

平成12年鳥取県西部地震の ダムサイトにおける強震動シミュレーション

佐藤信光¹・米崎文雄²・播田一雄³・鶴来雅人⁴・香川敬生⁵・土岐憲三⁶

1 正会員	水資源開発公団試験研究所	(〒338-0812	さいたま市大字神田 936 番地)
2 非会員	水資源開発公団試験研究所	(〒338-0812	さいたま市大字神田 936 番地)
3 正会員	工修 財団法人ダム水源環境整備センター	(〒102-0083	東京都千代田区麹町 2-14-2)
4 正会員	工修 財団法人 地域 地盤 環境 研究所	(〒550-0012	大阪市西区立売堀 4-3-2)
5 非会員	理修 財団法人 地域 地盤 環境 研究所	(〒550-0012	大阪市西区立売堀 4-3-2)
6 フェロー	工博 京都大学大学院工学研究科教授	(〒606-8317	京都市左京区吉田本町)

水資源開発公団では、ダムの耐震検討のために、断層モデルに基づくダムサイト地震動シミュレーションで入力地震動の検討を進めている。今回、地震動特性評価手法や地震動作成手法の妥当性を評価するために、平成12年鳥取県西部地震において賀祥ダムで観測された地震記録に対して、ハイブリッド法を用いた再現解析を行なった。解析に用いた震源モデルは既往研究成果、伝播経路特性は他のダムにおけるスペクトルインバージョン解析結果、サイト増幅特性は賀祥ダムにおける余震記録から得られた特性である。その結果、観測記録と概ね調和的なシミュレーション結果が得られ、現在進めている入力地震動検討方法の妥当性が示された。

Key Words : 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake, Kasyou Dam, Strong Ground Motion Simulation, Hybrid Method

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、最大震度Ⅶという強い地震動によって多くの構造物が被害を受け、6000名以上の人命が失われた。また、淡路島北部と神戸市域の震源断層に沿って強い揺れが発生したことから、従来の点震源ではなく断層面を考慮した震源断層近傍の強震動評価への対応が重要となった。土木学会は「土木構造物の耐震基準等に関する提言」において、レベル1及びレベル2地震動の考え方を示し、この2段階地震動に対する構造物の耐震検討を提言した¹⁾。兵庫県南部地震ではダムにおいては問題となるような被害は生じなかったが、水資源開発公団(以下、「水公団」という)では震源断層近傍の地震動に対するダムの耐震検討の重要性を考慮し、断層モデルに基づくダムサイト強震動シミュレーションを行なうこととした。ダムサイト岩盤における強震動シミュレーションの適用性を確認するため、兵庫県南部地震において一庫ダムで観測された地震動(最大加速度183cm/s²)を、余震記録から求めた地震動特性を考慮した統計的グリーン関数重ね合わせ法²⁾を用いて解析し、観測記録と調和的な結果を得ている³⁾。また、各ダムにおける地震動特性を把握するためには、ダムサイトにおいて地震観測を行なう必要がある。従来の加速度型強震

計では短期間に多くの小地震を観測すること困難であることから、水公団では速度型強震計により地震観測を行なっている。この速度型強震計は加速度型強震計と比較して、より小さい地震も観測することができる、長周期成分の精度が良い、という利点を有している。

鳥取県西部地震では賀祥ダム底部監査廊において約530cm/s(水平方向)という強震動を観測した。これは、国内のダム基礎で観測された地震動としては最大規模である。本論文はこの強震動に対して、現在、水公団が進めている地震動特性の評価手法やハイブリッド法⁴⁾によるダムサイト強震動シミュレーションの妥当性について報告するものである。

2. 解析概要

2.1 解析手法

地震動シミュレーションはハイブリッド法⁴⁾により行なった。この方法の概要を図1に示す。この方法は1秒程度以下の短周期領域の小地震動を統計的手法⁵⁾で、1秒程度以上の長周期領域の小地震動を理論的手法で作成し、それぞれに経験的グリーン関数重ね合わせ法^{6)・7)}と同じ合成式を適用して大地震動を求め、最終的に両者を足し合わせるにより広帯域の大地震動を得るもの

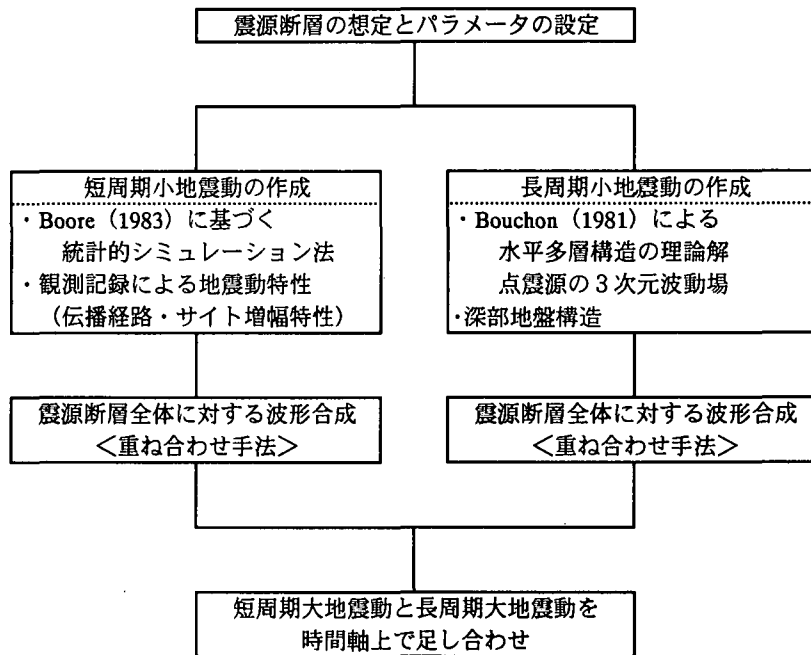


図1 ハイブリッド法による大地震動の作成手法

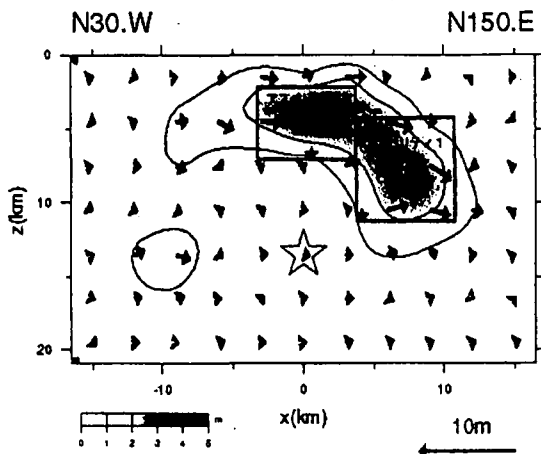


図2 池田・ほかによる断層モデル^{1,2)}
(関口・岩田によるすべり量分布図^{1,0)}に加筆)

表1 池田・ほかによる断層諸元^{1,2)}

	Asperity1	Asperity2
走向角 (°)	150	150
傾斜角 (°)	90	90
すべり角 (°)	0	0
長さ (km)	7	7
幅 (km)	7	5
面積 (km ²)	49	35
上端深さ (km)	4.2	2.1
地震モーメント (dyne · cm)	2.72×10^{25}	1.52×10^{25}
応力降下量 (bar)	160	160
破壊伝播速度 (km/s)	2.8	2.0

である。長周期領域の理論計算には1次元水平多層構造の理論解⁸⁾を用いた。深部地下構造は伊藤・ほか⁹⁾による構造を参考に設定した。

2. 2 解析に用いる諸特性

(1) 震源モデル

平成12年鳥取県西部地震の震源断層モデルとして、近地における強震観測記録を用いた波形インバージョン解析によるモデル^{例えば^{1,0)}}、近地における強震観測記録のエンベロープインバージョン解析によるモデル^{1,1)}、経験的グリーン関数重ね合わせ法によるモデル^{1,2)}などい

くつかのモデルが提案されている。ここでは短周期領域も含めた広範囲の周期に着目して検討を行なっている経験的グリーン関数重ね合わせ法によるモデル [池田・ほか^{1,2)}]を用いた。この断層モデル・諸元を図2および表1に示す。なお、賀祥ダムから断層までの最短距離は約1kmである。

(2) 伝播経路特性

伝播経路の減衰能を示すQ値は震源深さや震源距離に依存するとされおり、また地域依存性もあると考えられる。したがって、対象地域において対象とする地震と震源深さや震源距離が整合する地震観測記録を用いて、スペクトルインバージョン手法^{1,3)}などにより評価するこ

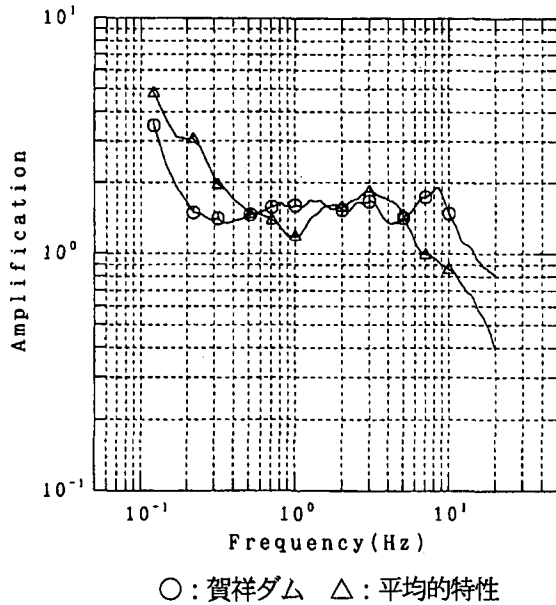


図3 サイト増幅特性

とが望ましい。しかし、鳥取県西部地方においては今回の地震以外の地震活動はさほど活発ではなく、スペクトルインバージョン解析を行なうにはデータが不足している。そこで、既往検討成果から次式に示す特性を用いることとした。この特性は徳山ダム（岐阜県）とその周辺の観測点における地震観測記録を用いたスペクトルインバージョン解析により得られたもので、用いたデータセットの震源距離の平均値は約22kmである。

$$Q(f) = 28.3 \times f^{1.04}$$

(3) サイト増幅特性

サイト増幅特性は賀祥ダムにおける鳥取県西部地震の余震記録から鶴来・ほかの手法¹⁴⁾により求めた。得られたサイト増幅特性を図3に示す。水公団では現在既設ダムや建設予定ダムにおいて断層モデルに基づく入力地震動の作成を進めている。これらの全ダム地点においてサイト増幅特性を評価するには、地震観測記録の蓄積を待たねばならない。そこで、十分な記録が得られるまでの暫定的な評価として、これまで評価した5ダムにおけるサイト増幅特性の平均的特性を用いる方法がある。ダムサイトはいずれも比較的堅固な岩盤であるため、サイト増幅特性には極端な差がないと考えられ、平均的特性の利用には大きな問題はないと考えられる。ここでは、ダムサイトにおける平均的な増幅特性を用いることの妥当性もあわせて検討した。ダムサイトにおける平均的なサイト増幅特性も図3に併記する。

(4) 高周波数領域のスペクトル特性

高周波数領域におけるスペクトル特性は、高域遮断周波数 f_{max} と呼ばれる周波数以上では理論震源スペクトル

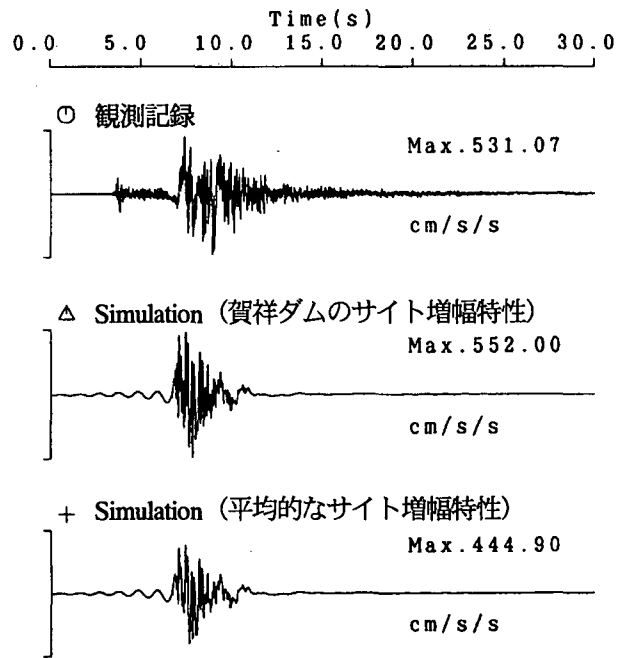


図4 加速度波形の比較 (EW 成分)

(ω^{-2} 則)で規定されるスペクトルよりも減衰することが知られている¹⁵⁾。賀祥ダムにおける鳥取県西部地震本震の観測記録は5Hz~6Hz程度以上の高周波数領域で減衰傾向が見られる。これに対し、サイト増幅特性の評価に用いた余震群の観測記録にはこうした高周波数領域の減衰傾向はさほど顕著ではない。したがって、余震記録から得られたサイト増幅特性をそのままシミュレーションに用いることは、高周波数領域で過大評価となる可能性がある。そこで、本シミュレーションでは f_{max} を5.5Hzとして、高周波数領域の補正を行なった。こうした補正は、池田・ほかの検討¹²⁾においても行なわれている。

3. 解析結果

シミュレーションによって得られた加速度波形と観測波形の比較を図4に、減衰定数5%の加速度応答スペクトルの比較を図5に示す。また、最大加速度・最大速度・最大変位の比較を表2・表3に示す。

(1) 賀祥ダムのサイト増幅特性を用いた場合

EW成分は観測記録と調和的な結果が得られた。NS成分についても、やや過小傾向が見られるものの、概ね妥当な結果が得られた。

(2) 平均的なサイト増幅特性を用いた場合

賀祥ダムのサイト増幅特性を用いた場合に比べてEW成分、NS成分ともにやや過小評価であった。しかし、工学的に有意な差ではなく、「平均的なサイト増幅特性を用いても固有の特性を用いた場合と大差なく評価できる」と考えている。

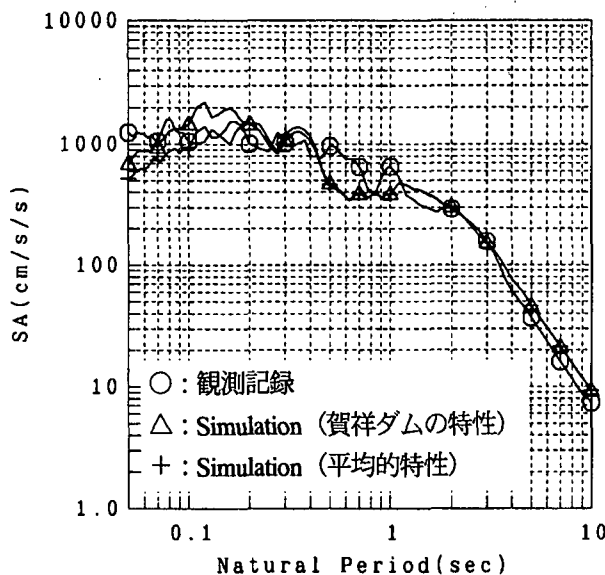


図5 加速度応答スペクトルの比較 (EW成分)

4. おわりに

平成12年鳥取県西部地震の賀祥ダムで観測された地震記録に対してハイブリッド法を用いて強震動シミュレーションを行なった。その結果、観測記録と概ね調和的な結果が得られ、地震動特性評価手法や地震動作成手法の妥当性が確認された。今後、地震観測の継続によりダムサイトにおける地震動特性の把握に努めるとともに、断層モデルに基づくダムサイト強震動シミュレーションにより想定される強震動を作成し、ダムの耐震性を検討していく予定である。

最後に、賀祥ダムにおける平成12年鳥取県西部地震の本震および余震記録を提供して頂いた鳥取県土木部砂防利水課各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説, p.2-6, 2000.
- 2) 釜江克宏・ほか：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.430, pp.1-9, 1991.
- 3) 安養寺学・ほか：ダムサイトにおける兵庫県南部地震の強震動シミュレーション, 地球惑星関連学会2000年合同大会, 2000.
- 4) 入倉孝次郎：大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測, 第24回地盤震動シンポジウム, pp.91-100, 1996.
- 5) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high - frequency ground

表2 最大加速度(A_{max})・最大速度(V_{max})・最大変位(D_{max})の比較 (EW成分)

	観測	シミュレーション	
		賀祥ダムの特性	平均的特性
A_{max}	531.1	552.0	444.9
V_{max}	49.3	62.4	62.8
D_{max}	16.4	16.3	16.3

表3 最大加速度(A_{max})・最大速度(V_{max})・最大変位(D_{max})の比較 (NS成分)

	観測	シミュレーション	
		賀祥ダムの特性	平均的特性
A_{max}	528.4	480.3	330.7
V_{max}	54.4	42.0	41.7
D_{max}	15.0	10.0	10.1

A_{max} :cm/s/s, V_{max} :cm/s, D_{max} :cm

motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.

- 6) Hartzell, S.H. : Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, pp.1-4, 1978.
- 7) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. of 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp.151-156, 1986.
- 8) Bouchon, M. : A simple method to calculate green's functions for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.71, pp.959-971, 1981.
- 9) 伊藤藤・ほか：西南日本内帯における地殻内地震発生圏, 京都大学防災研究所年報, Vol.38, B-1, pp.209-219, 1995.
- 10) 関口春子・岩田知孝：K-net, Kik-net地震記録を用いた断層破壊過程の推定, <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwata/ttr.source.html>, 2000.
- 11) 松元康広・岩田知孝：2000年鳥取県西部地震 (Mjma7.3) の断層面上の高周波 (2~10Hz) 地震波の生成過程の推定, <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/yasuhiro/totori.html>, 2000.
- 12) 池田隆明・ほか：経験的グリーン関数法を用いた2000年10月6日鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, <http://www.tobishima.co.jp/>, 2000.
- 13) 岩田知孝・入倉孝次郎：観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, Vol.39, pp.579-593, 1986.
- 14) 鶴来雅人・ほか：経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震2, Vol.50, pp.215-227, 1997.
- 15) Hanks, T.C. : f_{max} , *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.72, pp.1867-1879, 1982.