

断層変位に対するコンクリートダムの変動の 解析法に関する基礎的研究

有賀 義明¹

¹博 (工) 電源開発株式会社茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)
E-mail:yoshiaki_ariga@jpower.co.jp

1906 San Francisco地震では、San Andreas断層沿いに建設されていた、複数の既設ダムが断層変位によって地震被害を受けた。1999年台湾集集地震では、石岡ダムが大規模な断層変位によって決壊し、断層変位による地震被害の重要性が改めて認識された。本研究では、断層変位に対する長大構造物の耐震性能照査法の確立を目的に、接触面要素を活用した三次元解析モデルの境界条件や地震作用の入力方法を工夫することによって、断層変位に対する構造物の非連続的挙動を模擬するための三次元動的解析法を考案した。提案法の適用可能性を検討するためにコンクリートダムを想定した事例解析を行い、提案法によって断層変位に対するダムの非連続的な挙動を模擬することが可能であるとの結果が得られた。

Key Word : fault displacement, concrete dam, 3-D dynamic analysis, discontinuous behavior, fault-induced damage, seismic safety

1. はじめに

1906 San Francisco (1906.4/18, M8.3) 地震では、San Andreas 断層に沿って建設されていた、複数の既設ダムが断層変位によって地震被害を受けた¹⁾。これらの地震被害を契機に、米国では、古くから断層変位に対するダムの地震対策が考案され実施された。1999 年台湾集集地震 (1999.9/21, M7.6) では、地震に伴って出現した、相対変位約 7m の断層変位によって石岡ダム (コンクリート重力式、堤高 25m) が決壊した²⁾。

我が国では、建設前の地質調査で第四紀断層が分布していることが判明した場合には適地から除外されるようになっているため³⁾、事前に活断層の分布が分かっている地点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 San Francisco 地震や 1999 年台湾集集地震の実例を踏まえると、事前の調査では活断層の分布が認められなかった地点において、地震の結果として断層変位が出現する可能性は否定することができないものと考えられる。断層に対する既設ダムの耐震性能の評価を考える場合は、断層を震源断層と地震断層に分けて捉えるのが合理的であるように思われる。震源断層は、地震を繰り返し生み出す活断層であり、想定される地震動に対する耐震性能の評価として捉えることができる。地震断層は、地震の結果として派生する活断層であり、想定される地震動に対してのみならず、想定される断層変位に対しての性能照査が必要になるものと思われる。

このような必要性を考え、本研究では、ダム底面で断

表-1 断層変位による既設ダムの地震被害事例 ^{1), 2), 4), 5)}

名 称	所在地 建設年	形 式 堤 高	断層変位(実測値)と 地震被害概要
Upper Crystal Springs	米国 カリフォルニア 1878	アースフィル 23m	1906 San Francisco 地震 San Andreas 断層 水平変位 2.4m
Lower Howell	米国 カリフォルニア 1877	アースフィル 12m	1906 San Francisco 地震 San Andreas 断層 放水管 φ25cm の破壊
Upper Howell	米国 カリフォルニア 1878	アースフィル 11m	1906 San Francisco 地震 San Andreas 断層 基礎と堤体にクラック
Old San Andreas	米国 カリフォルニア 1875	アースフィル 8.5m	1906 San Francisco 地震 San Andreas 断層 水平変位 2.1m
石岡 Shih-kang	台湾 1977	コンクリート 重力式 25m	1999 台湾集集地震 鉛直相対変位 7m 堤体の決壊

層変位が発生した場合の耐震性能照査法の開発を目的として、三次元動的解析により断層変位に対するダムの非連続的挙動を模擬するための解析法について基礎的な検討を行った。

2. 断層変位による既設ダムの地震被害事例

地震時の断層変位による既設ダムの地震被害事例は、表-1に示したように、古くは、1906 San Francisco 地震の際に報告されている。1906 San Francisco 地震では、



図-1 台湾収集地震での石岡ダム地震被害事例¹⁾

San Andreas 断層の北部が約 450km に亘って右横ずれ変位（最大変位 6m）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）等で地震被害が発生した。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。台湾の石岡ダムは、コンクリート重力式ダムであり、堤高 25m、堤頂長 357m、洪水吐ゲート 18 門、排砂ゲート 2 門が設置されていたが、図-1 のように、右岸側の洪水吐 2 門の位置で約 7m の鉛直方向の相対変位が発生し、洪水吐を含めダム堤体が決壊した。

3. 断層変位に対するダムの地震対策事例

米国カリフォルニア州では、1906 San Francisco 地震での断層変位による既設ダムの地震被害を踏まえ、断層の直上に建設あるいは計画されたダムを対象に、断層変位に対する地震対策が 1930 年代から 1970 年にかけて、実施された。その概要は、表-2 に示すとおりである。Coyote ダム（アースフィル、堤高 43m）は、Calaveras 断層の分岐断層の直上に位置し、予測される断層変位量は水平変位 4.5m、鉛直変位 1.5m であった。このような予測変位量に対して、コア頂部の厚さを予測水平変位量の 4 倍に相当する 18m とする対策が講じられた。Monis ダム（重力式ダム、堤高 99m）は、San Andreas 断層と Sierra Madre 断層の中間部に位置し 0.9m の変位が予測されたが、断層の直上部に特殊なオープンジョイントを設置し、0.9m の走行方向の変位に追随できるような対策が実施された。Auburn ダム（アーチダム、堤高 213m）は、0.9m の断層変位が想定されたが、結果的には計画が放棄された。米国以外の地震対策事例としては、ニュージーランドの Clyde ダム（重力式ダム、堤高 102m）の事例が良く知られている。Clyde ダムでは、最大で水平変位 2m、鉛直変位 1m が予測され、1m の変位に追随可能な

表-2 断層変位に対するダムの地震対策事例^{4) ~12)}

名称	所在国 竣工年	形式 堤高	予測される断層変位 耐震対策法の概要
Coyote ⁵⁾	米国 1936	アースフィル 43m	予測水平変位水平 4.5m、 鉛直 1.5m、 コアの厚さ：頂部で 18m
Monis	米国 1934	コンクリート 重力式 99m	断層部にオープンジョイント 0.9m の走向方向変位対応
Palmdale	米国 1891 1967 改修	アースフィル 9.6m:旧 15.3m:新	予測横ずれ 6.1m 以上 予測鉛直変位：0.6m~0.9m センターコアを厚く変更
Cedar Springs	米国 1972	ロックフィル 76 m 原 102m	予測垂直変位 0.9~1.5m 外側のロックゾーンを 厚く変更
Auburn ⁶⁾	米国 (計画)	アーチ 213m	予測変位 0.9m 計画放棄
Los Angeles	米国 1977	アースフィル 39.6m	予測垂直変位 2.7m 変位追従型鉛直ドレーン
Clyde ⁷⁾	ニュージー ランド、 1969	コンクリート 重力式 102m	予測水平変位 2m、鉛直 1m 堤体にスリップジョイント
Seno	ギリシャ (計画)	アーチ 185m	断層変位伝搬防止対策 堤体に特殊ジョイント 最大 1m のズレに対応

特殊ジョイントを配置した地震対策が実施された。

これまでに実施された地震対策法を集約すると、フィルダムに関しては、断層変位によってズレが生じた場合でも遮水性が確保できるようにコアゾーンを非常に厚くした方法、コアに特別な細粒粘土を使用した方法、非粘着性の鉛直ドレーン層によって変位追従性を可能とした方法等が考案・採用されている。コンクリートダムに関しては、水平方向および鉛直方向の滑動、ジョイント面の開口に追随できるようなスリップ・ジョイント、オープン・ジョイント、特殊ジョイント等が考案・採用されている。こうした海外の地震対策事例では、想定される断層変位量が地質学・地質工学的に予測されていることが一つの特徴のように思われる。

4. 断層変位に対するコンクリートダムの挙動の解析法の提案

(1) 開発の趣旨

1999 年台湾集集地震の後、断層変位に対する地盤の変形や構造物の損傷等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、地震断層による地表の地盤変位の評価等に関して、応用要素法 (Applied Element Method)^{14), 15)}、弾塑性確率有限要素法 (Non-linear Stochastic Finite Element Method)^{16), 17)}、ラグランジアン・ポイント有限差分法 (Lagrangian Particle Finite Difference Method)¹⁸⁾等の解

析法が提案されている。

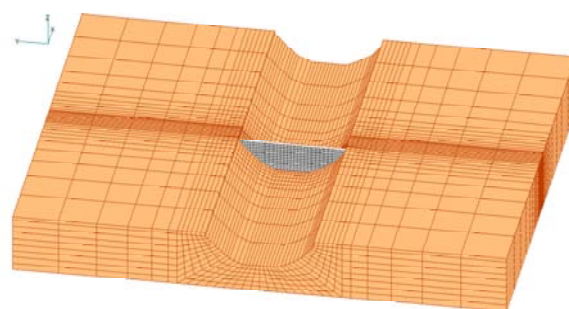
本研究では、コンクリートダムを解析対象として、石岡ダムの決壊事例に見られたような、ダム底面で断層変位が発生した場合のダムの挙動を模擬するための三次元的解析法を検討した。解析法の考案に際しては、①断層変位を強制変位として入力して解析する方法、②進行波解析を応用して、位相差を持った地震波を入力して解析する方法、③断層を挟んだ両サイドの入力基盤から異なる基盤加速度を入力して解析する方法の3種類の手法について検討した。これらの内、基盤加速度入力により解析する方法は、強制変位入力により解析する方法よりも、地震時の揺れによる基礎岩盤や構造物の破壊を考慮した解析が可能である点で適用性が広いのではないかと考察された。そこで、本論文では、③の方法、すなわち、ダム底面の直下に断層が分布すると仮定して、断層を挟んで、断層の片側半分の下方基盤から基盤加速度を入力し、断層の片側半分が自由に挙動できるような境界条件を設定して、断層変位に対するコンクリートダムの非連続的挙動を模擬する三次元的解析法について提案する。

(2) 提案法の概要

考案した解析法は、これまでに著者が開発してきた、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¹⁹⁾ (UNIVERSE)を基本にして、断層は接触面要素でモデル化し、三次元解析モデルの境界条件と加速度波の入力方法を工夫することによって、断層変位を模擬的に派生させて解析しようとするものである。

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－断層の連成系の三次元解析モデルの例を図-2に示す。図-2に示した解析モデルは、1993年釧路沖地震の際の実地震動データを用いて同定した糠平ダム²⁰⁾ (コンクリート重力式、堤高76m、堤頂長293m)の三次元解析モデル²¹⁾を基に修正して作成したものである。ダム堤体の直下に分布する断層は三次元接触面要素²²⁾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、ダム底面に沿うペリフェラル・ジョイントについてもモデル化している。それらの配置を模式的に示したものを図-3に示す。図-3では、ダム直下に分布する断層、コントラクション・ジョイント、ペリフェラル・ジョイントに分けて表示している。これは、基礎地盤と基礎地盤、コンクリートと基礎地盤、コンクリートとコンクリートなど、接触面の構成材料等に応じて、それぞれ動的物性値を設定することができるように考慮したものである。

地震動に対する耐震性評価を目的とした動的解析では、微小変形レベルの解析であるため、基礎岩盤の側方境界は粘性境界を設定するのが普通である。しかし、大規模



基礎岩盤の幅1335.0m、奥行き1094.4m、高さ162.0m

図-2 三次元的解析モデル (全体モデル)

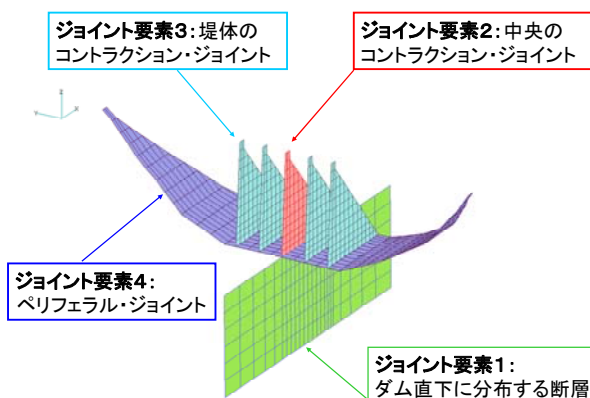


図-3 ダム直下の断層と堤体のジョイントの分布例

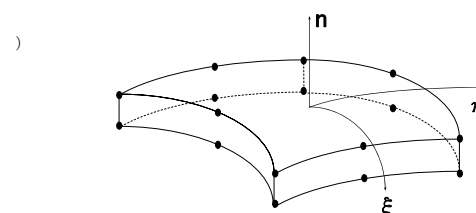


図-4 三次元接触面要素の構成

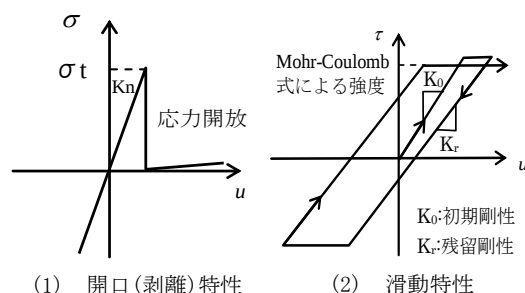


図-5 接触面要素の力学的特性

な断層変位に対する挙動を評価する際は、基礎岩盤の側方境界はローラー支持か自由端を設定することになるため、図-2では、境界条件の影響を少なくするために、ダム軸方向に1335m、上下流方向に1094.4m、鉛直方向に162mの範囲をモデル化している。図-3に示した、断層およびジョイントは、いずれも三次元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、そ

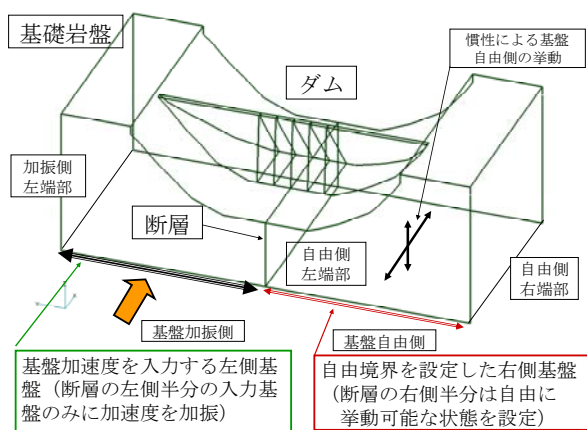


図-6 三次元解析モデルの境界条件と基盤加速度の入力法

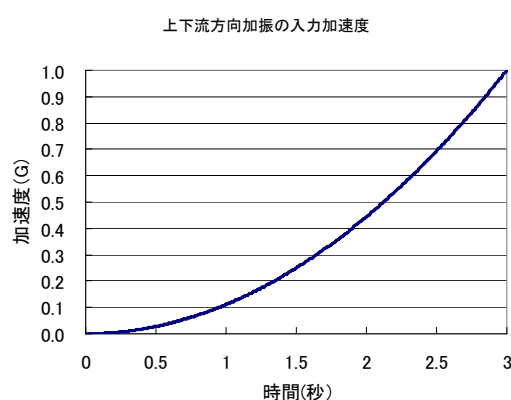


図-7 想定した基盤加速度波の例

れぞれ図-4 と図-5 に示すおりである²²⁾。この三次元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、強震時の接触面の開口（剥離）や滑動の考慮が可能である。いったん開口や滑動が生じた後の接触面の力学的特性については、図-5 に示したように残留強度特性を考慮している。

(3) 境界条件の設定と基盤加速度の入力方法

断層変位を生じさせるための工夫として、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境界は自由境界とし、解析モデルの左側半分の下方基盤のみから加速度を入力する方法を考案した。解析モデルの下方基盤の左側半分（図-6 に示す基盤加振部）から基盤加速度を入力し三次元動的解析を実施することによって、解析モデルの右側半分（図-6 に示す基盤自由部）は、慣性によって変位挙動を示すことになる。その結果として、基盤加振部と基盤自由部の境界面に位置している断層部で非連続的な変位が発生し、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な挙動等を模擬的に解

析することが可能ではないかと考えた。

加速度入力に関しては、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有効ではないかとの考えから、ここでは、図-7 に示したような、下に凸の二次曲線で表現することができる基盤加速度波を仮定した。この入力波は、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。0 G で始まり 0 G で終わる普通の地震動を用いた場合は、断層面や堤体のジョイント面で開口や滑動が生じて、瞬間、瞬間で、開口が閉じたり、滑動の方向が変化したるため、一方向に変位が生じるような解析には効果的ではないと考えられることから、開口や滑動が評価しやすい方法のひとつとして、図-7 に示したような加速度入力波を設定した。

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る。もし、地質学等の面から断層で想定される変位量を事前に予測することが可能であれば、提案法を応用することにより、断層の予測変位量を再現させるための地震入力を逆解析的に設定することが可能ではないかと考えられる。断層変位量の事前予測が難しい場合には、サイン波、パルス波、ランダム波などの様々な波形や最大振幅を有する加速度入力を設定し、断層変位量が数 cm オーダーの場合、数十 cm オーダーの場合、あるいは、数 m オーダーの場合の変位挙動を解析しておくことにより、ダムの耐震性能を工学的に評価することが可能ではないかと考えられる。

5. 提案法を用いた事例解析

(1) 事例解析の目的

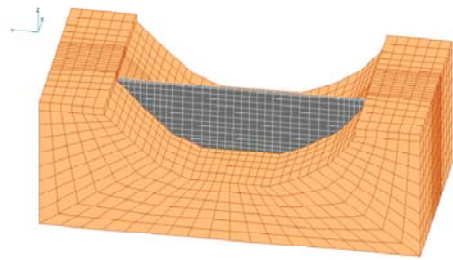
提案法によって、ダム直下に分布すると仮定した断層に変位を発生させることができるかどうか、また、断層変位に対するコンクリートダムの非連続的な挙動を模擬できるかどうかを検討するために、糠平ダムの解析モデルを修正した解析モデルを作成して事例解析を行った。

(2) 事例解析の三次元解析モデル

事例解析は、前出図-2 と図-3 に示した三次元モデルを使用した。図-2 に示した全体モデル図では、解析結果の表示が小さくなってしまったため、解析結果の出力表示は、注目すべきダム周辺の状況が理解しやすいように、図-8 に示した狭域モデル図に表示した。

(3) 解析用物性値

事例解析に用いた、ダムと基礎岩盤の動的物性値を



基礎岩盤の幅445.0m、奥行き218.88m、高さ162.0m

図-8 解析結果を表示するための狭域モデル

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

表-4 断層およびジョイントの動的物性値

ジョイントの分類	Kn N/mm ²	Ko N/mm ²	C N/mm ²	φ 度	Kr	C' N/mm ²	φ' 度	Hj %	σ _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

(備考：ジョイントの分類は図-3のジョイント要素1～4に対応)

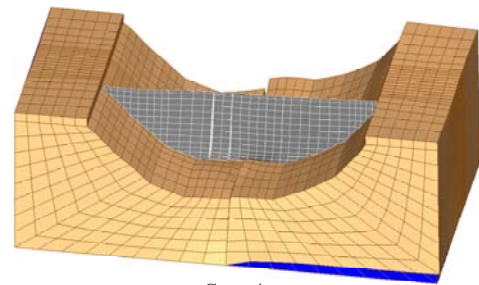
表-3 に示す。表-3 の物性値の内、動的せん断剛性と減衰定数は、1993 年釧路沖地震の際の糠平ダムの実地震時挙動の再現解析によって同定した値である²¹⁾。

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を表-4 に示す。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、σ_t 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-5 解析ケース

解析 Case	入力波の加振方向	接触面の物性値	基礎岩盤の側方と断層部の境界条件		
			条件	基盤加振側	基盤自由側
A	上下流方向	表-4の物性値	I	左端部のみローラー	右端部のみローラー
B	上下流方向	表-4の物性値	II	左端部のみローラー	右端部・左端部ローラー
C	鉛直方向	表-4の物性値	I	左端部のみローラー	右端部のみローラー
D	鉛直方向	表-4の物性値	II	左端部のみローラー	右端部・左端部ローラー

(基盤加振側、基盤自由側、左端部、右端部の位置は図-6に対応)

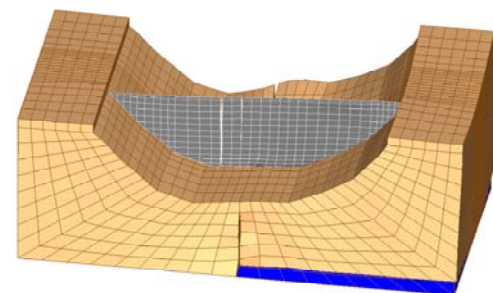


Case-A

(上下流方向加振、境界条件：I)

(変位倍率 2.0, ダム中央下部の最大相対変位 3.1m)

図-9 Case-A のダムの変位挙動の解析結果



Case-B

(上下流方向加振、境界条件：II)

(変位倍率 2.0, ダム中央下部の最大相対変位：0.18m)

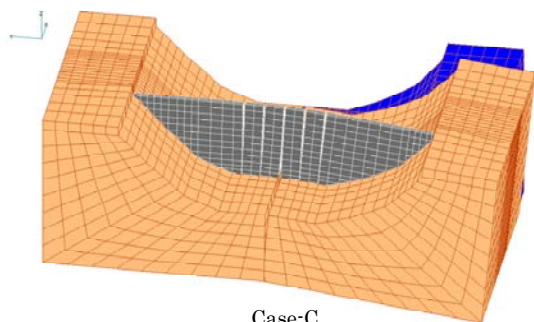
図-10 Case-B のダムの変位挙動の解析結果

(4) 比較解析ケース

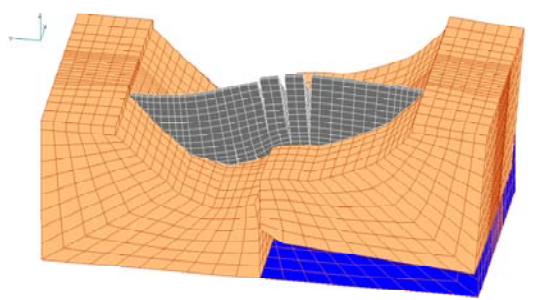
ここでは、比較解析の事例として、表-5 に示したように、基盤加速度入力に加振方向を 2 種類（水平上下流方向加振、鉛直方向加振）、解析モデルの境界条件を 2 種類想定した、4 つの解析ケースを紹介する。基礎岩盤の側方境界は、図-6 において、全体モデルの左右の側方境界の鉛直面をローラー支持とした場合(境界条件 I)と、基盤自由側の左端部の境界面をローラー支持に設定した場合(境界条件 II)の 2 種類を仮定した。

(5) 解析結果

表-5 に示した 4 つの解析ケース (Case-A～Case-D) に関して、ダムと基礎岩盤の変位挙動の解析結果を図-9



Case-C
(鉛直方向加振、境界条件：I)
(変位倍率 0.5, ダム中央下部の最大相対変位 1.1m)
図-11 Case-Cのダムの変位挙動の解析結果



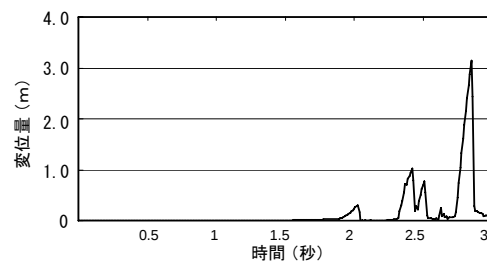
Case-D
(鉛直方向加振、境界条件：II)
(変位倍率 0.5, ダム中央下部の最大相対変位：2.4m)
図-12 Case-Dのダムの変位挙動の解析結果

から図-12 に、同様に、ダム中央のジョイント面下部での相対変位時刻歴を図-13 から図-16 に示す。

図-9 は、断層を接触面要素でモデル化し、水平上下流方向に基盤加速度入力した際の最大変位挙動の状況を示す。この Case-A では、図-13 に示したように、ダム中央のジョイント面での最大相対変位は 3.1m となった。

図-10 は、断層面の片面にローラー支持を設定し、水平上下流方向に入力加振した際の最大変位挙動の状況である。Case-B では、ダム中央のジョイント面での最大相対変位は、図-14 に示したように 0.18m となった。図-11 は、断層を接触面要素でモデル化し、鉛直方向に入力加振した際の最大変位挙動の状況であり、ダム中央のジョイントでの最大相対変位は 1.0m となった。図-12 は、断層面の片面にローラー支持を設定して鉛直方向に入力加振した際の結果であり、ダム中央のジョイント面での最大相対変位は 2.4m となった。

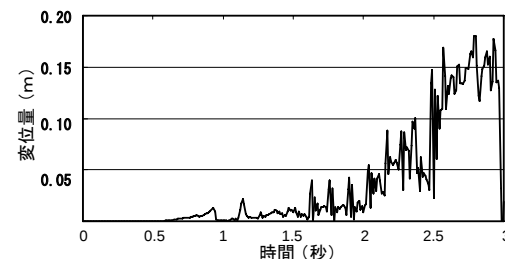
図-15 は、Case-C でのダム中央のジョイント面での相対変位時刻歴である。図-15 では、ダム中央のジョイント面の最大相対変位は 2.7 秒付近に現われており、最終の残留変位量は約 0.8m であった。図-15 に示した相対変位時刻歴には細かな起伏が乗っているが、これについては、接触面要素で剥離・滑動が発生した際の剥離・滑動



Case-A (上下流方向加振、境界条件：I)

(ジョイント面の上下流方向の相対変位)

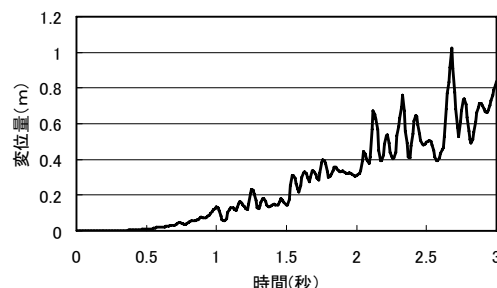
図-13 Case-Aのダム中央下部の相対変位時刻歴



Case-B (上下流方向加振、境界条件：II)

(ジョイント面の上下流方向の相対変位)

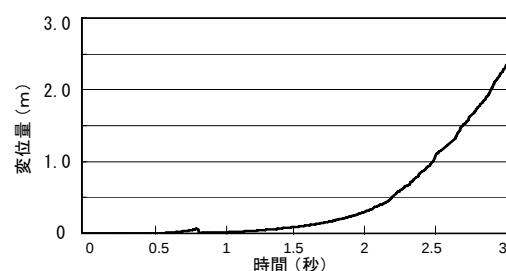
図-14 Case-Bのダム中央下部の相対変位時刻歴



Case-C (鉛直方向加振、境界条件：I)

(ジョイント面の鉛直方向の相対変位)

図-15 Case-Cのダム中央下部の相対変位時刻歴



Case-D (上下流方向加振、境界条件：II)

(ジョイント面の鉛直方向の相対変位)

図-16 Case-Dのダム中央下部の相対変位時刻歴

の繰り返しの影響によるものではないかと考えられる。

図-16 は、Case-D でのダム中央のジョイント面での相対変位時刻歴であるが、Case-D では、相対変位時刻歴は、基盤加速度波に類似したスムーズな波形となっている。断層面のモデル化と解析条件の設定については、断層面を三次元接触面要素でモデル化する方法と、断層面にロ

表-6 ダム中央のジョイント面の下部での最大相対変位

解析 Case	ダム中央の底部での 相対変位の最大値(m)	岩盤の相対変位1m当りの ダムの相対変位(m)
A	3.1 m	0.25 m
B	0.18 m	0.05 m
C	1.1 m	1.10 m
D	2.4 m	0.08 m

ローラー支持を設定する方法について比較解析を行ったが、想定される断層変位が大きい場合は三次元接触面要素で断層をモデル化する方法が、想定される断層変位が小さい場合は、断層面にローラー支持を設定する方法が比較的適しているのではないかと考えられる。表-6 は、各解析ケースでの、ダム中央のジョイント下端における最大相対変位の値を集約したものである。表-6 には、基礎岩盤の最大変位 1m 当りのダム中央のジョイントの最大相対変位量を参考に付記した。ここで言う基礎岩盤の最大変位は、断層面での最大変位量ではなく、基盤自由部（図-6 に示した右半分の基礎岩盤部）の原位置に対する変位量である。

6. 考察

本研究では、断層変位に対するダムの耐震性能照査法の確立を目的に、ダム－ジョイント－基礎地盤－貯水池連成系の三次元動的解析法を応用して、断層変位に対するダムの非連続的挙動を解析するための三次元解析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想定し、断層を接触面要素でモデル化し、基礎岩盤の境界条件、基盤からの加速度入力波と入力方法を工夫することによって、断層変位が発生した場合のダムの非連続的挙動を解析する方法を考案した。提案法の適用可能性を検討するために、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、ダム底面で断層変位が発生した場合のダム堤体の非連続的挙動を模擬することが可能であるとの基礎的結果を得ることができた。基盤加速度を水平上下流方向に入力した場合は、水平方向の変位が卓越する断層変位を模擬することが可能であり、横ずれ断層を想定した解析に適していると考えられる。また、基盤加速度を鉛直方向に入力した場合は、鉛直方向の変位が卓越する断層変位を模擬することが可能であり、正断層、逆断層を想定した解析に適していると考えられる。今回の事例解析では、動的解析によって断層変位を模擬する点に主眼を置いて、3 秒間で 1 G になる基盤加速度波を仮定した。このような基盤加速度波を用いた場合、ダム中央の

接触面での相対変位は、加振方向と境界条件等の条件によって変化するが、今回の事例解析では 0.18m～3.1m 程度の結果となった。基盤加速度波と断層変位の関連性および断層変位の特性に応じた加速度入力の設定法については、今後の検討と考えている。加速度入力に関しては、進行波解析を活用した方法も研究中であるが、非常に大きな地震動を仮定した進行波解析を行い、地震動が断層に到達した時刻の変位挙動状態を抽出することによって、ダムや基礎岩盤の非連続的挙動を模擬できる可能性があると考えられる。また、位相差入力という視点からは、断層を挟んだ解析モデルの左側半分と右側半分とで逆位相、あるいは異なる位相の加速度波を入力する方法も可能ではないかと考察される。

提案法は、基本は三次元動的解析であるので、地震動に対する性能評価と断層変位に対する性能評価を併せて行うことも可能であり、適用性は広いと思われる。提案法に関しては、既設ダムをモデル化した事例解析によって、ダム底部で断層変位が発生した場合のコンクリートダムの変位挙動を解析することが可能であることを示す結果を得ることができた。今後の課題としては、提案法の妥当性の検討、断層面およびジョイント面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、基盤加速度波の周波数や振幅の設定法、基盤加速度波の特性と断層変位量との関連性、接触面の相対変位時刻歴に見られる振動成分の原因の分析等と考えており、今後、更に検討を深めたいと考えている。

7. おわりに

地震に伴って発生する断層変位に対する安全性の確認と確保は、ダム、堤防、護岸、トンネル、鉄道、道路等、様々な長大構造物に共通の課題であると考えられる。従来の活断層研究は、地震の発生や地震動予測を主目的にして、震源断層に着目した研究が中心であるように思われるが、地震時の断層変位に対する地盤－構造物系の安全性評価に関しては、地震の結果として顕在化する、地震断層に着目した研究も重要になるものと思われる。地震断層の変位量の予測が可能になれば、より合理的な地震対策法の考案と実施が可能になるのではないかとと思われる。

謝辞：解析ラン作業の実施に際しては、J P ビジネスサービスの浅賀裕之氏、依田昌宏氏の協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

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) 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
- 5) 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
- 6) Sherard J. L., L. S. Cluff and C. R. Allen : Potentially active faults in dam foundations, Geotechnique 24, No.3, pp.367-428, 1974
- 7) Bennett J.H. : Crustal movement on the foothills fault system near Auburn, California Geology, pp.177-182, August, 1978
- 8) 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
- 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) 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
- 14) 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.
- 15) Ramancharla P. K. and K. Meguro : Non-linear static modeling of Dip-Slip faults for studying ground surface deformation using Applied Element Method, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.19, No.2, pp.169-178, 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) Hori M., T. Ichimura and H. Nakagawa : Analysis methods of stochastic model : Application to strong motion and fault problems, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.20, No.2, 105s-118s, 2003
- 18) 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
- 19) 有賀義明 : 三次元再現解析によるダムの動的変形特性の定量的評価に関する研究, 埼玉大学学位論文, 2001. 3
- 20) Ariga Y., S. Tsunoda, H. Asaka : Determination of dynamic properties of existing concrete gravity dam based on actual earthquake motions, 12th World conference on earthquake engineering, No.0334, p1-8, 2000
- 21) 有賀義明, 曹曹延, 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
- 22) 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動的解析に関する研究, 土木学会論文集 No. 759/I-67, pp. 53-67, 2004

(2007. 4. 6. 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON ANALYSIS METHOD FOR BEHAVIOR OF CONCRETE DAM AGAINST FAULT DISPLACEMENT

Yoshiaki ARIGA

Several dams constructed along the San Andreas Fault were damaged by the fault displacement during the 1906 San Francisco Earthquake. And, the Shih-Kang Dam was destroyed by the fault displacement during the 1999 Taiwan Chi-chi Earthquake. In regard to the seismic safety evaluation against strong earthquake motions, the analysis methods have been practically developed, however the analysis method for evaluating the safety against fault displacement has not been established yet. In order to realize an evaluation method against fault displacement, I have devised the analysis method for discontinuous behaviors of concrete dams by applying 3-D dynamic analysis method for coupled dam-joint-foundation reservoir system. The applicability of the proposed method was examined by the analyses for concrete dam..