

SHORT COMMUNICATION

Continuous ambient-vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin

Georges R. Darbre^{1,*†} and Jean Proulx²

¹*Safety of Dams; Federal Oece for Water and Geology; P.O. Box 957; CH-2501; Bienne; Switzerland*

²*Department of Civil Engineering; Faculty of Engineering; University of Sherbrooke; 2500 Boul. Universite;/ Sherbrooke; QC; Canada J1K 2R1*

SUMMARY

This paper presents the experimental programme and results of a continuous ambient vibrations recording programme carried out on the 250m arch dam of Mauvoisin. This project follows a series of previous measurements completed for seven different water levels. An automated system was set up on the dam and the ambient vibrations were recorded twice daily for a period of 6 months. Frequency shifts were tracked throughout the testing period and the effects of the varying water level were identified. The results confirmed the behavior observed in previous ambient- and forced-vibration tests. The added mass effects are overcome by the stiffening of the dam due to increasing hydrostatic pressure for lower reservoir levels. This trend is then reversed for higher water levels. Any temperature-related effects were not identified. The experimental techniques are briefly described and the frequency identification process and its limitations are discussed. Copyright 2001 John Wiley & Sons, Ltd.

در این مقاله نحوه آزمایش و نتایج حاصل از آنالیز ارتعاشات محیطی مداوم بر روی سد قوسی ۲۵۰ متری ماووین ارائه شده است. این پروژه شامل یک سری اندازه گیری های انجام شده برای هفت سطح مختلف آب است. یک سیستم خودکار پایش روی سازه سد اجرا شده است و ارتعاشات محیطی سازه را دو بار در روز به مدت ۶ ماه ضبط می کند. تغییرات فرکانس سازه در طول دوره آزمایش ردیابی و اثرات سطح متغیر آب بر روی آن مشخص شد. نتایج به دست آمده، رفتارهای مشاهده شده در این آزمون نتایج آزمایشهای قبلی ارتعاش اجباری و ارتعاش محیطی را تأیید می کند. اثرات جرم اضافه شده با سخت شدن سد به دلیل افزایش فشار هیدرواستاتیک برای سطح پایین مخزن نمودار می شود. این روند برای سطوح بالاتر آب معکوس می شود. اثرات دما در این مقاله بررسی نشده است. تکنیک های آزمایشاتی به طور خلاصه شرح داده شده و فرایند شناسایی فرکانس و محدودیت های آن مورد بحث قرار گرفته است.

1. INTRODUCTION

The Swiss Federal Oece for Water and Geology is actively involved in the monitoring of large dams and, in particular, in the experimental evaluation of their dynamic properties. During the past decade, it has installed a network of strong-motion accelerographs on five large dams [1] and initiated two field-measurement projects based on ambient- and forced vibration recordings [2; 3].

Oece سازمان فدرال سوئیس برای آب و زمین شناسی به طور فعال در زمینه پایش سدهای بزرگ و به ویژه در ارزیابی آزمایشاتی مشخصات دینامیکی آنها شرکت دارد. طی یک دهه گذشته، شبکه ای از شتابنگارها را بر روی پنج سد بزرگ نصب کرده است [۱] و دو پروژه اندازه گیری میدانی را بر اساس داده های ارتعاش محیطی و اجباری آغاز کرده است [۲؛ ۳]

In these projects the effects of dam–reservoir interaction and the influence of the varying water level on the resonance frequencies were investigated with four series of forced-vibration tests carried out on the 180m Eموsson arch dam [2] as well as with an extensive ambient-vibration measurement programme undertaken on the 250 m Mauvoisin arch dam [3]. Like many dams in the Alps, their reservoirs exhibit an annual filling cycle and reach their maximum levels in September/October and their minimum levels in May/June.

در این پروژه ها اثر متقابل سد و مخزن و تأثیر سطوح مختلف آب بر فرکانس های رزونانس طی چهار سری آزمایش لرزش اجباری بر روی سد قوس Eموsson ۱۸۰ متری مطالعه شده است [۲] و همچنین اندازه گیری گسترده ای بر اساس آزمون های ارتعاش محیطی بر روی سد قوس ماویوزین ۲۵۰ متری انجام شده است. مانند بسیاری از سدهای حوزه آلب، مخازن آنها دارای چرخه پر شدن سالانه است که در ماه سپتامبر / اکتبر به حداکثر سطح و در ماه مه / ژوئن به حداقل خود می رسند.

Results obtained on both arch dams clearly showed the same variation of resonance frequencies with the reservoir levels. As the water rises, an increase in the resonances is first observed, followed by a decrease after a certain level is reached. This phenomenon was attributed to an increase in the stiffness of the dam due to the contraction of the construction joints under increasing hydrostatic pressure. After a certain water level is reached this phenomenon is overcome by the added mass of the reservoir and the resonance frequencies begin to decrease.

نتایج به دست آمده در هر دو سد قوسی به وضوح تغییرات یکسان فرکانس رزونانس با سطح مخزن را نشان داد. با افزایش سطح آب ، ابتدا افزایش میزان فرکانس مشاهده می شود و پس از رسیدن به سطح آب مشخص ، کاهش فرکانس مشاهده می شود. این پدیده به دلیل افزایش سختی سازه سد تحت فشار هیدرواستاتیک آب است. پس از رسیدن به سطح مشخصی از آب ، این پدیده با افزایش جرم اضافه شده مخزن خنثی می شود و فرکانسهای رزونانس شروع به کاهش می کند.

A total of seven series of ambient-vibrations measurements were completed on Mauvoisin dam over a 16 month period, with water levels varying from 13 to 127 m below the crest. Some of the recommendations of this project were to follow the variations of the resonance frequencies more closely by continuous measurements, and to investigate the possible occurrence of an hysteresis in the resonance/water-level curves related to temperature effects (different overall dam stiffness in summer and winter at the same water levels).

در مجموع هفت سری اندازه گیری ارتعاشات محیطی بر روی سد ماوتوین در طی یک دوره ۱۶ ماهه انجام شد، که سطح آب از ۱۳ تا ۱۲۷ متر زیر تاج متغیر بود. توصیه می گردد مطالعات دقیق تری شامل تغییرات فرکانس رزونانس توسط اندازه گیری های مداوم و همچنین بررسی وقوع احتمالی چرخه هیستریزس در منحنی های رزونانس / سطح آب با در نظر گرفتن اثرات دما انجام شود. (مطالعه تغییرات سختی سازه سد در تابستان و زمستان در سطح آبی یکسان)

An automated measurement system was setup on the dam and the ambient vibrations were recorded twice daily for a period of 6 months, from December 1998 to June 1999. The main objectives of this follow-up project were: (i) to identify the shifts in the resonance frequencies as a function of the water level; (ii) to obtain a refined confirmation of the trend in the variation of these resonances with different water levels; (iii) to evaluate the influence of temperature variations on the resonance frequencies and (iv) to evaluate the usefulness of ambient-vibration recordings for damage assessment by monitoring changes in resonance frequencies. The experimental programme and results are presented in the following sections.

یک سیستم اندازه گیری خودکار روی سد راه اندازی شد و ارتعاشات محیطی دو بار در روز به مدت ۶ ماه ، از دسامبر ۱۹۹۸ تا ژوئن ۱۹۹۹ ثبت شده است. اهداف اصلی این پروژه پیگیری عبارتند از: (۱) شناسایی تغییرات فرکانسهای رزونانس به عنوان تابعی از سطح آب. (۲) به دست آوردن تأییدیه از روند تغییر این فرکانس ها با سطح آب مختلف. (۳) ارزیابی تأثیر تغییرات دما در تغییرات فرکانسهای رزونانس و (۴) ارزیابی مزایای داده های ارتعاش محیطی برای برآورد آسیب سازه با پایش تغییرات فرکانسهای رزونانس. نحوه و نتایج آزمایشات در بخش های بعدی ارائه شده است.

2. EXPERIMENTAL PROGRAMME

One of the upper galleries of Mauvoisin dam was selected for the automated system. Four uniaxial forced-balanced accelerometers were placed in blocks 6, 11, 14 and 23 (Figure 1) to record horizontal radial motions. The acquisition system was configured to record 16 samples of 8192 points at 100 Hz twice a day at 3:00 a.m. and 3:00 p.m.

یکی از گالری های فوقانی سد مائوئوزین به عنوان محل نصب سیستم اتوماتیک پایش انتخاب شد. چهار شتاب سنج از نوع متعادل اجباری تک محوره در جهت شعاعی و افقی در بلوک های ۶ ، ۱۱ ، ۱۴ و ۲۳ قرار گرفتند (شکل ۱). سیستم جمع آوری داده برای ضبط ۱۶ نمونه از ۸۱۹۲ نقطه در ۱۰۰ هرتز دو بار در روز در ۳:۰۰ صبح و ۱۵:۰۰ تنظیم شد.

Before each measurement, initial samples were recorded and analysed to select an appropriate gain (which varied from 200 to 15000), depending on the actual level of motion of the dam. These initial samples were also used to compute and remove the bias of the sensors. As the access to the structure is restricted during the wintertime, all data were stored on disk to be retrieved upon completion of the measurement programme. More details on the data acquisition process can be found in Reference [3].

قبل از انجام هر اندازه گیری ، بسته به میزان واقعی حرکت سد ، نمونه های اولیه ضبط و مورد بررسی قرار می گرفتند تا میزان مناسب (که بین ۲۰۰ تا ۱۵۰۰۰ متغیر بود) را انتخاب کنند. این نمونه های اولیه همچنین برای محاسبه و حذف بایوس سنسورها مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که دسترسی به سازه در طول زمستان محدود شده است ، تمام داده ها روی دیسک ذخیره شده اند تا پس از اتمام برنامه اندازه گیری ، بازیابی شوند. جزئیات بیشتر در مورد فرآیند دستیابی به اطلاعات را می توان در مرجع یافت [۳].

A total of 360 recordings were obtained for each sensor during 180 days from 9 December 1998 to 7 June 1999 with a total water-level variation of 97.6 m (Figure 1). Figure 2(a) illustrates a typical time-history for an acceleration record obtained on block 11, with a peak value of 11 microg.

در مجموع ۳۶۰ ضبط برای هر سنسور طی ۱۸۰ روز از ۹ دسامبر ۱۹۹۸ تا ۷ ژوئن ۱۹۹۹ که همراه با تغییرات ۹۷٫۶ متری سطح آب بود (شکل ۱) بدست آمد. شکل ۲ (الف) یک تاریخچه زمانی معمولی را برای ثبت شتاب به دست آمده در بلوک ۱۱ ، با حداکثر مقدار ۱۱ میکرو جی نشان می دهد.

A preliminary inspection of the recorded data led to the rejection of 41 per cent of the samples due to low signal-to-noise ratios (29 per cent) or malfunctions in the data-recording system (12 per cent) that included improper bias removal. The low signal-to-noise ratios can be attributed to the wind conditions on site and also to the operation of two power houses (one onsite and one downstream), which were shown to produce a significant amount of noise during the previous measurement project [3].

بازرسی اولیه از داده های ضبط شده منجر به حذف ۴۱ درصد از نمونه ها به دلیل پایین بودن نسبت سیگنال به نویز (۲۹ درصد) یا نقص در سیستم ضبط داده ها (۱۲ درصد) شد. نسبت های سیگنال و نویز پایین را می توان به شرایط باد در محل

و همچنین به بهره برداری از دو موتورخانه برق (یکی در محل و یک پایین دست) اشاره کرد که در طول پروژه اندازه گیری قبلی میزان قابل توجهی از نویز ایجاد می کند [۳]

CONTINUOUS AMBIENT-VIBRATION MONITORING

477

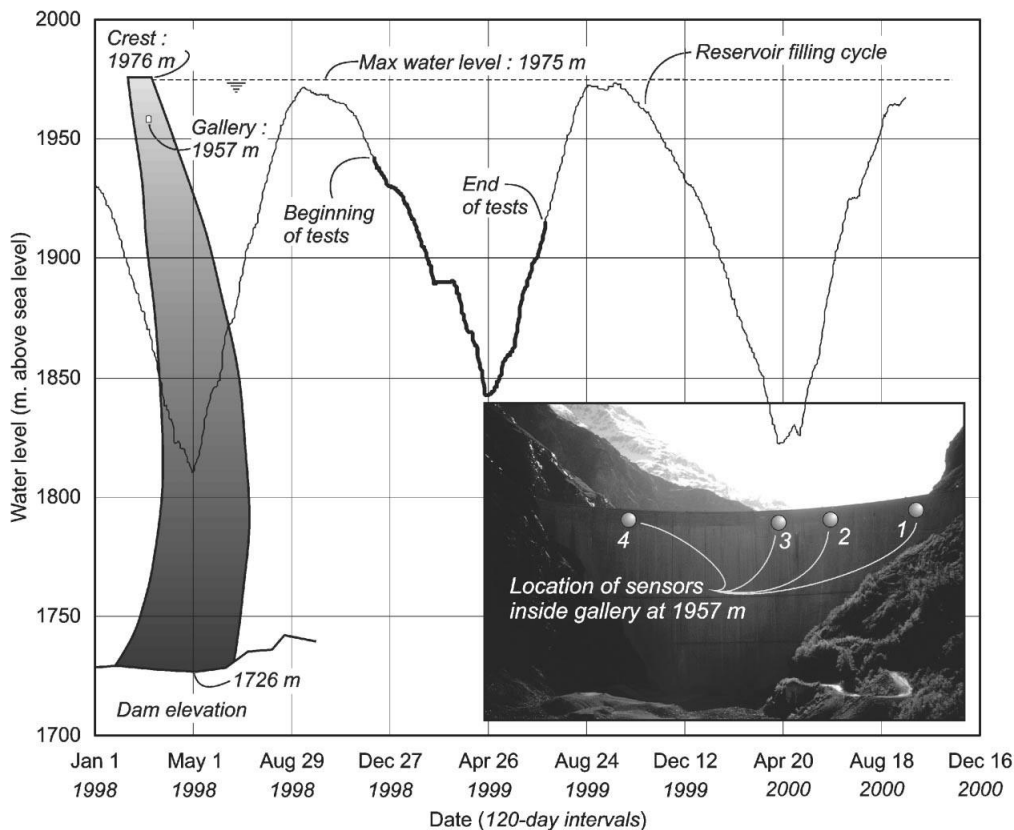


Figure 1. Testing period and experimental set-up.

Normalized power spectral density (PSD) curves were computed for 16 averages of 81,92s samples (yielding a resolution of 0.012 Hz) using an extended cosine window (Figure 2(b)). The resonance frequencies were identified from these curves for each recording. Upon inspection of the frequency contents of the data, an additional 13 per cent of recordings were rejected because of poor quality in the resulting PSD curves. The remaining 160 to 170 recordings were used to identify and track the resonance frequencies of the dam during the testing period.

منحنی های چگالی طیفی نرمال شده (PSD) برای تمامی ۱۶ میانگین از نمونه های ۸۱,۹۲ ثانیه ای با استفاده از روش بالا محاسبه شد (شکل ۲). فرکانسهای رزونانس برای هر سری داده ضبط شده از این منحنی ها مشخص شد. پس از بازرسی از محتوای فرکانس داده ها، ۱۳ درصد اضافی از ضبط ها به دلیل کیفیت پایین در منحنی های PSD نیز رد شدند. از ۱۶۰ تا ۱۷۰ ضبط باقی مانده برای شناسایی و ردیابی فرکانسهای رزونانس سد در طی دوره آزمایش استفاده شد.

3. RESERVOIR LEVEL EFFECTS

As the automated recording process was consistently carried out at predefined times, it was not possible to select particular periods of 'high' wind-induced motion and this directly affected the frequency-identification process. Several recorded signals had maximum amplitudes of a few g, resulting in PSDs that became very hard to analyse, and some of the resonance frequencies could not be identified. However, the first two modes, as well as the 6th one, were identified from almost all the records that were retained. Modes 3–5 were more difficult to identify, in particular for lower water levels. This had already been the case in the previous project [3].

از آنجا که فرآیند ضبط خودکار به طور مداوم در زمان های از پیش تعریف شده انجام می شود ، نمی توان دوره های زمانی خاصی که دارای باد تند هستند را انتخاب کرد در صورتیکه این موضوع به طور مستقیم بر روند شناسایی فرکانس تأثیر می گذارد. چندین سیگنال ضبط شده دارای دامنه حداکثر شتاب بودند ، در نتیجه باعث ایجاد PSD هایی می شوند که برای آنالیز سخت هستند لذا بعضی از فرکانسهای رزونانس قابل شناسایی نیستند. با این حال ، دو مود اول ، و همچنین مود ششم ، تقریباً از تمام داده ذخیره شده شناسایی شدند. شناسایی مودهای ۳–۵ دشوارتر بود ، خصوصاً در زمان پایین بودن سطح آب. قبلاً در پروژه قبلی نیز چنین بوده است [۳].

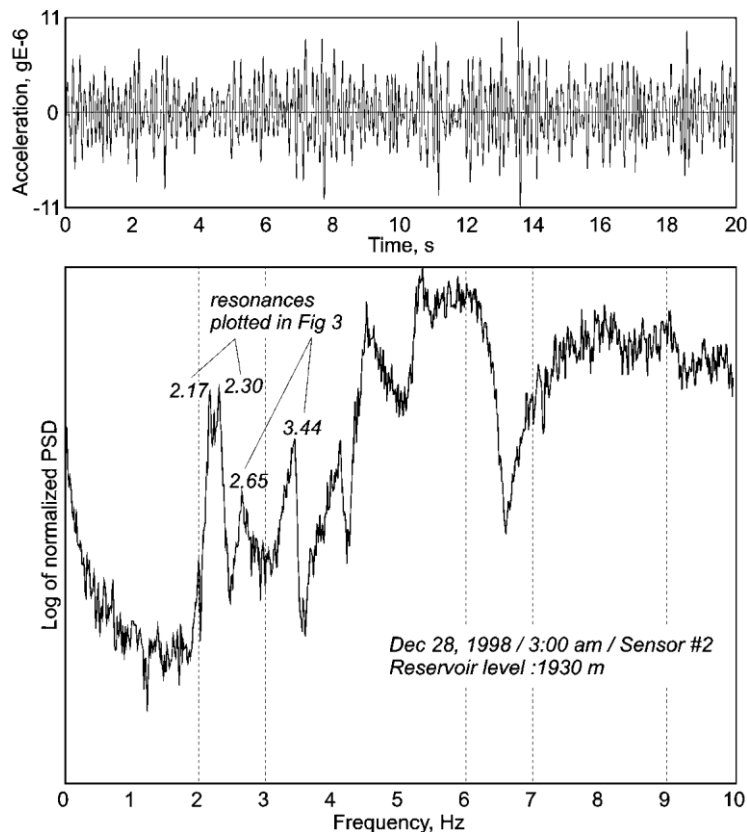


Figure 2. Typical acceleration recording and frequency contents.

The three graphs in Figure 3 show the variation of the first six resonances with the water level for modes 1 and 2, 3–5, and 6, respectively. Also shown on the graphs are the results from the previous project.

سه گراف موجود در شکل ۳ تغییرات شش فرکانس اول سازه با سطح آب برای مودهای ۱ و ۲، ۳-۵ و ۶ را به ترتیب نشان می دهد. همچنین در نمودارها نتایج حاصل از پروژه قبلی نشان داده شده است.

The vibration frequencies identified from two significant earthquakes recorded by the strong motion network are plotted as well. The 1996 Valpelline earthquake had a magnitude of 4.2 with an epicentre located 13 km from the dam and a peak acceleration recorded on the dam crest of $13/7 \text{ cm/s}^2$. The local event (unknown magnitude) occurred in 1994 with a peak crest acceleration of $13/6 \text{ cm/s}^2$. Again, identification of the 3rd, 4th and 5th resonant frequencies were more difficult than that of modes 1, 2 and 6. A tentative explanation is that modes 3-5 are not modes of vibrations, but rather resonance shapes strongly influenced by dam-reservoir interaction and thus more clearly apparent at higher water levels. This would be consistent with the fact that modes 3-5 were not predicted by a simplified finite element model of the dam with incompressible fluid [3]. It is planned to further investigate this aspect in a subsequent project.

فرکانس ارتعاشات شناسایی شده از دو زمین لرزه قابل توجه که توسط شبکه لرزه ای ثبت گردیده بودند نیز در شکل ترسیم شده است. زمین لرزه والپلین در سال ۱۹۹۶ با بزرگی ۴٫۲، بیشتر با مرکز لرزه ای واقع در ۱۳ کیلومتری سد و با شتاب نهایی $13/7 \text{ cm/s}^2$ در تاج سد ثبت شد. یک لرزه محلی نیز (بزرگی ناشناخته) در سال ۱۹۹۴ با شتاب نهایی تاج $13/6 \text{ cm/s}^2$ رخ داد. در این موارد نیز، شناسایی فرکانسهای رزونانس ۳، ۴ و ۵ سخت تر از مودهای ۱، ۲ و ۶ بود. یک توضیح تجربی برای این موضوع این است که مودهای ۳-۵ ارتعاش خود سازه نیستند بلکه شکل های مودی در این موارد به شدت تحت تأثیر اندرکنش مخزن و سازه سد هستند لذا این مودها در سطوح بالاتر آب آشکار می شود. این امر مطابق با این واقعیت است که مودهای ۳-۵ در یک آنالیز مدل المان محدود ساده سد با سیال تراکم ناپذیر قابل پیش بینی نیستند. قرار است این موضوع در پروژه بعدی بررسی شود.

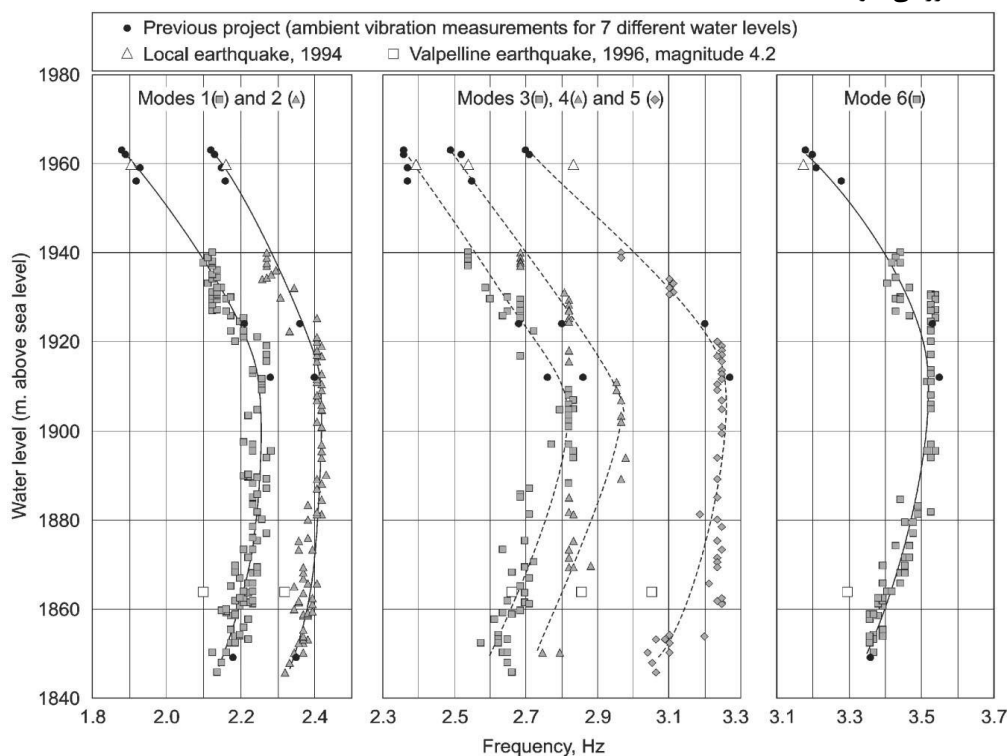


Figure 3. Water level effects on the resonance frequencies.

The resonance frequencies identified from the earthquake records coincide with those obtained from the ambient measurements (local event) or are slightly lower (Valpelline earthquake). The latter effect could be due to non-linearities. Although the levels of excitations were low, the absence of hydrostatic pressure (the Valpelline earthquake occurred with a low level in the reservoir) relieves part of the compressive stresses in the vertical construction joints, thus allowing relative joint motions more easily.

فرکانسهای رزونانس شناسایی شده از رویدادهای زلزله همخوانی مناسبی با موارد به دست آمده از اندازه گیری های ارتعاش محیطی (رویداد محلی) یا کمی پایین تر است. اثر دوم می تواند ناشی از پدیده های غیرخطی باشد. در هنگام پایین بودن سطح ارتعاشات، عدم وجود فشار هیدرواستاتیک (زلزله Valpelline در زمان سطح کم آب مخزن رخ داده است) بخشی از تنش های فشاری را در تکیه گاه های عمودی خنثی می کند، بنابراین اجازه می دهد حرکات مفصلی تکیه گاه های سازه راحت تر انجام شود.

Results from the continuous recordings are somewhat scattered, but with a level of confidence of approximately four to five times the resolution (in the order of $\pm 0.05\text{Hz}$), they clearly confirm the trend observed in the previous series of measurements as well as results reported from other dams [2]. The increase in stiffness (for lower water levels) overcomes the added mass influence on the resonance frequencies. The opposite holds true for higher water levels.

نتایج حاصل از ضبط مداوم داده ها تا حدودی پراکنده است، اما با چهار به پنج برابر کردن وضوح تصویر، به وضوح روند مشاهده شده در آزمون های قبلی اندازه گیری و همچنین نتایج مطالعات دیگر سدها را تأیید می کنند. [۲]. افزایش سختی (در حالت سطح آب کم) بر اثر افزایش جرم مودی ناشی از حجم آب در محاسبات فرکانسهای رزونانس غلبه می کند. در مقابل در مورد سطوح بالاتر آب برعکس است.

Comparing the resonance frequencies obtained in the summer from the previous project and those obtained during the winter in the current project (in particular around reservoir levels of 1920 m), it was not possible to identify temperature-related effects. Such an influence, if any, is too small in comparison with the scattering of the results (it is recalled that temperature effects would tend to stiffen the dam in the summer, as does an increase in hydrostatic pressure, and to soften it in winter). Consequently, it is unlikely that small structural damages could be identified by tracking the changes in resonance frequencies obtained from ambient response recordings.

با مقایسه فرکانسهای رزونانس به دست آمده در تابستان از پروژه قبلی و موارد به دست آمده در طول زمستان در پروژه فعلی (به ویژه در حدود سطح مخزن ۱۹۲۰ متر)، شناسایی اثرات مربوط به دما امکان پذیر نبود. چنین تأثیرگذاری، در صورت وجود، در مقایسه با پراکندگی نتایج، بسیار ناچیز است (یادآوری می شود که اثرات دما در تابستان باعث سخت تر شدن سازه سد و نیز افزایش فشار هیدرواستاتیک، و نرم تر شدن سازه در زمستان می شود). در نتیجه، بعید است که با ردیابی تغییرات در فرکانسهای رزونانس به دست آمده از ضبط پاسخهای محیطی، آسیبهای سازه ای کوچک شناسایی شود.

A project with similar objectives was carried out on the Talvacchia Dam in Italy [4; 5], however based on forced vibration excitation. A shaker was mounted on the dam and measurements were carried out twice a day for more than three years. A scattering of the resonance frequencies was also observed, especially at lower water levels, with a pronounced trend related to temperature effects.

پروژه ای با اهداف مشابه در سد تالواچیا در ایتالیا انجام شد [۴؛ ۵]، با این حال بر اساس آزمون ارتعاش اجباری بود. یک ارتعاش دهنده بر روی سد سوار شد و اندازه گیری ها دو بار در روز برای بیش از سه سال انجام شده است. پراکندگی فرکانسهای رزونانس در آن پروژه نیز مشاهده شد، به خصوص در سطوح آب پایین که همراه با روند آشکار مربوط به اثرات دما داد

The frequency identification process is often easier in the case of forced-vibration test results, as the frequency responses are well-defined and the resolution in the frequency domain is directly controlled by the precision of the shaker [6]. This may explain why temperature effects could be identified at Talvacchia and not at Mauvoisin, possibly combined with a different degree of temperature-related response at both dams.

فرآیند شناسایی فرکانس اغلب در مورد نتایج آزمون ارتعاش اجباری آسان تر است ، زیرا پاسخ های فرکانس به خوبی تعریف شده و وضوح در حوزه فرکانس ها مستقیماً با دقت شاکر کنترل می شود [۶]. این ممکن است توضیح دهد که چرا اثرات دما را می توان درسد Talvacchia مشاهده کرد ولی درسد Mauvoisin شناسایی نشدند ، احتمالاً با درجه های مختلفی از پاسخ مربوط به دما در هر دو سد ترکیب می شود.

4. CONCLUSIONS

Data recorded for 180 days during the wintertime part of the reservoir's filling cycle confirmed observations from a previous phase of the project. The stiffening of the dam due to increasing hydrostatic pressure is more important than the added hydrodynamic masses for lower water levels. This trend is reversed for higher water levels. Temperature effects could not be identified because of the scattering of the data.

داده های ثبت شده به مدت ۱۸۰ روز در طول زمستان از چرخه سطح آب مخزن ، مشاهدات مربوط به مرحله قبلی پروژه را تأیید کردند. سخت شدن سد به دلیل افزایش فشار هیدرواستاتیک از جرم هیدرودینامیکی اضافه شده در حالت سطح پایین آب از اهمیت بیشتری برخوردار است. این روند برای سطوح بالاتر آب معکوس می شود. به دلیل پراکندگی داده ها ، اثرات دما قابل شناسایی نیست.

Ambient-vibration measurements are a fast and inexpensive way to identify the fundamental vibration properties of a dam for design and safety evaluation purposes. However, they may not be appropriate for monitoring small changes in the overall dam properties (such as those associated with temperature effects). A similar continuous measurement programme would be needed at Mauvoisin to determine if this can be achieved with forced-vibration tests.

اندازه گیری ارتعاش محیطی یک راه سریع و ارزان برای شناسایی خصوصیات دینامیکی یک سد است که می توان از آن برای اهداف طراحی و ارزیابی ایمنی سازه استفاده کرد. با این حال ممکن است برای پایش تغییرات کوچک در خصوصیات سازه سد (مانند موارد مرتبط با اثرات دما) مناسب نباشند. یک برنامه اندازه گیری مداوم مشابه در Mauvoisin مورد نیاز است تا مشخص شود که آیا این امر می تواند با آزمایش لرزش اجباری حاصل شود.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Forces Motrices de Mauvoisin SA for their continuous support throughout the research project. The continuous monitoring system was installed by the Swiss Federal Laboratories for Materials (EMPA).

REFERENCES

1. Darbre GR. Strong-motion instrumentation of dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1995; **24**:1101–1111.
2. Proulx J, Paultre P, Rheault J, Robert Y. An experimental investigation of water level effects on the dynamic behaviour of a large arch dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2001; **30**:1147–1166.
3. Darbre GR, De Smet CAM, Kraemer C. Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2000; **29**:577–586.
4. Fanelli M, Giuseppetti G, Castoldi A, Bonaldi P. Dynamic characterization of Talvacchia dam: experimental activities, numerical modeling, monitoring. *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, 18–24 July 1992.
5. Fanelli M, Giuseppetti G, Bettinali F, Galimberti C, Castoldi A, Casirati M, Pizzigalli E, Lozza S, Ruggeri G. Seismic monitoring of dams—a new active surveillance system: basic criteria, operating methods and results obtained. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. VI, Tokyo–Kyoto, Japan, 2–9 August 1988.
6. Proulx J, Paultre P. Experimental and numerical investigation of dam–reservoir–foundation interaction for a large gravity dam. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1997; **24**(1):90–105.