

コンクリートダム地震応答解析における工学基盤の設定及びその入力地震動についての研究

安 田 成 夫*¹
曹 増 延*²

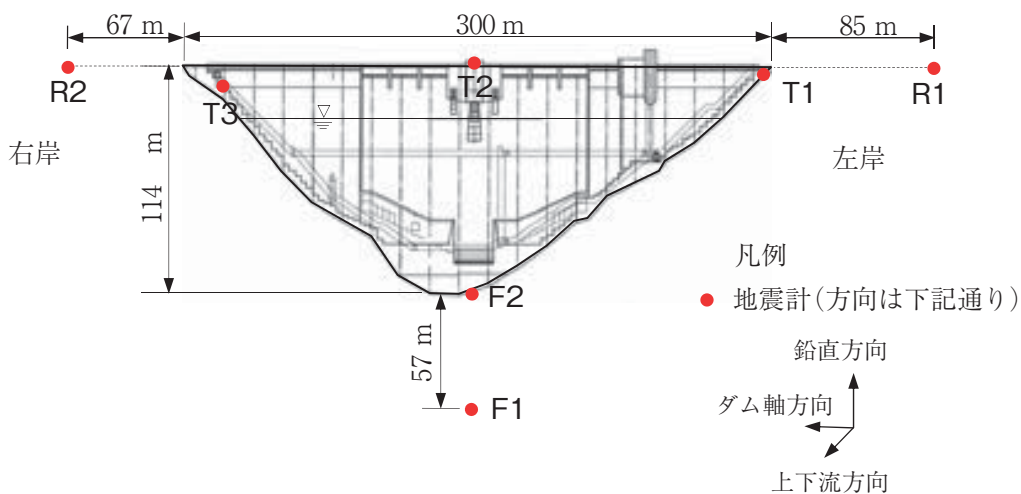
要 約

日本では、大規模地震に対するダムの安全性が数値解析に基づき照査されている。その解析におけるダム底部の地震動は、多くのダムの地震記録の統計解析により得られた距離減衰式や経験的グリーン関数法あるいは地震動記録を規定の照査用下限スペクトルに適合する方法により設定される。さらに、このダム底部の地震動を数値解析法によって仮定された工学的基盤に引き戻すことにより、ダムの地震応答解析に必要な入力地震動が作成される。一方、ダムの地震応答解析における工学的基盤の設定基準がないため、作成された入力地震動の妥当性は必ずしも十分に検証されたものではない。本研究では、8ヶ所に地震計を設置した札内川ダムを検討対象として、2003年の十勝沖地震（M. 8.0）の際にダムで記録された加速度時刻歴を用いて、工学基盤の設定位置及びその地震動を検討した。結果として、重力式コンクリートダムの場合、工学基盤はダム高さの約1.5倍の深さに設定し、その位置で岩盤のせん断波速度は2,000m/s程度以上である条件が望ましいことを指摘した。また、工学基盤における入力地震動の作成手順を提案した。

1. 序 言

既設ダムの耐震性能を照査するために実施される地震応答解析では、まず、経験的手法^{1,2)}または半経験的手法^{3,4,5)}を適用することにより、ダムの底面または解放基盤面の地震動を設定する。そして、波の引き戻し計算によって工学基盤の地震動を推定する。当然ながら、推定した工学基盤での地震動は、解析モデルの設定条件に依存し、そのモデルを用いた数値解析に限定される傾向にある。その入力地震動によって励起された基礎岩盤、自然地盤、ダム本体の地震応答は必ずしも妥当なものとは限らない。一方、深部岩盤の地震動を直接測定することは困難であるため、ダム工学の分野では、工学基盤の地震動の設定についての検証がほとんど行われていないのが現状である。

札内川ダムは高さ114mの重力式コンクリートダムである。図一1に示す位置に3方向成分地震計が設置されており、1996年にダムが完成して以来いくつかの地震記録が収集されている。特に、ダム底部より深さ57m（ダムの高さの半分に等しい）の位置及び両岸のリムトンネル内に地震計が設置され、岩盤内で貴重な記録が取得されている。安田ら⁶⁾はこれらの地震観測記録及び地震応



図一1 札内川の下流面及び地震計の設置位置

*1 一般財団法人 ダム技術センター

*2 (株) J-POWER ビジネスサービス

答解析によりダムの動的特性及び地震応答を検討している。本研究は、札内川ダムサイトの複数の観測点で得られた地震記録に基づき、深部岩盤の地震動を数値解析法により推定し、同時に、ダムの地震応答解析のための工学基盤の設定基準と入力地震動の準備方法を検討する。

2. 検討方法と条件

2.1 検討方法

工学基盤を設定する際に、以下の2点を考慮する。

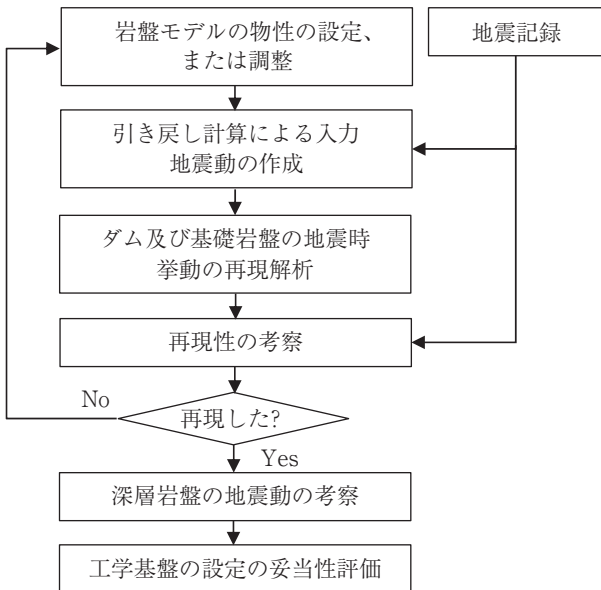


図-2 本研究の流れ

- ① 理想的な工学基盤の地震動は、上部地盤構造物やダムの動的挙動の影響をほとんど受けないため、この基盤面上の任意点の地震動がほぼ同じである。
- ② 自然地盤を含む複数観測点の地震記録がある場合、地震記録を用いて工学基盤の地震動を推定することができる。逆に、工学基盤で入力地震動を入力した場合、すべての観測点での地震記録を再現することができる。

本研究は、上記の2点を考慮して、2003年の十勝沖地震時の札内川ダムとその基礎岩盤の挙動を3次元地震応答解析により再現した。再現性の妥当性に関しては、最大加速度値、加速度波形、フーリエスペクトル及び伝達関数の4つの項目の考察により判定した。観測された全観測点の動的挙動の再現性を向上させるために、ダム及び基礎岩盤の物性を繰り返し調整した。この過程を通じて、ダム底面より下方へ171mの深さで設定した工学基盤が妥当であると推定した。図-2に検討フローを示す。各観測点の地震記録が再現される際の岩盤内の地震動を考察し、ダムの地震応答解析のための工学基盤の設定基準及びその位置の地震動の設定方法を提案した。

2.2 検討条件

2.2.1 地震記録

図-1に示す地震計位置でこれまで多数の地震記録が収録され、図-3に一例として2003年9月26日の十勝沖地震(M8.0)時の岩盤下部地震計(F1)での加速度記録及びそのフーリエスペクトルを示す。

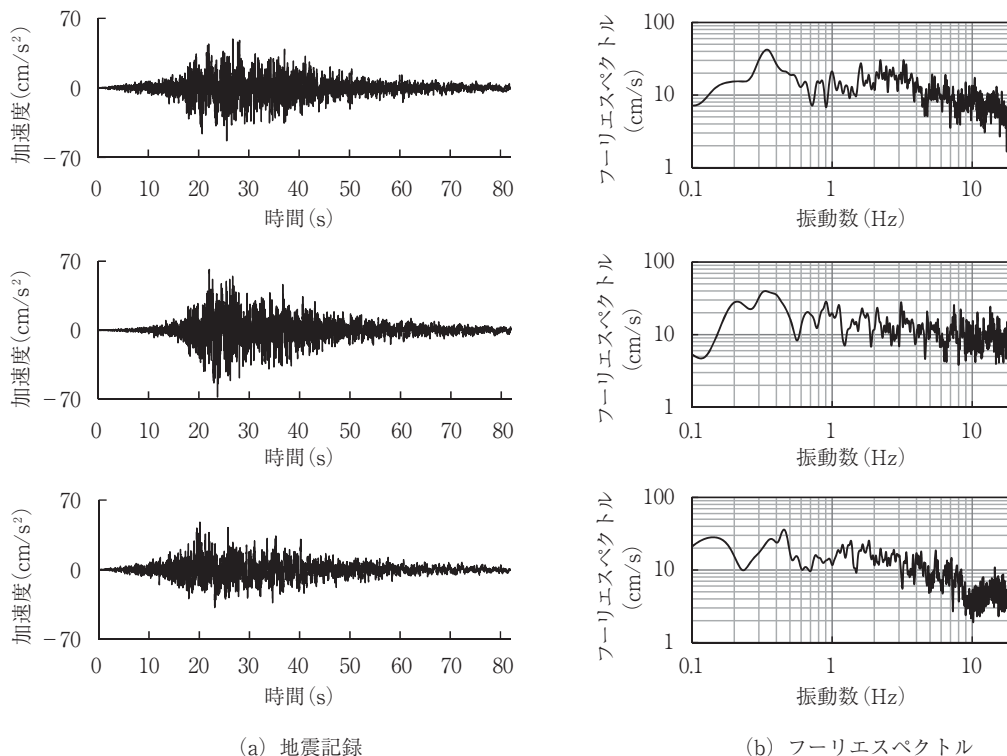


図-3 2003年十勝沖地震時岩盤下部地震計の地震記録とそのフーリエスペクトル

2.2.2 検討用モデル

図一4に本検討用解析モデルを示す。解析モデルにおいて基礎岩盤の地質と詳細な地形が考慮され、基礎岩盤モデルの側面境界と底面境界で粘性境界⁷⁾を設定し、解析範囲外に無限に広がる自由地盤の影響を考慮している。本解析モデルの深さ、つまり工学基盤の位置はダム高さの2.0倍としている事例があるが、ここでは既往のダムの地震応答解析⁶⁾の経験に基づき1.5倍(ダム底部より171mの深さ)とした。再現解析には3次元ダム—貯水池—基礎岩盤連成系の地震応答解析用プログラム“UNIVERSE”を用いた。

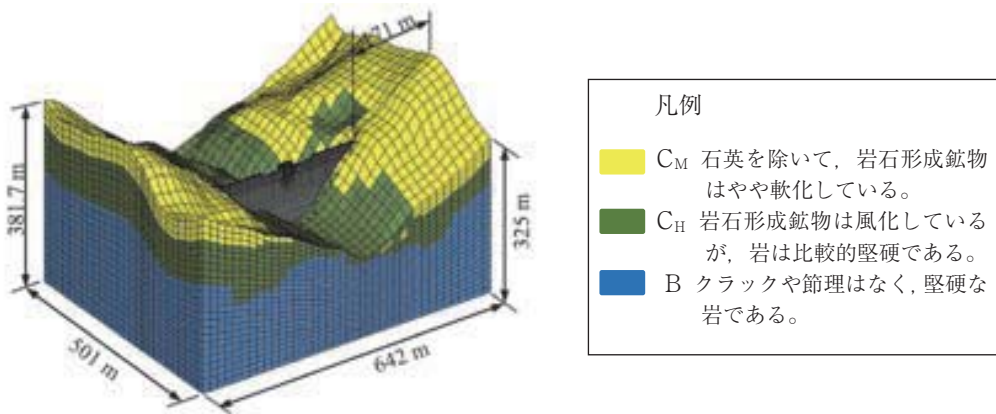
2.2.3 物性値

ダムコンクリートは線形材料として、弾性係数は設計値を用い、減衰係数は地震記録を用いてハーフパワー法により求めた。さらに地震時のダムの挙動が精度よく再

現されるように設定した弾性係数と減衰係数を微調整した。表一1に最終的に同定されたダムコンクリートの物性値を示す。このうち、密度とポアソン比はダムの建設中の品質管理試験の結果である。基礎岩盤も線形弾性材料として、その物性値はPS検層と岩盤試験により得た。減衰係数は地震時岩盤内の観測点の地震時挙動が精度よく再現されるよう調整し、最終的に表一2に示す物性値が同定された。

2.2.4 入力地震動

基礎岩盤モデルの底面(仮定された工学基盤)での入力地震動は、ダム堤体や自然地盤の振動の影響を最も少なく受けると思われる岩盤下部地震計(F1)の地震記録を3次元地震動の引き戻し法⁸⁾により作成された。図一5に入力地震動の作成方法を示し、詳細な説明は参考文献に譲る^{8,9)}。



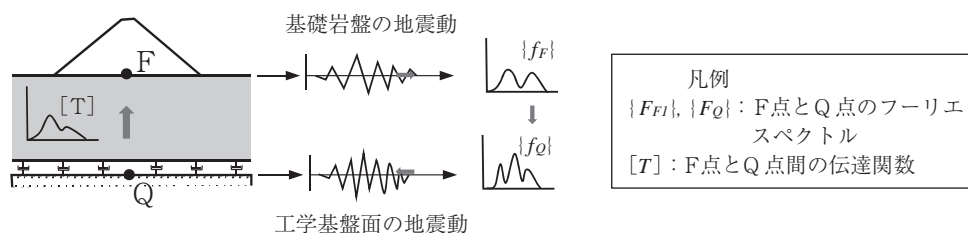
図一4 解析モデル

表一1 ダムコンクリートの物性値

弾性係数 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰比
31,200	2.4	0.2	2 %

表一2 基礎岩盤の物性値

岩盤分類	弾性係数 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰比
CM	13,620			5 %
CH	29,180	2.74	0.28	2 %
B	52,530			1 %
設定根拠	PS 検層	岩盤試験	PS 検層	解析により同定



図一5 工学基盤の入力地震動の作成方法

3. 再現解析によるダム及び基礎岩盤の地震応答

再現解析により十勝沖地震時のダム及び基礎岩盤の各観測点での地震挙動を再現した。表-3に各観測位置の加速度応答の最大値をまとめる。また、例としてダム天端 (T2) と基礎岩盤の上部 (F2) での加速度応答時刻

歴を図-6に示す。図-7にこれらの加速応答のフーリエスペクトルと伝達関数を示す。ダム天端 (T2) と基礎岩盤上部 (F2) においては解析による最大加速度応答値と地震記録の最大値との差は方向によって異なるが、図-6に示すように、加速度波形は全体的に合致している。図-7によりこの2ヶ所で解析により得られた

表-3 再現解析による各観測点の加速度応答の最大値

地震計位置	方向	観測 (cm/s ²)	解析 (cm/s ²)	相対誤差 [%]*
T2	上下流	674	672	0
	ダム軸	310	402	30
	鉛直	214	256	20
F2	上下流	61	80	33
	ダム軸	67	90	34
	鉛直	58	73	27
F1	上下流	53	53	0
	ダム軸	67	67	0
	鉛直	47	47	0
R1	上下流	68	94	39
	ダム軸	68	86	26
	鉛直	71	83	16
T1	上下流	202	161	-20
	ダム軸	222	182	-18
	鉛直	114	110	-3
T3	上下流	213	191	-10
	ダム軸	195	204	5
	鉛直	157	149	-5
R2	上下流	79	106	35
	ダム軸	98	90	-8
	鉛直	99	110	11

注：相対誤差 = (解析 - 観測) × 100 / 観測

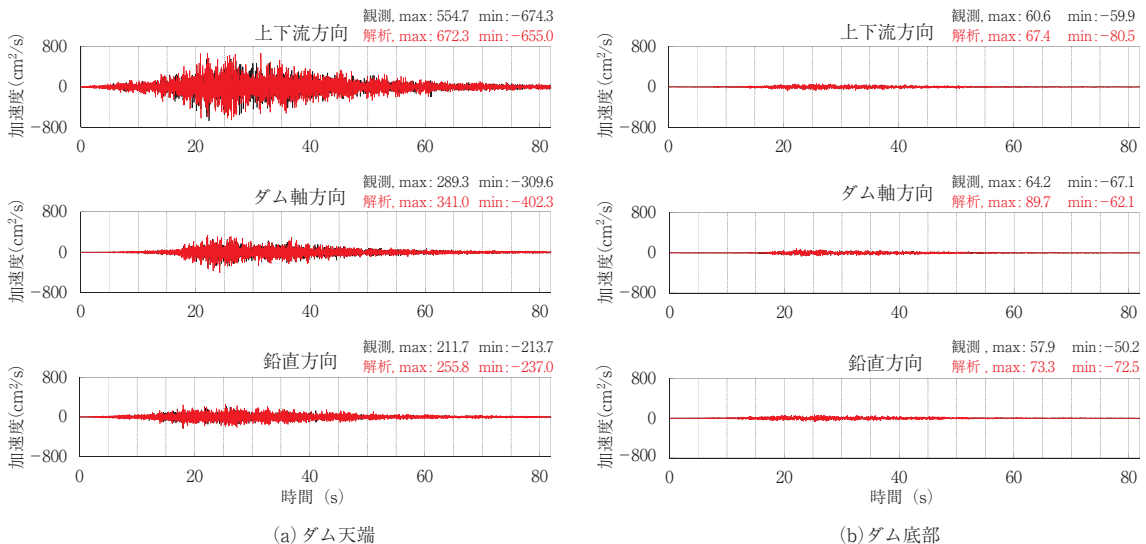


図-6 ダム天端と底部の加速度応答

加速度応答と地震記録並びにそのフーリエスペクトル及び伝達関数が非常によく一致していることが理解される。左岸 (T1) と右岸 (T3) の解析結果と地震記録も概ね一致しており、左岸と右岸のリムトンネル内 (R1 と R2) の地盤内部でも観測された地震動が概ね再現された。解析の再現性が高い理由は、解析モデルが詳細な地形及び地質学的情報を反映しており、物性値が実際の材料特性を反映しているためと考えられる。

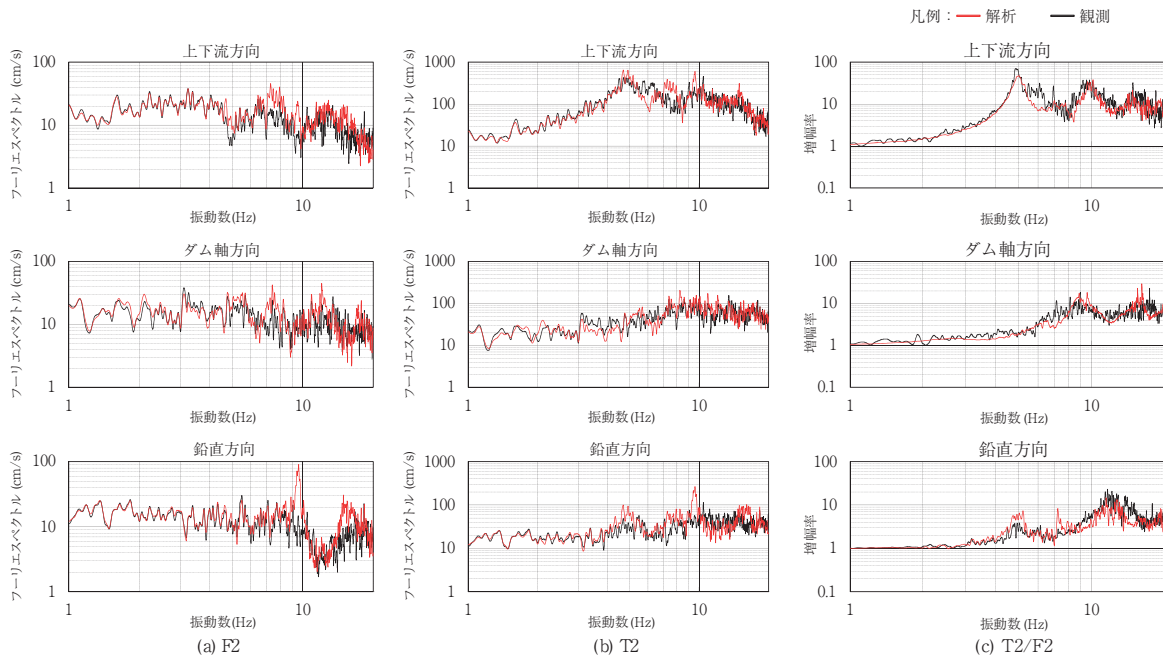
4. 岩盤内部及び工学基盤の地震動

4.1 岩盤内部の地震動

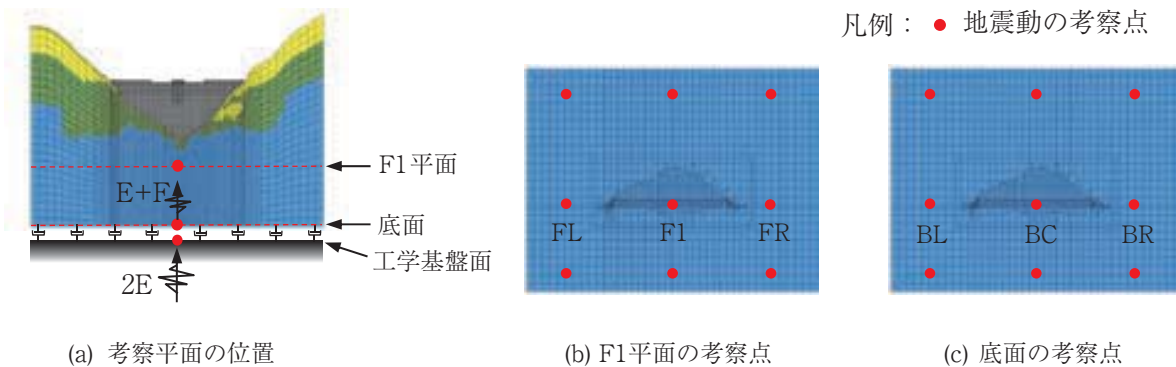
ダム及び基礎岩盤内部のすべての観測点の地震動が数値解析により再現された時、基礎岩盤モデルの深部の地震応答は実際の地震動に近似していると推定される。図一8に示す2つの水平面上の計18点での加速度時刻歴が

出力され、同じ平面内の各点の加速度応答時刻歴及びフーリエスペクトルを比較した。岩盤内部の地震動には下層からの上昇波と上層からの反射波が含まれるため、図一8ではE + F波と記されている。工学基盤での地震動は、地震記録を用いた逆解析によって得られ、図一8では2E波として記している。

各観測点の加速度応答履歴を詳細に考察するために、全長81.92秒の履歴から主要動の3秒 (22.01~25.0秒) の主要動を抽出して比較する。図一9にはダム軸断面とF1平面 (ダム底部から深さ57m) の交線にある3ヶ所の主要動を示す。岩盤の下部 (F1)と比較すると、両側 (FLとFR)の加速度は、3方向でやや大きく、位相差は時間によっては現れる。即ち、同じ深さ位置においても、これらの3ヶ所の地震応答に差がある。これはダム及び両側の自然地盤の動的挙動の影響によりこの深さの岩盤



図一7 ダム天端、底部の加速度応答のフーリエスペクトル及びその伝達関数



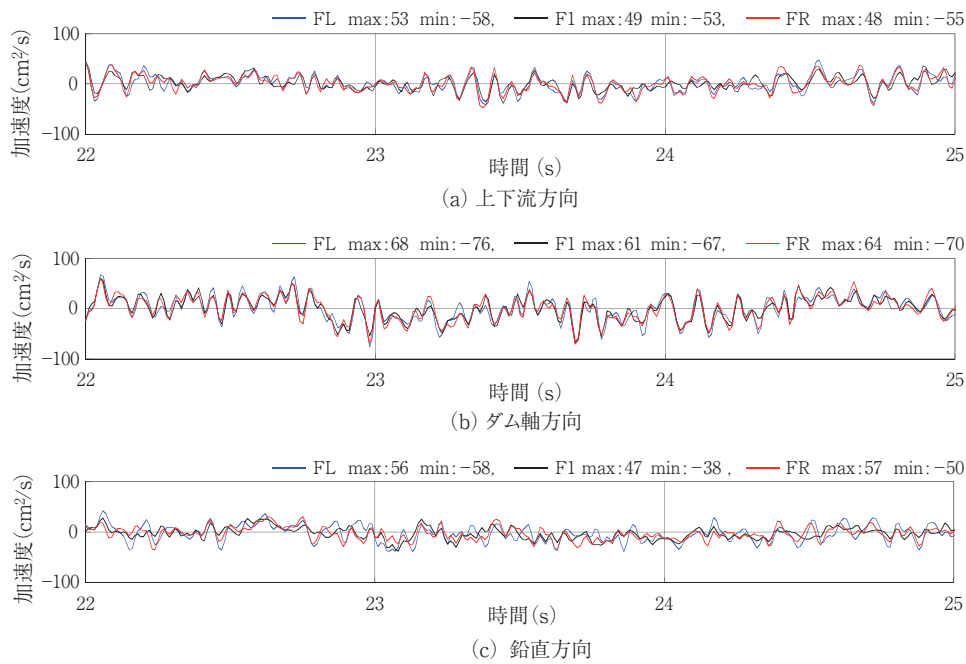
図一8 岩盤内部の地震動の考察点の位置

の地震動が乱されることから考えられる。一方、図—10には、基礎岩盤モデルの底面（ダムの底部より171mの深さ）にある3点（左側より順にBL、BCとBR）の主要動を示す。この深さでは、3ヶ所での最大加速度の相対誤差は非常に小さく、その位相はほぼすべての時間を通じて一致している。即ち、この深さでの地震動はダム及び自然地山の動的挙動の影響はほとんど受けないと考えられる。上述したことから、工学基盤の設定要件に満たす岩盤モデルの最小深さはダム高さの0.5～1.5倍の間に存在することが考えられる。しかしながら、各々の

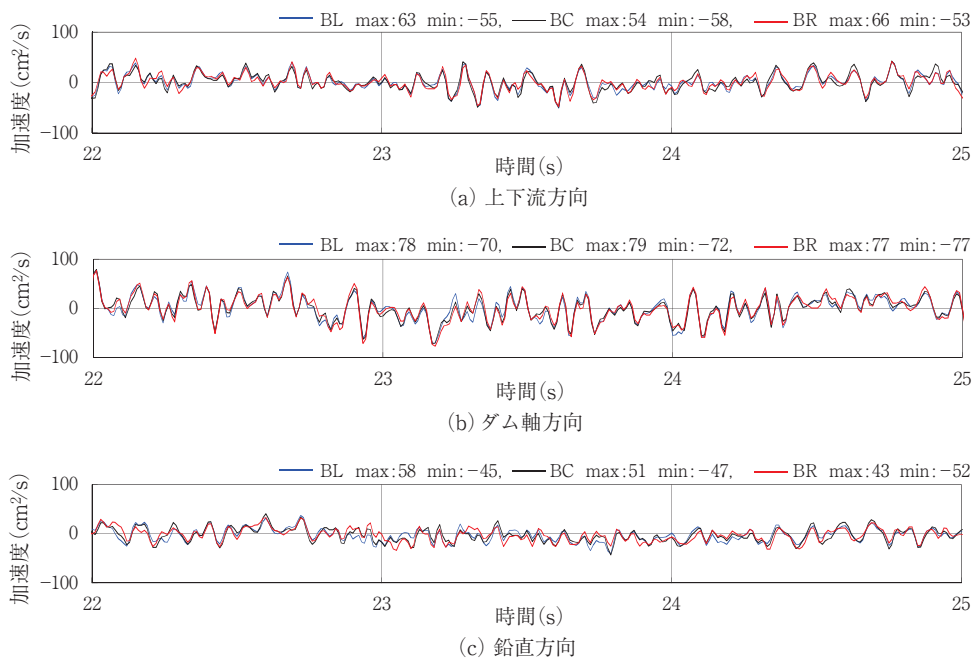
ダムのさまざまな実条件を考慮して解析における工学基盤の深さは一般値としてダム高さの1.5倍以上（このモデルでは171m）に設定することを提案したい。

4.2 工学基盤の地震動

前節で述べたように、深さ171mでのモデル底面の地震動は、ダムや自然地盤の動的挙動の影響をほとんど受けなため、この深さ（図—8 (a)）で工学基盤を設定することが可能である。図—11は、地震時挙動の再現解析により得られたこの深さでの応答を示す。これは2003年



図—9 F1平面内の地震動の比較



図—10 モデル底面の地震動の比較

十勝沖地震の際に深部岩盤で実際に発生した地震動に類似していると考えられる。すなわち、図-11(a)は、岩盤内部の深さ171mで推定した地震動であり、図-11(b)は工学基盤面(図-8(a))の入力地震動である。

2003年の十勝沖地震の震源は、札内川ダムから下流へ150km、深さ45kmの位置であった。図-12に震源と札内川ダムの相対的な位置関係を示す。ダムサイトでの上下流方向と鉛直方向の振動成分は、地震動のP波とSV波の合成によるもので、ダム軸方向の振動成分は地震のSH波の振動方向とほぼ平行となっている。したがって、図-11(a)及び図-11(b)に示すように、札内川ダムの上下流方向及び鉛直方向の地震動は、ダム軸方向成分よりもやや早く到達したように見える。一方、ダム軸方向の振幅、言い換えればSH波成分の振幅は、他の2つの

成分よりも少し大きかった。

以上、札内川ダムでは地震応答解析のための適切な工学基盤の設定条件は、ダム高さの1.5倍の深さで、かつその位置の岩盤のせん断波速度が約2,000m/s(表-2の岩盤分類CHの弾性係数に相当するせん断波速度 $V_s = 2,000\text{m/s}$)である。因みに、他分野では工学基盤をせん断波速度700m/s以上の岩盤に設定することが一般的であるものの、大規模構造物であるダムでは、せん断波速度が高めとなっている。設定された工学基盤での入力地震動の準備方法は、図-2の検討フローに従って複数の観測点での地震記録が再現されるよう解析モデルを同定した上で地表の地震動の引き戻しにより作成する。当然のことながら、使用される解析モデルは基礎岩盤の地質と地形を反映している必要がある。

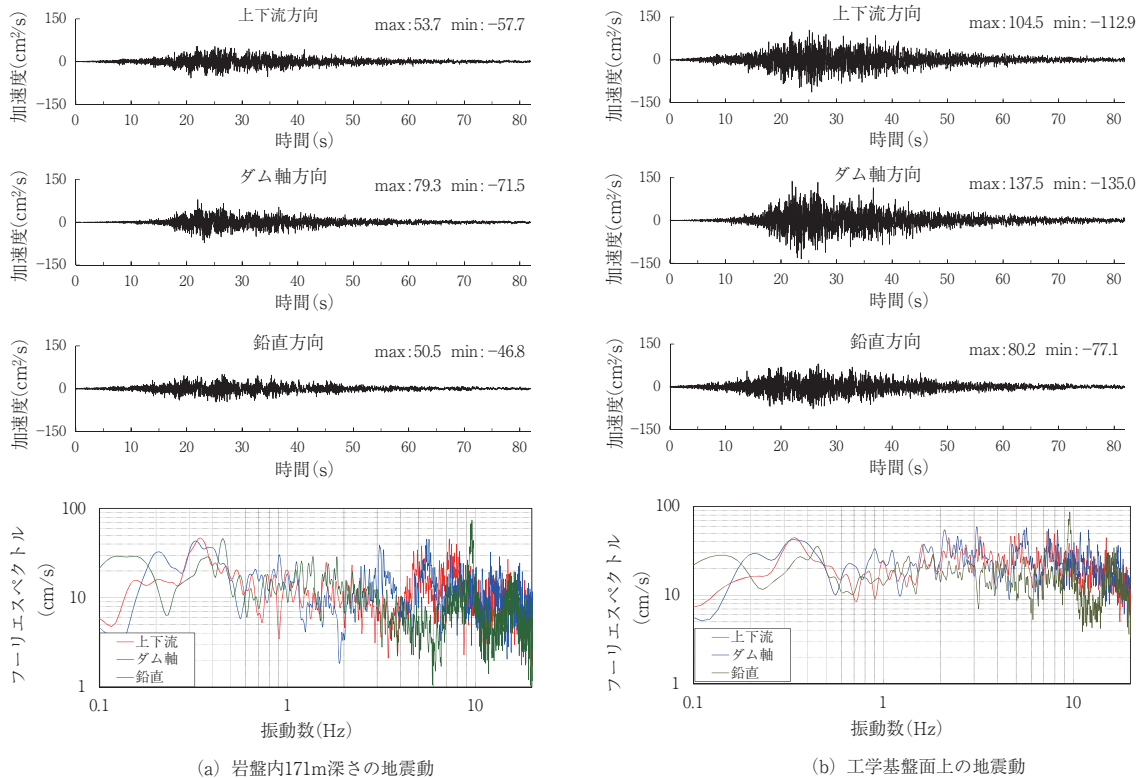
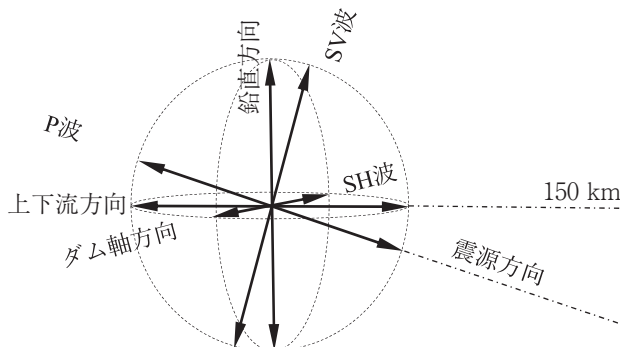


図-11 岩盤深部及び工学基盤面上の地震動



P波は、波が進行する方向に振動し、膨張と収縮を伝達する縦波である。
SH波は、地表面に平行に振動するせん断成分である。
SV波はSH波に垂直なせん断成分である。

図-12 地震動の方向とダムの向きの関係

大規模地震に対するダムの耐震性能照査における地震動は、ダム距離減衰式、グリーン関数法、さらに過去の地震記録を照査用下限スペクトルに適合する方法などにより設定することができる。本研究で得られた深部岩盤及び工学基盤の地震動は、これらの地震動の設定方法の検証にも参考になると考える。

5. ま と め

本研究により以下のことを明らかにした。

札内川ダムの物性は、詳細な地形データと地質情報に基づいた解析モデルを作成し、地震時の動的挙動の再現解析を行うことにより同定した。解析により、ダム本体と基礎岩盤の複数の観測点での地震記録が精度よく再現され、深部岩盤、特に工学基盤での地震動を再現できた。

工学基盤の設定について、重力式コンクリートダムの場合、ダム高さの1.5倍以上の深さに、かつその位置のせん断波速度が2,000m/s以上であることが望ましいことがわかった。

工学基盤での地震動は、複数の観測点での地震記録が再現できるように同定した解析モデルを用いて、波の引き戻し計算により作成することが望ましい。

本研究によって再生した工学基盤での地震動は、ダムの耐震性能照査に広く使用されている地震動の作成方法の検証にも活用できると考える。また、今回の検討は三次元解析により精緻に行われていたが、重力式コンクリートダムの耐震性能照査では二次元解析が主流となっており、工学基盤の入力地震動は二次元計算により作成されることになると考えられ、解釈あるいは取扱いには留意する必要がある。

謝 辞

本研究の実施に当っては、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部及び北海道開発局帯広開発建設部札内川ダム管理支所のご協力のもと地震観測記録を利用させて頂いたことを深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Matsumoto, N., Yoshida, H., Sasaki, T. and Annaka, T. : Response Spectra of Earthquake Motion at Dam Foundations, *Proc. 21st International Congress on Large Dams*, 2003
- 2) 佐々木隆, 伊藤壮志 : 東北地方太平洋沖地震を踏まえたダム基礎岩盤における地震動距離減衰式, *日本地震学会論文集*, 第16巻, 第4号(特集号), pp.80-92, 2016
- 3) Boore, D. M. : Stochastic Simulation of High Frequency Ground Motions based on Seismological Models of Radiated Spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983
- 4) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *The Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986
- 5) Kamae K., Irikura K., and Fukuchi Y. : Prediction of strong ground motion based on scaling law of earthquake, *Journal of Structural and construction engineering*, No.430, pp.1-9, 1991
- 6) 安田成夫, 島本和仁, 筋野晃司, 佐野貴之, 吉岡英貴, 清水康記, 平田俊二 : 重力式コンクリートダムの三次元地震応答解析—札内川ダムの三次元解析, *国土技術政策総合研究所資料*, No.429, 2007
- 7) Cao, Z. and Saotome A. : Analytic Method of Method of 3D Soil-Structure System with the Viscous Boundaries Considering the Vertical Motion, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, No.0598, 2012
- 8) Cao, Z., Matsumoto, N., Tardieu, B., Fry, J. J., Bourdarot, E., and Robbe, E. : Practical guide for selection seismic parameters and numerical models in earthquake analysis of dams, *Proc. of international symposium on qualification of dynamic analysis of dams and their equipment and probabilistic assessment of seismic hazard in Europe*, No.1-4, 2016
- 9) Yasuda, N., Matsumoto, N. and Cao, Z. : Study on the Mechanism of the Peculiar Behaviors of Aratozawa Dam in the 2008 Earthquake, *Journal of disaster research*, Vo.13, No.1, pp.205-215, 2018