進行波入力によるダムと基礎岩盤と断層連成系の 三次元動的解析法

3-D dynamic analysis method for coupled dam-foundation –fault system by utilizing progressive wave analysis

有賀義明* ・ 柏柳正之**・水橋雄太郎** Yoshiaki Ariga, Masayuki Kashiwayanagi and Yutaro Mizuhashi

*フェロー会員 博(工) 弘前大学教授 大学院理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3) **正会員 電源開発(株) 水力エンジニアリング部調査役 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

Seismic safety evaluation against fault displacement induced by surface earthquake fault is an important subject for long and large structures. However, a method for evaluating seismic safety against surface fault displacement has not been established yet. Therefore, we have studied and devised a 3-D dynamic analysis method for evaluating discontinuous behaviors of dam and surface earthquake fault by applying progressive wave analysis. And, in order to examine an applicability of the method proposed, we have made 3-D dynamic analyses in regard to the discontinuous behaviors of concrete gravity dam against surface fault displacement. It can be concluded that the method proposed is effective for evaluating discontinuous behaviors of the coupled dam-foundation-surface earthquake fault system. The proposed method can be broadly applied for various kinds of structure-foundation rock-fault system.

Key Words: 3-D dynamic analysis, fault displacement, discontinuous behavior, progressive wave analysis

キーワード:三次元動的解析、断層変位、非連続的挙動、進行波解析

1. はじめに

大地震に付随して地表に出現した地震断層によるダム の被害事例としては,古くは,1906 San Francisco 地震 (1906.4/18, M8.3)の際に 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被災し た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)の際の石岡ダム(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.米国では,1906 San Francisco 地震での被害事例 を教訓に1930年代から1970年代にかけて地表の地震断 層に対するダムの対策が行われた.我が国では,特に, 1999年台湾集集地震の被害事例を契機として,断層変位 に対する既設構造物の安全性評価や対策方法に関する研 究が実施されるようになっている.

我が国では、ダムの建設に際して、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ダ ム建設の適地から除外さ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地点にダムを建設す ることはないが、1906 San Francisco 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に付随して 結果的に地表に地震断層が出現する可能性があると想定 される.これらの事項を踏まえ、本研究では、地表に出 現した地震断層に対する長大構造物の安全性評価法の確 立を目的として、構造物と基礎地盤と断層の連成系の三 次元動的解析法について研究した.そして、コンクリー トダムを事例対象として進行波入力による三次元動的解 析を行い、提案法の適用可能性について検討した.

2. 地表地震断層による既設ダムの被害事例

1906 San Francisco 地震の際に San Andreas 断層の北部 が約 450km にわたり右横ずれ変位(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)等のダムで被害が 発生し^{4),5),6)}, Upper Crystal Springs ダムでは, 2.4m の水 平変位, 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 隆起した結果, 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一緒に破壊した.石岡ダムは,その 後,破壊した洪水吐2門を"1999.9.21 地震"の記念碑 として当時のままに残しつつ修復が行われ,現在は,以 前同様に上水・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.

米国カリフォルニア州では, 1906 San Francisco 地震で のダムの地震被害を踏まえ,断層変位に対するダムの地 震対策がこれまでに複数例実施されている^{7),8),9),10)}.米 国以外の対策事例としては,ニュージランドの Clyde ダ ム(重力式ダム,堤高 102m)の事例等が知られている. 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特殊ジョイントを配置した 対策が実施された¹¹⁾.

進行波入力によるダムと断層の連成挙動を 評価するための三次元動的解析法の検討

3.1 研究目的

ダムと断層の関連性を検討する際,活断層を地震断層 と震源断層とに分けて考えること,すなわち,地震断層 は地震の際に活動した断層,震源断層は自らが地震を発 生する断層として考えることが有用であると思われる. ダム地点については,建設前の調査で活断層の分布が判 明した場合には適地から除外されるため,ダムサイトに 震源断層が分布することは通常は想定されない.しかし, 大地震に基礎岩盤が変位挙動を示し,その結果として, ダム底面で地震断層が発生する可能性はあり得るものと 想定される.このような観点から,本研究では,大地震 の際に発生するかも知れない,地震断層を主対象として, ダムと基礎岩盤と断層の連成挙動を評価するための三次 元動的解析法について研究した.

1995 年兵庫県南部地震や 1999 年台湾集集地震の後, 地表に出現する地震断層に対する地盤の変形や構造物の 損傷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^{12),13)},弾塑性確率有限要素法^{14),15)}, ラグランジアン・ポイント有限差分法¹⁶⁾等の解析法が提 案されている.既往の研究事例では,断層変位を強制変 位入力によって評価する手法等が報告されているが,本 研究では,地震動の位相差入力によって破壊形態を評価 するための解析法を開発するために,接触面要素と進行 波入力を活用することによりダムと断層の非連続的挙動 を評価するための三次元動的解析法を検討した.提案法 は,三次元動的解析法を基本としているので、非常に強 い地震動による基礎岩盤の破壊,基礎岩盤の破壊に伴う 断層の変位挙動,そして断層の変位挙動に対する構造物 の損傷や破壊等を統括的に解析することが可能であり適 用性が広いと考えられる.

3.2 基本とした三次元動的解析法

提案法は、これまでに著者等が実用化開発した、ダム -ジョイントー基礎地盤-貯水池連成系の三次元動的解 析法¹⁷⁾ (UNIVERSE)に進行波入力の機能を付加して開発 した.提案法の基礎とした三次元動的解析法は、ダムと 基礎岩盤の地震時相互作用、ダムに対する貯水池の振動 抑制効果、基礎岩盤の境界面から半無限自由地盤への波 動エネルギーの逸散、貯水池の底面および貯水池の上流 端での波動エネルギーの逸散、強震時の堤体材料および 地盤の非線形効果¹⁷⁾、ジョイントやクラックでの非連続 的挙動と応力解放効果¹⁸⁾等を適切に解析することがで きるように開発したものである。ダム-ジョイントー基 礎岩盤-貯水池連成系の典型的な三次元解析モデルの例 を図-1 に示す。



図-1 ダムージョイントー基礎岩盤-貯水池 連成系の三次元動的解析モデルの概念

3.3 進行波入力の方法

進行波入力は、図・2 に示したように、解析モデルの下 方基盤に対する入射角をαとし、地震波が一定の速度進 行しながら下方基盤に入射して行く入力法である. 地震 波の進行速度は、通常は、下方基盤直上の基礎岩盤の弾 性波速度から設定する.



地震波のせん断波速度 Vs は,基礎岩盤の動的せん断剛性 Gと密度 ρ を用いて,式(1)により算出する.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{1}$$

地震波の伝播の時間差は、式(2)により算出する.

$$\Delta t_n = \sum_{i=0}^n \frac{x_{i+1} - x_i}{V_{si} \cos \alpha} \tag{2}$$

ここに、Δtn は下方基盤の入射側の端から任意位置 n ま での伝播に必要な伝播時間、xi は下方基盤にある節点 i の座標値、Vsi は節点 i と節点 i+1 の間のせん断波速度 である.進行波入力では、地震波が一定の時間遅れで伝 播して行く状態を模擬することが可能であるため、実地 震時の波形やパルス的な波形を入力し、地震波が断層面 に到達した瞬間や断層面で大きな変位挙動が発生した瞬 間等に着目することによって、断層変位に対するダムの 挙動を予測評価することが可能かどうかを事例解析によ って検討した.

3.4 断層とジョイントのモデル化

基礎岩盤内に分布する断層,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クラックの発生を防ぐために堤体内に設けられるジョイント),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)は、三次元接触面要素¹⁸⁾を用いてモデル化する.三次元接触面要素の構成,開口および滑動に関する力学的特性は図-3 に示すとおりである.この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,滑動が生じた後の接触面の力学的特性については残留強度・変形特性を考慮することが可能である. 図中,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)を意味する.



図-3 三次元接触面要素の構成と力学的特性

4. 事例解析

4.1 解析目的

事例解析は,提案法の適用可能性を考察するために実施した.すなわち,ダムと基礎岩盤と断層の連成系の動的挙動解析を進行波入力により実施することによって、断層とダムの非連続的な挙動を模擬することができるかどうかを確認するために実施した。事例解析に用いる解析モデルに関しては,石岡ダムの事例を念頭に置いて,ダム底部に断層が鉛直に分布している状況を想定し,ダム,ダム堤体のジョイント,基礎岩盤および断層の連成モデルとして設定した.

4.2 ダムと基礎岩盤の解析モデル

事例解析に用いた、三次元解析モデルを図-4(全体モ デル)に示す.図-4に示した、コンクリート重力式ダム の解析モデルは、1993年釧路沖地震における実地震時挙 動の再現解析によって同定した既設ダムの解析モデル 17)を下地にして単純化して作成した.解析モデルの下地 になったダムは、堤高 76m、堤頂長 293m のコンクリート 重力式ダムであるが、この事例解析では、堤高100m、堤 頂長 386m に寸法を調整して作成した.解析モデルの左右 岸方向の側方境界は鉛直平面ローラー支持、上下流方向 の側方境界は自由境界とした.そのため、図-4に示した 全体モデルでは、側方境界の影響を緩和するために、左 右岸方向 1335m, 上下流方向 1094.4m, 鉛直方向 162m の 広範囲をモデル化した.下方境界は剛基盤を設定した. ダムと基礎岩盤はソリッド要素でモデル化し、貯水池は 空虚時を仮定した.解析結果を全体モデルに図示した場 合,ダム周辺部の出力表示が小さくなり判読し難くなる ため,解析結果の出力は,ダム堤体の変位挙動を分かり 易く表示するために図-5 に示した表示用モデルを用い て表示した.変位時刻歴の出力位置は、図-6に示した代 表節点を選定した.



4.3 断層と堤体ジョイントのモデル化

基礎岩盤の中央に分布する鉛直な断層,堤体内に分布 するコントラクション・ジョイントおよび堤体の底面に 沿って分布するペリフェラル・ジョイントの配置を図-7 に示す.これらの断層とジョイントは、いずれも図-3に 示した三次元接触面要素を用いてモデル化した. 堤体内 のコントラクション・ジョイントは、図-7 に示したよう に No.1 からNo.. 5までの5つの面を設定した.



図-5 解析結果を表示するための表示用モデル



図-6 変位時刻歴の代表出力節点



4.4 解析用物性值

事例解析に用いたダムと基礎岩盤の動的物性値を表-1 に示す. 表-1の物性値の内, 動的せん断剛性と減衰定数 は、1993年釧路沖地震における既設ダムの実地震時挙動 の三次元再現解析によって同定した値である17).動的せ ん断剛性は、ダム底部に対するダム天端の伝達関数のピ ーク周波数、特に、ダムの一次固有周波数に当たる周波

数に着目して地震観測結果と三次元動的解析結果が一致 するように同定したものであり、減衰定数は、ダム天端 での加速度時刻歴の最大振幅が地震観測結果と三次元動 的解析結果が一致するように同定したものである.動的 せん断剛性を同定するために、ダムで観測された伝達関 数に着目した理由は、伝達関数のピーク周波数の値は減 衰定数の値にはほとんど依存しないが、動的せん断剛性 の値のは直接的に支配されることによる.また、減衰定 数を同定するために、ダムで観測された加速度時刻歴の 振幅に着目した理由は、加速度時刻歴の振幅は、減衰定 数の値によって支配的な影響を受けることによる.

表-1 ダムおよび基礎岩盤の解析用物性値

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-2 断層およびジョイントの解析用物性値

断 層 ジョイント	Kn kN/mm²	Ko kN/mm²	${C \over N/mm^2}$	φ deg.	Hj %	σt N/mm²
断層	243	121	0.	45	5	0.01
コントラクション・シ゛ョイント	264	132	0	45	5	0.01
ペリフェラル・ジョイント	243	121	4.5	45	5	3.00
残留強度変形特性: Kr = 1.0, C'=0, ϕ'= 45度						

場体ジョイントの動的物性値は表-2のように仮定し た. 図-7 および表-2 で接触面を断層とコントラクショ ン・ジョイントとペリフェラル・ジョイントの3種類に 分けているいるが、これは、基礎岩盤と基礎岩盤、コン クリートと基礎岩盤, コンクリートとコンクリート等, 接触面の構成材料や状況に応じて、動的物性値を個々に 設定できるように考慮したためである. なお,本事例解 析では、接触面の状況は、特殊な噛み合わせは想定せず、 接触面が滑動や剥離等の非連続的挙動を最も生じやすい 条件として、平らな平面と平面が接触している状況を仮 定して、物性値を仮定した.

表-2 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, σt 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 の際に派生す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.コ ントラクション・ジョイントについては、コンクリート 面とコンクリート面が単純に接触している状態を想定し て、非連続的挙動を考える場合に安全サイドの値となる せん断強度と初期引張強度を仮定した.ペリフェラル・ ジョイントについては、コンクリートと基礎岩盤が付着 している状態を想定して初期せん断強度 4.5 N/nm²、初 期引張強度 3.0 N/mm²を仮定した.

4.5 入力波形

入力波の波形は、図-8 に示した、周期 0.3 秒,加速度 振幅 0gal~1000gal のサイン波と、図-9 に示した、1995 年兵庫県南部地震の際に一庫ダムで観測された一庫波を 用いた.サイン波については、パルス波を模擬するため に図-8 に示した波形を設定した.サイン波の周波数は、 対象ダムの一次固有周波数を考慮して 3.3Hz とした.



図-8 サイン波形(最大 1000gal, 周期 0.3 秒)

ー庫ダムの底部通廊で観測された上下流方向の最大加 速度は182.1galであるが、ここでの事例解析では、兵庫 県南部地震の震源域でのダム地点の最大加速度の推定結 果²⁰⁾を参考に、この地震動を250galに調整して使用し た.サイン波については、継続時間を1秒間として、図-8 に示した波形(0~0.3秒はパルス的なサイン波、0.3秒 ~1.0秒は0gal)を入力した.入射角αは0度とし、地 震波が下方基盤を水平方向に伝播する状況を想定した.



表-3 解析ケース					
名 称	入力波形	最大加速度	周波数		
Case-1	サイン波	1000gal	3.3Hz		
Case-2	一庫波	250gal	3~6Hz		

4.6 解析ケース

解析ケースは、表-3 に示したように、入力波形にサイン 波と実地震波を用いて 2 つの解析ケースを設定した.

4.7 解析結果

(1) サイン波入力時の解析結果

図-8 に示したサイン波形を下方基盤の左端から右端 に向けて進行波入力した時の解析結果として,堤体中央 の No.3 ジョイントの変位差が最大となった瞬間の変位 状態を図-10 に示す. この瞬間での No.3 ジョイントで のジョイント面とジョイント面の上下流方向の変位差 (相対変位)は1.56cm であった.





地震動:サイン波 上下流方向のジョイント面の変位差:1.56cm

図-10 サイン波形を入力した際の変位状態

サイン波形の継続時間1秒間のコントラクション・ジ ョイントの変位差時刻歴における、上下流方向のピーク の滑動変位量(片振幅)No.2 ジョイントで1.18cm, 鉛直方 向の滑動変位量は No.3 ジョイントで 0.74cm, 左右岸方 向の開口変位量は No.3 ジョイントで 1.31cm であった. このサイン波入力では、1000gal の最大加速度を仮定し パルス波的な波形を工夫して解析を行ったが、ジョイン ト面で生じた変位量は最大で 0.74cm~1.31cm であった. なお,+1000gal~-1000gal で振動する普通のサイン波を 入力した場合は,変位量は最大で 0.02~0.08cm であった. 1000gal という大きな加速度を仮定したにもかかわらず, あまり大きな変位挙動が現れなかった要因としては、サ イン波形の周期が 0.3 秒と比較的短周期であったこと、 進行波の伝播速度を基礎岩盤のせん断波速度から 2060m/s としたことが考えられる. サイン波の周期を長 周期に設定した場合,進行波の伝播速度を遅く仮定した 場合は、基礎岩盤およびダムの動的応答が大きくなると 想定されるため、より大きな変位挙動を模擬することが

可能であると考察される.次に、サイン波入力時の主要 な節点での変位時刻歴を図-11に示す.図-11は、ダムの 底面と同じ標高の節点を選び、サイン波が基礎岩盤を伝 播して行く際の節点での変位応答を比較するために図化 したものであるが、この図より、各節点の変位応答に時 間差が現れていることを理解することができる.図-11 に示した変位時刻歴の最大値は、節点 6744 で 32.23cm であった.



(2) 一庫波 250gal 入力時の解析結果

最大加速度を 250gal に調整した一庫波を下方基盤の 左端から進行波入力した時の解析結果として,堤体中央 の No.3 ジョイントでの変位差が最大値を示した瞬間の 変位状態を図-12 に示す.



図-14 一庫波入力時の 0~10 秒間の変位時刻歴

この瞬間の堤体中央の No.3 ジョイントの上下流方向 の変位差(ジョイント面とジョイント面の相対変位)は 0.36cm であった. 地震波の全時刻を通しての堤体ジョイ ントの変位差時刻歴において、上下流方向の滑動変位量 の最大値は No.1 ジョイントで 0.19cm, 鉛直方向の滑動 変位量の最大値は No.3 ジョイントで 0.17cm, 左右岸方 向の開口変位量の最大値は No.5 ジョイントで 0.18cm で あった. 図-12は、時刻 8.01 秒での変位状態である. こ の図では、地震動によって基礎岩盤内の断層が変位挙動 を起こし、断層の変位挙動に連動してダム堤体のジョイ ントで非連続的な変位挙動が派生した状態を見て取るこ とが可能であると考えられる.なお、ダム地点に関して は、活断層が存在する地点にはダムを建設しないのが基 本的な原則となっているので,ダムサイトに震源断層が 存在することは通常は想定されない.しかし、大地震の 際に地震作用によって基礎岩盤が変位挙動を起こし、そ の結果として、ダム底面に地震断層が出現する可能性は 否定することはできないと思われる.

時間差を持った地震波を入力し、断層とダムに変位挙 動が発生した瞬間に着目することによって断層とダムの 変位挙動を模擬することが可能かどうかの検討がここで の着目点のひとつであるが、この結果から、進行波入力 を活用した三次元動的解析によって、地表地震断層とダ ムの連成を考慮した非連続的な変形挙動の模擬が可能で あると考察される. 地震波が伝播していく際の代表的な 節点(節点位置は図-11 参照)の変位時刻歴に関して、 一庫波入力時の 0~0.5 秒間の変位時刻歴を図-13 に,0 ~10 秒間の変位時刻歴を図-14 に示す. 図-13 は、地震 波が到達して来た時の立ち上がりの部分を拡大して表示 したものであり、各節点での変位応答が時間差を持って いることが分かる. 図-14 は、10 秒間の変位時刻歴であ る. ダム軸方向と鉛直方向の変位時刻歴は、上下流方向 の水平入力に伴って派生した変位成分であり振幅は非常 に小さい. 全時刻を通じての上下流方向の変位応答の最 大値は節点 13920 で 3.0cm であった.

(3) コントラクション・ジョイントの変位量

図-7 に示した, No.1 から No.5 のコントラクション・ ジョイントの非連続的な変位量をまとめて表-4 に示す.

項	目	堤体のジョイント面での変位量 (cm)				
入力地震動	変位成分	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
サイン波 1000gal 周期0.3秒	上下流方 向滑動量	0. 82	1. 18	0. 29	0.13	0.31
	鉛直方向 滑動量	0.40	0.40	0.74	0.64	0.64
	開口量	1.22	1.28	1.31	1.15	1.30
一庫波 250ga1入力	上下流方 向滑動量	0. 20	0. 16	0.05	0. 05	0. 05
	鉛直方向 滑動量	0.13	0. 15	0.17	0. 10	0. 11
	開口量	0.09	0.09	0.11	0.15	0.18

表-4 全時刻を通じてのジョイント面の変位量

コントラクション・ジョイントでの上下流方向の最大滑 動量は 1.18cm,最大開口量は 1.31cm であった.

ー庫波 250gal 入力に対する上下流方向の最大滑動量 は 0.20cm,最大開口量は 0.18cm であった.高さ 100m の コンクリート重力式ダムに最大加速度 250gal の一庫波 が作用した場合,堤体には引張応力が発生するため,瞬 間的ではあるがジョイント面で軽微な剥離・滑動が発生 することを想定することが可能であると考察される.

5. まとめと考察

・地表地震断層の変位に対する安全性評価法の確立を目的に、ダムージョイントー基礎地盤ー貯水池連成系の三次元動的解析法に進行波入力の機能を付加することにより、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動的解析法を考案した。

・提案法は、断層と堤体のジョイントを三次元接触面要 素でモデル化し、地震波を進行波入力することにより、 地震波が断層面に到達した瞬間の変位状態等に着目して、 断層とダムの非連続的な変位挙動を解析するための三次 元動的解析法である.

・提案法の適用可能性を検討するために、ダム底面に断 層が分布している場合を仮定し、1993年釧路沖地震の際 の実地震時挙動の再現解析で同定した糠平ダムの三次元 解析モデルを修正して用いて事例解析を行った.

・事例解析の結果,提案法により,断層とダムの連動を 考慮した非連続的変形挙動を解析することが可能である と考えることができた.

・今後の課題としては、進行波の入射角αの影響、進行 波の伝播速度の影響、入力波形の影響、地表地震断層の 破壊速度の評価等が重要であると考察される.ここで言 う、地表地震断層の破壊速度は、地震断層の変位が生じ る際に、地震断層の変位が一瞬で出現するのか、数秒~ 十数秒で発生するのか、あるいは数分で発生するのか等、 地震断層の変位が発生する際の時間的な特性を表現する ために考えたものである.もし、地表地震断層の破壊速 度を実際の地震時の事例から定量的に評価することがで きれば、入力波の波形(パルス的な波形か、一般的な地 震波形か、それ以外の波形か等)と継続時間を実現象に 即して設定することが可能ではないかと考察される.

・今回の事例解析では、地震波の入射角αを0度とし地 震波が水平方向に伝播する場合を想定したが、入射角が 45度,90度等の場合の比較検討を行う予定である.また、 地震波の伝播速度は、基礎岩盤の動的せん断剛性と密度 から2060m/sと設定したが、伝播速度を遅く設定した場 合の方が時間差、位相差の影響が強調される可能性があ ると推察されるため、地震波の伝播速度の影響について 検討する予定である.

・台湾石岡ダムの周辺域では、1999年台湾集集地震の際
 に 100~500kine(cm/s)の速度があったと推定されてい

るが、こうした地表地盤の速度と地表地震断層の破壊速 度の関連性、地表地震断層の破壊を模擬するための地震 波の伝播速度との関連性等についての検討が必要ではな いかと考えられる.

・提案法は三次元動的解析法であるので,強震動に対す る耐震性能照査と断層変位に対する安全性評価を同時に 統合的に行うことが可能であり,広く様々な長大構造物 への活用が可能である.

6. あとがき

地表地震断層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、堤防等の河川構造物、道路、 鉄道、トンネル等の線状構造物など、広い空間に分布す る長大構造物とって大変重要な技術課題であると考えら れる.断層変位に対する既設構造物の性能照査の精緻化 と対策法の合理化を進めるためには、既存の地表地震断 層の分布、地表地震断層の出現予測、断層変位量の予測 等が必要と思われる.従来の活断層研究は、地震の発生 と地震動予測に着目した調査研究が多いと思われるが、 断層変位に着目した場合は、震源断層のみならず地震断 層に着目した研究が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、より合理的な評価と 対策の考案が可能になるものと考察される.

謝辞

三次元動的解析に係わるラン作業等の実施に際しては, (株)JP ビジネスサービスの浅賀裕之氏および依田昌宏 氏に多大なるご協力をいただきました.記して深謝の意 を表します.

参考文献

- 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., Chu, H.T., Angelier, J., Chan, Y. C.J., Hu, C., Lu, C. Y. and Rau, R. J. : Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw7.6 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

- 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) 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
- 9) 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
- 10) Seed, H. B., Makdisi, F. I. and Alba, P. D. : Performance of earth dams during earthquake, ASCE GT7, pp.967-994, July, 1978
- 11) Hatton, J. W., Black, J. C. and Foster, P. F. : New Zealand's Clyde Power Station, Water power & dam construction, pp.15-20, December, 1987
- 12) Meguro, K. and Ramancharla, P. K. : Nnmerical 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.
- 13) Ramancharla, P. K. and Meguro, K. : 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
- 14) 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
- 15) Hori M., Ichimura, T. and Nakagawa, H. : Analysis methods of stochastic model : Application to strong motion and fault problems, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.20, No.2, 105s-118s, 2003
- 16) Konagai, K. and Johansson, J. : Two dimensional Lagrangian Particle Finete Difference Method for modeling large soil deformation, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.18, No.2, 105s-110s, 2001
- 17)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, Vol29, 11-8, pp. 690-697, 2007.
- 18) 渡邉啓行,有賀義明,曹増延:三次元動的解析による 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/ I-58, pp. 99~110, 2002.
- 19) 有賀義明, 曹増延, 渡邉啓行: 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.
- 20)国土交通省:ダムの耐震性に関する評価検討委員会報 告書, 1996.11

(2008年4月14日受付)