

地表に現れる断層変位の形態に応じた ダムの安全性評価法の検討

有賀 義明

弘前大学大学院理工学研究科教授 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

E-mail:y-a-arig@cc.hirosaki-u.ac.jp

1999年台湾集集地震では、地表に出現した断層変位によって石岡ダムが大きな被害を受けた。こうした事例から、地表の断層変位に対する構造物の安全性評価の必要性が改めて認識される。地表に現れる断層については、正断層、逆断層、横ずれ断層、蝶番断層、回転断層などの形態が考えられ、断層変位に対する安全性を評価するためには、様々な形態の断層に対応した解析が必要になると考えられる。そこで、本研究では、地表の断層変位に対する構造物の安全性評価法の開発を目的に、解析モデルの境界条件と地震波の入力方法を工夫することによって、断層変位に対するダムの安全性を評価するための三次元動的解析法を検討した。提案法の適用性を検討するために、堤高100mのコンクリートダムを仮定した事例解析を行った。その結果、提案法を活用することにより、蝶番断層、横ずれ断層、逆断層などを模擬した、ダム-断層連成系の三次元動的解析が可能であるとの結果を得た。

Key Words: 3D dynamic analysis, fault displacement, concrete dam, discontinuous behavior, seismic safety

1. はじめに

世界有数の地震被災国である、我が国では、ダム、電力施設、道路、鉄道、トンネル等、地震被害を受けた際に社会的に大きな影響を及ぼす構造物や施設については、大地震時の安全性の確認と確保が大変重要である。そして、強震動に対してのみならず、断層の変位に対する安全性の評価も大変重要である。大地震の際に地表に出現した断層変位によるダムの被害事例としては、古くは、1906年のサンフランシスコ地震(1906.4.18, M8.3)におけるサンアンドレアス断層沿いの既設ダムの事例が報告されている¹⁾。近年では、1999年台湾集集地震(1999.9.21, M7.6)における石岡ダム(コンクリート重力式、堤高25m、堤頂長357m)の事例²⁾が良く知られている。

我が国では、ダムの建設に際して、事前の地質調査で第四紀断層の分布が判明した場合には適地から除かれるようになっているため³⁾、活断層の分布が事前に判明している場所にダムを建設することは基本的にないと考えられる。しかし、1906年サンフランシスコ地震や1999年台湾集集地震の教訓を踏まえると、事前の調査段階では活断層の分布が認められなかった地点でも、大地震の際に結果的に地表に地震断層が出現することは想定し得ることと思われる。また、地表に現れる断層につ

いては、正断層、逆断層、横ずれ断層、蝶番断層、回転断層等の形態が想定され、地表の断層変位に対する安全性を評価する際には、こうした断層の形態を考慮した解析評価が必要になると考えられる。

そこで、本研究では、地表に出現した地震断層の変位に対する構造物の安全性評価法の確立を目的として、断層とダム堤体ジョイントを接触面要素でモデル化し、解析モデルの境界条件と地震波の入力方法の工夫することによって、様々な形態の断層に対応可能な三次元動的解析法を工夫した。提案法の適用性については、堤高100mのコンクリート重力式ダムを想定した事例解析を行い考察した。

2. 断層変位による既設ダムの被害事例

(1) 地震被害事例

1906年サンフランシスコ地震の際にサンアンドレアス断層の北部が約450kmにわたり最大約6mの右横ずれ変位を起こし、Upper Crystal Springsダム(アースフィル、堤高23m)、Lower Howellダム(アースフィル、堤高12m)、Upper Howellダム(アースフィル、堤高11m)等のダムで被害が発生した⁴⁾⁻⁷⁾。Upper Crystal Springsダムでは、2.4mの水平変位が、Old San Andreasダム(アースフィル、

堤高 8.5m) では 2.1m の水平変位が記録された。台湾の石岡ダムでは、洪水吐ゲート 18 門、排砂ゲート 2 門が設置されていたが、左岸が約 9.8m、右岸が約 2.2m 隆起し、その結果、右岸側の洪水吐 2 門の位置で約 7.6m の鉛直方向の相対変位が発生し、洪水吐とダム堤体が被害を受けた。これらの事例の教訓を将来の技術に活かして行くことが必要であると考えられる。

(2) 地震対策事例

米国カリフォルニア州では、1906 年サンフランシスコ地震の被害事例を踏まえ、断層変位に対する既設ダムの地震対策が 1930 年代から 1970 年代にかけて実施された^{8)~12)}。カリフォルニア州では、1975 年に活断層に関する法律として、アルキスト - プリオ口地震断層帯に関する法律¹³⁾が制定されている。

米国以外の対策事例としては、ニュージーランドの Clyde ダム (重力式ダム、堤高 102m) の事例が報告されている¹⁴⁾。台湾の石岡ダムは、その後、修復され、現在は、多目的ダムとして以前と同様に活用されている。

3. 研究対象とする断層

(1) 断層の種類

強震動に対する安全性を評価する場合は、活断層を地震断層 (地震の際に動く断層) と震源断層 (地震を繰り返し発生する断層) に細分化し、震源断層に着目した評価で良いと考えられる。しかし、地震に伴い出現する断層変位に対する安全性を評価する場合は、震源断層のみならず、広く地震断層を評価対象とすることが必要になる。このような理由から、ここでは、広く地震断層を評価対象としている。

(2) 断層の形態

地表に現れる断層の形態は、一般的に、図-1 に示したよう、正断層、逆断層、横ずれ断層、蝶番断層、回転断層等に分類される。したがって、地表の断層変位に対する安全性評価を行う場合には、これらの断層形態を解析で模擬することが必要になる。このような必要性から、ここでは、これらの断層形態を解析で模擬するための方法について検討した。

4. ダム-断層連成系の三次元的解析法

(1) 研究目的

1999 年台湾集集地震の後、地盤や構造物に対する地

表地震断層の影響を評価するための解析法の研究が行われており、これまでに、応用要素法¹⁵⁾、弾塑性確率有限要素法¹⁶⁾、ラグランジアン・ポイント有限差分法¹⁷⁾等の解析法が提案されている。既往の研究では、ダムを研究対象にした事例がなく、また、構造物と断層の連成系の大規模な非連続的挙動を研究対象にした事例がない。そのため、本研究では、コンクリートダムを対象に、石岡ダムの事例に見られた、ダム底面で大きな断層変位が発生した場合のダムの挙動を評価するための解析法を研究した。

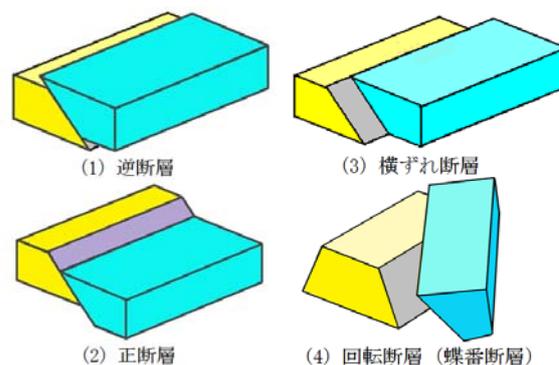


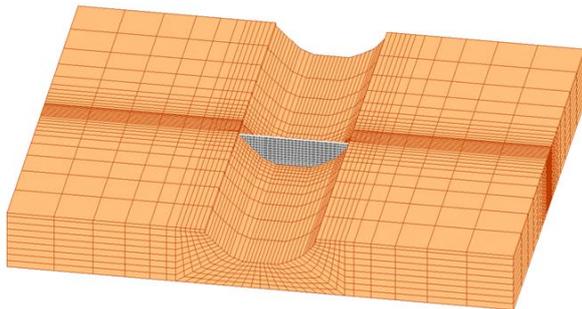
図-1 想定される地表地震断層の形態

(2) 提案法の概要

想定される断層の形態に対応可能な、ダムと断層の連成挙動を解析評価するために、地震作用の入力方法に関しては、ダム底面中央の直下に断層が分布する状況を仮定して、断層を挟んで、断層の片側半分の下方基盤から加速度波を入力し、断層の片側半部分が自由に挙動できるような境界条件を設定して解析を行う三次元的解析法を検討した。ダム堤体のジョイントおよび断層は、三次元接触面要素を用いてモデル化する。提案法は、これまでに著者等が開発してきた、ダム - ジョイント - 基礎地盤 - 貯水池連成系の三次元的解析法¹⁸⁾を基に、解析モデルの境界条件や下方基盤での加速度波の入力方法を工夫した。

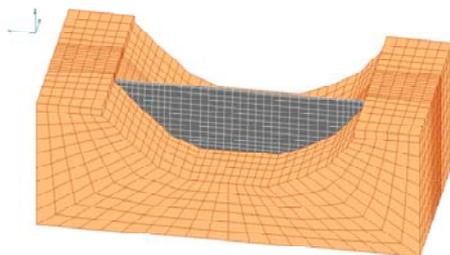
ダム底面の直下に断層が分布していることを想定して作成した、ダム - 基礎岩盤 - 断層連成系の三次元解析モデルを図-2 と図-3 に示す。図-2 は広い範囲の基礎岩盤をモデル化した広域モデルであり、図-3 は狭い範囲をモデル化した狭域モデルである。図-2 および図-3 中のダムモデルは、実地震時挙動の再現解析事例^{19),20)}を参考に仮定したものである。ダム堤体中央の直下に分布する断層は三次元接触面要素²¹⁾でモデル化しており、ダム堤体内のコントラクション・ジョイント (乾燥収縮や温度変化によるコンクリートのクラック発生を防ぐために設けられたジョイント)、ダム底面のペリフェラル・

ジョイント（ダム底面と基礎岩盤の接触面に設けられるジョイント）についてもモデル化している．これらの配置は、図-4に示すとおりである．



基礎岩盤の幅1335.0m、奥行き1094.4m、高さ162.0m

図-2 広域の三次元的解析モデル



基礎岩盤の幅445.0m、奥行き218.88m、高さ162.0m

図-3 狭域の三次元的解析モデル

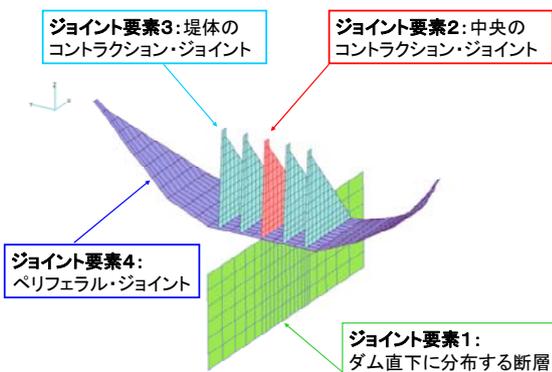


図-4 ダム直下の断層と堤体のジョイントの分布例

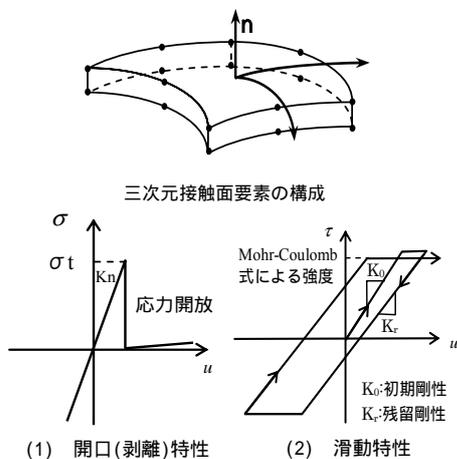


図-5 接触面要素の力学的特性

図-4に示した、断層ならびにジョイントは、いずれも接触面要素でモデル化している．接触面要素の構成と力学的特性は、図-5に示すとおりである．接触面要素を用いることにより、任意形状の不連続面をモデル化することが可能であり、断層およびジョイントの開口（剥離）や滑動を評価する．一度、開口、滑動が発生した後の力学的特性については、残留強度特性を必要に応じて考慮することが可能である．

(3) 加速度波の入力方法

図-6に示したように、断層を挟んで解析モデルの右側半分の下方向境界は自由境界とし、解析モデルの左側半分の下方向基盤のみから加速度波を入力する．解析モデルの下方向基盤の左側半分（図-6の基盤加振側）から加速度波を入力することによって、解析モデルの右側半分（図-6の基盤自由側）は、慣性によって変位挙動を示すことになる．その結果、基盤加振側と基盤自由側の境界面である、断層面で大きな変位を発生させることが可能になり、断層変位に対するダム堤体の挙動、ダム堤体に配置されたジョイントの開口や滑動、ダム全体の非連続的挙動等を解析評価することが可能になる．

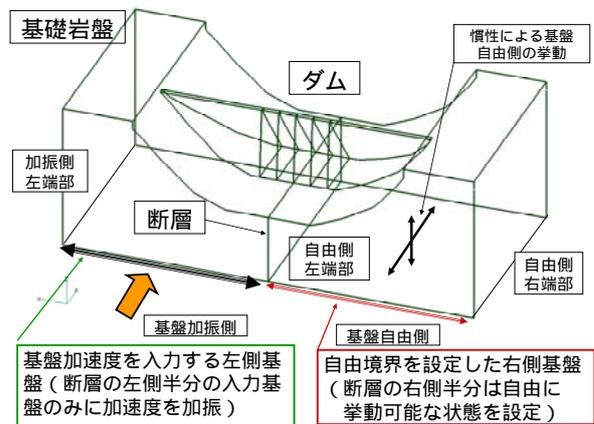


図-6 解析モデルの境界条件と加速度の入力法

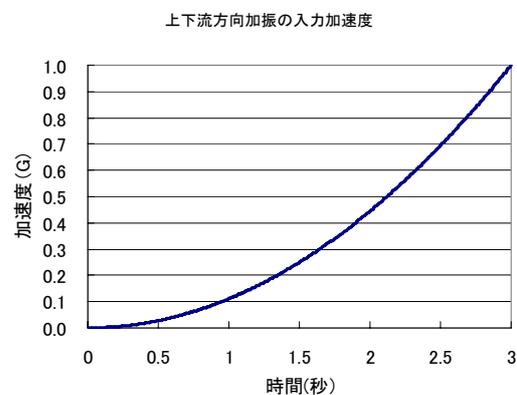


図-7 下方基盤で仮定した加速度波

加速度波に関しては、断層で非連続的な変位を発生させるためには、非常に強い加速度を一方向に作用させることが必要であると考え、ここでは、図-7 に示したような、下に凸の二次曲線で表現ができる、加速度波を用いた。この加速度波は、3秒間で加速度が0 Gから1 Gまで増加するように仮定した。加速度振幅が0galで始まり0galで終わる、普通の加速度波形を用いた場合は、断層面や堤体のジョイント面で開口や滑動が生じて、揺れの方向が時々刻々変化するため、開口や滑動が一方向に進行する解析ができない。そのため、図-7 に示したような加速度波を設定した。したがって、図-7 に示した加速度波は、通常地震動の入力波とは、その目的と性格が異なるものである。なお、ダム底面で発生する断層の変位量は、最大値に至るまでの時間や設定する最大加速度の値に応じて変化するものと考えられ、もし、事前に断層の変位量を定量的に予測することができれば、予測される断層変位量を再現させるための加速度波を逆解析的に評価することが可能であると考察される。

5. コンクリートダムの事例解析

(1) 事例解析の目的

提案法の適用性を検討するために、堤高100mのコンクリート重力式ダムを想定した事例解析を行った。

(2) 解析モデルと解析用物性値

事例解析は、図-2 および図-3 に示した三次元モデルを用いて行った。ダムと基礎岩盤の動的物性値を表-3 に示す。表-3 の物性値の内、動的せん断剛性と減衰定数は、既設ダムの実地震時挙動の再現解析²¹⁾を参考に設定した値である。

表-3 ダムおよび基礎岩盤の動的物性値

項目	ダム	基礎岩盤
密度 (t/m ³)	2.4	2.6
動的せん断剛性(N/mm ²)	11000	9300
動ポアソン比	0.20	0.30
減衰定数 (%)	5	5
せん断波速度 (m/s)	2140	2060

断層、ダム堤体内のコントラクション・ジョイント、ダム底面のペリフェラル・ジョイントの動的物性値は表-4 に示したように仮定した。表-4 において、Kn はジョイント面の法線方向の剛性(N/mm²)、Ko はジョイント面の接線方向のせん断剛性(N/mm²)、C はジョイントのせん断強度(N/mm²)、φ はジョイントの摩擦角(度)、Kr は開口・滑動した後のせん断剛性(N/mm²)、C' は開口・滑動した後の残留せん断強度(N/mm²)、φ' は開口・滑動した後の残留摩擦角(度)、hj はジョイント要素の減衰定数、αt はジョイント要素の初期引張強度(N/mm²)を意味する。KnとKoの値は、解析上生じる接触面要素の変形を抑制するために、ダムおよび基礎岩盤の動的剛性の10倍の値を仮定した。ジョイント要素1~3については、既存の接触面としてせん断強度と初期引張強度を仮定した。ジョイント要素4については、ここでは、ダム堤体と基礎岩盤が付着しているとの設定で、せん断強度4.5 N/mm²、初期引張強度3.0 N/mm²を仮定した。

開口・滑動した後のせん断剛性(N/mm²)、C' は開口・滑動した後の残留せん断強度(N/mm²)、φ' は開口・滑動した後の残留摩擦角(度)、hj はジョイント要素の減衰定数、αt はジョイント要素の初期引張強度(N/mm²)を意味する。KnとKoの値は、解析上生じる接触面要素の変形を抑制するために、ダムおよび基礎岩盤の動的剛性の10倍の値を仮定した。ジョイント要素1~3については、既存の接触面としてせん断強度と初期引張強度を仮定した。ジョイント要素4については、ここでは、ダム堤体と基礎岩盤が付着しているとの設定で、せん断強度4.5 N/mm²、初期引張強度3.0 N/mm²を仮定した。

表-4 断層およびジョイントの動的物性値

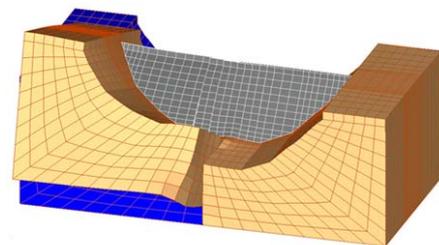
ジョイントの種類	Kn N/mm ²	Ko N/mm ²	C N/mm ²	度	Kr	C'	φ' 度	Hj %	t N/mm ²
1 断層	243000	93000	0	45	1.0	0	45	5	0.01
2 ダム中央	264000	110000	0	45	1.0	0	45	5	0.01
3 ダム堤体	264000	110000	0	45	1.0	0	45	5	0.01
4 ダム底面	243000	93000	4.5	45	1.0	0	45	5	3.00

(3) 解析結果

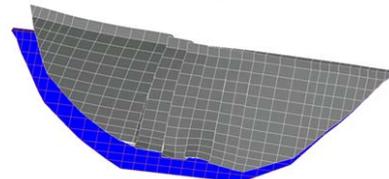
a) 蝶番断層の模擬について

狭域モデル(図-3 参照)を用いて下方境界の基盤加振側から上下流方向に加速度波を入力した場合の変位挙動の解析結果を図-8 に示す。狭域モデルを用いた場合は、解析モデルの基盤加振側(図-6 参照)から加速度波を入力した際に基盤自由側に生じる回転成分の影響が大きくなるため、結果的に、回転成分を有する蝶番断層を模擬する方法として活用できるものと考えられる。

次に、ジョイント面で剥離・滑動が発生している、時刻2.43秒におけるダム軸方向応力の分布状況を図-9 に示す。ジョイント面に強度以上の引張応力やせん断応力



ダムと基礎岩盤(上流側)



ダム(上流側)

ダム堤体中央のジョイント面の最大相対変位: 2.5m
図-8 狭域モデルを用いて上下流方向に加振した場合の変位挙動の解析結果

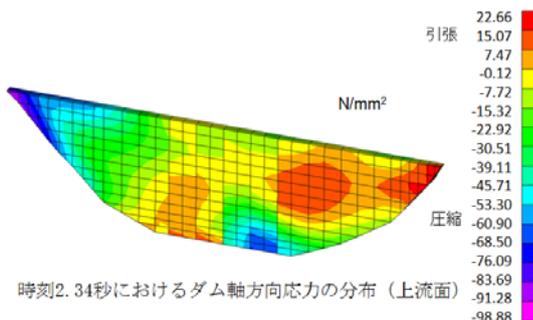
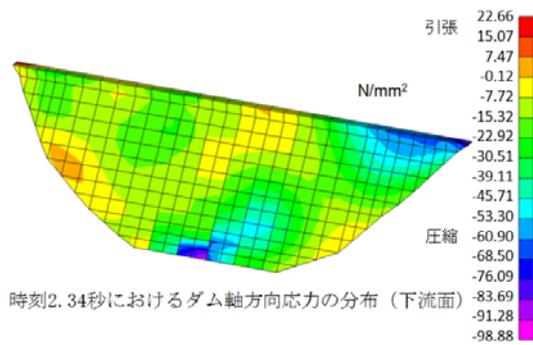
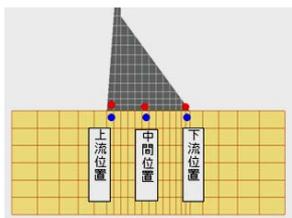
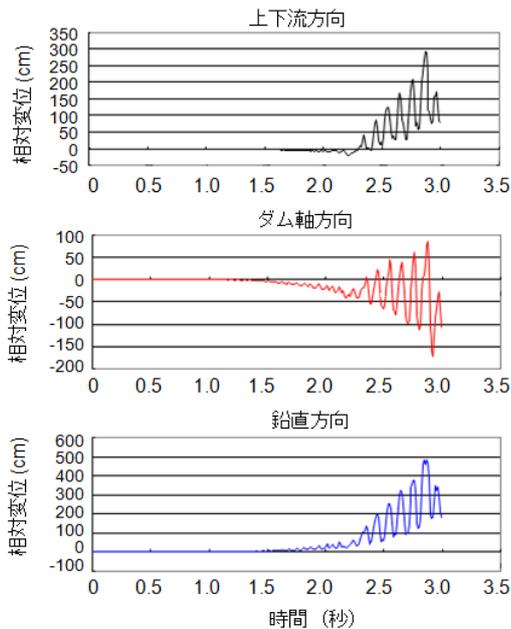


図-9 狭域モデルを用いて上下流方向に加振した場合のダム軸方向応力の分布



(1) 相対変位時刻歴の出力位置



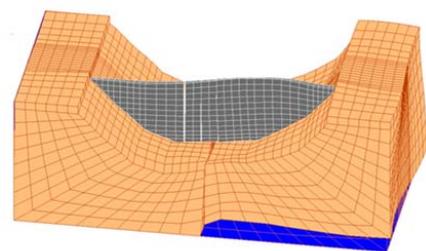
(2) ダム中央断面底部の下流位置での相対変位

図-10 狭域モデルを用いて上下流方向に加振した場合のダム中央断面底部での相対変位時刻歴

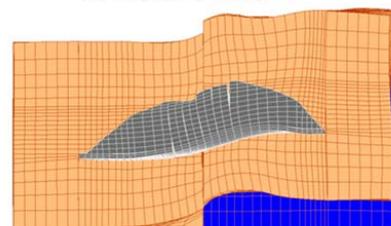
が作用した場合、ジョイント面では剥離や滑動が発生し、堤体内の応力やひずみが解放されると考えられる。図-9の応力分布状況から、ジョイント面の剥離や滑動によって応力状態が非連続的に変化していることが分かる。図-10は、ダム中央断面の底部の下流位置における、ダム堤体と基礎岩盤間の相対変位の時刻歴である。加振後のダム堤体と基礎岩盤間の残留相対変位量は、上下流方向、ダム軸方向、鉛直方向でそれぞれ0.8m、1.1m、1.9mであった。図-10では、相対変位時刻歴に調和的な振動成分が乗っているが、これは、接触面で剥離や滑動が発生した際の挙動の影響であると考えられる。剥離が発生した場合、接触面の開口幅は最初は拡大するが、地震作用に相応した開口幅に拡大した後は、開口が閉じるようになると思われる。滑動が発生した場合も、最初は滑動量が拡大するが、地震作用に応じた滑動量に達した後はその反動で逆方向に挙動するようになると思われる。図-10に示した相対変位時刻歴の振動成分の原因は、接触面の剥離や滑動に伴う、こうした挙動になると考察される。

b) 横ずれ断層の模擬について

広域モデル(図-2 参照)を用いて基盤加振側の下方境界から上下流方向に加速度波を入力した場合の変位挙動の解析結果を図-11に示す。広範囲の基礎岩盤をモデル化した場合は、基盤自由側に励起される回転成分の影響が小さくなるため、基盤自由側が概ね水平方向に挙動するようになる。このような結果から、広域モデルを活用することにより、横ずれ断層を模擬することが可能になるものと考えられる。



(1) 上流側の斜め上から



(2) 真上から

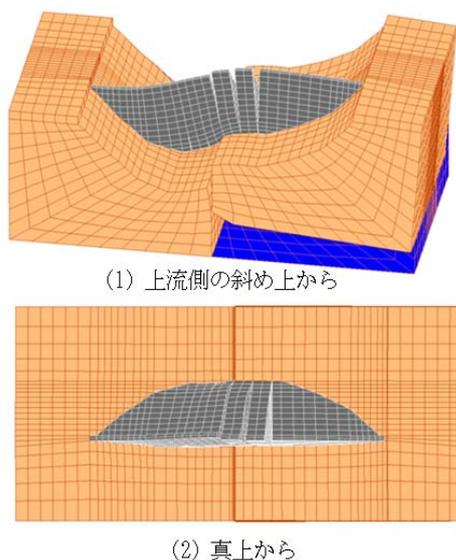
ダム堤体中央のジョイント面の最大相対変位：3.1m

図-11 広域モデルを用いて上下流方向に加振した場合の変位挙動の解析結果

図-11 に示した事例では、ダム堤体中央のコントラクション・ジョイントの底部におけるジョイント面の最大相対変位は3.1mであった。

c) 逆断層と正断層の模擬について

広域モデル（図-2 参照）を用いて基盤加振側の下方境界から鉛直方向に加速度波を入力した場合の変位挙動の解析結果を図-12 に示す。図-12 に示した事例では、ダム直下の断層の傾斜を鉛直に仮定したため、断層面で鉛直上向きの変位が主体になっているが、断層の傾斜を傾けることに逆断層や正断層の動きを模擬することが可能であると考えられる。図-12 の事例では、ダム堤体中央のコントラクション・ジョイントの底部におけるジョイント面の最大相対変位は2.4mであった。



ダム堤体中央のジョイント面の最大相対変位：2.4m

図-12 広域モデルを用いて鉛直方向に加振した場合の変位挙動の解析結果

6. まとめ

地表地震断層の変位に対する構造物の安全性評価法の開発を目的として、三次元動的解析技術を活用して、断層変位に対する非連続的挙動を評価するための手法について検討した。ダム底面の直下に断層が分布している場合を仮定し、断層およびダム堤体のジョイントを接触面要素でモデル化し、解析モデルの境界条件と下方基盤からの加速度波の入力方法を工夫することによって、断層変位に対するダムの非連続的挙動を解析評価するための方法を考案した。提案法の適用可能性を検討するために、堤高 100m のコンクリート重力式ダムを対象として

事例解析を行った。その結果、提案法を用いることにより、正断層、逆断層、横ずれ断層、蝶番断層など、様々な形態の断層を模擬した解析を行うことが可能であるとの結果を得ることができた。

提案法は、三次元動的解析法を基本としているので、強震動に対する安全性評価と断層変位に対する安全性評価を統合的に行うことも可能であり、適用性は広いものと思われる。今後の課題としては、断層およびジョイントの動的物性値の定量的評価法、境界条件に応じた減衰定数の設定法、加速度波の設定法、解析法の妥当性の検討等があると考えている。

7. あとがき

地表地震断層の変位に対する安全性の確認と確保は、ダム、道路、鉄道、トンネル、堤防、電力施設等、様々な長大構造物に共通の課題であると考えられる。本研究では、三次元動的解析を応用することによって様々な形態の地表地震断層を模擬することが可能な解析法を考案した。もし、地質学や地質工学的な視点から、地表に現れる断層の形態や変位量をある程度予測することが可能であれば、提案法を活用することによって断層変位に対する長大構造物の安全性評価が可能になり、より合理的な地震対策技術の考案と実用化が可能になるものと思われる。

なお、集集地震で大きな被害を受けた石岡ダムは、その後、破壊した2門の洪水吐は、1999.9.21 地震の記念碑として当時のままに保存されつつ修復が行われ、現在は、以前と変わりなく、水道水・農業用水・工業用水・発電用のダムとして、また、貴重な観光資源として活用されている。



大破した洪水吐2門は被災当時のままに保存され、その他の部分は修復され従来と同様に運用されている

図-13 現在の石岡ダム（台湾）

参考文献

- 1) Leps T. M. : The influence of possible fault offsets on dam design, Water power & dam construction, pp.36-43, April, 1989
- 2) Lee J. C., H.T. Chu, J. Angelier, Y. C. Chan, J. C. Hu, C. Y. Lu and R. J. Rau : Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures, Journal of Structural Geology 24, pp.173-192, 2002
- 3) 河川管理施設等構造令および同施行規則 (1976年制定)
- 4) 菅原捷 : ダムにおける断層の諸問題, 応用地質 Vol.22 No.1, pp.160-169, 1981.4
- 5) 中村康夫 : ダム基礎地盤における断層変位 (その1) - ダム近傍の断層変位例 -, 応用地質 Vol.31 No.4, pp.37-45, 1990.12
- 6) 中村康夫 : ダム基礎地盤における断層変位 (その2) - 断層変位に対するダムの設計 -, 応用地質 Vol.32 No.1, pp.19-27, 1991.4
- 7) Sherard J. L., L. S. Cluff and C. R. Allen : Potentially active faults in dam foundations, Geotechnique 24, No.3, pp.367-428, 1974
- 8) Bennett J.H. : Crustal movement on the foothills fault system near Auburn, California Geology, pp.177-182, August, 1978
- 9) Louderback G. D. : Characteristics of active faults in the central coast ranges of California with application to the safety of dams, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.27 No.1, pp.1-27, January, 1937
- 10) Leaflet for dam risk assessment: A Guide, CEA Technologies Inc., 2003
- 11) Harpster R. E. : Selected clay used as core for a rock-fill dam designed to cross a potentially active fault, Clay Fills, Institution of civil engineers, London, pp.119-125, 1978
- 12) Seed H. B., F. I. Makdisi and P. D. Alba : Performance of earth dams during earthquake, ASCE GT7, pp.967-994, July, 1978
- 13) The Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act, 1975
- 14) Hatton J. W., J. C. Black and P. F. Foster : New Zealand's Clyde Power Station, Water power & dam construction, pp.15-20, December, 1987
- 15) Meguro K. and P. K. Ramacharla : Numerical study on the characteristics of the ground responses in the Near-Fault regions, Proceedings of 11th Japan earthquake engineering symposium, Japanese Geotechnical Society, pp.397-400, 2002.
- 16) Hori M., M. Anders and H. Gotoh : Model experiment and numerical simulation of surface earthquake fault induced by lateral strike slip, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.19, No.2, 227-236, 2002
- 17) Konagai K. and J. Johansson : Two dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for modeling large soil deformation, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.18, No.2, 105s-110s, 2001
- 18) 有賀義明, 曹増延, 渡邊啓行 : 強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元的解析に関する研究, 土木学会論文集 No.759/I-67, pp.53-67, 2004
- 19) 有賀義明, 曹増延, 渡邊啓行 : 強震時の非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性の評価について, 大ダム No.175, 2001
- 20) 渡邊啓行, 有賀義明, 曹増延 : 三次元的解析による非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性評価について, 土木学会論文集 No.696/ -58, pp.99 ~ 110, 2002.
- 21) 有賀義明 : 断層変位に対するコンクリートダムの挙動の解析法に関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, 11-8, pp.690-697, 2007.
- 22) 有賀義明, 柏柳正之, 水橋雄太郎 : 進行波入力によるダムと基礎岩盤と断層連成系の三次元的解析法, 応用力学論文集 Vol.11, pp.633-640, 2008

STUDY ON SAFETY EVALUATION METHOD FOR DAM AGAINST VARIOUS KINDS OF SURFACER EARTHQUAKE FAULT

Yoshiaki ARIGA

The Shih-Kang Dam was damaged by the fault displacement during the 1999 Taiwan Chi-chi Earthquake. From such the historical cases, it is considered that the seismic safety evaluation against fault displacement induced by surface earthquake fault is an important subject for long and large structures. As for the mode of surface fault, normal fault, reverse fault, strike-slip fault, hinge fault, and so forth can be supposed. In order to realize an evaluation method against various kinds of fault displacement, I have devised the analysis method for discontinuous behaviors of concrete dams by applying 3-D dynamic analysis method. Applicability of the method proposed was examined by the analyses for concrete dam.