

Comparative study of operational modal analysis techniques using ambient vibration measurements of a concrete dam

1 1

P. Bukenya , P. Moyo , C. Oosthuizen

¹ University of Cape Town, Department Civil Engineering
Private Bag X3, 7701, Rondebosch, Cape Town, South Africa
email: patrick.bukenya@uct.ac.za

Department of Water Affairs
Private Bag X313, 0001, Pretoria, South Africa

Abstract

Operational modal analysis is currently applied in structural dynamic monitoring studies of large structures such as concrete dams. In this study, ambient vibration tests were conducted on Roode Elsberg dam to get a data base of modal parameters for finite element model updating. Signals were processed by operational modal analysis techniques namely enhanced frequency domain decomposition, alias free polynomial algorithm, least square complex exponential and stochastic subspace identification. The major aim is to determine which technique is suitable for extracting modal parameters out of data from dams. Natural frequencies of the dam obtained by the four techniques are found to be in good agreement while damping ratios had no correlation. Enhanced frequency domain decomposition method captured all the modes while the other methods missed some modes.

آنالیز مودال عملیاتی در حال حاضر نیز در مطالعات پایش دینامیکی سازه های بزرگی مانند سدهای بتونی به کار گرفته می شود. در این مطالعه ، آزمایش ارتعاش محیطی بر روی سد روده السبرگ انجام شده است تا بتوان پایگاه داده ای از پارامترهای مودال سازه برای انجام بروزرسانی مدل المان محدود از سازه بدست آورد. سیگنال ها با استفاده از تکنیک های آنالیز مودال عملیاتی مانند روش تجزیه حوزه فرکانس ارتقاء یافته ، الگوریتم AFP ، SSI ، پردازش می شوند. هدف اصلی تعیین مناسب ترین تکنیک برای استخراج پارامترهای مودال از داده های سدها است. فرکانسهای طبیعی سد به دست آمده توسط چهار روش به خوبی مشخص شده است در حالی که نسبتهای میرایی هیچ همبستگی ندارند. روش EFDD همه مود ها را بدست می آورد در حالی که سایر روش ها برخی از مود ها را از دست دادند.

1 Introduction

Concrete dams play a very important role in the economy of a country due to their purposes such as providing water for hydro electric power generation and flood control. When these dams fail, there is an economical loss and a loss of life, therefore understanding the structural behavior of dams under different loading conditions becomes imperative.

سدهای بتنی به دلایل مهمی مانند تأمین آب برای تولید برق آبی و کنترل سیلاب ، نقش بسیار مهمی در اقتصاد یک کشور دارند. وقتی این سدها از بین بروند ، یک فاجعه اقتصادی و انسانی به وجود می آید ، بنابراین درک رفتار سازه سدها در شرایط بارگذاری متفاوت ضروری است.

The structural behavior of dams can be clearly understood through full scale dynamic tests. The aim of dynamic tests is to determine the modal parameters of dams for finite element model updating and validation, structural health monitoring and safety evaluation. Modal parameters such as natural frequencies, damping ratios and mode shapes are estimated using either forced vibration or ambient vibration tests. In forced vibration tests, the excitation force is controlled, so force response relationships can be determined leading to more accurate modal properties. Ambient vibration tests utilize environmental forces which cannot be measured, so only estimates of natural frequencies of vibration, mode shapes and modal damping factors can be made [8]. Forced vibration tests are expensive and time consuming to conduct as they involve purchasing and transporting large equipment such as servo hydraulic shakers to site which makes it less practical for dams. The only reliable choice is the use of ambient vibration tests since they do not require artificial excitations.

رفتار سازه ای سدها را می توان با آزمایش های دینامیکی در مقیاس کامل بدسا آورد. هدف از انجام آزمایش های دینامیکی، تعیین پارامترهای مودال سدها جهت بروزرسانی و اعتبار سنجی مدل المان محدود، پایش سلامت سازه ای و ارزیابی ایمنی است. پارامترهای مودال مانند فرکانس های طبیعی، نسبت میرایی و شکل های مودی با استفاده از تست های ارتعاش اجباری یا ارتعاش محیطی برآورد می شوند. در آزمایش های ارتعاش اجباری، نیروی ایجاد کننده ارتعاش کنترل می شود، بنابراین روابط پاسخ به نیرو را می توان تعیین کرد که منجر به تعیین دقیق تر مشخصات مودال می شود. آزمایش های ارتعاش محیطی از نیروهای محیطی استفاده می کنند که قابل اندازه گیری نیست، بنابراین تنها می توان تخمین هایی از فرکانس های طبیعی لرزش، اشکال مودی و ضرایب میرایی مودی ارائه داد [۸]. آزمایش لرزش اجباری گران است و زمان زیادی برای خرید و حمل تجهیزات بزرگی مانند شیکرهای هیدرولیکی سرو به محل صرف می شود که این امر باعث می شود تا برای پایش سدها کمتر عملی باشد. تنها انتخاب قابل اعتماد استفاده از تست های ارتعاش محیطی است زیرا نیازی به تحریک مصنوعی ندارند.

In 1980s, forced vibration testing was the only method used to test concrete dams. Examples include: Wimbleball dam [20], Morrow point dam [10] and Contra arch dam [11]. The development of algorithms that can extract modal parameters from output only responses, more sensitive sensors and better data acquisition systems has played a big role in the use of OMA in dams. In 1990s, OMA started gaining popularity in the field of dynamic tests of dams. Several dams around the world have been tested using ambient vibration testing such as Hermitage dam [5], Ruskin dam [15], Claewern dam [8], Cabril arch dam [17], arch dam of Mauvoisin [9], Hitotsuse dam [18] and Berke arch dam [21] to mention but a few.

در دهه ۱۹۸۰، آزمایش لرزش اجباری تنها روشی بود که برای آزمایش سدهای بتونی مورد استفاده قرار می گرفت. مثالها عبارتند از: سد [20] Wimbleball، سد [10] Morrow و سد [11] Contra arch. توسعه الگوریتم هایی که می توانند پارامترهای مودال را تنها از پاسخهای خروجی پیدا کنند و توسعه حسگرهای حساس تر و سیستمهای بهتر جمع آوری داده ها، نقش بزرگی در استفاده از OMA در سدها داشته است. در دهه ۱۹۹۰، OMA در زمینه آزمایش های دینامیکی سدها محبوبیت خود را به دست آورد. چندین سد در سراسر جهان با استفاده از آزمایش لرزش محیطی مانند سد هر میتاژ [۵]، سد [15] Ruskin، سد کلورن [۸]، سد قوس کابل [۱۷]، سد قوس مائوئیزین [۹]، سد هیتوتوزه [۱۸] و سد طاق برک [۲۱] که ذکر آنهاست.

Bukenya [6] noted in OMA for dams, a frequency domain based technique (peak picking) was the only method that was used in modal parameter estimation. However, peak picking is not the only available technique in OMA. OMA parameter estimation techniques use either correlation functions between output responses in time domain and output power spectra in frequency domain [24].

[6] Bukenya در OMA برای سدها ذکر کرد که تکنیک مبتنی بر دامنه فرکانس (انتخاب اوج) تنها روشی بود که در تخمین پارامترهای مودال مورد استفاده قرار گرفت. با این حال، انتخاب اوج تنها تکنیک موجود در OMA نیست. تکنیک های تخمین پارامتر OMA از توابع همبستگی بین پاسخهای خروجی در حوزه زمان و طیف توان خروجی در حوزه فرکانس استفاده می کنند [۲۴].

The aim of this study is compare the performance of various OMA techniques in estimation natural frequencies and damping ratios for dams. The methods studied include: enhanced frequency domain decomposition, alias free polynomial, least square complex exponential and stochastic subspace identification. The best method or combination of methods will be used in obtaining a database of modal parameters to be used in finite element model updating and validation and structural health monitoring of dams.

هدف از این مطالعه مقایسه عملکرد تکنیکهای مختلف OMA در برآورد فرکانسهای طبیعی و نسبتهای میرایی سدها است. روشهای مورد بررسی در بالا ذکر شده است. بهترین روش یا ترکیبی از روشها برای بدست آوردن بانک اطلاعاتی پارامترهای مودال مورد استفاده قرار می گیرد که در بروزرسانی مدل المان محدود و اعتبار سنجی و پایش سلامت سازه ای سدها مورد استفاده قرار می گیرد.

The paper describes the type and location of the dam to be tested, followed by field test description, and then an overview of the adopted methods is given. Results from the tests are given and discussed.

مقاله نوع و محل سد مورد آزمایش را شرح داده و پس از آن توضیحات آزمایش میدانی را ارائه می دهد و سپس مروری بر روشهای اتخاذ شده ارائه می دهد. نتایج حاصل از آزمایشات ارائه شده و مورد بحث قرار می گیرد.

2 Roode Elsberg dam

2.1 Description of the dam

Roode Elsberg dam (Figure 1) is a double curvature concrete arch dam with a centrally situated overspill section. The dam was built in 1968, situated on the Sanddrift River 30 km from Worcester, Western Cape Province, South Africa. The height above the lowest foundation is 72 m, the length of the crest is 274m and the gross capacity of the reservoir is 8.210 million m³. Roode Elsberg dam was constructed to provide supplementary water, so as to create a more assured supply of water for irrigation to the farms in the Hex River Valley.

سد روده السبرگ (شکل ۱) یک سد دو قوسی بتنی با بخش مرکب مرکزی است. این سد در سال ۱۹۶۸ ساخته شده است ، در رودخانه Sanddrift در ۳۰ کیلومتری Worcester ، استان کیپ غربی ، آفریقای جنوبی واقع شده است. ارتفاع از پایین ترین پایه ۷۲ متر ، طول تاج ۲۷۴ متر و ظرفیت ناخالص مخزن ۸،۲۱۰ میلیون متر مکعب است. سد روده السبرگ برای تأمین آب ذخیره ساخته شده است و نیز به منظور ایجاد یک منبع در دسترس آب برای آبیاری مزارع موجود در دره رود هگز.



Figure 1: Roode Elsberg dam

3 Field tests

3.1.1 Measurement set up

Full scale ambient response tests at Roode Elsberg dam were performed when the reservoir level was 25.9 m. To measure vibration responses of blocks a long cable through the gallery of the dam was connected to the data acquisition system set up on one side of the dam. This cable was then connected to the roving accelerometers. This was useful as there was no need to shift the measuring equipment in order to obtain data from blocks far away from the set up area.

آزمون پاسخ ارتعاش محیطی در سد رود السبرگ در مقیاس واقعی زمانی انجام شد که سطح مخزن ۲۵٫۹ متر بود. برای اندازه گیری پاسخ های ارتعاش بلوک های سازه سد، یک کابل بلند از طریق گالری سد به سیستم جمع آوری داده ها راه اندازی شده در یک طرف سد متصل شد. این کابل سپس به شتاب سنجهای متحرک متصل شد. این کار مفید بود زیرا نیازی به جابجایی تجهیزات اندازه گیری به منظور به دست آوردن اطلاعات از بلوک های دور از منطقه نبود.

The ambient vibration tests were performed with Q-Flex QA-700 accelerometers (Figure 2) by Honeywell with a sensitivity of 6 V/g and resolution $< 1\mu\text{g}$. Data acquisition manufactured by National Instruments with channels that can simultaneously acquire each channel with 24-bit high-resolution delta sigma analog-to-digital converters (ADCs) was used. The system has anti-aliasing filters to prevent aliasing and noise from affecting the measurement quality. Measurements will be taken by a data acquisition system (DAQ) built from hardware by National Instruments and using National Instruments' Lab VIEW software. The accelerometers were connected to NI PXI-4472B device cards mounted into a NI PXI 1045 chassis which is connected via fiber cable to a PCI card of an ordinary PC. The ambient vibration data was acquired using a sampling frequency of 1000 Hz during more than 10 minutes in each test.

آزمایش ارتعاش محیطی با شتاب سنج Q-Flex QA-700 (شکل ۲) توسط هانیول با حساسیت ۶ ولت بر گرم و وضوح $> 1\mu\text{g}$ میکروچی انجام شد. برای جمع آوری داده های تولید شده از دستگاه National Instrument با کانالهایی که می توانند همزمان هر کانال را با مبدلهای ۲۴ بیتی با رزولوشن بالا دلتا سیگما آنالوگ به دیجیتال (ADC) بدست آورند، استفاده شد. این سیستم دارای فیلتر ضد کج شدگی برای جلوگیری از کج شدن و نویز سیگنال است. اندازه گیری ها توسط یک سیستم دستیابی به اطلاعات (DAQ) ساخته شده از سخت افزار توسط National Instrument و با استفاده از نرم افزار Lab VIEW از National Instruments انجام می شود. شتاب سنج به کارتهای دستگاه NI PXI-4472B متصل به یک NI PXI 1045 وصل شد که از طریق کابل فیبر به کارت PCI یک رایانه معمولی وصل می شود. داده های ارتعاش محیطی با استفاده از فرکانس نمونه برداری از ۱۰۰۰ هرترز طی بیش از ۱۰ دقیقه در هر آزمون بدست آمد.



Figure 2: Forced balanced accelerometers

Measurements were taken at each of the blocks in three directions namely: vertical, radial and horizontal to the dam wall. For this to be done three accelerometers were mounted orthogonally to each other on a supporting steel plate leveled using a bubble level on the surface with three adjustable screws. The travelling accelerometer method was used in this field work where one set of accelerometers was kept at a fixed location and the other set roved along different locations on the dam structure.

در هر یک از بلوک ها داده ها در سه جهت اندازه گیری شد: عمودی ، شعاعی و افقی نسبت به جداره سد. برای انجام این کار ، سه شتاب سنج به طور عمود بر هم بر روی یک صفحه فولادی قرار گرفتند که با استفاده از تراز حبایی روی سطح با سه پیچ قابل تنظیم بود. روش شتاب سنج متحرک در این آزمون میدانی مورد استفاده قرار گرفت بدین ترتیب که یک مجموعه شتاب سنج در یک مکان رفرنس ثابت نگه داشته شدند و مجموعه دیگر در مکانهای مختلف روی سازه سد در جاهای مختلف در هر آزمون قرار گرفتند.

4 Overview of the adopted OMA techniques

The major objective of this to study is to identify which OMA technique can give reliable results from ambient vibration measurements of a concrete dam. In this paper, four techniques for OMA have been tested on the operation data of dams. The two methods work in frequency domain namely enhanced frequency domain decomposition, alias free polynomial algorithm and least square complex exponential, stochastic subspace identification work in time domain.

هدف اصلی این مطالعه ، شناسایی بهترین تکنیک OMA می باشد که از نتایج اندازه گیری لرزش محیطی یک سد بتنی می تواند نتیجه قابل قبولی بدست آورد. در این مقاله ، چهار تکنیک OMA بر روی داده های آزمون سدها مقایسه شده است. دو روش در حوزه فرکانس یعنی EFDD ، الگوریتم AF-P و دو روش LSCE و SSI در حوزه زمان کار می کنند.

Brincker et al., [2] presented an OMA method called enhanced frequency domain decomposition (EFDD) which is an extension of the frequency domain decomposition method. The singular degree of freedom (SDOF) model is imposed on the singular values in a user-defined frequency band around the peak providing the estimate of frequency and damping [14]. An average of the corresponding singular vectors, weighted by the singular values in the band, provides the estimate of the mode shape.

Brincker و همکارانش ، [۲] یک روش OMA بنام (EFDD) ارائه داده اند که ارتقاء روش تجزیه حوزه فرکانس است. درجه تک درجه آزادی (SDOF) مدل در مقادیر منحصر به فرد در یک باند فرکانس تعریف شده توسط کاربر در حوالی پیک ، تخمین فرکانس و میرایی را منجر می شود [۱۴].

Alias Free Polynomial (AF-Polynomial) is based on the Laplace domain orthogonal polynomial rational fraction method (RFP), with the added usage of a generalized orthogonal polynomial companion matrix, which allows for the numerical stability over an entire frequency range containing hundreds, even thousands of modes [23]. RFP is a curve-fitting algorithm which extracts poles and residues from experimental frequency response functions (FRFs) [13]. The technique is based on the Forsythe method [16] and orthogonality of polynomials. This approach divides the curve-fitting process into two procedures, that is to say estimating the natural frequency and damping ration first and then mode shapes second. This method is known as global curve fitting.

The least square complex exponential (LSCE) method is a time domain based on the structure free response analysis which is obtained from the recorded time history autocorrelation. LSCE is one of the first time domain methods to be proposed in 1974 based on Prony's method and it constructs the time series as a sum of exponential functions [3].

Stochastic subspace identification (SSI) method is an advanced OMA technique which devises an idealized model for the structural behavior of the system. Van Overschee and De Moor [22] produced a comprehensive book which is considered to have triggered the break-through among system control engineers with respect to practical acceptance and application. Brincker and Andersen [1] gives a detailed mathematical framework of subspace methods. Recently, the fields of civil engineering have adopted SSI to include it into their special case of system identification [19]. There are three algorithms under SSI which include Unweighted Principal Component (UPC), Principal Component (PC) and Canonical Variate Analysis (CVA).

4.1 Signal processing

The raw data obtained from the ambient vibration tests had to be processed before modal parameters could be extracted. Two commercial software namely ME' scope Ves 5.0 from Vibrant technology and ARTeMIS Extractor Pro.2010 by Sound vibration solutions were used to preprocess the data. In order to obtain accurate results from the ambient measurements signal processing is needed. The following procedures were carried out in both software:

- Detrending for adjusting the accelerometer time-history signals.
- Resampling to bring all records to a common sampling rate and duration. The sampling frequency was 33.33Hz with an overlap of 66.67%.
- Low-pass filtering to reduce noise in the band of interest (0-20Hz).

داده های خام به دست آمده از آزمایش های لرزش محیط باید قبل از استخراج پارامترهای مودال پردازش شوند. برای پیش پردازش داده ها از دو نرم افزار تجاری یعنی ME Ves 5.0 و ARTeMIS Extractor Pro.2010 استفاده شد. به منظور به دست آوردن نتایج دقیق از اندازه گیری های محیط ، پردازش سیگنال مورد نیاز است. مراحل زیر در هر دو نرم افزار انجام شد:

• تنظیم سیگنال های تاریخ-زمان شتاب سنج.

• تنظیم دوباره نرخ نمونه برداری و مدت زمان. نرخ نمونه برداری ۳۳,۳۳ هرتز با همپوشانی ۶۶,۶۷٪ بود.

• فیلتر کم گذر برای کاهش نویز در باند مورد نظر (۰-۲۰ Hz).

5 Results

The results presented in the section are based on the four OMA algorithms namely EFDD, AFPolynomial, SSI-UPC and LSCE. Modes below 10 Hz were obtained after low-pass filtering, decimation to 16.67 Hz. Table 1 summarizes the results for the five modes from ambient vibration tests carried out in this study in terms of natural frequencies and damping ratios. The first natural frequency is around 3.35 Hz and the fifth mode is around 7.5 Hz. There was no big difference in the picked modes from all the algorithms. AF-Polynomial and LSCE did not pick mode 2, as this can be attributed to the stabilization criterion made in the two methods that it was a local mode hence not stable in all measurements. The same reason explains why SSI-UPC did not pick the fourth mode. The range of damping ratio is 0.21-1.84% but there was no correlation amongst the different methods.

نتایج ارائه شده در این بخش بر اساس چهار الگوریتم OMA یعنی EFDD ، AFPolynomial ، SSI-UPC و LSCE است. مود های زیر ۱۰ هرتز پس از اعمال فیلتر کم گذر ، دسیمیت به ۱۶,۶۷ هرتز بدست آمد. در جدول ۱ نتایج پنج مود از آزمایشهای لرزش محیطی که در این مطالعه از نظر فرکانس های طبیعی و نسبت میرایی انجام شده است ، خلاصه می شود. فرکانس اول طبیعی در حدود ۳,۳۵ هرتز و مود پنجم در حدود ۷,۵ هرتز است. در مود های انتخاب شده از همه الگوریتم ها تفاوت زیادی وجود ندارد. AF-چند جمله ای و LSCE مود ۲ را پیدا نکردند ، این امر می تواند به معیار تثبیت در دو روش نسبت داده شود و نیز این یک مود محلی است از این رو در تمام داده ها پایدار نیست. همین دلیل توضیح می دهد که چرا SSI-UPC مود چهارم را پیدا نکرد. دامنه نسبت میرایی ۰ / ۸۴ / ۱ - ۰ / ۲۱٪ است اما بین روشهای مختلف هیچ ارتباطی وجود ندارد.

Mode	AF-Polynomial		EFDD		LSCE		SSI-UPC	
	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)
1	3.54	0.45	3.38	0.62	3.44	0.82	3.53	1.47
2	....	...	3.59	0.58	....	...	3.92	1.42
3	4.82	0.49	4.74	0.47	4.84	0.79	4.83	1.46
4	6.42	0.38	5.99	0.52	6.52	1.84	...	...
5	7.59	0.44	7.53	0.35	7.2	1.18	8.05	0.21

Table 1: Natural frequencies and damping ratios of Roode Elsberg dam

Figure 3 shows the frequency response functions (FRFs) from which the modes that were used the construction of the stabilization diagrams in the AF-Polynomial and LSCE methods. Figure 4 shows the average singular plot that was used in the selection of modes in the EFDD method.

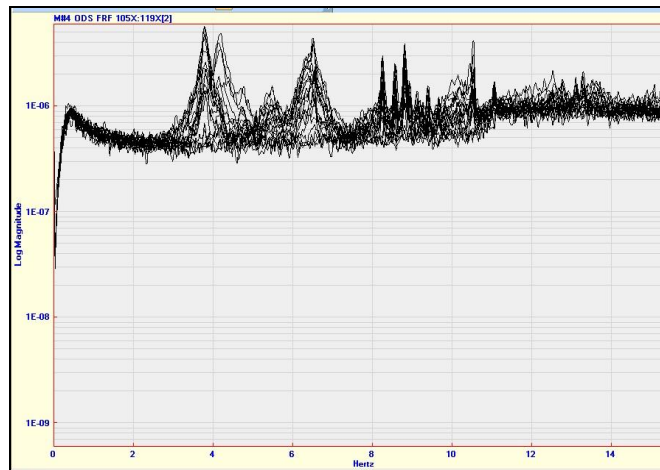


Figure 3: Radial FRFs of Roode Elsberg dam

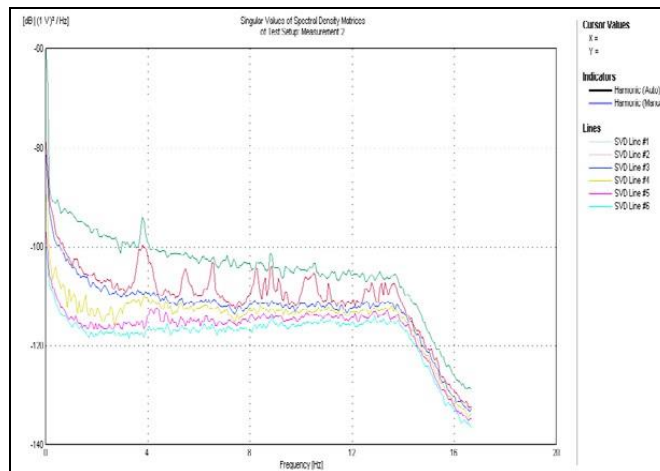


Figure 4: Average SVD plot from the test of Roode Elsberg dam

Figure 5 shows the estimated SDOF bell function from measurement set 1 found at 5.99 Hz, with a MAC Rejection level of 0.83. The value of the MAC had to be adjusted so that a good representation of the bell function around the chosen peak is obtained. Using this SDOF bell function, damping ratio and natural frequency are determined by doing inverse Fourier transform.

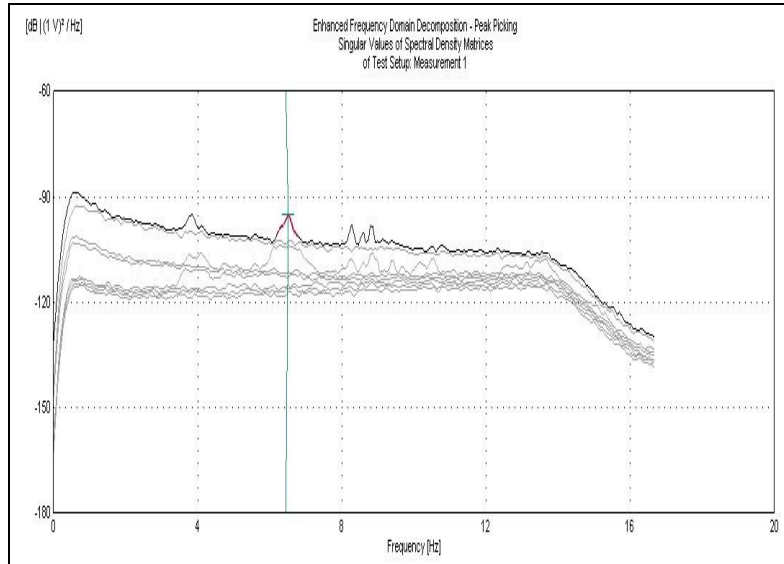


Figure 5: Singular Value Spectral Bell identification from data set 1

The response of the resonating system decaying exponentially is shown in Figure 6 obtained from the correlation function. Damping ratio is done through logarithmic decrement technique from the logarithmic envelope of the correlation function as shown in Figure 7.

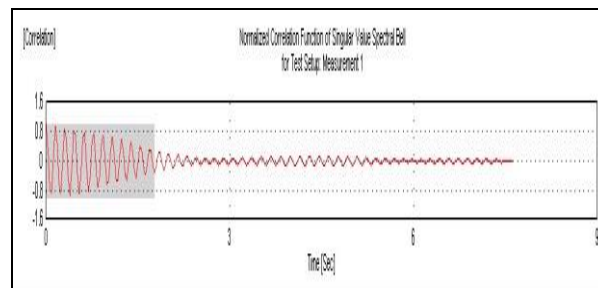


Figure 6: Normalized correlation function for mode at 6.39 Hz

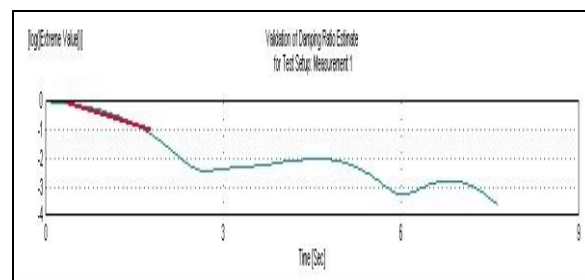


Figure 7: Damping Ratio Estimation from correlation function

The Bell functions, the estimation of the damping and natural frequency was performed for each measurement data set. The final result was then obtained by averaging the results from all the data sets together. Both the average values as well as the standard deviations (std.) are calculated from the data sets. For example one mode had a natural frequency 5.99 Hz with a std. of 0.06 Hz and damping ratio of 0.5 % with a std. of 0.1 %.

Figure 8 shows an example of the stabilization diagram of SSI method for measurement set 3. The diagram shows that the dynamic behavior of the structure is well represented by state-space models of order between 20 and 70. The measurements data sets of the 16 setups had to be processed resulting into 16 stabilization diagrams. The most suitable model order was selected for each of the 16 stabilization diagrams, and the corresponding natural frequencies and damping ratios were calculated.

Figure 9 shows a stabilization diagram of the AF-Polynomial method. Stable modes were easily found using a stabilization criterion based on maximum damping ratio of 5% and frequency resolution of 0.067 Hz.

Figure 10 shows a stabilization diagram of the LSCE method. The diagram was constructed after changing the FRFs into impulse Response Functions and also following the same stabilization criterion as for the SSI and AF-Polynomial methods. The LSCE method has a problem of out band modes in its stabilization diagrams hence they are not clear.

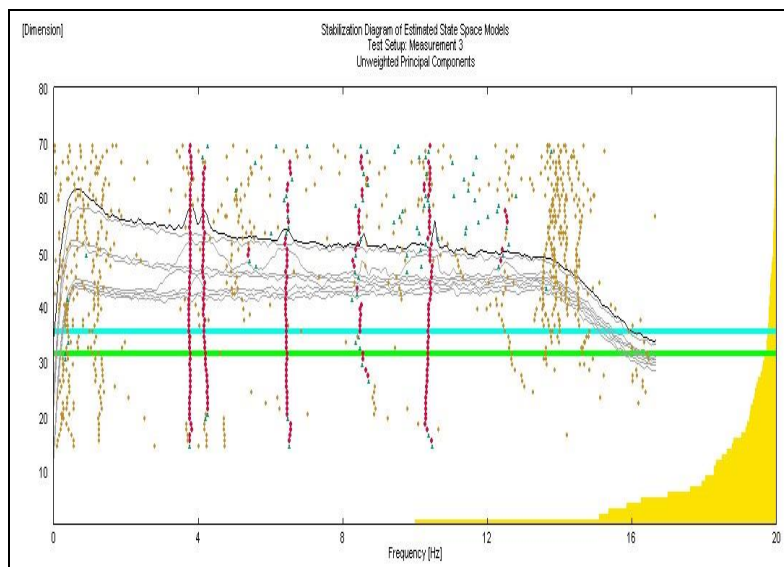


Figure 8: Stabilization diagram of the SSI-UPC method

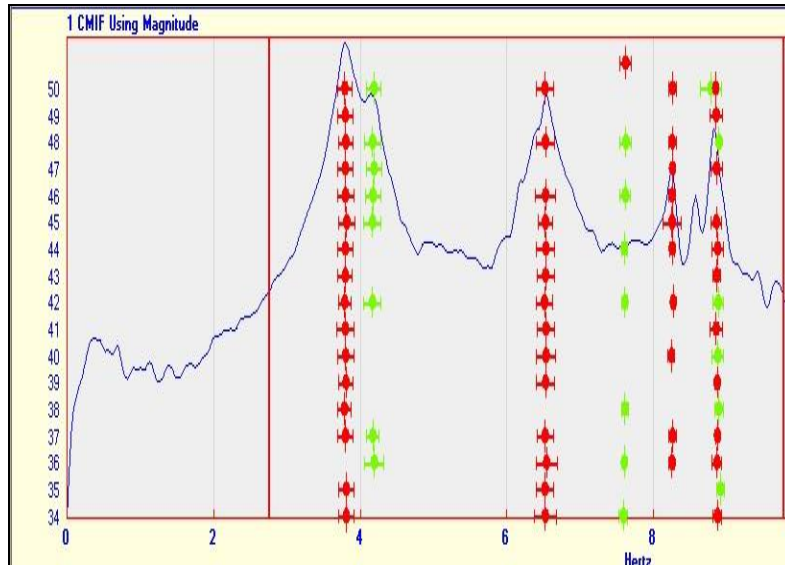


Figure 9: Stabilization diagram of the AF-Polynomial method

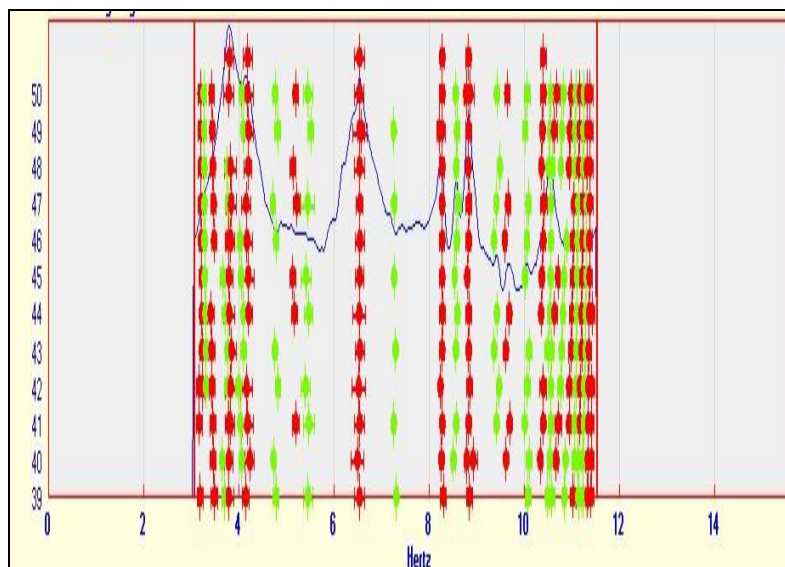


Figure 10: Stabilization diagram of the LSCE method

6 Conclusions

Ambient vibration testing is a vibration testing and analysis technique targeted towards large civil engineering structures such as concrete dams. This method requires no artificial excitation to be used on the structure being tested. It relies on the ambient and operating forces on the structure at the time of testing.

آزمایش لرزش محیطی یک تکنیک تست و تحلیل ارتعاش است که برای سازه های بزرگ مهندسی عمران مانند سدهای بتونی در نظر گرفته شده است. این روش نیازی به ایجاد لرزش مصنوعی بر روی سازه مورد آزمایش ندارد. در زمان آزمایش به نیروهای محیطی و عامل بر سازه متکی است.

Ambient vibration tests of Roode Elsberg have been reported. High quality instrumentation manufactured by National Instruments was used to obtain signals from the dam. Issues of signal resolution, bandwidth, sensitivity and dynamic range of accelerometers were taken into consideration while using the instruments. Modal parameters of the dams were extracted using commercial software, namely: ME' Scope Ves 5.0 and ARTeMIS Extractor 2010.

در این مقاله آزمایش لرزش محیطی روده السبرگ گزارش شده است. ابزار دقیق با کیفیت بالا تولید شده توسط National Instrument برای به دست آوردن سیگنال از سد استفاده شد. مسائل مربوط به وضوح سیگنال، پهنای باند، حساسیت و دامنه دینامیکی شتاب سنجها هنگام استفاده از ابزار مورد توجه قرار گرفت. پارامترهای مودال سدها با استفاده از نرم افزارهای تجاری استخراج شدند، یعنی ME' Scope Ves : ARTeMIS Extractor 2010.5.0

The first five natural frequencies of Roode Elsberg dams have been determined using time and frequency domain based methods. Natural frequencies of Roode Elsberg dam were in the range of 3.35-7.9 Hz The EFDD method picked up all the modes while the rest of the method did not pick. This is due to the fact that EFDD is based on the peak picking method and the rest are based on stabilization diagrams. In the construction of the stabilization diagrams, the missed modes were not stable in all measurements hence could not be picked.

پنج فرکانس طبیعی نخست سده روده السبرگ با استفاده از روشهای مبتنی بر حوزه زمان و فرکانس تعیین شده است. فرکانسهای طبیعی سد روده السبرگ در محدوده ۳٫۳۵-۷٫۹ هرتز بود. روش EFDD همه مودها را شناسایی کرد در حالی که بقیه روش ها اینطور نبودند. این موضوع به این دلیل است که EFDD مبتنی بر روش چیدن اوج است و بقیه روش بر اساس نمودارهای تثبیت بنا شده است. در ساخت نمودارهای تثبیت، مودهایی که در تمام اندازه گیریها پایدار نباشند را نمی توان برداشت کرد.

There is a need for further research in developing an algorithm that suits best ambient vibration measurements from dams as the method employed in this study did not give satisfactory results.

در تهیه الگوریتمی که مناسب ترین روش شناسایی سیگنال ارتعاش محیطی از سدها باشد، نیاز به تحقیقات بیشتری وجود دارد زیرا روش استفاده شده در این مطالعه نتایج مطلوبی را ارائه نمی دهد.

Acknowledgements

The authors want to acknowledge the financial support offered by Water Research Commission (WRC), Department of Water Affairs (DWA) South Africa and Concrete Materials and Structural Integrity Research Unit (CoMSIRU) at the University of Cape Town where this research was carried out.

References

- [1] R. Brincker, P. Andersen, *Understanding Stochastic Subspace Identification. Proceedings of the 24th International Modal Analysis Conference*, St. Louis, Missouri, (2006).
- [2] R. Brincker, C. Ventura, P. Andersen, *Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition. Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, USA, 2001
- [3] D.L. Brown R.J. Allemang, D.C. Zimmerman, M. Mergeay, *Parameter Estimation Techniques for Modal analysis*. SAE Paper No. 790221.
- [4] J.M.W. Brownjohn, R.T. Severn, C.A. Taylor, *Ambient vibration survey of Contra dam*. Research Report University of Bristol Department of Civil Engineering. (1986)
- [5] J. M. W. Brownjohn, *Dynamic investigation of Hermitage Dam*, Jamaica. Report UBCE-EE-90-13 University of Bristol Department of Civil Engineering. (1990).
- [6] P. Bukenya, *Ambient vibration testing of concrete dams*. Msc (Civ) Eng, thesis submitted to the Faculty of Engineering and Building Environment, University of Cape Town, (2011).

-
- [7] R. Cantieni, *Assessing a dam's structural properties using forced vibration testing. Proceedings of International Conference on Safety, Risk and Reliability-Trends in Engineering IABSE*, Malta, (2001).
- [8] W.E Danielle, C.A. Taylor, *Effective ambient vibration testing for validating numerical models of concrete dams. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, No.11 pp.1327-1344.
- [9] G.R. Darbre, J. Proulx, *Continuous ambient vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2002, Vol.31, No.2, pp 475–480.
- [10] Z.H. Duron, J.F. Hall, *Experimental and finite element studies of the forced vibration response of Morrow Point dam. Journal of Earthquake Engineering and Structural dynamics*, Vol16.No7,pp. 1021-1039.
- [11] B.R. Ellis, A.P. Jeary, J.D. Litter, *Vibration testing of Contra dam. Building Research Establishment report* (1983)
- [12] D. Formenti, M.H. Richardson, *Global curve fitting of Frequency Response Measurements using Rational Fraction Polynomial Method. Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida (1985)
- [13] D. Formenti, M. H. Richardson, *Parameter Estimation from Frequency Response Measurements using Rational Fraction Polynomial Method (Twenty years of Progress). Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida.(2002)
- [14] S. Gade, N. Moller, H. Herfulsen, H. Konstantin, *Frequency domain techniques for operational modal analysis. Proceeding of 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark (2005)
- [15] B.G. Kemp, *Ambient vibration assessment of Ruskin dam: Dynamic properties. Msc (Civil) Engineering. Thesis*, submitted to the University of British Columbia (UBC), Vancouver, Canada (1996).
- [16] L.G. Kelly, *Handbook of Numerical Methods and Applications. Addison-Wesley Publication company.Inc.*(1967)
- [17] P. Mendes, S. Oliviera, L. Guerreiro, M.A. Baptista, *Dynamic behavior of concrete dams monitoring and modeling. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, August 1-6, (2004).
- [18] N.Okuma, Y. Etou, K. Kanzawa, K Hirata, *Evaluation of dynamic properties of an aged large arch dam. Civil Engineering Group, Research Laboratory report*, Kyushu Electric Power Co. Fukuoka, Japan (2008).
- [19] B. Peeters, G. De Roeck, *Stochastic system identification for operational modal analysis: a review. ASME Journal for Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.123, No.4 pp 659.
- [20] R.T. Severn, A.P. Jeary, B.R. Ellis. *Forced vibration tests and theoretical studies on dams. Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2*, Vol. 69 ICE London, UK.
- [21] B. Sevim, A. Bayraktar, A. C. Altunisik, *Finite Element Model Calibration of Berke Arch Dam using Operational Modal Testing*, *Journal of Vibration Control*, Vol.17 No.7 pp.1065–1079.
- [22] P. Van Overschee, B. De Moor, *Subspace Identification for linear systems: theory-implementation and applications*, Dordrecht, The Netherlands. Kluwer Academic Publishers (1996)
- [23] H. Vold, *Aliasing in modal parameter estimation: An historical Look and New innovations. Proceeding of 25th International Modal Analysis conference. Orlando, Florida* (2007)
- [24] L.M. Zhang, R. Brinker, P. Andersen, *An overview of operational of modal analysis: Major developments and issues. Proceeding of International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.

