ANALYSIS OF GRAVITY DAM-FOUNDATION SYSTEM FOR JOINTED ROCK FOUNDATIONS WITHOUT AND WITH SHEAR SEAMS

KANUPREIYA

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
NEW DELHI-110016, INDIA

JANUARY 2019

ANALYSIS OF GRAVITY DAM-FOUNDATION SYSTEM FOR JOINTED ROCK FOUNDATIONS WITHOUT AND WITH SHEAR SEAMS

by

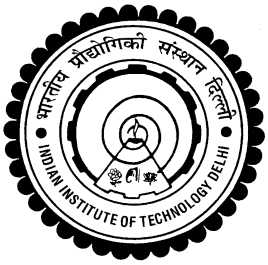
KANUPREIYA

Department of Civil Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JANUARY 2019

Dedicated to

my husband: Amit Gupta and

my son: Shivansh Gupta

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled "Analysis of Gravity Dam–Foundation System for Jointed Rock Foundations Without and With Seams" submitted by **Ms. Kanupreiya** to the Indian Institute of Technology Delhi, is a record of the bonafide research work carried out by her under our supervision and guidance. This thesis work, in our opinion, has reached the standard, fulfilling the requirements for **Doctor of Philosophy** degree. The research report and the results presented in this thesis have not been submitted, in part or full, to any other university or institute, for the award of any degree or diploma.

(Dr. K. G. Sharma) (Dr. Bappaditya Manna)

Emeritus Professor Associate Professor

Department of Civil Engineering

Indian Institute of Technology Delhi New Delhi – 110016

INDIA

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my sincere gratitude **to Dr. K. G. Sharma** and **Dr. Bappaditya Manna**, Professors, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Delhi for their constant effort throughout the work by continuous encouragement, meticulous guidance and inspiration during this research work. I am grateful for their co-operation and kind help rendered from time to time.

My sincere thanks are to **Shri R.K. Gupta**, Chairman and Managing Director, WAPCOS Ltd. and **Shri Anupam Mishra**, Executive Director, WAPCOS Ltd. for giving me this opportunity to pursue the research work in addition to the office duties. My heart filled thanks to **Dr. R. K. Gupta**, Chief Engineer, Central Water Commission for his guidance, insights and suggestions. I would also like to express my gratitude to **Ms. P. Sumana**, Chief Engineer, WAPCOS Ltd. for her immense support throughout the research work.

A special thanks for my in-laws **Shri Ashok Gupta** and **Smt. Geeta Gupta** who have always loved me and have unconditionally supported me in every sphere of life. I would like to extend my gratitude to my parents, **Shri Yogendra Pal** and **Smt. Manju Pal** for their blessings and the trust they have shown in me. I would like to thank my pillar of support, my husband, **Mr. Amit Gupta,** without whose love and support, this research work was not possible. I would like to express my deepest love for my son, **Master Shivansh** who stood by me with his unconditional love and allowed me to spend time doing research, in the time that rightfully belonged to him. A loving thanks to my sister, **Ms. Tanya Singhal** who although is younger than me, but supports me like an elder sister, is a friend and much more. I can never thank God enough for the love and support extended by my family.

I would also like to thank **Dr. Aditya Singh** and **Ms. Rajani Sharma** for constructive discussions and suggestions for the best performing of the research and their valuable opinions during the writing process.

I would also like to thank all those who have rendered help directly or indirectly during the entire research. Last but not least, I would like to thank all my friends and relatives for their continuous encouragement for the research.

(Kanupreiya)

ABSTRACT

At present, India's installed capacity in the hydropower sector is approximately 44.47 GW out of total power capacity of 326.84 GW (CEA, 2018). Therefore, a substantial development of the hydropower is required which significantly depends on construction of dams. Concrete gravity dams (referred as dams) transmit large loads to the foundation, which requires detailed analysis of dam-foundation system. Rock mass comprises of joints and shear seams and hence distinct element models, DEM, that incorporates deformable blocks are required (Cundal, 1992).

The detailed project reports of 40 hydroelectric projects in the Himalayan region are reviewed and the apparent dips of the set of joints of these projects evaluated to access the combination of joint orientations used for analysis in this study.

The dam and foundation are modelled as two discrete blocks, which are interacting through an interface between them. Analysis is carried out for two loading conditions, viz., (i) Loading condition 'A' (construction condition), LCA, i.e., construction of dam completed but no water in reservoir and no tail water, and (ii) Modified loading condition 'B', *LCB*, i.e., full reservoir level, with extreme uplift, assuming the drainage holes to be inoperative. For *LCB* both coupled hydro-mechanical analysis, LCB_c, and uncoupled hydro-mechanical analysis, LCB_u, (or mechanical analysis) are carried out.

To study the effect of joints and shear seams, dam-foundation analysis is carried out idealizing the foundation rock as *(a)* a discontinuum jointed rock mass foundation with one or two sets of joints, *(b)* a continuum rock foundation with shear seam, and *(c)* a discontinuum rock foundation with shear seam. For the present study elasto-plastic analyses has been carried out for 29,612 cases using the software Universal Distinct Element Code, UDEC (Itasca, 2011).

Analysis of the dam-foundation system with single set of joints are carried out to study the effect of *(a)* single set of joints: by varying the joint spacing, s, joint orientation, θ_j of the foundation joints; *(b)* foundation joint stiffness: by varying joint normal stiffnesses, k_n, and joint shear stiffnesses, k_s and (c) dam-foundation interface joint stiffness by varying the dam-foundation interface normal stiffness, k_{ni}, and dam-foundation interface shear stiffness, k_{si}.

As expected, it is observed that the major principal stresses are maximum at the heel for LCA and at the toe for LCB (both LCB_c and LCB_u). For LCB_c, the uplift pressure distribution is non-linear and varies with the variation of joint orientation. For most cases for LCB_c, the factor of safety is higher than that from the conventional analysis. It is also observed that for both LCA and LCB_c, major principal stress and crest displacement increase as joint spacing reduces, for all θ_j. For

values of θ_j from 0° to 30° and 105° to 180°, LCA is the critical condition for stresses while for values of θ_j from 30° to 105°, LCB_c is critical. For LCA, the displacements are minimum for sub-horizontal joints and maximum for sub-vertical joints. For LCB_c, the *x*-displacements of the crest are minimum for sub-horizontal joint sets and maximum for sub-vertical joint sets while the *y*-displacements of the crest are maximum for sub-horizontal joint sets and minimum for sub-vertical joint sets. It is observed that stresses and displacements under both loading conditions are dependent on the product of k_n and s, and, for any value of k_n.s greater than Young's modulus of intact rock, E_r, i. e., $k_n.s > E_r$, the stresses and displacements do not change with further increase in $k_n.s$. It is generally observed that as the ratio k_n/k_s increases, the stress and displacement increases.

The behaviour of rock foundation with two sets of joints is evaluated by varying the joint spacing, s, joint set orientation, θ_j, and included joint angle, θ_i. The joint set spacing for both joint sets are assumed equal. Critical joint set combinations for major principal stress are observed as 0°-120° and 120°-150° for LCA, and 0°-90° and 0°-150 for LCB_c. Crest displacements are observed to be critical for 60°-90° and 30°-60° for LCA. For LCB_c, critical joint combinations for *x*-displacements are 0°-120°, 30°-90° and for and *y*-displacements are 60°-90°, 30°-60°.

To study the effect of seam in the dam-foundation system, analysis has been carried out by idealising the foundation as equivalent continuum by varying the seam width, seam orientation, θ_s, with respect to the upstream horizontal and seam strength properties namely, seam cohesion, c_s, and angle of friction, ϕ_s. The locations of the seam are considered at Heel (*Hl*), Heel-Center (*HC*), Center (*C*), Center-Toe (*CT*) and Toe (*T*).

It is observed that due to the presence of a seam, the stresses and displacements are affected in the vicinity of the seam, in the dam and foundation. The deformation at the mid-point of the seam, δ_{ys}, at the dam base is compared with the deformation at the same location without the seam, δ_y. A seam influence factor (I_f) defined as the ratio of δ_{ys} to δ_y is calculated for each case, to study the impact of the seam.

Seam orientation of 90° and 120° is observed to be most critical for LCA and LCB_c respectively. A seam at the heel (*Hl*) of the dam is most critical for both loading conditions. In all cases, the seam influence factor increases with increase in the seam width. For both loading conditions it is observed that as value of c_s or ϕ_s decreases, values of δ_{ys} and I_f increase. The effect of change in c_s or ϕ_s is greater for smaller values of c_s or ϕ_s.

In order to study the effect of shear seam on a jointed rock foundation, and, to calculate the optimum depth of plug for dental treatment, analyses are carried out for a gravity dam on a jointed rock foundation with a single set of joints along with shear seam and plugs for dams of different heights. Twelve different joint set orientations (θ_j), and a spacing of 2 m are considered for foundation joints. Seam of four different widths are considered at different locations below dam base. Analysis is carried out for both LCA and LCB_c.

Additional analysis are carried out with concrete plugs of 4 different depths for each seam considered and plug efficiency curves are developed. The optimum plug depth is defined as the plug depth where the rate of change of plug efficiency reduces to 1%. A study of the optimum plugs for all cases considered showed that the impact of θ_s, θ_j and seam location is negligible on the value of optimum plug depth for seam of various widths.

In order to develop an empirical equation for the optimum plug depth required for dental treatment of shear seam, the optimum plug depth is calculated for different dam heights and seam widths.

Based on the assessment of the impact of various parameters on the optimum plug depth, the relevant variables affecting plug depth, namely, dam height and seam width, have been identified, and an empirical relationship is proposed through regression analysis. The plug depth calculated from the derived empirical relationship has also been compared against other similar equations available for plug depth.

Numerical validation of empirical equation for optimum plug depth is carried out for variation in joint spacing; variation of ratio of Young's modulus of intact rock blocks to that of dam concrete, E_r/E_c ; and varying the ratio of Young's modulus of rock blocks to that of shear seam blocks, E_r/E_s. Impact of variation in each of the parameters on the optimum plug depth is studied.

It is concluded from the above study that the empirical relationship developed in the present study is suitable for calculating the optimum depth of plug which should be provided for any given seam width and dam height.

सार

वर्तमान में, भारत की 326.84 GW की कुल बिजली क्षमता में से हाइड्रोपावर क्षेत्र की इंस्टॉलड क्षमता लगभग 44.47 GW है (CEA, 2018)। इसलिए, हाइड्रोपावर के पर्याप्त विकास की आवश्यकता है, जो डैम के निर्माण पर काफी निर्भर करता है। कंक्रीट ग्रेविटी डैम (डैम के नाम में संदर्भित) विशाल लोड्स को फॉउण्डेशन में ट्रांसमिट करते हैं, जिसके लिए डैम-फॉउण्डेशन सिस्टम के विस्तृत विश्लेषण की आवश्यकता होती है । रॉक मास में जॉइंट्स और शीअर सीम शामिल होती हैं, और इसलिए डिस्टिंक्ट एलिमेंट मॉडल (डीईएम, DEM), जिसमें डिफोरमेबल ब्लॉक शामिल हैं, की आवश्यकता होती है (Cundal, 1992)।

इस अध्ययन में हिमालयी क्षेत्र की 40 हाइड्रोपावर परियोजनाओं की डिटेल्ड प्रोजेक्ट रिपोर्ट्स की समीक्षा की गई है, और इन परियोजनाओं के जॉइंट सेट्स के अपैरेंट डिप्स का मूल्यांकन किया गया है, और उनका उपयोग इस अध्ययन में विश्लेषण हेतु उपयोग किए जाने वाले जॉइंट ओरिएन्टेशंस तक पहुंचने के लिए किया गया है।

डैम और फॉउण्डेशन को दो डिस्क्रीट ब्लॉकों के रूप में मॉडल किया गया है, जो उनके बीच एक इंटरफेस के माध्यम से परस्पर इंटरैक्शन कर रहे हैं। विश्लेषण दो लोडिंग कंडीशंस के लिए किया गया है, नामतः (i) लोडिंग कंडीशन 'A' (कंस्ट्रक्शन कंडीशन), LCA, अर्थात, पूर्णतया निर्मित डैम, जिसके रिज़ेर्वायर में पानी नहीं है और टेल वाटर भी नहीं है, और (ii) मॉडिफाइड लोडिंग कंडीशन 'B' ', LCB, अर्थात, पूर्ण रिज़ेर्वायर स्तर, एक्सट्रीम अपलिफ्ट वाली स्तिथि, ड्रेनेज होल्स निष्क्रिय मान लिए गए हैं। LCB के लिए कपल्ड हाइड्रो-मैकेनिकल एनालिसिस, LCB_c, और अन्-कपल्ड हाइड्रो-मैकेनिकल एनालिसिस, LCB_u, (या मैकेनिकल एनालिसिस), ये दोनों किए गए हैं।

जॉइंट्स और शीअर सीमों के प्रभाव का अध्ययन करने हेतु, डैम-फॉउण्डेशन सिस्टम का विश्लेषण फॉउण्डेशन के रॉक को तीन स्तिथियों में आइडियलाइज़ कर के किया गया है, क्रमशः (क) जॉइंट्स के एक या दो सेटों के साथ एक डिस्कॉन्टीनूअम जॉइंटेड रॉक मास फाउंडेशन, (ख) शीअर सीम के साथ एक कॉन्टीनूअम रॉक फाउंडेशन, और (ग) शीअर सीम के साथ एक डिस्कॉन्टीनूअम रॉक फाउंडेशन। वर्तमान अध्ययन के लिए यूनिवर्सल डिस्टिंक्ट एलीमेंट कोड, यूडीईसी (UDEC) सॉफ्टवेयर (Itasca, 2011) के उपयोग द्वारा 29,612 परिस्थितियों का इलास्टो-प्लास्टिक एनालिसिस किया गया है।

जॉइंट्स के सिंगल सेट के साथ डैम-फॉउण्डेशन सिस्टम का विश्लेषण किया गया है, निम्नलिखित स्थितियों के प्रभावों का अध्ययन करने हेतु : (क) जॉइंट्स का सिंगल सेट : फॉउण्डेशन के जॉइंट्स के विभिन्न जॉइंट स्पेसिंग्स, s, तथा विभिन्न जॉइंट ओरिएन्टेशंस, θ_j, के प्रभाव का अध्ययन; (ख) फॉउण्डेशन के जॉइंट्स की जॉइंट स्टिफनेस : विभिन्न जॉइंट नॉर्मल स्टिफनेस, k_n, तथा विभिन्न जॉइंट शीअर स्टिफनेस, k_s, के प्रभाव का अध्ययन, और (ग) डैम-फॉउण्डेशन के इंटरफेस की इंटरफेस जॉइंट स्टिफनेस : विभिन्न इंटरफेस नॉर्मल स्टिफनेस, k_{ni}, तथा विभिन्न इंटरफेस शीअर स्टिफनेस, k_{si}, के प्रभाव का अध्ययन किया गया है।

जैसा कि अपेक्षित था, यह देखा गया है कि मेजर प्रिंसिपल स्ट्रेस LCA के लिए डैम के हील पर और LCB (दोनों LCB_c और LCB_u) के लिए डैम के टो पर अधिकतम होते हैं। LCB_c के लिए, अपलिफ्ट प्रेशर डिस्ट्रीब्यूशन नॉन-लीनियर है और जॉइंट ओरिएन्टेशन की भिन्नता के साथ बदलता रहता है। अधिकांश परिस्थितियों में कन्वेंशनल एनालिसिस की तुलना में LCB_c का

फैक्टर ऑफ़ सेफ्टी अधिक पाया गया है। यह भी देखा गया है कि LCA और LCB_c दोनों स्तिथिओं में, सभी θ_j के लिए, जॉइंट स्पेसिंग कम होने से मेजर प्रिंसिपल स्ट्रेस और क्रेस्ट डिस्प्लेस्मेंट दोनों में वृद्धि होती है । θ_j के मान 0° से 30° और 105° से 180° के लिए, स्ट्रेस के लिए क्रिटिकल कंडीशन LCA पायी गयी है, जबकि θ_j के मान 30° से 105° के लिए, स्ट्रेस के लिए क्रिटिकल कंडीशन LCB_c पायी गयी है। LCA के लिए, न्यूनतम डिस्प्लेस्मेंट स्तिथि सब-हॉरिज़ॉन्टल जॉइंट्स के लिए, और अधिकतम डिस्प्लेस्मेंट स्तिथि सब-वर्टीकल जॉइंट्स के लिए पायी गयी है। LCB_c के लिए, डैम के क्रेस्ट का x-डिस्प्लेस्मेंट सब-हॉरिज़ॉन्टल जॉइंट्स के सेट के लिए न्यूनतम और सब-वर्टीकल जॉइंट्स के सेट के लिए अधिकतम पाया गया है, जबकि डैम के क्रेस्ट का y- डिस्प्लेस्मेंट सब-हॉरिज़ॉन्टल जॉइंट्स के सेट के लिए अधिकतम और सब-वर्टीकल जॉइंट्स के सेट के लिए न्यूनतम पाया गया है। यह देखा गया है कि दोनों लोडिंग कंडीशंस में स्ट्रेस और डिस्प्लेस्मेंट k_n और s के गुणनफल ($k_n.s$) पर निर्भर होते हैं, और, इन्टैक्ट रॉक के यंग मॉडुलस, E_r, से अधिक $k_n.s$ के किसी भी मूल्य के लिए, अर्थात्, $k_n.s > E_r$ की स्तिथि में, स्ट्रेस और डिस्प्लेस्मेंट $k_n.s$ के मूल्य में वृद्धि के साथ नहीं बदलता। यह आमतौर पर देखा गया है कि जैसे-जैसे k_n/k_s का अनुपात बढ़ता है, स्ट्रेस और डिस्प्लेस्मेंट भी बढ़ता है।

जॉइंट्स के दो सेट से युक्त रॉक फाउंडेशन के व्यवहार का मूल्यांकन जॉइंट स्पेसिंग, s, जॉइंट सेट ओरिएन्टेशन, θ_j, और इनक्लूडेड जॉइंट एंगल, θ_i, के विभिन्न मूल्यों को लेकर किया गया है। जॉइंट्स के दोनों सेटों के लिए जॉइंट स्पेसिंग को समान माना गया है। मेजर प्रिंसिपल स्ट्रेस के लिए क्रिटिकल जॉइंट सेट कॉम्बिनेशन, LCA के लिए 0°-120° और 120°-150°, तथा LCB_c के लिए 0°-90° और 0°-150° देखे गए हैं। क्रेस्ट डिस्प्लेस्मेंट LCA के लिए 60°-90° और 30°-60° पर क्रिटिकल देखे गए हैं। LCB_c के लिए क्रिटिकल जॉइंट कॉम्बिनेशन x-डिस्प्लेस्मेंट के लिए 0°-120°, 30°-90° तथा y-डिस्प्लेस्मेंट के लिए 60°-90°, 30°-60° हैं।

डैम-फॉउण्डेशन सिस्टम में सीम के प्रभाव का अध्ययन करने हेतु, फॉउण्डेशन को एक्विवैलेन्ट कॉन्टीनूअम के आदर्शरूप कर, सीम विड्थ, अपस्ट्रीम हॉरिज़ॉन्टल के साथ सीम ओरिएन्टेशन, θ_s, तथा सीम स्ट्रेंथ प्रॉपर्टीज़ नामतः सीम कोहेशन, c_s, और एंगल ऑफ़ फ्रिक्शन, ϕ_s, के विभिन्न मूल्यों को लेकर विश्लेषण किया गया है। सीम की लोकेशंस डैम के हील (HI), हील-सेंटर (HC), सेंटर (C), सेंटर-टो (CT) और टो (T) पर मानी गयीं हैं।

यह देखा गया है कि एक सीम की उपस्थिति के कारण, डैम और फॉउण्डेशन में, सीम के आसपास के क्षेत्र का स्ट्रेस और डिस्प्लेस्मेंट प्रभावित होते हैं। डैम बेस पर सीम के मध्य-बिंदु पर होने वाली डीफ़ॉर्मेशन, δ_{ys}, की तुलना उसी स्थान पर बिना सीम की स्थिति में होने वाली डीफ़ॉर्मेशन, δ_y, के साथ की गई है। सीम इन्फ्लुएंस फैक्टर, I_f, को δ_{ys} से δ_y के अनुपात के रूप में परिभाषित किया गया है, और इसकी गणना प्रत्येक परिस्थिति के लिए की गई है, ताकि सीम के प्रभाव का अध्ययन किया जा सके।

LCA एवं LCB_c के लिए क्रमशः 90° एवं 120° ओरिएन्टेशन की सीम क्रिटिकल देखी गयी है। दोनों लोडिंग कंडीशंस के लिए सीम की क्रिटिकल लोकेशन डैम के हील (HI) पर देखी गई है। सभी परिस्थितियों में सीम इन्फ्लुएंस फैक्टर सीम विड्थ में वृद्धि के साथ बढ़ता जाता है। दोनों लोडिंग कंडीशंस के लिए देखा गया है कि जैसे-जैसे c_s और ϕ_s का मूल्य कम होता है, वैसे-वैसे δ_{ys} और I_f के मूल्य में वृद्धि होती है। c_s और ϕ_s में परिवर्तन का प्रभाव c_s और ϕ_s के छोटे मूल्यों के लिए अधिक होता है।

जॉइंटेड रॉक फाउंडेशन पर शीअर सीम के प्रभाव का अध्ययन करने हेतु, एवं, डेंटल ट्रीटमेंट के लिए ऑप्टिमम प्लग डेप्थ की गणना करने हेतु, शीअर सीम और प्लग सहित जॉइंट्स के सिंगल सेट से युक्त जॉइंटेड रॉक फाउंडेशन वाले ग्रेविटी डैम की विभिन्न डैम हाइट्स के लिए विश्लेषण किए गए हैं। फॉउण्डेशन के जॉइंट सेट ओरिएन्टेशन के बारह अलग-अलग मूल्य एवं जॉइंट स्पेसिंग का मूल्य 2 मीटर माना गया है। डैम बेस के नीचे सीम विभिन्न लोकेशंस पर एवं चार विभिन्न विड्थ्स की मानी गयी है। विश्लेषण LCA एवं LCB_c दोनों के लिए किया गया है।

प्रत्येक सीम के लिए कंक्रीट प्लग की 4 विभिन्न डेप्थ्स के लिए अतिरिक्त विश्लेषण किया गया है, और प्लग एफिशिएंसी कर्व्स विकसित किए गए हैं। ऑप्टिमम प्लग डेप्थ को प्लग की उस डेप्थ के रूप में परिभाषित किया गया है जिस डेप्थ पर प्लग एफिशिएंसी के परिवर्तन की दर 1% तक कम हो जाती है। विश्लेषण की सभी परिस्थितियों के लिए पाई गई ऑप्टिमम प्लग डेप्थ के मूल्यों के अध्ययन से यह दर्शाया गया कि विभिन्न विड्थ्स के सीमों के लिए ऑप्टिमम प्लग डेप्थ के मूल्यों पर θ_s, θ_j और सीम लोकेशन का प्रभाव नगण्य है।

शीअर सीम के डेंटल ट्रीटमेंट के लिए आवश्यक ऑप्टिमम प्लग डेप्थ के मूल्य की एक इम्पीरिकल इक्वेशन विकसित करने हेतु, अलग-अलग डैम हाइट्स और सीम विड्थ्स के लिए ऑप्टिमम प्लग डेप्थ की परिगणना की गई है।

ऑप्टिमम प्लग डेप्थ पर विभिन्न पैरामीटर्स के प्रभाव के मूल्यांकन के आधार पर प्लग डेप्थ को प्रभावित करने वाले उचित वेरिएबल्स, नामतः, डैम हाइट और सीम विड्थ, की पहचान की गई है, और रिग्रेशन एनालिसिस के माध्यम से एक इम्पीरिकल रिलेशनशिप प्रस्तावित की गई है। डिराइव्ड इम्पीरिकल रिलेशनशिप से गणना की गई प्लग डेप्थ की तुलना प्लग डेप्थ के लिए उपलब्ध अन्य समान एक्वेशन्स से भी की गई है।

ऑप्टिमम प्लग डेप्थ के लिए विकसित इम्पीरिकल इक्वेशन की न्यूमेरिकल वेलिडेशन निम्न परिसथितियों में की गई है : विभिन्न जॉइंट स्पेसिंग्स के लिए; इन्टैक्ट रॉक ब्लॉक एवं डैम कंक्रीट के यंग मॉडुलस के अनुपात (E_r/E_c) के विभिन्न मूल्यों के लिए; तथा, रॉक ब्लॉक एवं शीअर सीम ब्लॉक के यंग मॉडुलस के अनुपात (E_r/E_s) के विभिन्न मूल्यों के लिए। ऑप्टिमम प्लग डेप्थ पर विभिन्न पैरामीटर्स में भिन्नता के प्रभाव का अध्ययन किया गया है।

उपरोक्त अध्ययन से यह निष्कर्ष निकाला गया है कि वर्तमान अध्ययन में विकसित इम्पीरिकल रिलेशनशिप किसी भी डैम हाइट और सीम विड्थ के लिए प्रदान किए जाने वाले प्लग की ऑप्टिमम डेप्थ की गणना हेतु उपयुक्त है।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

LIST OF SYMBOLS AND ACRONYMS

δ_y	Vertical displacement without seam
δ_{yp}	Vertical displacement at mid-point of seam with concrete plug
δ_{ys}	Vertical displacement at mid-point of seam without concrete plug
ϕ	Friction angle
ϕ_b	Basic friction angle
ϕ_j	Joint friction angle
ϕ_r	Effective friction angle
ϕ_s	Angle of internal friction for shear seam material
ϕ_c	Concrete friction angle
μ	Dynamic viscosity of the fluid
η_p	Efficiency of the concrete plug
v	Poisson's ratio
v_m	Rock mass Poisson's ratio
v_r	Intact rock Poisson's ratio
ρ	Density
σ_1	Major principal stress
σ_1^H	Major principal stress at heel of the dam
σ_1^T	Major principal stress at toe of the dam
σ_2	Intermediate principal stress
σ_3	Minor principal stress
σ_3^H	Minor principal stress at heel of the dam
σ_3^T	Minor principal stress at toe of the dam
σ_{Heel}	Stress at the heel of the dam
σ_n	Normal stress
σ_r	Radial stress
σ_T	Stress at point of discontinuity for bilinear model
σ^t	Tensile strength
σ_{max}^t	Maximum allowable tensile strength
σ_{Toe}	Stress at the toe of the dam

σ_{zz}	Out-of-plane stress
τ_s	Shear stress
θ_k	Joint set orientation joint set with horizontal
θ_j	Joint set orientation
θ_r	Angle of resultant forces (from upstream horizontal)
θ_s	Seam orientation
ψ	Dilation angle
ψ_j	Dilation angle of joint
Δp	Change in pressure across the joint
$\Delta\sigma_n$	Normal stress increment
Δu_n	Normal displacement increment
Δu_s	Total incremental shear displacement
Δu_s^e	Elastic component of shear displacement
a_0	Joint aperture at zero normal stress
a	Contact hydraulic aperture
a_{min}	Residual joint aperture
A	Contact area under consideration
B	Width of the weak rock seam
B_d	Base width of dam
c	Cohesion
c_c	Concrete cohesion
c_j	Joint cohesion
c_s	Seam cohesion
D	Depth of plug
e	Eccentricity with centre of section
E	Elastic modulus
E_c	Concrete elastic modulus
E_r	Young's modulus for intact rock
E_m	Young's modulus for rock mass
$\frac{E_r}{E_c}$	Ratio of Young's modulus of intact rock blocks to that of dam concrete

$\frac{E_r}{E_s}$	Ratio of Young's modulus of rock blocks to that of shear seam blocks
F	Constant force for body at instant of time
F_s	Factor of safety against sliding
F_H	Total horizontal force acting on the dam
F_ϕ	Partial factor of safety in respect of friction
F_c	Partial factor of safety in respect of cohesion
f_c	Compressive strength of concrete
f^s	Shear yield function
f^t	Tensile yield function
G	Shear modulus
G_r	Shear modulus for intact rock
G_m	Shear modulus for rock mass
g^s	Shear potential function
H	Height of the dam above foundation level
i	Angle of asperities
I_f	Influence factor
J_f	Joint factor
K	Bulk modulus
k_0	In-situ stress ratio
k_j	Joint permeability factor
k_n	Joint normal stiffness
k_s	Joint shear stiffness
k_{n_k}	Joint normal stiffness of kth joint set
k_{s_k}	Joint shear stiffness of kth joint set
k_{ni}	Interface normal stiffness
k_{si}	Interface shear stiffness
l	Length assigned to the contact between the domains
m	Mass
n	Number of joints
q	Flow rate through joints

r	Distance from the point of load application
R^2	Correlation coefficient
s	Spacing of discontinuity / Joint set spacing
$\overline{s}$	Distance
s_k	Joint set spacing joint set
t	Time
U	Total uplift force
$\dot{u}$	Velocity
u_n	Joint normal displacement
u_s	Shear displacement
u_{cs}	Critical shear displacement
$\sum V$	Sum of all vertical forces
v_0	Initial velocity
v	Final velocity
W	Total weight of dam
X	load perpendicular to the surface but parallel to the plane of discontinuity
Y	Load parallel to the surface but parallel to the plane of discontinuity
LCA	Construction condition (loading condition 'A')
LCB	Full reservoir condition (loading condition 'B')
LCB_c	Coupled hydro-mechanical loading condition 'B'
LCB_u	Uncoupled hydro-mechanical loading condition 'B'
L_n	In-situ block size
L_o	Block size of 100 mm lab specimen
C	Position of seam centre of the dam
CT	Position of seam center-toe of the dam
Hl	Position of seam at heel of the dam
HC	Position of seam heel-centre of the dam
JCS	Joint compressive strength
JCS_o	Joint compressive strength for 100 mm lab specimen
JCS_n	Joint compressive strength for L_n size lab specimen

JRC	Joint roughness coefficient
JRC_o	Joint roughness coefficient for L_0 size lab specimen
JRC_n	Joint roughness coefficient for L_n size lab specimen
T	Position of seam toe of the dam
GSI	Geological strength index
RMR	Rock mass rating
RQD	Rock quality designation