

# ダム建設における地震観測に基づくレベル2地震動の作成 —金居原水力発電所における検討—

松本明男<sup>1</sup>・山田雅行<sup>2</sup>・川西正夫<sup>3</sup>・澤田純男<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工修 関西電力(株)土木建築室水力開発グループ マネジャー (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島 3-3-22)

<sup>2</sup> 正会員 工修 (株)ニュージェック技術開発部耐震・防災室 課長代理 (〒542-0082 大阪府大阪市中央区島之内 1-20-19)

<sup>3</sup> 工修 関西電力(株)金居原水力発電所建設準備所 所附 (〒529-0402 滋賀県伊香郡木之本町杉野ワラベ 819-1)

<sup>4</sup> 正会員 工博 京都大学防災研究所 助教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ丘)

レベル2地震動を作成する方法としては、半経験的方法が最も精度が高いと考えられるが、当該地点での地震記録が必要である。しかしながら、実際に調査段階で地震計を設置した例はほとんどみられない。本報告では、金居原水力発電所のダムの設計に際して、各種調査を実施する段階で、建設地点に地震計を設置し、得られた観測記録に基づいて、半経験的方法を用いて、入力地震動を設定した。これにより、ダム建設地点の岩盤の地震応答特性および対象断層との相対位置による影響が反映された入力地震動を作成することが出来た。

**Key Words:** *design earthquake motion, ground motion record, semi-empirical method, earthquake-resistant design of dam*

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以来、近傍の内陸活断層を震源とする地震動に対して、土木構造物の耐震設計を行うことが求められるようになってきている。例えば、土木学会は現行の耐震設計の枠組みに加えて、内陸の断層破壊に起因する断層近傍の地震動の影響を耐震設計に取り入れることが必要であるとの提言<sup>1)</sup>を行なった。その中では供用期間中に発生する確率は極めて希であるが非常に強い地震動(レベル2地震動)を定義し、今後は土木構造物に対してこの地震動を用いて構造物の損傷過程まで立ち入って耐震性能を照査することとしている。

レベル2地震動を設定するにあたっては、想定される震源の破壊過程や構造物建設地点における振動特性を反映できる強震動予測手法によって作成することが必要となる。これは過去に発生した地震被害が地震動の特性(卓越周期)と地盤や構造物の振動特性(固有周期)が近かったために発生した事例が多いことから明らかである。このような強震動予測の方法には、大きく分類して理論的方法、半経験的方法、経験的(統計的)方法がある。後章に詳述するが、一般に理論的方法は震源・伝播特性のパラメータの設定が困難であり、経験的(統計的)方

法は特定の震源・サイトの特性を考慮する際に統計的要素が入ってしまう。一方、半経験的方法は、その地点で観測された中小地震を想定した断層の破壊過程に従って重ね合わせる方法で、モデル化は破壊過程のみであるため最も信頼性が高いと考えられる。ただし、この方法にはその地点で観測された中小地震の記録が不可欠である。

今日では、多くの土木構造物において地震観測が実施されており、半経験的方法に用いる中小地震は多く観測されているように思われる。しかしながら、この地震観測の大部分は土木構造物の完成後に管理用として設置されるもので、土木構造物の建設に先立ち、実際に調査時点で地震計を設置し、得られた地震記録に基づいて入力地震動を作成した例はほとんど見られない。

関西電力(株)では金居原水力発電所のダム建設に際して、入力地震動の作成に用いる中小地震の記録を得る目的で、調査段階から地震計を設置して観測を行ってきた。さらに、この観測によって得られた記録に基づいて、上述の半経験的方法<sup>2)</sup>である Irikura&Kamae の方法<sup>3)</sup>を用いてダムの設計に資するレベル2相当の入力地震動の作成を行った。本稿では地震観測から入力地震動作成までの金居原水力発電所における一連の検討を報告するものである。

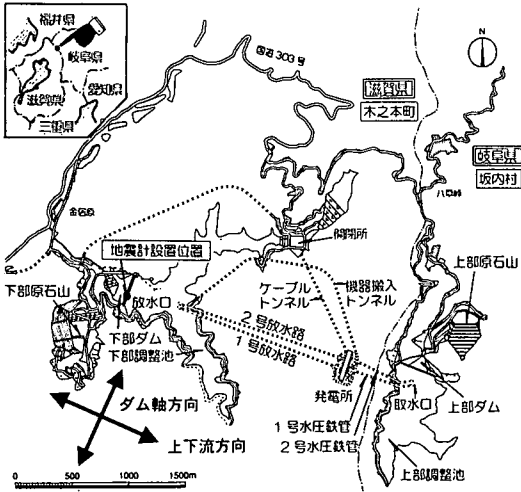


図-1 金居原地点の概要

ここに、入力地震動作成の対象とした金居原地点の概要を図-1に示す。金居原水力発電所は出力228万kWの揚水式発電所であり、上部ダムは岐阜県揖斐郡坂内村に位置し、木曾川水系揖斐川上流部の八草川に計画中の堤高148.5mの重力式コンクリートダム（以下、重力ダム）である。下部ダムは滋賀県伊香郡木之本町に位置し、淀川水系姉川上流部の須赤川に計画中の堤高108.2mの中央遮水壁型ロックフィルダム（以下、フィルダム）である。これらのダムの基礎岩盤は、古生代後期～中生代に形成された美濃帯からなり、頁岩を主体としている。

なお、本報告では地震計の設置から、入力地震動作成までのプロセスの記述に重点を置き、断層破壊パラメータの設定などに際し多くの検討を行なった点については、付録にその一部を記述するにとどめた。

## 2. 地震観測

### (1) 地震計の設置位置

通常、ダムにおける地震観測は、ダム完成後にダム管理の目的で行われる。その場合、地震計はダム堤体と基礎岩盤に相当する位置に設置されることが多く、その記録は、実際にダムが受けた地震動や、堤体の固有周期を把握するために用いられている。

金居原地点では、動的解析に用いる入力地震動作成や、地盤の特性の把握など、ダムの耐震性検討を行うための基礎資料を入手するために、各種調査と同時に地震観測を実施した。

着工前にダムサイトに地震計を設置する際の問題点として、電源の確保がある。本地点も地震計設置を検討した時点ではダムサイトに配電線が引かれておらず、電源

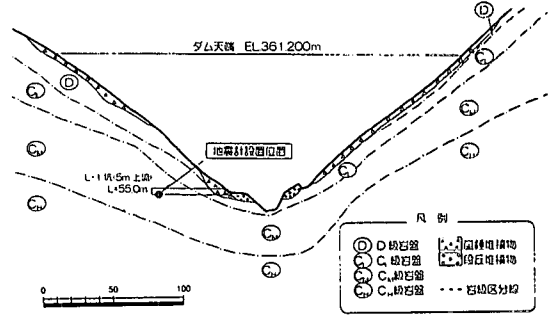


図-2 下部ダム軸断面図

の確保が必要となった。そこで、上部ダム、下部ダムにおいて、電源に太陽電池、バッテリーを対象とした検討を行った。太陽電池については、上部・下部ダム地点とも谷間であることや、冬季、パネルへの積雪などで、太陽電池が稼働できる日照時間が十分得られない恐れがある。バッテリーについては、上部ダム地点では、冬季、積雪により、道路が閉鎖され12～4月までの約5ヶ月間バッテリーの交換が不可能であるが、下部ダム地点では、冬季、除雪を行えるので通行は可能である。したがって、バッテリーを電源とし、地震計は下部ダムサイトに設置することとした。

地震計の詳細な設置位置は、下部ダム試掘横坑（L-1坑）内の、坑口から約50mの位置とした（図-2参照）。この位置の岩盤等級は、電力中央研究所方式でCM級、S波伝播速度（以下、Vs）はPS検層によると1500m/sec程度の値を有している。

### (2) 地震観測システム

検出器はサーボ型速度計（東京測振株、VSE-11、12）を使用した。速度計は、現在ダムで良く用いられている加速度計に比べ、周期1秒程度以下の短周期域で同等の性能を有しながら、長周期域のS/N比が優れた記録が得られる特徴がある。特に半経験的方法の要素地震に用いるためには、長周期域の信頼性の高い記録を得ることが必要であり、このような目的には速度計が最も適していると考えられる。検出器の仕様を表-1に示す。

収録器については、表-2に示す収録器として必要な機能を満たしていることと、小さな地震から強震記録まで精度良く記録出来ることが必要であり、表-3に示す仕様の収録器を使用した。

電源については、2.(1)で述べたようにバッテリーを採用しており、定期的な充電が必要である。本検討で採用した地震計を稼働させるためには、月1回の充電を行うこととして1.3kAhの容量が必要となる（これは普通自動車のバッテリー約50個を接続した容量に相当）。したがって、ダムサイトにある地震計の観測舎に併設されて

表-1 地震計の仕様

検出器	サーボ型速度計	
型名	VSE-11 (水平動用), VSE-12 (上下動用)	
測定範囲	速度	±40kine
	加速度	±1000gal
感度	速度	250mV/kine
	加速度	10mV/gal
周波数範囲	0.025~70Hz	

表-2 収録器として必要な機能

項目	機能
遅延時間の設定	トリガーレベル以上の揺れ (S 波部分) が感知された時点で、その数秒前まで記録でき、地震の初動部 (P 波部分) の観測が可能であること。
トリガーモード	感知するレベルを設定でき、地震以外の振動による誤動作が少ないこと。
自動時刻校正	観測時刻が十分な精度を有することで、記録の特定が正確にでき、他の地震計を含めた解析が可能であること。
PC によるデータの収録	記録されたデータが波形処理などの解析に直接利用できること。

表-3 収録器の仕様

収録器	DAIOL-100
A/D コンバータ	16bit
サンプリング周波数	100Hz 又は 200Hz
データ保存	IC メモリー
メモリー容量	4M バイト
遅延時間	10 秒又は 20 秒

いるポータブル発電機を運転し、約6時間バッテリーの充電を行っている。現地へ赴く際には、発電機を稼働させるための燃料と地震計の点検機器を、人力で約500m運搬する必要があり、特に冬季は積雪が多いため、雪かきを行いながら現地に向かった。また、充電の際には検出器と収録器の点検も実施した。

(3) 観測結果

設置した地震計によって平成7年1月25日の観測開始から平成9年10月末までに60の地震が観測された。観測結果を表-4に示す。

観測された60の地震のうち、加速度、速度とも最大の記録はNo.49地震で、6.594gal, 0.407kine、加速度が1galを超える記録は9地震、速度が0.1kineを越える記録は4地震である。規模が最も大きい記録はNo.24地震で、マグニチュード6.7、震源距離が最も近い記録はNo.30地震で、震源距離13.6km、震源距離が最も遠い記録はNo.24地震で、震源距離929.8kmである。

図-3に、観測された60地震の中から地震の規模(マグニチュード)と震源距離が異なる3地震の記録を示す。No.30地震は小規模・近距離地震の典型的な波形の一例

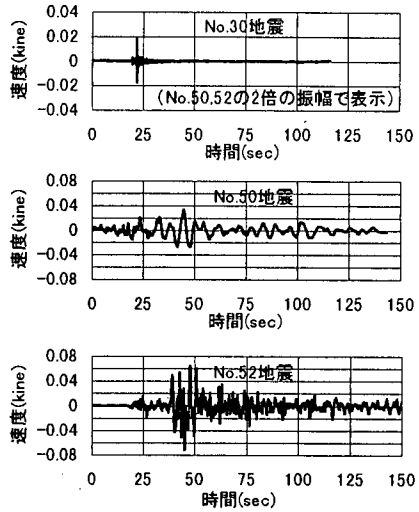


図-3 観測記録 (速度波形, ダム軸成分)

で、P波とS波が明瞭に分離でき、S-P時間(初期微動継続時間)が短く、S波主要動部の継続時間も短いという特徴を持っており、単純な点震源とみなしうる波形であると考えられる。

No.50地震は中規模・遠距離地震(震央距離約700km)で、震源が観測点から遠いため、P波の初動は観測されずに、S波部分またはそれによって励起された表面波が観測されていると考えられる。

No.52地震は両者の間で、中規模・中距離地震で、P波初動部分から長周期・小振幅の後続波までほぼ完全な形で波形が収録されている。また、P波およびS波の初動部分は単純な点震源では表現できないような複雑な形状をしている。

上記3波形に代表されるように、本検討では、検出器の選定時に意図していた、S/N比が優れ、短周期域から長周期域まで幅広い周期の記録を得ることが出来ている。

3. 入力地震動の作成

(1) 手法の選定

土木学会が提言する「レベル2地震動」を作成するには、対象とする内陸断層(震源)の性質、波動伝播経路の特性、対象地点のサイト特性を考慮する必要がある。このような場合、次の①~③の方法を、単独もしくは組み合わせで行われることが多い。

- ①食い違い弾性論と解析的なグリーン関数を組み合わせた理論的な方法

表-4 地震観測記録

No.	地震発生時刻	震源地	マグニチュード M	緯度	経度	深さ km	震央距離 km	震源距離 km	最大加速度 gal	最大速度 kine
1	1995/1/25 23:15:00	兵庫県東部	5.1	34.790	135.307	14.8	125.2	126.0	0.802	0.048
2	1995/2/18 21:37:33	淡路島	4.8	34.437	134.816	15.9	184.8	185.4	0.220	0.016
3	1995/3/10 16:31:42	福井県東部	4.3	36.033	136.740	7.4	65.0	65.4	0.395	0.016
4	1995/4/13 22:48:00	石川県加賀地方	4.0	36.386	136.575	8.4	94.0	94.4	0.315	0.007
5	1995/4/18 20:26:25	駿河湾	4.5	35.062	138.589	24.1	215.2	216.6	0.222	0.008
6	1995/5/8 1:19:00	若狭湾	3.4	35.720	135.922	7.8	38.0	38.9	0.448	0.012
7	1995/5/18 2:10:00	福井県嶺南地方	3.3	35.506	135.885	10.3	38.2	39.6	0.371	0.009
8	1995/6/7 21:23:00	長野県南部	3.6	35.766	137.546	12.1	114.6	115.3	0.277	0.007
9	1995/7/24 4:00:00	大阪府	4.1	34.925	135.552	14.1	98.8	99.8	0.392	0.009
10	1995/8/15 14:08:00	滋賀県	3.9	35.519	136.294	38.3	5.7	38.7	4.095	0.118
11	1995/8/15 21:32:00	滋賀県	3.9	35.515	136.283	38.5	6.3	39.0	3.185	0.092
12	1995/8/24 7:24:00	長野県南部	4.6	35.850	137.595	7.8	121.0	122.9	0.729	0.032
13	1995/9/9 0:39:00	紀伊水道	4.6	33.767	135.166	54.3	225.7	232.1	0.246	0.011
14	1995/10/1 12:07:00	長野県南部	4.5	35.775	137.538	11.7	114.1	114.7	0.475	0.015
15	1995/10/6 21:43:40	伊豆半島南方沖	5.6	34.148	139.107	9.3	300.9	301.1	0.232	0.015
16	1995/10/14 2:04:05	大阪湾	4.5	34.627	135.114	15.3	150.4	151.2	0.370	0.028
17	1996/1/4 12:52:00	奈良県	4.3	34.132	136.063	47.7	161.4	168.3	0.298	0.015
18	1996/2/7 10:33:00	福井県嶺北地方	4.9	35.932	136.626	12.2	49.9	51.3	1.628	0.061
19	1996/2/11 6:00:00	福井県嶺北地方	3.7	35.861	136.686	11.3	47.6	48.9	0.369	0.007
20	1996/2/12 3:15:00	福井県沖	4.2	36.138	135.447	14.2	99.5	100.5	0.378	0.010
21	1996/2/17 0:22:58	福島県沖	6.5	37.306	142.551	58.0	591.2	594.1	0.233	0.051
22	1996/3/6 23:35:00	山梨県東部	5.3	35.473	138.951	19.6	240.1	240.9	0.441	0.056
23	1996/3/12 12:05:26	滋賀・岐阜県境	2.7	35.500	136.371	10.6	10.1	14.6	1.060	0.009
24	1996/3/17 7:05:00	鳥島近海	6.7	28.887	139.498	472.1	801.0	929.8	0.189	0.035
25	1996/3/17 16:49:00	岐阜県美濃中西部	4.2	35.749	137.114	13.3	76.2	77.3	0.777	0.031
26	1996/4/21 22:54:00	愛知県西部	3.6	35.261	137.024	46.2	74.1	87.3	0.344	0.009
27	1996/5/27 5:38:16	静岡県中部	4.2	34.962	138.210	27.9	186.1	188.2	0.216	0.009
28	1996/6/9 1:46:07	三重県中部	3.7	34.770	136.082	64.8	91.1	111.8	0.330	0.011
29	1996/7/18 13:44:00	京都府南部	4.0	35.014	135.775	15.2	78.1	79.5	0.345	0.008
30	1996/7/28 8:24:00	滋賀県	3.6	35.448	136.313	14.6	13.6	13.6	1.268	0.019
31	1996/7/28 13:48:00	滋賀県	3.7	35.445	136.311	14.3	13.9	20.0	1.466	0.018
32	1996/7/30 4:36:00	滋賀県	3.9	35.422	136.312	15.1	16.5	22.4	4.359	0.128
33	1996/7/30 21:11:28	滋賀県	3.4	35.421	136.319	14.8	16.7	22.3	1.128	0.011
34	1996/8/3 8:18:00	滋賀県	3.7	35.422	136.305	13.7	16.5	21.4	0.827	0.014
35	1996/9/11 11:37:00	茨城県沖	6.4	35.636	141.220	52.0	444.7	447.8	0.115	0.047
36	1996/9/12 23:59:00	京都府南部	3.6	35.182	135.586	14.4	77.8	79.1	0.196	0.007
37	1996/10/5 9:51:00	静岡県中部	4.3	34.971	138.052	27.6	172.4	174.6	0.153	0.027
38	1996/10/6 21:56:00	静岡県西部	3.8	35.024	138.059	29.6	170.8	173.3	0.102	0.005
39	1996/10/19 1:44:47	東海道沖	5.8	33.804	137.599	356.0	229.5	423.6	0.228	0.028
40	1996/10/19 23:44:41	日向灘	6.6	31.795	131.992	41.2	578.5	580.0	0.112	0.084
41	1996/11/23 5:10:00	長野県西部	3.9	35.753	137.552	12.2	114.9	115.6	0.327	0.008
42	1996/11/28 16:41:00	兵庫県南東部	2.4	34.898	135.355	10.7	113.8	114.3	0.200	0.009
43	1996/12/3 7:18:00	日向灘	6.6	31.755	131.679	42.6	602.0	603.5	0.225	0.066
44	1996/12/21 10:28:00	茨城県南部	5.4	36.093	139.864	53.1	326.5	330.8	0.226	0.030
45	1997/1/1 18:35:23	滋賀県北部	3.4	35.457	136.337	12.1	13.0	17.8	0.439	0.008
46	1997/1/8 22:36:29	京都府南部	4.0	35.151	135.521	14.8	84.6	85.9	0.314	0.011
47	1997/3/4 0:30:23	伊豆半島東方沖	4.7	34.961	139.174	0.0	269.5	269.5	0.229	0.014
48	1997/3/4 12:51:27	伊豆半島東方沖	5.7	34.952	139.173	2.6	269.7	269.7	0.229	0.024
49	1997/3/16 14:51:39	愛知県東部	5.8	34.925	137.528	39.1	132.6	138.2	6.594	0.407
50	1997/3/26 17:31:48	鹿児島県薩摩地方	6.5	31.969	130.361	11.9	678.9	679.0	0.222	0.033
51	1997/5/6 6:07:03	岐阜県美濃中西部	3.4	35.397	136.663	41.2	38.1	56.1	0.626	0.016
52	1997/5/24 2:50:38	遠州灘	5.9	34.498	137.503	23.1	161.9	163.5	0.472	0.073
53	1997/6/12 10:24:29	兵庫県南部	3.9	34.904	135.431	15.1	108.2	109.3	0.283	0.008
54	1997/6/25 18:50:13	兵庫県西部	6.3	34.438	131.669	8.3	440.0	440.1	0.500	0.019
55	1997/7/24 13:59:49	福井県嶺北地方	3.7	35.924	136.612	12.9	48.4	50.1	0.345	0.010
56	1997/9/4 5:15:00	鳥取県西部	5.1	35.259	133.379	8.9	266.9	267.1	0.300	0.018
57	1997/9/7 2:19:00	京都府南部	4.1	35.039	135.524	17.8	91.9	93.6	0.600	0.124
58	1997/9/8 8:40:38	東京湾	5.2	35.555	140.005	108.6	335.1	352.2	0.188	0.010
59	1997/10/11 14:44:00	遠州灘	4.9	34.420	138.234	35.7	217.7	220.6	0.221	0.018
60	1997/10/21 19:55:00	静岡県中部	4.3	35.110	138.232	33.1	182.5	185.5	0.252	0.014
		気象庁発表値					経度・緯度から計算		観測値	

②小地震の観測波形を経験的なグリーン関数として利用する半経験的な方法

③種々の経験則を用い断層面の広がりなどを考慮した方法

①の方法は震源～観測点間の伝達特性を表すグリーン関数を解析的に与える方法である。現在の技術レベルでは、周期2秒程度以上の長周期域ではかなり精度良く推定できるものの、短周期域まで適用できるグリーン関数を解析的に与えるのは難しい。

③は、例えば点震源を仮定して経験的に求められた波形包絡線を断層面の破壊過程に従って、重ね合わせて応答スペクトルを合成する翠川・小林の方法<sup>4)</sup>などがある。

これらの方法は計算に必要な入力データが比較的少なく計算が容易であるという利点はあるが、経験式に基づくため、すべりの方向による違いや放射特性などが考慮されない。

②は①と③の中庸で、発震機構や波動伝播経路が想定する大地震と共通する中小地震の観測波形をグリーン関数として考え、それを仮定した断層の破壊過程に従って重ね合わせることでより大地震の地震動を予測するものである。グリーン関数は経験的に、一方、断層の破壊過程は理論的に与えることから、半経験的方法（または、経験的グリーン関数重ね合わせ法）と呼ばれている。これまでに、大地震の余震記録からその本震動を合成するな

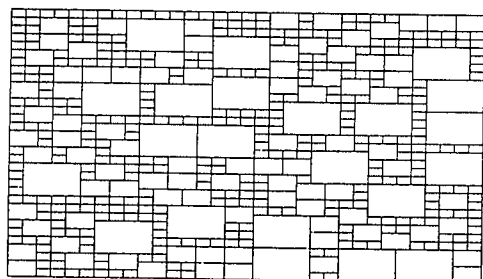


図-4 フラクタルな不均質断層モデルの例

どの検討により、実際の地震動で適用性が検証されており<sup>5)~9)</sup>、現時点では最も精度の高い推定法と考えられる。したがって、本検討では、②の半経験的方法である Irikura&Kamae の方法<sup>3)</sup>を採用した。

半経験的方法を用いる際には、適切な小地震記録の選択や重ね合わせ方法を考慮する必要がある。一般に、半経験的方法では、小地震の重ね合わせ数Nが多い場合に、合成された大地震が低周波数域と高周波数域では $\omega^{-2}$ モデルに従うが、中間周波数域では人工的な断層分割により振幅が落ち込むという問題点が報告されている。Irikura&Kamae の方法<sup>3)</sup>では、この中間周波数域での落ち込みを解決する方法として自己相似（フラクタル）な不均質断層モデルを導入している。フラクタルな不均質断層モデルの例を図-4に示す。このモデルは、大地震が成長する過程で種々のサイズのクラックが形成され、それらのクラックが結合して最終的には1つの大きなクラック、大地震となるという考えに基づいている。

半経験的方法により波形を合成する場合、対象とする断層と適切な要素地震を定め、それから求めたパラメータと波形合成に必要な条件を設定する必要がある。また、その合成結果が設計に用いる波形として妥当かどうかを判断する必要もある。入力地震動作成のフローを図-5に示す。

## (2) 対象断層

「新編 日本の活断層」<sup>10)</sup>に記載されているもののうち、確実度がIまたはII、かつ活動度がAまたはBの中から、金居原地点を中心として半径500km以内にある活断層を抽出した（以下、周辺活断層と呼ぶ）。金居原地点と周辺活断層との位置関係を図-6に示す。これらの周辺活断層について、断層長から松田の式<sup>11)</sup>を用いてマグニチュードを推定し、マグニチュードと周辺活断層からの最短距離を用いて、福島・田中の式<sup>12), 13)</sup>の岩盤に対する距離減衰式によりダム地点における各断層による最大加速度を推定した。結果を表-5に示す。なお、この距離減衰式は、兵庫県南部地震のダムサイト岩盤での観測

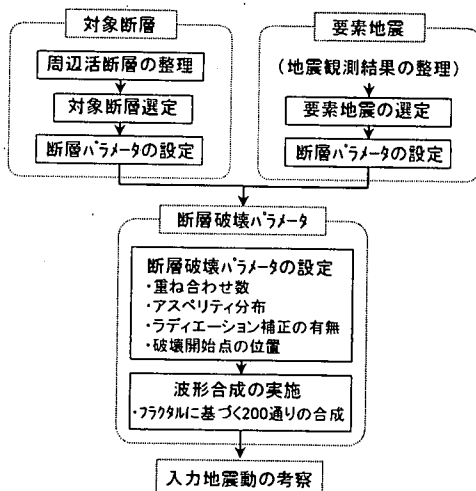


図-5 入力地震動作成フロー

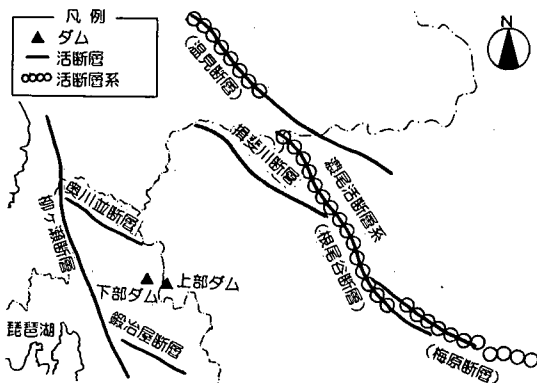


図-6 金居原地点と周辺活断層との位置関係

記録<sup>14)</sup>を包絡していることが確認されている（図-7参照）。表-5を見ると上部・下部ダムとも柳ヶ瀬断層による最大加速度が最も大きくなるため、これを対象断層として選定した。

柳ヶ瀬断層は最近の調査で延長は28km程度で断層の北部と南部で活動時期が異なっているとの報告<sup>15)</sup>もあるが、本検討では延長は「新編 日本の活断層」<sup>10)</sup>より37kmとし、断層全体が同時に動くものと仮定した。断層幅については、微小地震の震源分布<sup>16)</sup>から20kmとした。

図-8に既往地震の地震モーメントと断層の破壊面積の関係<sup>17)~19)</sup>を示す。ストレスドロップは、これらの記録のうち、日本の記録の平均より80barとした。なお、兵庫県南部地震の観測記録から高精度に算出された各種のインバージョン結果をもとに換算したストレスドロップは10~30bar程度<sup>20)~24)</sup>であり、これと比較すると80barという数値はかなり大きな値である。したがって、兵庫県南部地震と比べて、2倍以上の値を設定することになる。

地震モーメントは、Eshelby<sup>25)</sup>に基づく式(1)によって

表-5 想定される最大加速度

断層名	確実度	活動度	最大加速度 (gal)	
			上部	下部
柳ヶ瀬断層	I~III	B	284	302
奥川並断層	II	B~C	268	286
濃尾活断層系	I~II	A~B	231	225
揖斐川断層	I~II	B	190	180
鍛冶屋断層	I~II	B	212	216

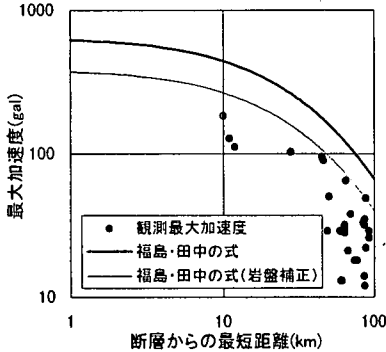


図-7 兵庫県南部地震のダムサイト岩盤での観測記録<sup>14)</sup>と福島・田中の式<sup>12), 13)</sup>の岩盤に対する距離減衰式( $M=7.2$ )との関係

計算し、 $6.6 \times 10^{26}$  dyne·cm となった。

$$\Delta\sigma = 7/16 \times M_0 / r^3 \quad (\pi \times r^2 = L \times W) \quad (1)$$

ここに、 $\Delta\sigma$  : ストレッドロップ、 $M_0$  : 地震モーメント、 $r$  : 円形断層を仮定した場合の断層の半径、 $L$  : 断層の長さ、 $W$  : 断層の幅である。

ライズタイムは Somerville et al<sup>17)</sup> の式 (2) によって 1.5 秒とした。式 (2) は北西アメリカの地震記録に基づいて得られた回帰式であるが、兵庫県南部地震の結果<sup>19)</sup> と調和的であるといわれている。また、一般に堤高 100m 程度のフィルダムが 1.0 Hz 程度の一次固有周波数をもつことを勘案すると、Somerville et al<sup>18)</sup> に基づく値 (=1.8 秒) や日本の地震記録を回帰した式<sup>17)</sup> より算出した値 (=5.4 秒) と比較して、工学的により安全側の設定になっていることがわかる。

$$\tau = 1.72 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3} \quad (2)$$

断層から対象地点までの S 波伝播速度は一般的な値として 3.5 km/s、断層面内の破壊伝播速度は同様に一般的な値として S 波伝播速度の 70%<sup>26)</sup> に相当する 2.45 km/s とした。設定した断層パラメータを表-6 に示す。

### (3) 要素地震

波形合成に半経験的方法を用いる場合、グリーン関数

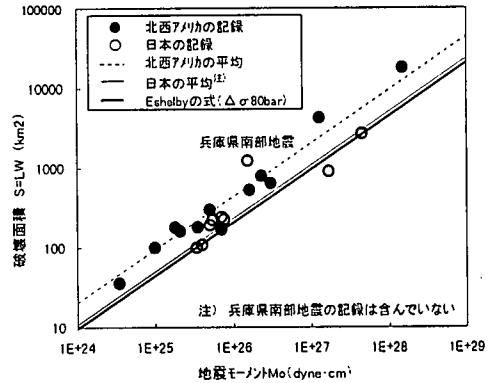


図-8 カリフォルニアおよび日本の地震断層における断層破壊面積と地震モーメントの関係<sup>17) ~ 19)</sup>

表-6 対象断層断層パラメータ

パラメータ	数値	備考
長さ L	37km	「新編 日本の活断層」より
幅 W	20km	地震の震源深さ分布より
マグニチュード	M7.4	松田の式より
ストロップ $\Delta\sigma$	80bar	既往地震の平均より
地震モーメント $M_0$	$6.6 \times 10^{26}$ dyne·cm	(1)式より
S波伝播速度 $V_S$	3.5km/sec	一般値
破壊伝播速度 $V_R$	2.45km/sec	$0.7 \times V_S$ より算出
ライズタイム $\tau$	1.5sec	(2)式より

として用いる要素地震が必要となる。本検討では設置した地震計で観測された 60 の地震記録の中から、要素地震としての条件を満たす地震の選定を行った。要素地震としての条件は、震央位置、震央深さ、メカニズムなどが、対象断層の想定しているものと近いこと、観測波形の S/N 比が十分高く、記録として信頼出来ることである。

これらの条件とその選定結果を表-7 に示す。なお、選定した要素地震に対して合成に用いるのは、通常、振幅が大きく構造物に最も影響を与えと考えられる水平動 (ダム上下流方向) S 波主要動部とする。検討の結果、1996 年 7 月 30 日の No. 32 地震の記録 (表-8 参照) を要素地震として選定した。また、ほぼ同一のメカニズムを持つと考えられる No. 30~34 地震の変位フーリエスペクトルをそれぞれの地震モーメントで除して、地震のエネルギーを同一にして比較した図-12 を見ると、No. 32 地震が 5 地震の中で最も平均のスペクトルに近いことが確認できる。

要素地震として選定した No. 32 地震の断層パラメータを表-9 のように設定した。これは、観測記録の変位スペクトルからコーナー周波数とフラットレベルを求め、短周期成分に与える影響の大きい遠方場の S 波についての式 (3)<sup>27)</sup>、円形断層を仮定した Brune<sup>28)</sup> による式 (4)、式 (1) によりそれぞれ、地震モーメント、断層面積、ストレッドロップを求めたものである。

表-7 要素地震選定結果

項目	内容	選定要素地震番号	備考
震央位置	観測波形の震央位置が、対象断層（柳ヶ瀬断層）の近傍に位置する	No.10, 11, 30, 31, 32, 33, 34	60個の観測記録のうち、対象断層近傍に位置する地震の震央位置図を図-9に示す。
震源深さ	観測波形の震源深さが、対象断層で想定される震源深さに近い。	No.30, 31, 32, 33, 34	想定される対象断層の震源深さは約20km。No.30~34も同様の20km以下に対し、No.10, 11は約40kmと深い。
メカニズム	観測波形のメカニズムが対象断層で想定されるメカニズムに近い。	No.30, 31, 32, 33, 34	図-10に示すようにNo.30~34は対象断層と同様のメカニズム解を持つ（左横ずれ）。
波形の精度	観測波形のS/N比が十分高い。	No.32	図-11に示すようにNo.32のS/N比が低周波数域（長周期域）まで最も高い。

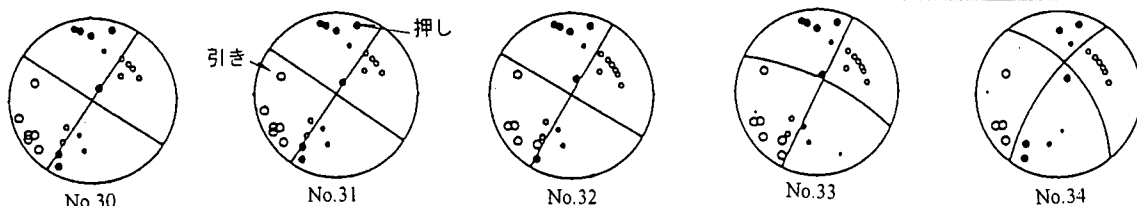


図-10 No. 30~34の5地震のメカニズム解（京都大学防災研究所により決定）

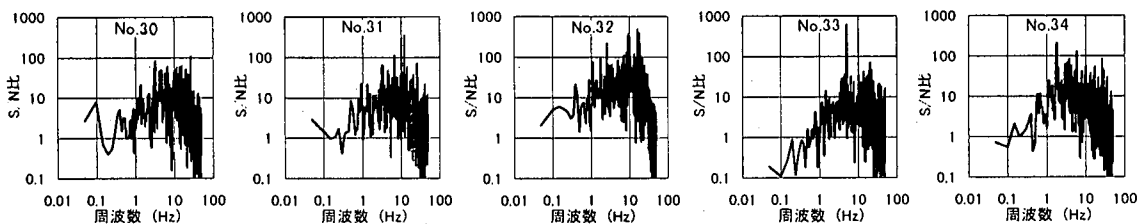


図-11 No. 30~34地震のS/N比の検討

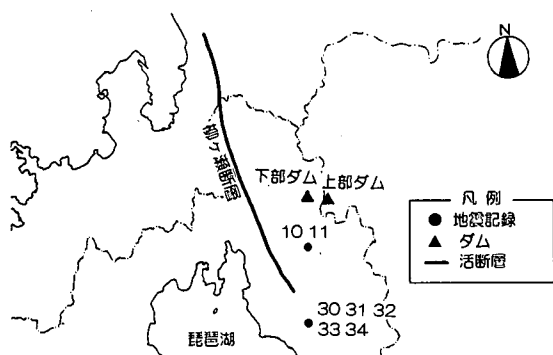


図-9 観測記録の震央位置図

$$M_0 = 4 \times \pi \times \rho \times X \times V_s^3 \times \Omega_0 / R(\theta, \phi) \quad (3)$$

ここに、 $\rho$  : 密度 (=2.7g/cm<sup>3</sup>)、 $X$  : 震源距離、 $V_s$  : S波速度、 $\Omega_0$  : フラットレベル、 $R(\theta, \phi)$  : ラディエーションパターンの補正係数 (=0.63) である。

$$r = 2.34 \times V_s / (2 \times \pi \times f_c) \quad (4)$$

ここに、 $f_c$  : コーナー周波数である。

#### (4) 断層破壊パラメータ

波形合成を行うために必要な断層破壊パラメータを表-10のように設定した。これは、本震を合成するため

表-8 要素地震の諸元

地震発生日、時刻	1996.7.30, 4:36
震源地	滋賀県
マグニチュード	M4.1
緯度、経度	35.4°, 136.3°
深さ	15.1km
震央距離	18.9km
震源距離	27.5km
最大加速度	4.359gal
最大速度	0.128kine

の要素地震の重ね合わせ数は式(5)によって計算し、アスペリティ、破壊開始点の位置、ラディエーション補正の有無については、過去の研究成果<sup>18), 29)~31)</sup>を参考に工学的な判断により設定したものである。なお、設定した条件の妥当性に関する検討結果は付録に示す。

$$N = \sqrt[3]{(M_0 / (C \times M_{0e}))} \quad (5)$$

ここに、 $N$  : 重ね合わせ数、 $C$  : ストレスドロップ補正係数 (=  $\Delta\sigma / \Delta\sigma_e$ ) である。

さらに、本検討で採用した、フラクタルに基づく断層分割は、乱数を用いて作成するため一義的に決めることは出来ないため、断層分割を200通りの乱数に対して定義することとした。

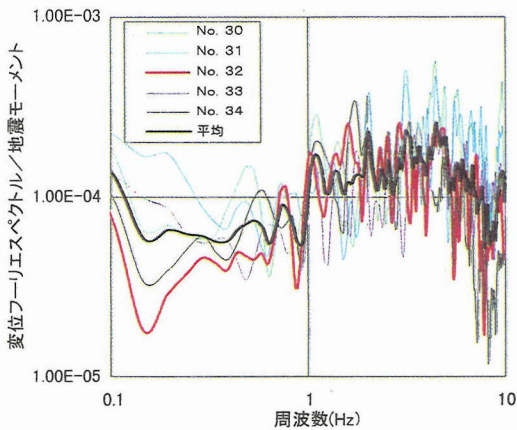


図-12 No. 30～34 地震の比較

表-9 要素地震断層パラメータ

パラメータ	設定値	備考
フラットレベル	$\Omega_0$ 0.682 × 10 <sup>3</sup> cm <sup>2</sup> ·sec	波形データより
コーナー周波数	$f_c$ 2.78 Hz	
地震モーメント	$M_{0e}$ 4.3 × 10 <sup>21</sup> dyne·cm	(3)式より
破壊面積	0.69 km <sup>2</sup>	(4)式より
ストレストロップ	$\Delta\sigma_e$ 18.4 bar	(1)式より

表-10 断層破壊パラメータ

項目	設定値	備考
重ね合わせ数	33	(5)式より
アスペリティ強度比	2.01	文献18)
アスペリティ分布	図-13	付録参照
破壊開始点		
ラディエーション補正の有無		

#### 4. 作成した入力地震動の考察

前章の解析の結果により、フラクタルに基づく200通りの断層分割で合成した200波の加速度応答スペクトルを図-14に示す。このスペクトルを検討するため、フラクタルに基づく200波の合成波形と、既往強震波形（地震時挙動解析に従来よく用いられている開北橋波、および建設省のダム耐震性の検討<sup>14)</sup>で、重力ダム、フィルダムに大きな影響を与える結果となった兵庫県南部地震の観測波形である一庫波及び箕面川波を、応答スペクトルで比較した(図-15)。なお、既往強震波形の最大加速度は、建設省のダム耐震性の検討で設定されている250 galに振幅調整したものを用いた。図-15によれば、3波の既往強震波形が今回作成した200波の合成波形の、最大および最小の包絡の範囲には含まれていること、更に150mクラスの重力ダムの一次固有周期0.5秒付近では一庫波が、100mクラスのフィルダムの一次固有周期1秒付近では箕面川波が200波の最大の包絡に近いことが分かった。合成される波形は対象断層や対象位置により変わるが、

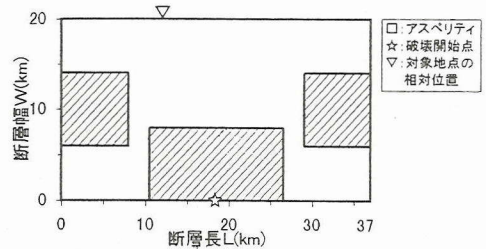


図-13 今回設定したアスペリティ分布と破壊開始点 (アスペリティ I)

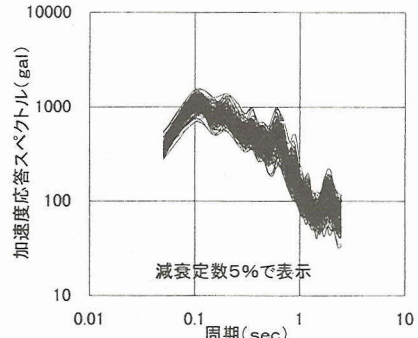


図-14 200通りの断層分割で合成した加速度応答スペクトル

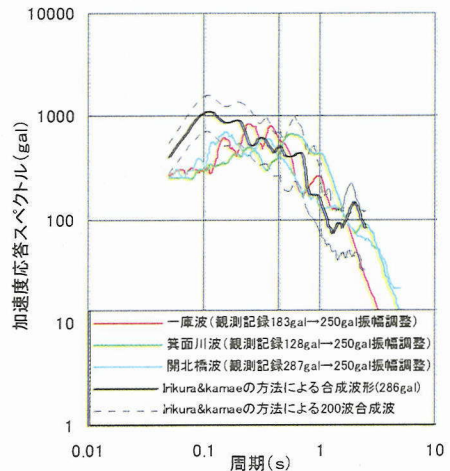


図-15 Irikura&Kamaeの方法<sup>3)</sup>による200波合成波形と既往強震波形の関係

今回作成された合成波形の応答スペクトルは、3波の既往強震波形と良く整合したものとなっている。

ここで作成した200波の合成波形は、断層パラメータは全く同じで、フラクタルによる要素分割のみが乱数に基づいて発生されるために異なったものとなる。すなわち、200波の間のばらつきは、いわば“計算上の”ばらつきと考えることができる。したがって、200波の中からダムの地点に生じる可能性が最も高い波として、200波の加速度応答スペクトルの平均に近いスペクトルを持つ波形を入力地震動として選定することができる。



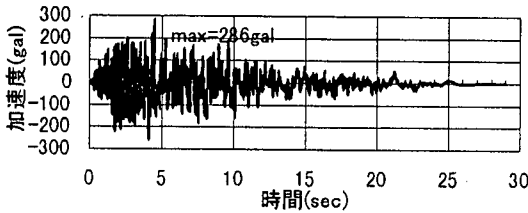


図-16 入力地震動合成波形

考えられる。なお、選定の際に考慮する周期帯(0.2~1.0秒)は、ダムの固有周期を勘案することとした。

その結果、最大加速度286galの波形を動的解析に用いる入力地震動として選定した。入力地震動の加速度波形を図-16に示す。286galという最大加速度は、福島・田中の距離減衰式(岩盤補正)から求めた最大加速度284gal(上部ダム地点)、302gal(下部ダム地点)とほぼ同程度の値となっている。また、主要動の継続時間は13秒程度であり、兵庫県南部地震で観測されたマグニチュード7クラスの岩盤での観測記録13秒と整合する。

## 5. おわりに

金居原地点において、調査段階で地震計を設置して中小地震の記録を収集し、これに基づいて入力地震動を作成する方法について示した。作成された入力地震動は、ダム建設地点の岩盤の地震応答特性および対象断層との相対位置による影響が反映されたものと考えられる。

本報告で述べたような方法が一般的に用いられるようになれば、今後、地盤調査などの設計に必要なとされる調査項目の一つとして、地震観測を行うことが重要となると思われる。

謝辞：本検討で御指導、御協力をいただいた京都大学工学研究科 土岐憲三先生、同防災研究所 片尾浩先生、同原子炉実験所 釜江克宏先生に紙面を借りて謝意を表します。

## 付録

波形合成に必要な条件であるアスペリティ、ラディエーション補正の有無、破壊開始点の位置は、合成結果に影響するので、各項目に関してパラメータスタディを行い、本検討で設定した数値、内容の妥当性の検討を行っている。なお、種々の検討を行う前提条件として、対象構造物の固有周期(金居原地点で計画されている150mクラスの重力ダム0.5秒、および100mクラスのフィルダム1秒)を考慮し、検討の際にはこの範囲を対象とした。

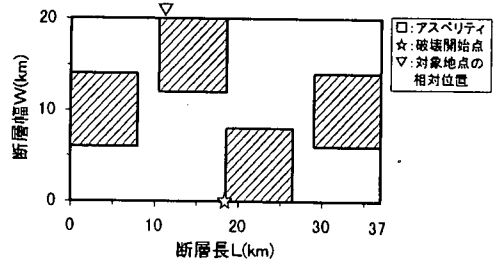


図-17 検討に用いたアスペリティモデル(アスペリティⅡ)

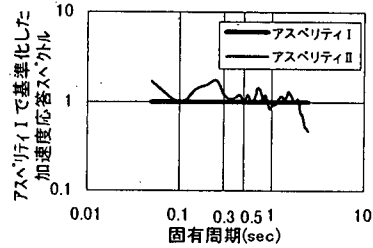


図-18 アスペリティの違いによる合成結果の比較

## A. アスペリティ分布

本検討で設定したアスペリティ分布は、Somerville et al<sup>18)</sup>による、地震のすべり変位量の空間分布の検討を参考に設定した。

このアスペリティ分布が観測点での地震動に与える影響について検討するために、設定したアスペリティ(アスペリティⅠ)に対して、アスペリティの一部を地表付近としたアスペリティⅡを設定し、波形合成を行った。アスペリティⅡを図-17に、波形合成結果について、アスペリティⅠの結果で基準化した加速度応答スペクトルとの関係を図-18に示す。その結果、アスペリティⅡの応答スペクトルはアスペリティⅠと比較して、周期0.3秒以下の短周期側では大きくなるが、0.3秒以上ではあまり変わらない結果となっている。

## B. ラディエーション補正の有無

地震動の波動エネルギーは、その射出方向によって異なるという特性(ラディエーションパターン)を持っており、波形合成の際にはラディエーション特性を考慮(補正)する必要があると考えられる。しかし、ラディエーション特性は長周期領域では理論解の分布に従うが、短周期領域ではその分布が明確でなくなることが知られており、Boore et al<sup>30)</sup>は2秒以上の周期では理論的なラディエーション特性を有するが、0.2秒以下ではまったくその特性は見られないとしている。観測データが乏しいため明確に議論した研究はないが、強震動予測において地盤の不均一性、ラディエーション特性の三次元性を考慮すると、概ね1.0秒以下の短周期域では、ラディエーション特性を理論通りに与えた(ラディエーション補

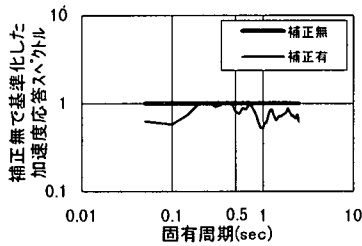


図-19 ラディエーション補正の有無による合成結果の比較

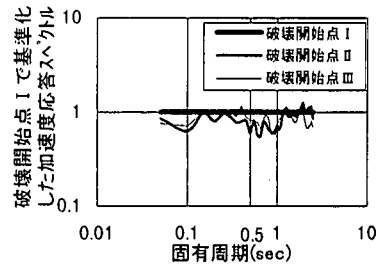


図-21 破壊開始点の違いによる合成結果の比較

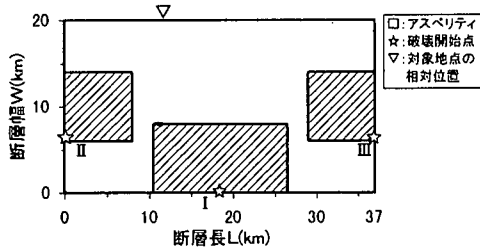


図-20 破壊開始点の検討位置

正有りの)予測結果は必ずしも適当でないと考えられる。本検討では、対象とする周期は0.5~1秒程度であることから、ラディエーション補正は無と設定した。

このラディエーション補正の有無が地震動に与える影響について検討するために、補正有り無しについて波形合成を実施し、補正無の結果で基準化した加速度応答スペクトルでその影響の確認を行った。なお、ラディエーション補正は、釜江ら<sup>31)</sup>で提案されている周波数依存型の補正方法を用いた。結果を図-19に示す。両者を比較すると、今回選定した補正無の方が卓越する結果となっている。

### C. 破壊開始点

本検討では、観測地点の対象断層に対する相対位置が、走向方向ではなく側面に位置していることから、断層中央下端を破壊開始点にした場合が、観測地点に波が同時に到達することが多くなると考えられることより、破壊開始点の位置を設定した。

この破壊開始点の位置が、観測地点での地震動に与える影響について検討するために、断層両端を破壊開始点としたII、IIIと、今回設定したIとの比較検討を行った。

(図-20参照)。波形合成結果について、破壊開始点Iの結果で基準化した加速度応答スペクトルとの関係を図-21に示す。図-21を見ると、周期0.5~1.0秒間では破壊開始点Iが他の2つよりも卓越する結果となっている。

### 参考文献

1) 土木学会耐震基準等基本問題検討会議編：土木学会耐震基準等に関する提言集，土木学会，1996。

2) Irikura,K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, 第7回日本地震工学シンポジウム, pp.151-156, 1986.

3) Irikura,K. and Kamae,K. : Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, Annali di Geofisica, Vol.37, pp.1721-1743,1994.

4) 翠川三郎, 小林啓美: 地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定, 日本建築学会論文報告集, 282号, pp.71-79, 1979

5) 武村雅之, 池浦友則: 震源の不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価, 地震, 第40巻, pp.77-88, 1987.

6) 壇一男, 渡辺孝英, 田中貞二: 半経験的波形合成法による1976年中国唐山地震の遠方場における加速度波形の再現, 日本建築学会構造系論文集, 第403号, pp.35-44, 1990.

7) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1946年南海(M<sub>w</sub>=8.1)地震時の震源近傍及び周辺地域における強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第455号, pp.61-71, 1994.

8) 松本正毅, 白方邦博, 金谷賢生, 山田雅行, 中野歩: 経験的グリーン関数法による波形合成の適用性について, 地球惑星科学関連学会合同大会, p.195, 1996.

9) 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震の震源断層, 強震動と被害の特徴, 物理探査, Vol.48, pp.463-489, 1995.

10) 活断層研究会編: [新編]日本の活断層, 東京大学出版会, 1991.

11) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 第28巻, pp.269-283, 1975.

12) Fukushima,Y. and Tanaka,T. : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Simizu Tech, No.10, pp.1-11, 1991.

13) 福島美光, 田中貞二: 新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 地震学会講演予稿集, No.2, p.116, 1992.

14) ダムの耐震性に関する評価検討委員会編: ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書, 建設省河川局, 1995.

15) 武藤章, 豊蔵勇, 松浦一樹, 池戸正行: 活断層調査の例一柳ヶ瀬断層, 応用地質, 22巻, pp.32-51, 1981.

- 16) 平野憲雄, 西上欽也, 竹内文朗, 渡辺邦彦, 安藤雅孝: 北陸地方の地震活動の時間変化, 京都大学防災研究所年報, 第37号, p.354, 1994.
- 17) Somerville,P.G., 入倉孝次郎, 澤田純男, 岩崎好規, 田居優, 伏見実: 地震断層のすべり変化量の空間分布の検討, 第22回地震工学研究発表会, pp.291-294, 1993.
- 18) Somerville,P.G., Irikura,K., Graves,R., Sawada,S., Wald,D., Abrahamson,N., Iwasaki,Y., Kagawa,T., Smith,N. and Kowada,A.: Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, Seismological Research Letters, Vol.70, No.1, 1999.
- 19) Irikura,K., Iwata, T., Sekiguchi, H., Pitarka, A. and Kamae,K. : Lesson from the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Journal of Natural Disaster Science, Vol.17, pp.99-127, 1996.
- 20) Ide,S., Takeo,M. and Yoshida,Y.: Source Process of the 1995 Kobe Earthquake: Determination of Spatio-Temporal Slip Distribution by Bayesian Modeling, B.S.S.A, Vol.86, pp.547-566, 1996.
- 21) Sekiguchi,H., Irikura,K., Iwata,T., Kakehi,Y. and Hoshiba,M.: Minute Locating of Faulting beneath Kobe and the Waveform Inversion of the Source Process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, Earthquake Using Strong Ground Motion Records, J.Phys.Earth,Vol.44, pp.473-487, 1996.
- 22) Horikawa,H., Hirahara,K., Umeda,Y., Hashimoto,M. and Kasano,F.: Simultaneous Inversion of Geodetic and Strong-Motion Data for the Source Process of the Hyogo-ken Nanbu, Japan, Earthquake, J.Phys.Earth, Vol.44, pp.455-471, 1996.
- 23) Yoshida,S., Koketsu,K., Shibasaki,B., Sagiya,T., Kato,T. and Yoshida,Y.: Joint Inversion of Near- and Far-field Waveforms and Geodetic Data for the Rupture Process of the 1995 Kobe Earthquake, J.Phys.Earth,, Vol.44, pp.437-453, 1996.
- 24) Wald,D.J.: Slip History of the 1995 Kobe, Japan, Earthquake Determined from Strong Motion, Telesismic, and Geodetic Data: J.Phys.Earth, Vol.44, pp.489-503, 1996.
- 25) Eshelby,J.D. : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proc.Roy Soc.Lond., A.241, pp.376-396, 1957.
- 26) 宇津徳治, 嶋悦三, 吉井敏尅, 山科健一郎: 地震の事典, 朝倉書店, 1987.
- 27) 理論地震動研究会編: 地震動-その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994.
- 28) Brune,J.N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, Journal of geophysical research, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 29) 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地震動の予測, 第24回地盤震動シンポジウム, pp.91-100, 1996.
- 30) Boore,D.M. and Boatwright,J. : Average body-wave radiation coefficients, B.S.S.A, Vol.74, pp.1615-1621, 1984.
- 31) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地域的な震源スケールング則を用いた地震 (M7級) のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp57-70, 1990.

(2000.10.4 受付)

## PREDICTION OF LEVEL-2 EARTHQUAKE MOTION FOR EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN OF DAM WITH A SEISMOGRAMS RECORDED AT THE SITE -A CASE AT THE SITE OF KANEIHARA PUMPED STORAGE POWER PROJECT-

Akio MATSUMOTO , Masayuki YAMADA , Masao KAWANISHI and Sumio SAWADA

For the Kaneihara pumped storage power station of Kansai Electric Power Co., we evaluate a Level-2 earthquake motion for the seismic design of dam using seismograms recorded at the site.

In most projects of infrastructure construction, strong motion observation is usually started for their maintenance after their construction is completed, and a seismograph is rarely installed before their design. The method of Irikura&Kamae(1994), one of the empirical Green's function methods, is selected to estimate earthquake ground motions. The method is one of the most accurate techniques, but it is rarely applicable to practical design because of the lack of ground motion records at the construction site.

In this project, a seismograph has been installed at the site before a process of design. We estimate strong motions which would be generated by Yanagase fault using ground motion datum observed by the seismograph. The simulated strong ground motions include the effect of the source process, the amplification at the site and the characteristics of propagation path between them properly. The Level-2 earthquake motion for seismic design of the rock-fill dam is evaluated based on the simulation.