

砂防施設の地震計の観測記録を用いた 砂防えん堤の地震応答特性について

武澤 永純¹・内田 太郎¹・田村 圭司¹・栗原 淳一²

¹独立行政法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail:takezawa@pwri.go.jp

²長野県土木部砂防課(〒380-8570 長野市大字南長野字幅下691-2)

E-mail:sabo@pref.nagano.jp

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、砂防施設以外の土木構造物が大きな被害を受けたことに鑑み、「砂防設備の耐震設計に関する検討委員会」を設置して砂防施設の耐震性評価について検討がなされた。その結果、砂防設備に関する地震動の観測体制の強化、充実を図る事が課題とされ、砂防施設に地震計が設置、観測が開始された。本報告は、各地方整備局、都道府県で収集された地震計データについて、砂防えん堤の堤体および地盤に関する地震動応答特性について検討を行い、今後の砂防えん堤の耐震設計の検討に資するための基礎資料を取りまとめたものである。その結果、砂防えん堤の堤体および地盤に関する基本的な応答特性を明らかにする事ができた。

Key Words : Sabo Dam, Ground of Sabo Dam, Seismic observation, Earthquake response

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震において、砂防えん堤等の砂防施設では一部で亀裂・破損等の軽微な損傷が生じたものの、砂防設備の著しい機能の損失や、人命・家屋への直接的な災害および二次災害は生じなかった。

しかし、兵庫県南部地震により、多くの土木構造物が大きな被害を受けていることを鑑み、建設省(当時)では、社団法人砂防学会に委託し、砂防設備の耐震設計等について検討を依頼した。これにより、同学会は「砂防設備の耐震設計に関する検討委員会」を設置して検討を行った。委員会では、FEMによる解析により砂防えん堤の耐震性を検討し、現行の設計基準で設計された砂防えん堤は、兵庫県南部地震と同程度の大規模な地震動に対して基本的に耐震性を有しており、現行の設計基準は耐震性の面からは妥当であると結論付けた¹⁾。ただし、1995年当時、砂防設備およびその周囲には地震計がほとんど設置されていなかったため、砂防えん堤の基礎および堤体の振動特性を明らかにし、解析手法の妥当性を検証する必要があるとされた¹⁾。今日でも平野部と比べ、

砂防えん堤が建設されているような山間地の地震動の観測体制は充実していないことにより、山間地での地震動観測記録は少ないのが現状である。

一方、建設省(当時)、各都道府県では、1995年以降、砂防えん堤に地震計を設置し、地震動データの蓄積をはかってきた。それを元に、砂防えん堤の地震応答特性も踏まえた山地地盤の地震動特性が検討されているが、観測データ数が不十分であった事等により、定性的な比較でとどまっている^{2),3),4)}。

そこで、本報告では、国土交通省、都道府県で収集された地震計データについて、一次的な検討結果を報告する。

2. 観測データの概要

(1) 観測体制

前述の砂防学会の報告を受け、1995年に建設省(当時)は砂防えん堤への地震計の設置について、各地方建設局等および各都道府県あてに通達を発出した⁵⁾。これにより、砂防えん堤に地震計が設置され、地震動データが観測され始めた。同通達において、地震動データにつ



図-1 地震計を設置している砂防施設の位置図

表-1 対象とする地震データ⁶⁾

地震発生日	対象地震	マグニチュード	震源深さ (km)	最高震度	震源位置
2000年10月6日	鳥取県西部地震	7.3	9	6強	35° 16.4'N 133° 20.9'E
2001年3月24日	芸予地震	6.7	46	6強	34° 7.9'N 132° 41.6'E
2003年5月26日	2003年宮城県沖地震	7.1	72	6強	38° 49.2'N 141° 39.0'E
2005年8月15日	2005年宮城県沖地震	7.2	42	6強	38° 8.9'N 142° 16.6'E

いては、震度4以上の地震が発生した場合独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームにおいて、データの解析を行うこととなっている。

砂防施設に設置されている地震計は、2005年1月時点で、計348施設に設置されている。その中の342施設が砂防えん堤であり、他には床固工、護岸にも地震計が設置されている。地震計は加速度を計測している。設置施設を日本地図に示したものを図-1に示す。

(2) 解析対象の地震及び観測データ

本報告では、表-1に示した規模が大きく、ひとつの地震に対して、震源からの距離が異なる複数の箇所でデータが観測されている地震のうち、ノイズの影響を受けているデータが少ないこと（波形を見て判断）を条件に抽出した。表-2に示す観測データを対象に解析を行なった。

表-2に示す地震計設置位置についての概念図を図-2に示す。本報告で対象とする44基の砂防えん堤は、すべて堤体（袖部天端）と地盤の両者に地震計が設置されている。地盤について「左（右）岸上」とは、水通しの位置と同等もしくはそれ以上の高さに設置されているものを指し、主に袖部のかん入部付近の地山もしくは袖部の両

表-2 解析を行った砂防えん堤の諸元と地震計設置位置

No.	対象地震	型式	堤高 (m)	堤頂長 (m)	地震計位置 (堤体:天端)	地震計位置 (地盤)
1	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	13.5	44.0	左岸袖	左岸下
2	鳥取県西部地震	その他(鋼製箱枠)	7.9	124.0	右岸袖	右岸上
3	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	11.0	45.5	右岸袖	右岸下
4	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	14.0	62.4	右岸袖	右岸下
5	鳥取県西部地震	石積	8.0	58.0	左岸袖	左岸下
6	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	16.0	101.0	左岸袖	左岸下
7	鳥取県西部地震	A-7式	36.5	91.4	右岸袖	右岸下
8	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	15.0	53.9	左岸袖	左岸上
9	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	7.0	88.0	左岸袖	左岸下
10	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	8.5	42.0	左岸袖	左岸上
11	鳥取県西部地震	重力式コンクリート	10.0	47.0	右岸袖	右岸下
12	芸予地震	重力式コンクリート	14.5	49.0	左岸袖	左岸下
13	芸予地震	鋼製オープン	14.5	100.0	左岸袖	左岸上
14	芸予地震	重力式コンクリート	20.8	71.9	右岸袖	右岸上
15	芸予地震	重力式コンクリート	14.5	58.0	右岸袖	右岸下
16	芸予地震	重力式コンクリート	14.5	51.0	右岸袖	右岸下
17	芸予地震	重力式コンクリート	13.0	42.0	右岸袖	右岸下
18	芸予地震	重力式コンクリート	14.0	73.4	右岸袖	右岸下
19	芸予地震	重力式コンクリート	16.0	101.0	左岸袖	左岸下
20	芸予地震	A-7式	36.5	91.4	右岸袖	右岸下
21	芸予地震	重力式コンクリート	15.0	53.9	左岸袖	左岸下
22	芸予地震	A-7式	36.6	109.7	右岸袖	左岸上
23	芸予地震	重力式コンクリート	14.0	78.0	右岸袖	右岸上
24	芸予地震	重力式コンクリート	6.0	19.0	左岸袖	右岸下
25	芸予地震	鋼製クロスえん堤	6.0	28.4	左岸袖	左岸上
26	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	8.0	51.0	右岸袖	右岸下
27	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	22.0	99.0	右岸袖	右岸下
28	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	10.7	53.5	右岸袖	右岸下
29	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	9.5	76.0	左岸袖	左岸下
30	2003年宮城県沖地震	隔壁7ア11タイプ	8.0	60.0	右岸袖	右岸上
31	2003年宮城県沖地震	木製枠+詰石	7.4	19.0	右岸袖	右岸上
32	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	14.0	144.0	左岸袖	右岸下
33	2003年宮城県沖地震	重力式	10.0	77.0	右岸袖	右岸下
34	2003年宮城県沖地震	鋼製スリット	6.0	33.2	左岸袖	左岸上
35	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	7.5	103.5	左岸袖	右岸下
36	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	12.0	43.5	左岸袖	左岸下
37	2003年宮城県沖地震	重力式コンクリート	13.0	84.0	左岸袖	左岸下
38	2006年宮城県沖地震	重力式コンクリート	10.5	97.5	左岸袖	左岸下
39	2006年宮城県沖地震	重力式コンクリート	10.0	54.4	左岸袖	左岸下
40	2005年宮城県沖地震	重力式コンクリート	17.0	105.0	右岸袖	左岸下
41	2005年宮城県沖地震	重力式コンクリート	11.0	82.5	右岸袖	右岸下
42	2005年宮城県沖地震	重力式コンクリート	15.0	78.0	左岸袖	左岸下
43	2005年宮城県沖地震	重力式コンクリート	12.5	78.0	右岸袖	右岸上
44	2005年宮城県沖地震	重力式コンクリート	9.5	57.0	左岸袖	左岸下

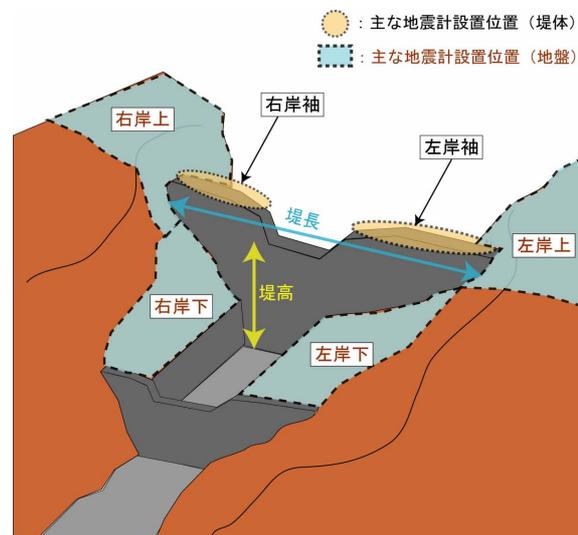


図-2 砂防えん堤の地震計設置概念図

岸の斜面等に設置されている。一方、「左（右）岸下」とは、水通しより低い位置に設置されているものを指す。主に砂防えん堤の基礎地盤に設置されているが、砂防えん堤の付帯施設（側壁護岸、前提保護工）の上に設置されているものもある。

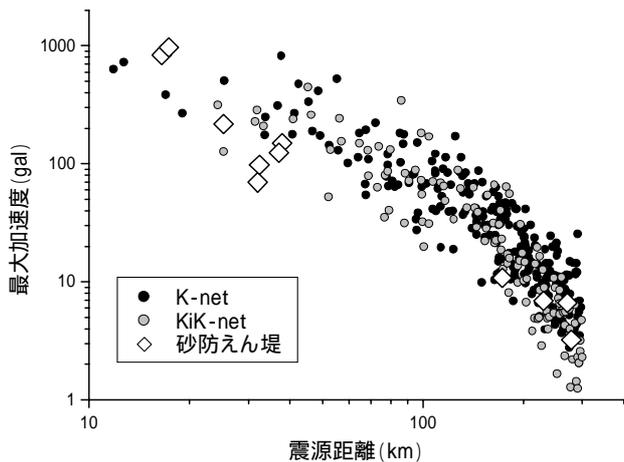


図-3 鳥取県西部地震における地盤の水平最大加速度

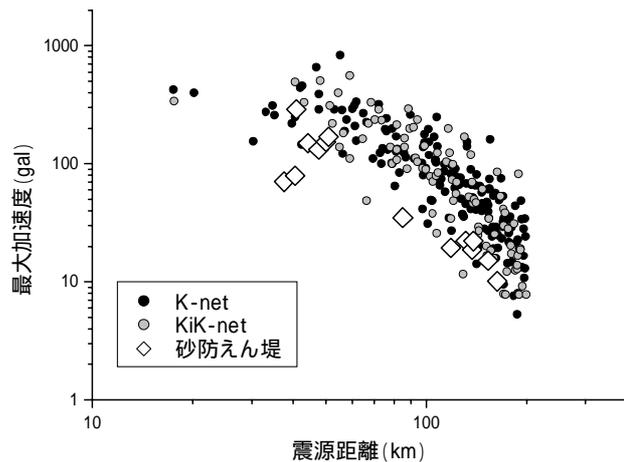


図-4 芸予地震における地盤の水平最大加速度

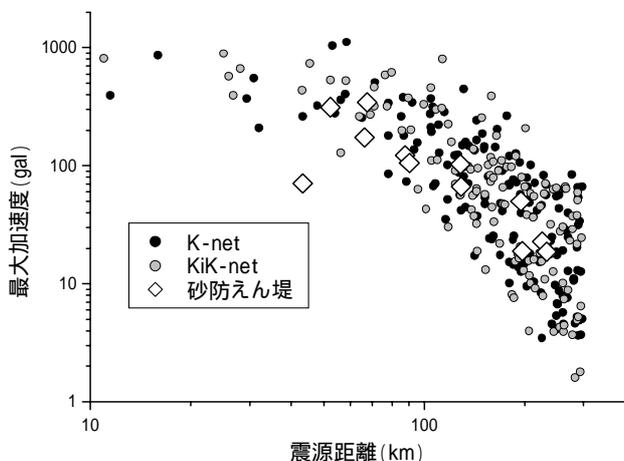


図-5 2003年宮城県沖地震における地盤の水平最大加速度

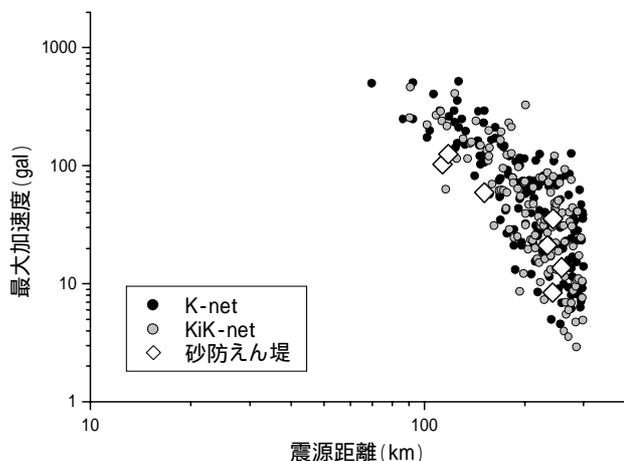


図-6 2005年宮城県沖地震における地盤の水平最大加速度

3. 砂防えん堤の地盤の地震応答特性

砂防えん堤の地盤で得られた観測記録について検討した。図-3～図-6に地震ごとに独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網「K-net」、基盤強震観測網「KiK-net」で得られた地震動の水平最大加速度と、砂防えん堤の地盤で観測された水平最大加速度を比較したものを示す。観測記録について震源から遠方の観測点は工学的にあまり意味がないと考えられるため、本検討ではM7以上については震源距離300km以内、M6.6～7未満については震源距離200km以内のデータを対象とした。いずれも、砂防えん堤の地盤で観測された地震動はK-net、KiK-netで観測されたデータの範囲内であり、同じ震源距離のK-net、KiK-netのデータと比較して加速度が小さい領域のデータが多かった。

砂防えん堤は山間地に築造され、良好な基盤であることが一般的である。一方、K-net、KiK-netは日本全国の様々な箇所に設置されており、平野部等沖積層が厚く堆

積している箇所にも設置されている場合もある。このような地震計が設置されている地盤の違いが、砂防えん堤の地盤での地震動が相対的に小さかった一因と考えられ、既往の研究成果とも調和的な傾向である⁷⁾。ただし、地震動に影響を与える因子としては、地盤だけでなく、地形⁸⁾など様々なパラメータが関係していると言われており、更なる検討が必要である。

4. 砂防えん堤の堤体の地震応答特性

(1) 堤体と地盤の加速度の関係

図-7に地盤で観測された水平最大加速度と、堤体の天端で観測された水平最大加速度の関係を示す。図-7によると、えん堤の加速度が地盤の加速度を上回っているものが44ケース中25ケースあり、全体の56%を占める。地盤の加速度に対し、2倍以上の値を観測した事例が9ケースあった。

次に、えん堤と地盤の水平加速度の比とえん堤の諸元

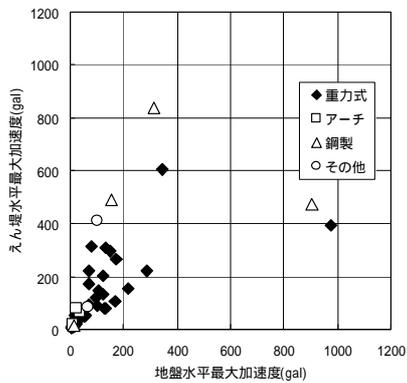


図-7 地盤水平最大加速度とえん堤の水平加速度の関係

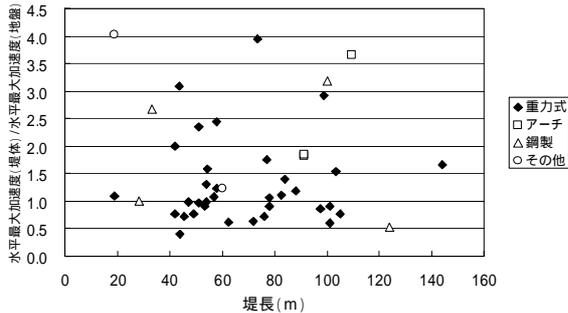


図-8 堤長に対する堤体と地盤の加速度応答倍率の関係

との関係を図-8～図-10に示す。図-8、図-9に示したとおり、えん堤と地盤の水平加速度の比は、堤頂長、堤高とは顕著な関係は見られなかった。一方、図-10に示したとおり、水平加速度の比は、えん堤の堤長と堤高の比が大きくなるに従い、小さくなる傾向が示された。具体的には、堤長/堤高が8を超える場合には、堤体/地盤が2を越えるケースはなかったのに対し、堤長/堤高が8未満の場合には、堤体/地盤が2を超過するものは39ケース中、9ケースあった。また、地盤と比較して堤体の加速度は最大4倍程度まで増幅されているものが確認できた。

ここで、砂防設備の耐震設計に関する検討委員会では、兵庫県南部地震で被災した西山砂防えん堤（水平・縦打継目にクラックが発生）および被災がなかった水晶谷砂防えん堤について3次元FEMによる地震応答解析により、地震時の挙動を検討している⁹⁾。その計算結果をプロットした。図より、両えん堤の解析結果は1.0以下の値を示している。これは当時山地の観測データがなかったため、入力地震動は神戸海洋気象台の波形を基本にダムサイトの加速度を参考に振幅を縮小させて入力していることが原因のひとつと考えられる。神戸海洋気象台のスペクトルは2～3 Hzにピークがあるが¹⁰⁾、砂防えん堤の固有の振動数は後述するとおり、概ね5 Hz以上であるとされるため、地震動が増幅せずに小さい値を示したものと考えられる。

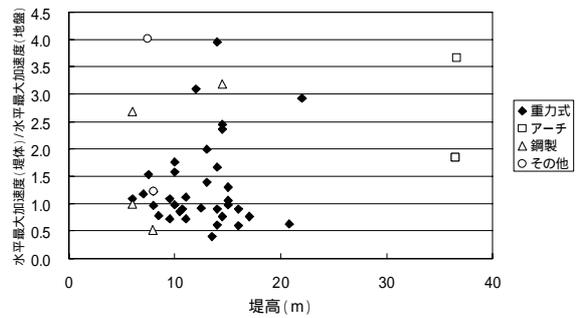


図-9 堤高に対する堤体と地盤の加速度応答倍率の関係

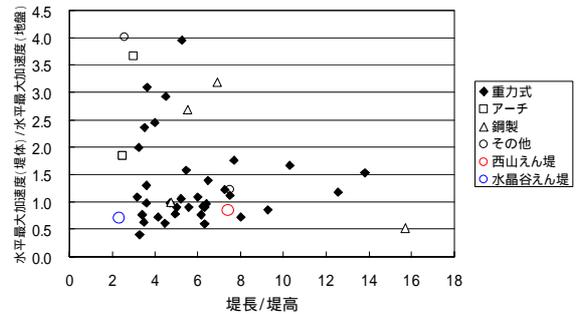


図-10 堤長/堤高 と 堤体と地盤の加速度応答倍率の関係

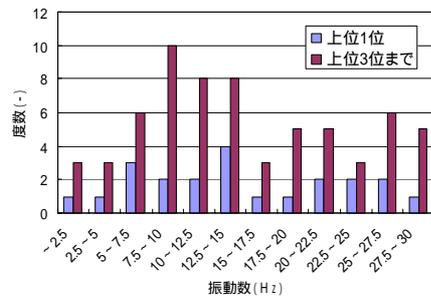


図-11 堤体の卓越振動数ごとの頻度分布

(2) えん堤の振動数の特性

地震に対するえん堤の動的特性を把握するために、観測された地震動の振動数特性を分析した。

スペクトルの算出については、本検討で使用している44データのうち、震源距離が遠く（300km以上）、振動数特性を検証しても信頼性にかけるデータ、または砂防えん堤の軸方向と地震計のNS方向との方位角が示されておらず、成分変換できない17データは対象外とした。よって、残りの27データについて、地盤とえん堤堤体の上下流方向における観測波形のフーリエスペクトルを算出した。スペクトルにはParzenウィンドウ（バンド幅0.4Hz）を施してスペクトルの平滑化を行なっている¹¹⁾。平滑化したスペクトルから地盤とえん堤堤体のスペクトルの比を算出し、増幅が高い上位3位までの卓越振動数を抽出した。なお、本検討で対象とする振動数の最大値は地震計の応答特性等を考慮して30Hzとした。

解析で得られた、各堤体の上位1位および上位3位までの卓越振動数の頻度分布を2.5Hz刻みで示したものを図-11に示す。これより、明瞭ではないが、堤体の振動

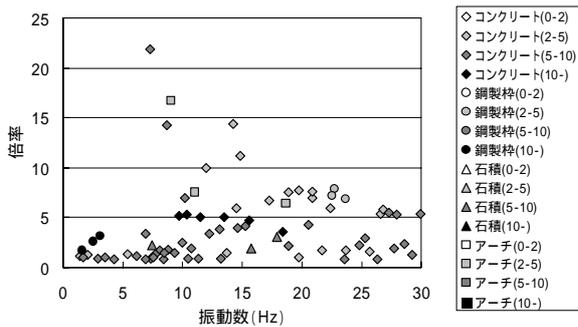


図-12 えん堤の振動数とスペクトルの比の倍率との関係（凡例は堤長と堤高の比を示す）

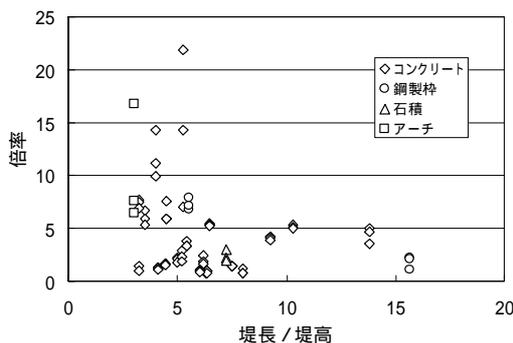


図-13 えん堤の堤長と堤高の比とスペクトルの比の倍率との関係

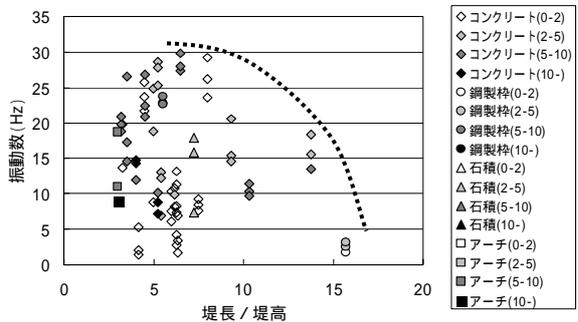


図-14 えん堤の堤長 / 堤高とえん堤の卓越振動数との関係（凡例はスペクトルの比の倍率を示す。）

数は5 Hzから15Hzまでに度数が多いことが分かる。上位3位の卓越振動数とスペクトルの比との関係を図-12に示す。これより振動数が5 Hz以上になるとスペクトル比が大きくなる傾向が分かる。スペクトルの比の倍率について、砂防えん堤の形状との関係を示したものを図-13に示す。これより、堤高に対する堤長が10以上のものは、すべて倍率が6以下となっている。堤高に対する堤長が10以下のものについては、10以上のものと比べて、倍率が高い値を示しているえん堤があることが確認できる。

次に、増幅が見られた振動数と堤高に対する堤長の比

の関係を図-14に示す。図について、プロットされたデータの包絡線を破線で示すと、本検討で用いたデータの範囲では、堤長と堤高の比が大きくなると、振動数も低くなる傾向がみられた。

ただし、今回対象としたデータについて堤長と堤高の比が大きい砂防えん堤は少ないため、今後は引き続きデータの収集・整理を行い、検証する必要があると考えられる。

6. まとめ

本報告では砂防えん堤に設置されている地震計のデータを基に、砂防えん堤の堤体と地盤の地震応答特性について検証した。その結果を以下に示す。

(1) 砂防えん堤の地盤で観測されたデータについて、K-net, KIK-netの地震計で観測されたデータと比較すると、同じ震源距離のK-net, KIK-netのデータと比較して加速度が小さい領域のデータが多かった。

(2) 地盤の最大加速度と堤体の最大加速度について、今回のデータではえん堤の加速度が地盤の加速度を上回っているものが25ケースあり、全体の56%を占めた。

(3) 堤長 / 堤高が8を越える場合には、堤体 / 地盤が2を超えるものはなかったのに対し、堤長 / 堤高が8を下回る場合には、堤体 / 地盤が2を超過するものは39ケース中、9ケースあった。

(4) えん堤の卓越振動数について5Hz以上の方が高いスペクトル比の倍率を示していた。えん堤の形状と振動数の関係について、本検討で用いたデータの範囲では、堤長と堤高の比が大きくなると、スペクトルの比や振動数が低くなる傾向がみられた。

今後は、引き続きデータの収集・整理を行い、砂防えん堤の観測記録を用いた堤体・地盤の地震応答特性とともに、砂防えん堤の耐震性の評価等について検討していきたいと考えている。

謝辞：本資料の作成に当たっては、砂防えん堤の地震動データを収集・送付頂いた国土交通省ならびに都道府県の関係各位に心よりお礼申し上げます。地震観測データには独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網（K-net）、基盤強震観測網（KIK-net）のデータを利用して頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 社団法人砂防学会：砂防設備の耐震設計に関する検討委員会報告，砂防学会誌Vol48, No.6, pp.37-60, 1995.
- 2) 石田哲也，山田孝，南哲行，永田謙二：山地における地震動応答特性，平成10年砂防学会研究発表会概要集，pp.86-87, 1998.

- 3) 千田容嗣, 南哲行, 石田哲也, 永田謙二: 砂防ダムの地震応答特性, 平成11年砂防学会研究発表会概要集, pp.362-363, 1999.
- 4) 森島成昭, 佐藤康一, 小原大輔, 大角恒雄: 鳥取県西部地震による砂防ダムの地震動特性及び斜面崩壊の分布特性, こうえいフォーラム第11号, pp.65-73, 2003.
- 5) 社団法人全国治水砂防協会: 砂防関係法令例規集, p.594, 2006.
- 6) 気象庁 震度データベース検索: http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html
- 7) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, .626 / 1-48, pp.79-91, 1999.
- 8) 例えば翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集第442号, pp.71-78, 1992.
- 9) 社団法人砂防学会: 第4回砂防設備の耐震設計に関する検討委員会資料(資料2), pp.53-106, 1995.
- 10) 建設省土木研究所: 平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告, 土木研究所報告第196号, p.16, 1996.
- 11) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会 pp.93-109.
- (?)

Study on the earthquake response characteristics of Sabo dam
by using the earthquake observation record of the Sabo facilities

Nagazumi TAKEZAWA, Taro UCHIDA, Keiji TAMURA and Jun_ichi KURIHARA

The earthquake observation of the preventing Sabo facilities was begun to attempt the enhancement of the system of the observation of the earthquake since the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. In this report, the seismograph data of Sabo dam and examined to clarify general characteristics earthquake response concerning the Sabo dam and the ground of Sabo dam.