加えて、ii) P2 以外の曲げ損傷の要因と推定された地震による規模の小さい揺れ（慣性力）、といった両方の現象が絡んだものと考えられた。前者 i) のインパクトによる強制変位現象については、以下のような仮説を立ててみた。地震時に石岡ダム周辺に作用した力をマクロ的な視点で見ると、左岸側から右岸側へ向かって圧縮力が作用したと考えられている⁴⁾。石岡ダムは岩着（基盤）されているが、左岸側のアバット背面には表層地盤（20m 強の高低差）があり、基盤と表層地盤では地盤変動による水平方向の動きが異なる。すなわち、ダムが設置されている基盤部より左岸側のアバット背面地盤は若干大きく動き得るため、地盤が強制的に左岸側アバットの上部（胸壁位置）を押したような状態が生じたものと考えられる。

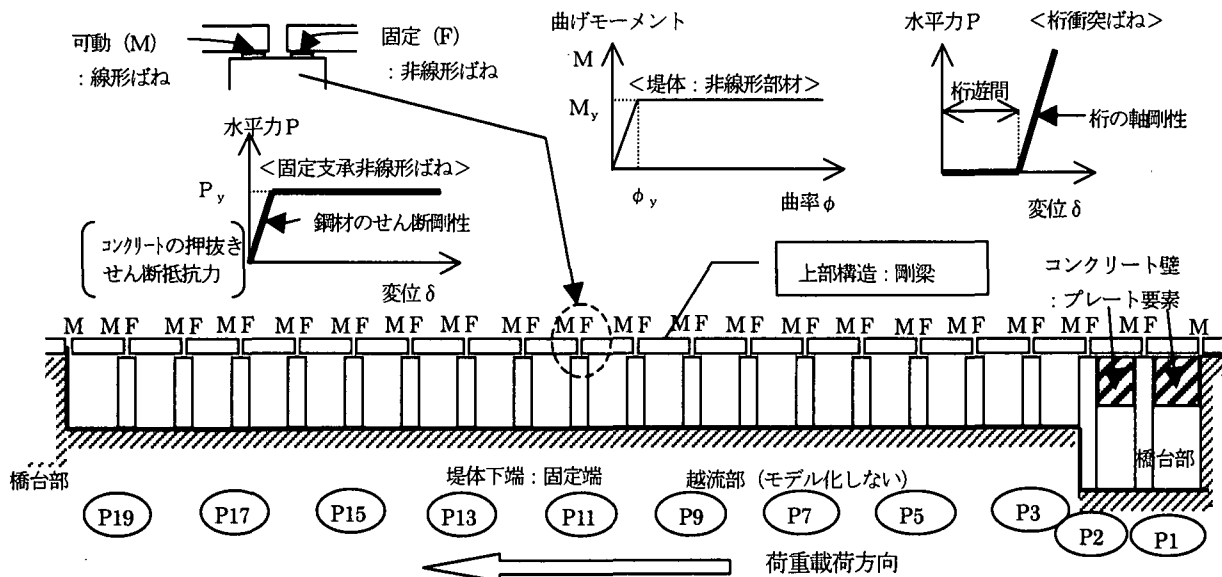


図-4 解析モデル

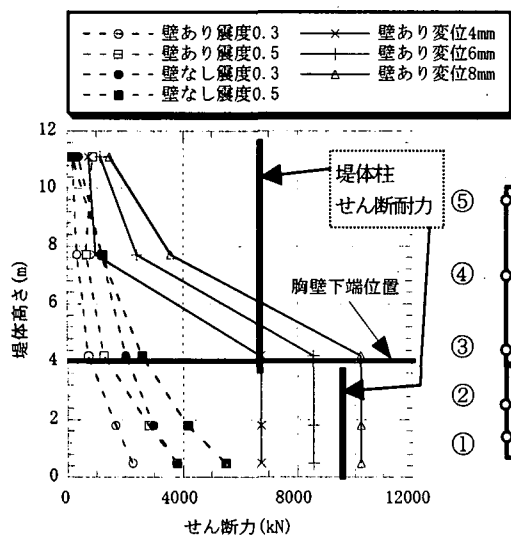


図-5 P2 柱に発生するせん断力の比較

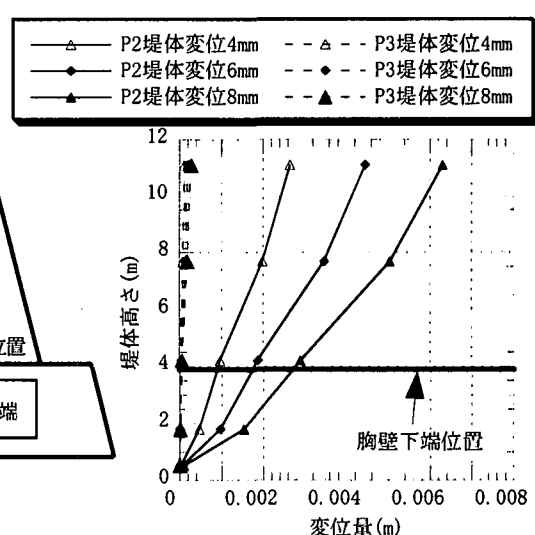


図-6 強制変位入力に対するP2とP3柱の変形

5. おわりに

石岡ダムが受けた損傷のうち、左岸側の地震による揺れの影響を受けたと推測される Zone 1 の損傷メカニズムについて、被害分析にもとづいた仮説を立て、数値解析を用いてその検証を試みた。これによれば、着目した損傷は特異な状況下で発生した可能性が示されたものの、それを定量的に検証するには至らなかった。今後は、ダム周辺のマクロな地盤の動きと、それがダム構造の損傷に及ぼした影響に着目した研究を行い、ここでの仮説を検証することが望まれる。

謝辞：石岡ダムの被害調査と必要図書類の提供に協力いただくとともに、被害分析に関する充実した議論に参加いただいた、台湾經濟部水利処中区水資源局の葉純松副局長ならびに蔡炎生課長、国立中興大学の黃添坤教授、

中興工程顧問社の龔誠山博士ならびに李仁杰副部長に、深甚たる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小長井一男、三浦三郎、杉村淑人：台湾地震と石岡ダムの被害について（速報），大ダム，No. 171，pp63-80，2000。
- 2) 川島一彦：動的解析における衝突のモデル化に関する一考察，土木学会論文報告集第 308 号，pp123-126，1981。
- 3) W. H. K. Lee, T. C. Shin, K. W. Kuo and K. C. Chen：CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake：Volume 1, Seismology Center, Central Weather Bureau, 1999。
- 4) C. S. Kung, W. P. Ni and Y. J. Chiang：The Damage and Rehabilitation Work of Shin-Kang Dam, A Workshop on Seismic Fault-induced Failures, JSPS Research Project 2001, pp33-48, 2001。