

震源域における 6 次元地盤変位の 定量的評価の試み

小田僚子¹・大町達夫²・井上修作³

¹東京工業大学大学院理工学研究科 国際開発工学専攻 修士課程
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 14-9)

E-mail:oda@ide.titech.ac.jp

²東京工業大学大学院総合理工学研究科教授 人間環境システム専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-2)

E-mail:ohmachi@enveng.titech.ac.jp

³同上 教務職員 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-2)

E-mail:shusaku@enveng.titech.ac.jp

2000年鳥取県西部地震の際、震央近くの賀祥ダムでは最大加速度がダム上部で2000galを上回る強震記録を得たが、重力式コンクリートダムの本体は無被害であった。この強震記録を積分して変位を算出した結果、ダム上下での変位時刻歴は水平面上での軌跡が互いに系統的なずれを示すと同時に、地震後の残留変位量がプラムラインによる計測値と有意な差を示した。そこで現地調査結果をもとに、強震記録の修正を行うとともに、数値シミュレーションにより算定した震源域での地震時地盤変位の時刻歴と強震記録から算定されたダム上下での地震時変位時刻歴をもとに、ダム下部の強震計設置地点での6成分変位を定量的に評価した。

Key Words : 2000 Western Tottori earthquake, near-field, co-seismic displacement, 6 DOF ground motion.

1. はじめに

2000年10月6日13時30分ごろ、鳥取県西部地震が発生した。この地震は、気象庁マグニチュード(M_J)は7.3であったが、震源域に地表地震断層が認められなかった¹⁾ため、伏在断層による比較的大きな地震として注目された。一方、震央近くに位置する賀祥ダムでは、ダム上部で2051gal、下部で531galという大きな地震動加速度が観測された²⁾が、ダム本体には地震による損傷は特になかった。図-1に賀祥ダムの位置および2000年鳥取県西部地震の本震と余震の震央位置を示す。

大町ら(2002)は、2000年鳥取県西部地震の際、賀祥ダムのダムサイト直下に伏在する震源断層の断層運動によって、ダム基礎を含む地盤に永久変位が発生し、それが原因となって貯水位の急低下と、湖水のセイシュ現象が発生したことを、観測記録や測量などの実測値および数値シミュレーションをもとに論じた³⁾。その際、用いた強震記録はダム下部で

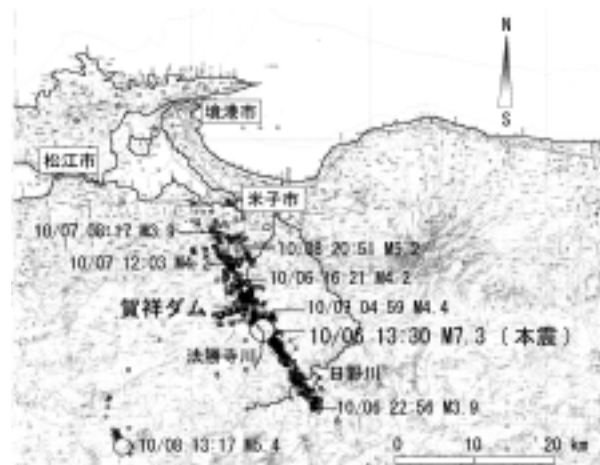


図-1 賀祥ダム及び2000年鳥取県西部地震の本震と余震の位置図

観測された記録のみであったが、本論文では、さらにダム上部での強震記録を加え、並進3成分と回転3成分の合計6成分の地震時地盤変位を、数値

シミュレーションによる検討を交えて算定する。ただし、その前段で、強震記録を積分して得られる変位波形がダムの上下で不可解な系統的なずれを示すことから、その原因が強震計の方位が不正確である可能性が高いことを指摘し、現地調査の結果に基づいて強震記録の修正を行う。

地震時の地盤変位や地盤ひずみについては、道路や鉄道など線状構造物や地中構造物の耐震性に密接に関連するなどの理由から、現地観測や室内実験、理論解析さらに数値解析などをもとに、多種多様な研究が実施されている(例えば、4)~6)。これら既往の地震工学的研究では、地盤変位として、直交座標系における並進成分について論じられることが多く、直交座標軸まわりの回転成分が扱われることは比較的まれであったが、近年、実測結果が報告⁷⁾されたり、新たな回転地震計⁸⁾や6成分地震計⁹⁾が提案されるなど、この分野の研究も進展の兆しがある。震源域では特に顕著な地盤変位が発生するため、地震時の6成分地盤変位の究明は工学的必要性も高いと思われるが、観測事例が少ないこともあり、既往の研究は限られている¹⁰⁾。6次元の変形を定量的に評価しておくことは、地下構造物の耐震性能を照査する上で必要な検討課題と考えられる。

2. 賀祥ダムにおける強震記録の解析

(1) ダムの概要¹¹⁾

賀祥ダムは、鳥取県西部を北流する日野川の支流法勝寺川に建設された多目的重力式コンクリートダムである。ダム基礎には全体として比較的堅硬な岩盤が分布し、設計施工時に特に問題となる断層などは認められていない。

賀祥ダムは、堤高 46.4m、堤頂長 174.0m、堤体積 86,600m³ で、1989年3月に竣工した。ダム下流面図を図-2に、標準断面図を図-3に示す。また図-4に示すように、ほぼダム軸中央の橋脚に隣接してエレベータシャフトが設置され、ダム頂から底部監査廊までのエレベータが装備されている。

このダムには、上下2ヶ所のコンクリート床に3成分強震計が設置されている。上部の設置位置はダム頂の上部エレベータ室(EL. 124.4m)であり、下部は底部監査廊内(EL. 87.0m)である(図-2参照)。強震計は明星電気(株)製GTA-53であり、分解能は24bit、サンプリングは100Hz、計測帯域はDC~41Hz(3dB)である。ダム軸の右岸方向方位はN110°Eであるが、文献12)によれば強震計水平2成分の設置方向は、ダムの上下2ヶ所とも、

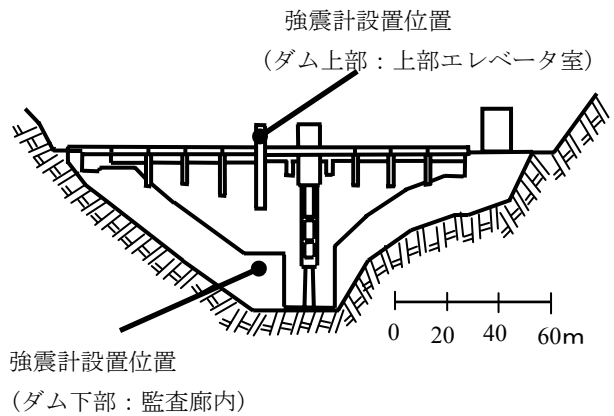


図-2 ダム下流面図および強震計設置位置

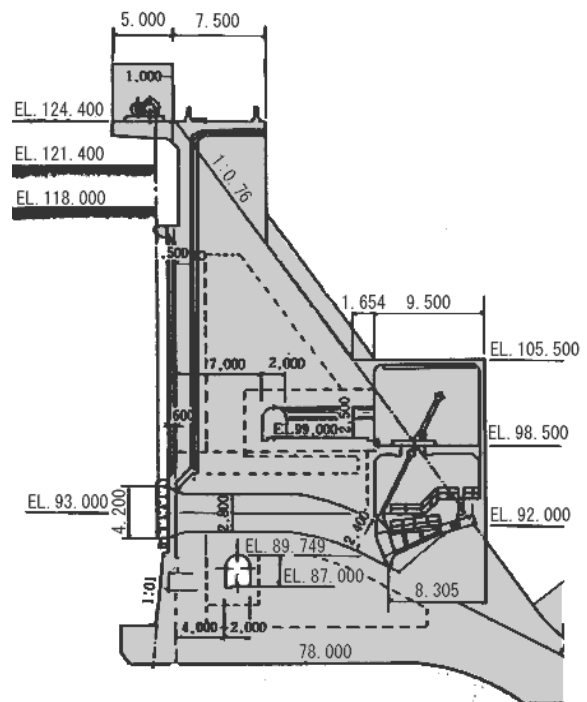


図-3 標準断面図



図-4 ダム頂とエレベータ塔の外観

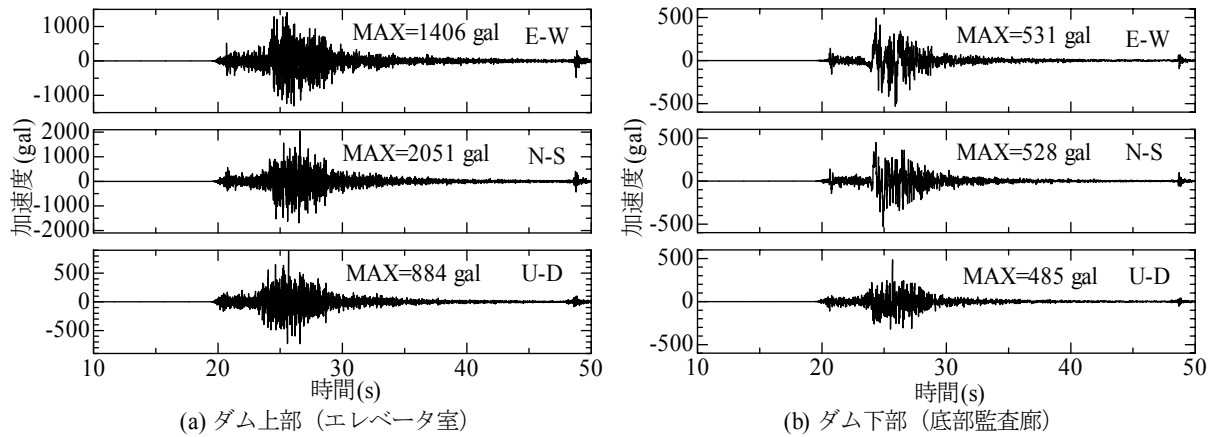


図-5 本震時の強震記録（時間軸原点は13時30分10秒を示す）

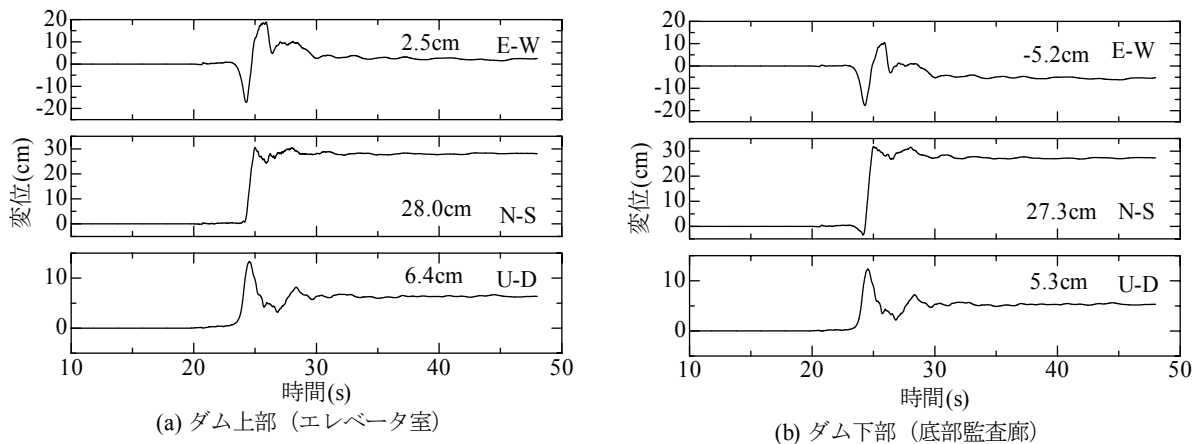


図-6 強震記録から算定されたダム上下の変位時刻歴

N-S方向とE-W方向である。

(2) 強震記録の積分による並進変位成分の算定

2000年鳥取県西部地震の本震の際、賀祥ダムの上下2ヶ所で観測された強震記録の時刻歴を図-5に示す。大町ら(2002)は、図-5(b)に示すダム下部の加速度強震記録を積分して変位時刻歴を算出した³⁾。その積分過程で、強震記録の基線(ゼロ線)補正を行った。同様の方法を図-5(a)に示すダム上部での強震記録に対しても適用したので、積分と基線補正の概要を、以下に記す。

主要動を含む強震記録の時刻 t_0 から t_3 までの継続時間を3区間に区分し、区分した時刻を順に t_1 および t_2 とする。ここに t_1 はP波初動が到達する時刻、 t_2 は本震による永久地盤変位が終息する時刻であり、これらは強震記録の3成分に共通とする。 t_1 は強震記録から容易に決定でき、その時刻直前での速度と変位はゼロとする。 t_2 は13時30分25秒から0.1秒ずつ移動させ、積分して得られる残留(永久)変位量が安定する時刻から、最適値

を試行錯誤的に決定する。図-5の強震記録では、 t_0 と t_3 をそれぞれ13時30分10秒と同48秒とし、 t_1 および t_2 として13時30分19.4秒と、同30秒をそれぞれ採用した。このように基線補正した時刻歴を、台形公式で積分して得た変位時刻歴を図-6に示す。

図-6によれば、本震時におけるダムの変位時刻歴は、3成分がそれぞれ特徴的な変動を示している。すなわちE-W成分は逆正弦波状、N-S成分はステップ状、U-D成分は単峰状の時刻歴を描いている。

本震後に残留した永久変位量は、ダム下部では北へ27.3cm、西へ5.2cm、上へ5.3cm、ダム上部では北へ28.0cm、東へ2.5cm、上へ6.4cmであり、両者には有意な差異がある。

図-6に示すダムの上部と下部の変位時刻歴から、下部に対する上部の相対変位の時刻歴を算定すれば図-7のようになる。各成分とも時刻 t_2 (13時30分30秒)以降は、相対変位はほぼ収束しているが、上部は下部に対してN-S成分で0.8cm、E-W成分で7.8cm、U-D成分で1.1cmの相対変位が残留してお

り、E-W成分の相対変位は、他成分に比べ約8倍大きい。

3. 強震記録の修正

(1) プラムラインによるダム上下の相対変位

賀祥ダムにはプラムライン（下げ振りたわみ計）が、強震計に併設されている。本装置は、ピアノ線の上端を上部エレベータ室のコンクリート床に固定し、下端に重錘を吊り下げて鉛直に垂らし、底部監査廊と中間部で水平相対変位（X-Y偏差）を電氣的に計測する方式であり、上端と下端の標高差は34.9mである。計測頻度は1～数回/日であるので、地震時の動的相対変位は検出できないが、地震前後におけるダム上下の相対変位を、直接的に高精度で検出するのに適している。

ダム上部におけるプラムライン設置位置の概略と、底部監査廊における鳥取県西部地震前後の計測結果を図-8に示す。これによれば、本震前に水位変動の影響で上下流方向へのわずかな変動を示しているが、本震前後で左岸方向（-X方向）へ0.28cm、上流方向（Y方向）へ0.07cmの有意な相対変位が生じている。これらの相対変位量は、前記の図-7に示された相対変位量とは明らかに異なっている。またプラムラインが示す値をダム上下の強震計位置に対応させると、左岸方向へ0.30cm、上流方向へ0.08cm、相対変位ベクトルは北から時計回りに268°の方向へ0.31cmとなる。

(2) 水平面上の地震時変位軌跡

図-6に示した、ダムの上下における変位時刻歴を用いて、水平面内での変位軌跡を描いてみると図-9が得られる。図中の矢印で示すように、ダムの上部と下部の変位軌跡はともに、まず西方向へ大きく変位した後、北東方向へ転じてさらに大きな変位を示しているが、両方の軌跡には互いに系統的なずれが認められる。このずれは、回転角度にして約17°に相当し、上部または下部の軌跡の一方を他方に対して回転させれば、両者を全時刻でほぼ重ねあわせることができる。コンクリートダムのような剛な構造物の上下37.4m間で、地震時に約17°の一定の回転ねじれが生じるとは考えにくいので、強震計の設置方位がずれている可能性が指摘される。

余震記録を用いて、同様に水平変位軌跡を描いても、本震記録の場合と同様のずれが認められた。最大余震（10月8日20時51分、M5.2）の記録を用いた場合の水平変位軌跡を、図-10(a)に示

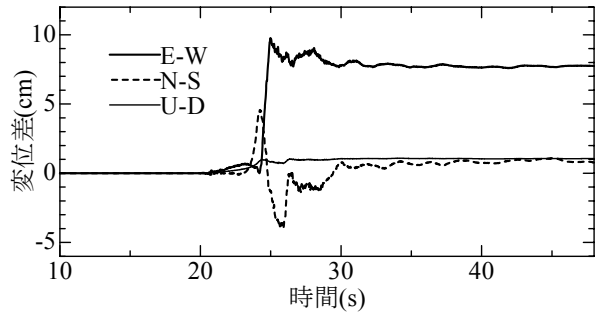


図-7 ダム上下における相対変位時刻歴

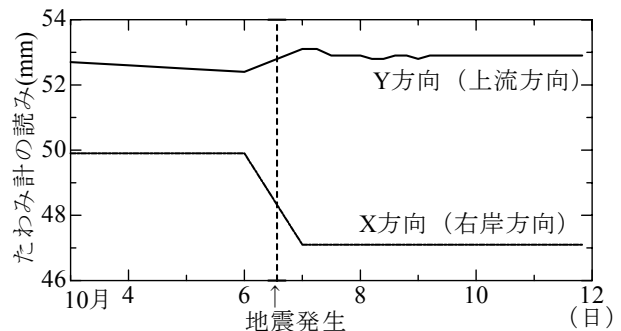
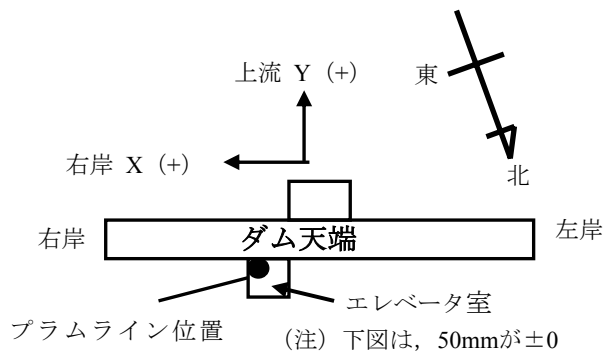


図-8 プラムラインの概略位置と計測結果

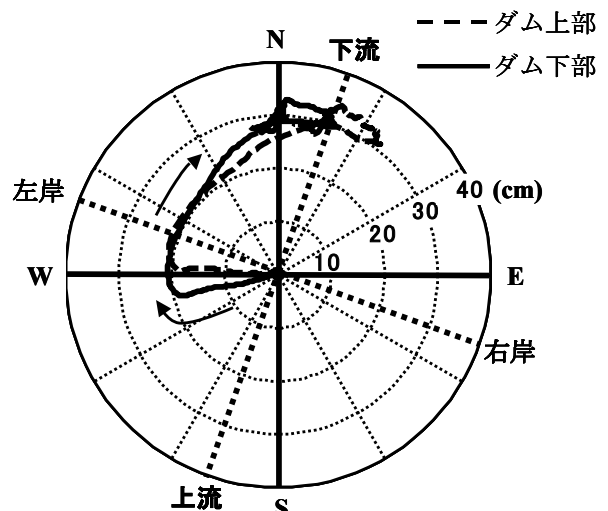


図-9 本震時の水平変位軌跡

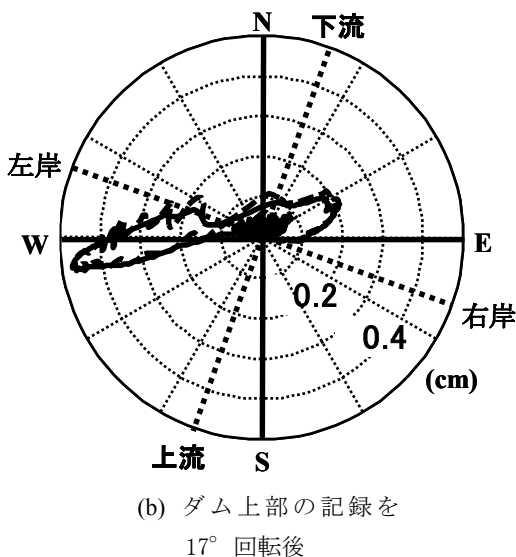
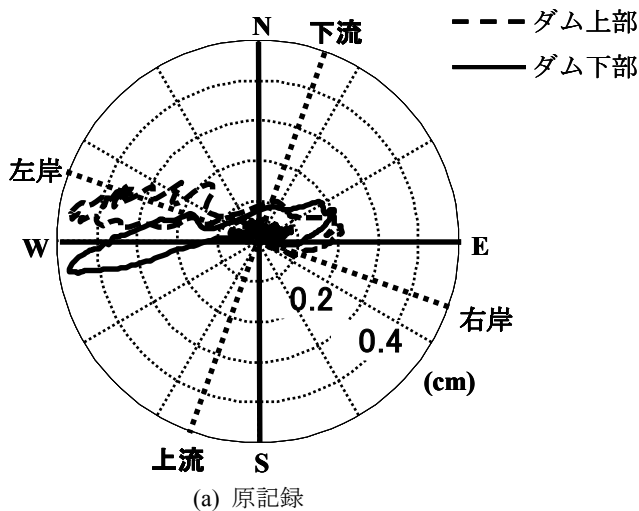


図-10 最大余震時の水平変位軌跡

す。最大余震記録は、最大加速度がダムの上で 131gal (E-W)，下部で 26gal (N-S) であり、本震のように顕著な永久変位を生じるような強震動ではない。また、図-10(a)のダム上部の最大変位後の軌跡には、下部の軌跡には認められない数個の小さな山谷状の起伏が認められる。これらの起伏は、上下流方向へ卓越したダムの変位応答に対応すると推察される。そのため、この山谷状の起伏が上下流方向に一致するよう地震動の補正を行うと、ダム上部の軌跡を反時計方向に約 17° 回転することになり、同図(b)ようになる。

(3) 強震記録の補正

上記のように、ダム上部の強震計の方位が回転ずれを起こしている可能性が高いと推察されたので、現地調査を実施すると共に、関係者に方位測量を依頼した。その結果、強震計の南北方位は、ダム下部

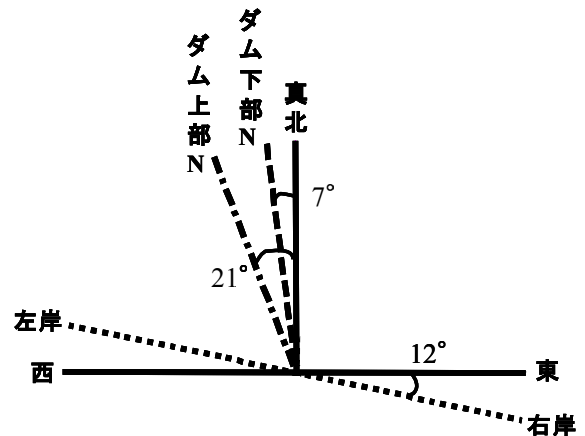


図-11 現地調査結果より判明した
賀祥ダムの強震計設置方位

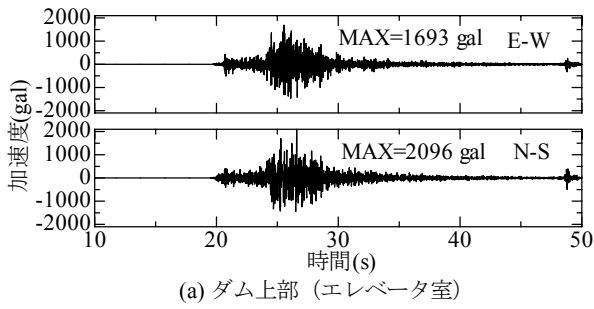
(底部監査廊)ではダム軸(右岸)方向から約 109°，ダム上部(エレベータ室)では約 123° に設置されており、本来のN-S(真北)方向を基準として、ダム下部では約 N 7° W，ダム上部では約 N 21° W の方向へずれていたことが判明した¹³⁾。ダム上下では、相対的に約 14° のずれが生じていたことになる。現地調査結果より判明した、賀祥ダムにおける強震計設置方位等をまとめて図-11に示す。

この現地調査結果を踏まえ、賀祥ダム上下における強震記録の方位を修正した。修正後の本震の加速度と変位の時刻歴を、それぞれ図-12および図-13に示す。方位修正の結果、ダム下部に対する上部の相対変位成分は、下流方向へ 0.80cm，右岸方向へ 0.67cm であり、相対変位ベクトルは、北から時計回りに 52° の方向へ 1.04cm となる。前述のように、プラムラインの記録に基づく強震計位置での相対変位は方位が 268°，ベクトル長が 0.31cm であった。これと比較すると、修正強震記録から算定された相対変位は、ベクトル長は 0.73cm ほど長く、方位はおおよそ原点对称となっている。プラムラインの結果は、実際のダムの傾きを示していると考えられるので、強震記録から信頼できる永久変位をmm単位で求めることについては、課題が残ると言える。

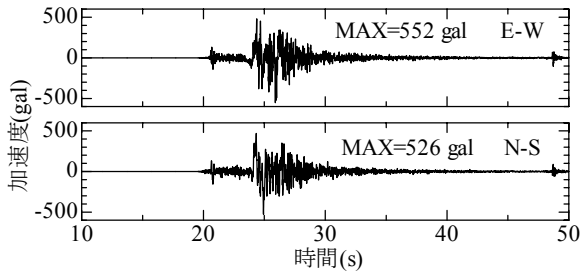
4. 数値シミュレーションによる地盤変位

(1) 解析方法

ここでは賀祥ダムの強震記録から算定された地盤変位時刻歴を参考に、断層モデルによる数値シミュ

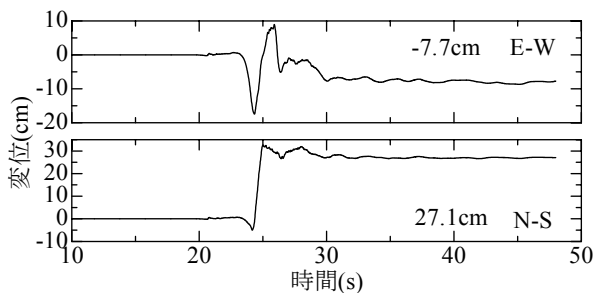


(a) ダム上部 (エレベータ室)

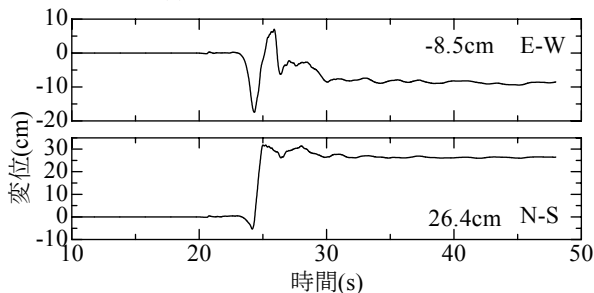


(b) ダム下部 (底部監査廊)

図-12 方位修正された水平2成分の強震記録



(a) ダム上部 (エレベータ室)

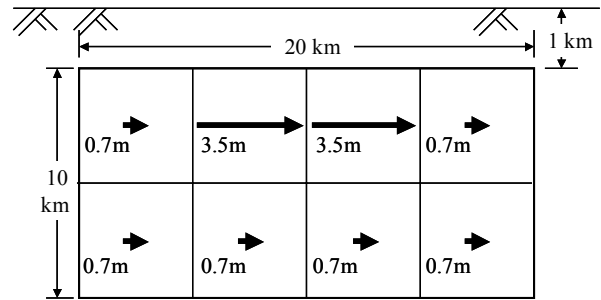


(b) ダム下部 (底部監査廊)

図-13 修正強震記録から算定された水平2成分の変位時刻歴

レーションを行い、震源域での複雑な地震時地盤変位の状況を把握するとともに、ダム地点での6成分地盤変位の算定方法について検討する。

数値シミュレーションで使用した断層と地盤のパラメータを表-1と図-14に示す。これらのパラメータのうち、走向傾斜や長さなど巨視的パラメータは文献3)と同一であるが、ライズタイム、破壊伝播速度、すべり量分布などは、他の研究成果^{例えば、14),15)} および、シミュレーション結果と強震記録か



破壊伝播速度; 3.6 km/s ライズタイム τ ; 0.5 s

図-14 使用した断層のすべり量分布 (矢印) と破壊伝播時間

表-1 断層と地盤のパラメータ

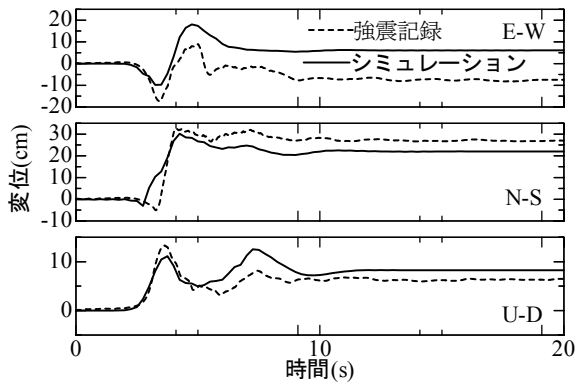
項目 (単位)		数値
断層	走向 (北から) (度)	152
	傾斜角 (度)	86
	すべり角 (度)	-7
	平均すべり量 (m)	1.4
	上端深さ (km)	1
	ライズタイム (s)	0.5
	断層の長さ (km)	20
地盤	断層の幅 (km)	10
	破壊伝播速度 (km/s)	3.6
	P波速度 (km/s)	6.7
	S波速度 (km/s)	4.0
地盤の単位体積重量 (t/m ³)		2.64

らの算定結果との比較による試行錯誤をもとに決定した数値である。解析対象範囲は、震源断層と賀祥ダムを含む、南北約 22km、東西約 16km の範囲とし、地盤を半無限均質弾性体で単純化して、約 500m 間隔の格子点での地震時地盤変位を 3次元境界要素法で計算した。

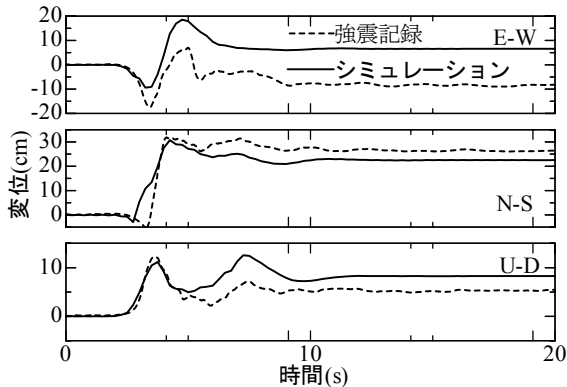
(2) 解析結果

シミュレーションにより賀祥ダムの位置で得られた変位時刻歴および修正強震記録による変位 (図-13参照) を、図-15に示す。

図-15より、シミュレーション結果は、3成分とも強震記録による変位の現れ方の特徴を捉えており、かなりの類似性がある。シミュレーションによる永久地盤変位は、揺れが完全に収まっていると考えられる同図(b)の 10~20 秒の変位の平均から、N-S方向 6.6cm、E-W方向 22.6cm、U-D方向 8.2cm と算定された。



(a) ダム上部 (エレベータ室)



(b) ダム下部 (底部監査廊)

図-15 修正強震記録とシミュレーションによる変位時刻歴の比較

また、ダム地点のシミュレーション結果をもとに、ダムを剛体と考えたダム上部（地震計位置）に相当する変位を算定し、修正強震記録から求められた変位と比較した（図-15(a)）。ダム上部の変位を算定する際には、ダム地点においてダムの高さの垂線（37.4m）を立て、その垂線の先端の位置を追ったシミュレーション結果より求めたダム上部の変位（図-15(a)）も、ダム下部の場合と同様に、強震記録の特徴をよく捉えている。このことから、シミュレーションもダムの挙動をほぼ再現していると考えられる。強震計位置に対応したプラムラインの値、強震記録、シミュレーションにより求められたダム上下の相対変位を、表-2および図-16にまとめる。

図-15(a)(b)から、実際の強震記録とシミュレーションの適合性は比較的よいと考え、このシミュレーション結果をもとに、震源域における地盤変位の面的分布を概観すると、次のようである。

地震開始から変位が安定するまでの間、まず数秒間、地表全体が波打ち、その後断層の北東・南西で地盤の隆起、北西・南東で沈降が発生し、断層面を中心に変位は徐々に周囲に広がっていく。破壊開始から約4秒後に最大変位量を示す。その大きさは

表-2 ダム上下の相対変位

	ダム軸方向 (右岸+)	上下流方向 (下流+)
プラムライン	-0.30cm	-0.08cm
強震記録	0.67cm	0.80cm
シミュレーション	-0.49cm	-0.49cm

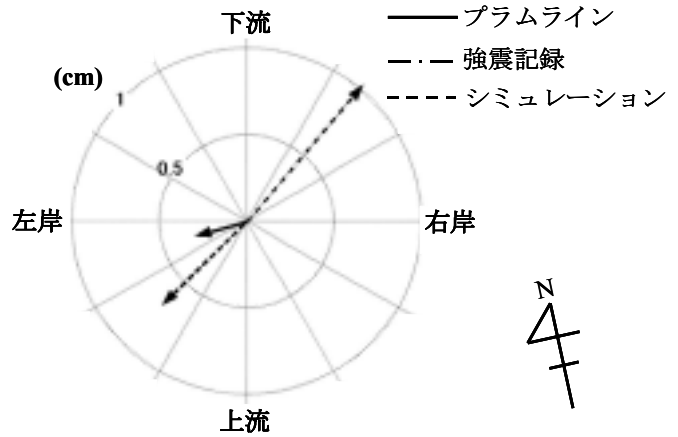


図-16 相対変位ベクトル

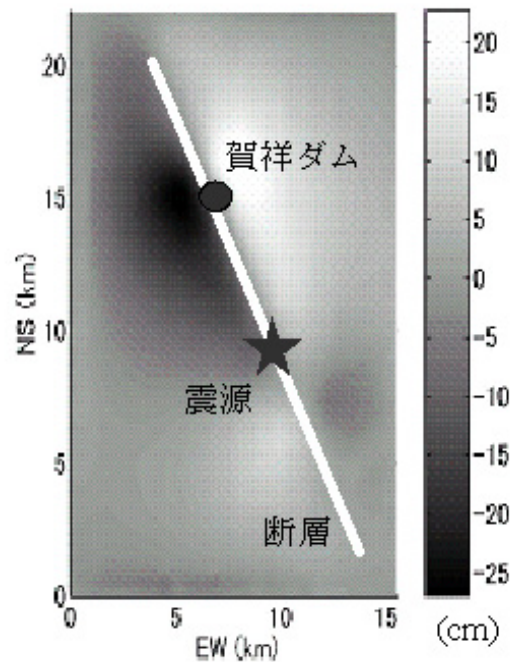


図-17 シミュレーションによる永久地盤変位

断層の北東で+32cm、南西で+20cm、北西で-39cm、南東で-18cm程度である。破壊開始から約10秒後に地盤の変動は終息し、断層の北東で-8cm程度の永久変位となった。シミュレーションにより求められた永久地盤変位の鉛直成分を図-1

7に示す。最大変位量時の地表の最大直ひずみは 1.9×10^{-4} 、永久変位時のそれは 1.6×10^{-4} である。

5. 回転変位成分の評価

(1) ダム上下の回転変位成分

地震動の回転成分を研究した例は数少ないが、M. Bouchon and K. Aki (1982) は、1971年サンフェルナンド地震における震源域の回転変位成分に関連して、1mの断層ずれによって生じる最大回転変位成分は 2×10^{-4} rad のオーダーであると述べている¹⁰⁾。

上述のシミュレーションより得られた地盤変位を用い、ダム軸・上下流軸・ダム鉛直軸回りの回転成分の算定を試みた。 ϕ_x (ダム軸回り)、 ϕ_y (上下流軸回り) は、ダム地点とそこから垂直に立てた垂線 (長さはダムの高さ: 37.4m) の先 (天端) の回転角から、また、 ϕ_z (鉛直軸回り) は、ダム地点とそこからダム軸方向に離れた1点 (長さはダムの高さ: 37.4m) の回転角から算出した。図-18に回転成分の概略図、図-19にシミュレーションから算定した回転成分の時刻歴を示す。図-19によれば、賀祥ダムの本震時の最大回転量は、 $\phi_x = 1.7 \times 10^{-4}$ rad、 $\phi_y = -2.0 \times 10^{-4}$ rad、 $\phi_z = 7.0 \times 10^{-4}$ rad である。

また、修正強震記録をもとに回転変位成分を試算した。強震計はダムの上下2ヶ所のみ設置されているために鉛直軸回りの回転成分を求めることはできないので、ダム軸 (ϕ_x) 回り・上下流軸 (ϕ_y) 回りの回転成分のみを算出した。強震記録によるダム上下の最大回転量は、 $\phi_x = -2.3 \times 10^{-4}$ rad、 $\phi_y = 2.2 \times 10^{-4}$ radであった。

以上、震源極近傍における地震時の地盤変位および構造物の応答からは、地盤変位の並進成分のみならず回転成分も概略ながら評価可能であることが確認できた。

6. 結論

(1) 本研究で得られた結果

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 賀祥ダムの上下における強震記録に系統的なずれがあることを見出し、測量の結果、本来の真北方向を基準にして、ダム下部で約 $N 7^\circ W$ 、ダム上部で約 $N 21^\circ W$ のずれが確認され、強震記録の方位修正が可能となった。
- 2) 方位修正された強震記録、プラムライン計測値、

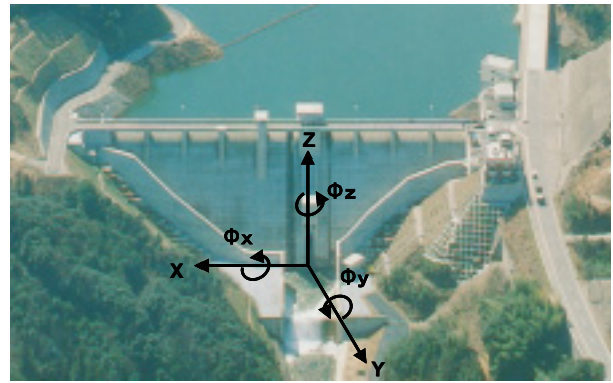


図-18 回転成分の概略図

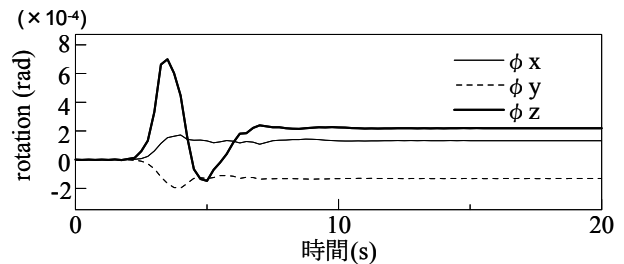


図-19 シミュレーションによるダム基礎の回転成分

数値シミュレーションを用い、震源域での地震時地盤変位の並進3成分の評価を試みた。ダム上下の相対変位は、強震計位置で右岸方向に0.67cm、下流方向に0.80cm、プラムライン測定値に基づけば右岸方向に-0.30cm、下流方向に-0.08cm、シミュレーションでは右岸方向に-0.49cm、下流方向に-0.49cmであった。

- 3) 方位修正された強震記録、数値シミュレーションを用い、地盤の回転変位成分を定量的に試算した。その結果、両者とも 1×10^{-4} rad オーダーの回転量が得られた。

(2) 問題点および今後の課題

現状では、強震記録から精度の良い変位を算出する段階には至っていない。永久変位、特に回転変位は、地下構造物への影響を評価する上で必要な検討課題である。強震記録の精度向上により設計で有効な回転成分が求められるが、現段階では強震記録から期待できる精度は得られていないので、地震による相対変位を正確に示すプラムラインを用いて強震記録の適切な積分方法を確立することが望ましい。現行の地下構造物の耐震設計では、地盤回転変位成分は無視されているが、震源極近傍でも、それが妥当であるか否かを、今後、より詳しく、定量的に検討する必要がある。

謝辞：本研究に際し，鳥取県土木部砂防利水課及び鳥取県米子土木事務所，ならびに独立行政法人土木研究所にはデータ提供や度重なる問い合わせに対する懇切丁寧な回答など種々のご厚誼をいただいた。記して深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 岡田篤正，堤 浩之：鳥取県西部地震の地震断層と周辺の活断層，2000年10月鳥取県西部地震による災害に関する調査研究，pp.96-103，2001.
- 2) 土木学会鳥取県西部地震調査団：2000年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告，土木学会誌 Vol. 85，pp.80-83，2000.
- 3) 大町達夫，小島直之，村上 敦：ダムサイト直下の伏在断層による地震時の地盤変位と貯水位変動，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.337-346，2002.7.
- 4) 高田至郎，J.P.Wright：ライフライン系解析のための相対地盤震動，土木学会論文報告集 第289号 pp.13-21，1980.7.
- 5) 永田茂，片山恒雄，山崎文雄，佐藤暢彦：加速度・速度・変位地震計の同時観測に基づく記録精度の検討，土木学会論文集 第422号 / I-14，pp.372-380，1990年10月.
- 6) 森地重暉，今村芳徳，高野工，小田幸平：地震時に生ずる地盤ひずみの観測とその結果についての考察，土木学会論文集 No.570/I-40，259-275，1997.7.
- 7) Nigbor, R. L. : Six-degree-of-freedom ground-motion measurement, Bull. Seism. Soc. Am., No.84, pp.1665-1669, 1994.
- 8) 森谷武男，丸茂只直：回転成分地震計の試作と感度の検定，物理探査学会第96回学術講演会論文集，pp.65-69，1997.
- 9) 江口孝雄：光回折格子利用型6成分地震計，地球惑星化学合同大会2003年予稿集 CD-ROM,2003年.
- 10) Bouchon, M. Aki, K.: Strain, tilt, rotation associated with strong ground motion in the vicinity of earthquake faults, Bull. Seism. Soc. Am., No.72, pp.1717-1738, 1982.
- 11) 鳥取県賀祥ダム建設事務所：賀祥ダム工事報告書，1989.
- 12) Japan Commission on Large Dams: Acceleration Records on Dams and Foundations, No.2, 2002.4. (CD-ROM)
- 13) 佐々木隆氏，佐野貴之氏との私信
- 14) 建設省国土地理院 <http://www.gsi.go.jp/>
- 15) 岩田知孝，関口春子：2000年鳥取県西部地震の震源断層の実体，サイスマ，第5巻3号，2001.

(2005. 3. 14 受付)

PRELIMINARY EVALUATION OF EARTHQUAKE-INDUCED 6DOF GROUND DISPLACEMENT IN NEAR FIELD

Ryoko ODA, Tatsuo OHMACHI and Shusaku INOUE

The 2000 Western Tottori earthquake (M7.3), Japan occurred on October 6. Kasho Dam which is a 46.4m-high concrete gravity dam, was located in the near field of this earthquake. Strong motion accelerometers at the dam registered very high acceleration, but suggested systematic rotation in their azimuth. After correcting the azimuth, 6DOF ground displacement was evaluated from not only the strong motion records but also numerical simulation. The evaluation resulted in, for example, rotational components of the order of 1×10^{-4} rad.