SHOCK TUBE TESTING OF SAND AND ITS APPLICATION IN BLAST AND FRAGMENT ANALYSIS OF STRUCTURE

RASHMI

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY (IIT) DELHI

JUNE 2024

SHOCK TUBE TESTING OF SAND AND ITS APPLICATION IN BLAST AND FRAGMENT ANALYSIS OF STRUCTURE

by

RASHMI

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Submitted

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

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY (IIT) DELHI

JUNE 2024

CERTIFICATE

This is to certify that thesis entitled **"SHOCK TUBE TESTING OF SAND AND ITS APPLICATION IN BLAST AND FRAGMENT ANALYSIS OF STRUCTURE"** submitted by **Ms. Rashmi (2017CEZ8531)** to the **Indian Institute of Technology (IIT) Delhi** for the award of the degree of **DOCTOR OF PHILOSOPHY** is record of the student's bonafide research work carried out by her. She worked under my supervision for the submission of the thesis, which to my knowledge, has reached the requisite standard as demonstrated by excellent international publications in journals and conferences.

To the best of my knowledge and belief, the contents of her research work have not been submitted in full or in part to any other university or institute to confer a degree or diploma.

Submitted by:

Ms. Rashmi

Supervisor:

Dr. Tanusree Chakraborty

Professor

Department of Civil Engineering

IIT Delhi

New Delhi

JUNE 2024

Acknowledgments

I sincerely thank my supervisor **Prof. Tanusree Chakraborty** for her invaluable guidance support, and inspiration. I am highly grateful to Dr. Tanusree Chakraborty, particularly her insightful observations and extraordinarily considerate manner, which helped to shape my Ph.D. study. She has always encouraged me to give my best and expressed trust in my abilities. Her incredible comprehension of the subject, helpful technical conversations, and courteous approach to resolving several technical issues set the door for steady progress in this research. I want to express my gratitude to her for providing the required laboratory and other facilities to conduct experimental work involved in this work independently and very smoothly. She has also made sure that I have all the opportunities and experiences that will provide me with a strong basis for my profession and enable me to work independently as a researcher.

I express my sincere gratitude to the members of the research committee, **Prof. R. R. Kalaga**, **Prof. N. M. Anoop Krishnan**, and **Prof. M. K. Singha**, for their helpful comments that have aided in identifying the research gaps and defining this thesis's objectives.

I especially thank **Mr. Sonu Prajapati** and **Ms. Pooja Garg** for helping me prepare test specimens and conduct shock tube experiments on the sand. I am also thankful to **Sanujula ji** for her assistance in administrative work at the institute, which saved my time. I am also very grateful to all my lab mates – Ms. Kavita Ganorkar, Mr. Venkatesh Deshpande, Ms. Prerna Singh, Ms. Lekhani Gaur, Ms. Sriparna Roy, and Mr. Ranveer Singh, for their continuous support, encouragement, and for keeping a friendly and warm environment in the laboratory.

Especially, I deeply thank and admire my husband, **Mr. Navneet Sharma**, for his continuous inspiration, encouragement, understanding, and support during my Ph.D. studies. I am truly blessed to have you as my partner for life. I am also eternally grateful to my parents, **Mr. K Singh** and **Mrs. Usha Singh,** and my sisters, **Ms. Shivani Singh** and **Ms. Shikha Singh**, for their continuous support, love, and encouragement. I also thank my father and mother-in-law, who believed in me and kept patience throughout. I would like to dedicate this thesis to my husband, my parents, and my sisters.

I would like to thank God, for letting me through all the difficulties. I have experienced your guidance day by day and I will keep on trusting you for my future. Lastly, I am thankful to those people whom I may not know or may not remember right now but have helped me in one way or the other to move forward with my research work.

Date: 04-06-2024 Rashmi

Abstract

In the present day scenario, due to the increase in accidental or intentional detonations, there is a necessity to build blast and impact-resistant structures. Semi-buried box structures are important military protective structures of national and strategic importance and must withstand extreme loading threats from weapon detonations, which is usually in the form of combined blast and impact (fragment) loading. The stability of these structures is also greatly influenced by the behavior of soil under blast loading, therefore study of blast-induced ground shocks and its propagation in the soil media needs a detailed investigation.

Initially, the performance of the vertical shock tube (VST) is evaluated by characterizing the generated blast waves considering two different diaphragm types; Aluminium and Lexan, and two driver gases; Nitrogen and Helium. The properties of the blast waves generated in the VST are greatly influenced by the diaphragm type (material and thickness), and driver gas. The present VST can simulate blast waves with peak reflected overpressure ranging from, 0.59-2.04 MPa and 0.68-5.60 MPa upon using Nitrogen and Helium as driver gas, respectively. In addition, numerical simulations are also performed, and results are validated with the experimental results. The VST is then used to investigate the stress wave attenuation and vibrational characteristics of the four different sands each with two different relative densities (medium-dense and dense) under air-blast loading. A stress enhancement of about 1.01 - 2.76 times the peak over-pressure is observed at the top one-third layer of all the sand specimens. The amplitude of the peak particle acceleration is also observed to attenuate with the depth of all the sand specimens. In addition, the damages incurred in reinforced concrete (RC) walls subjected to combined loading of blast and fragment as a result of cased charge detonation is also studied using the finite element (FE) analysis method.

An increase in fragment penetration (5.4% - 23.1%), perforation, and excessive scabbing is noted under combined loading of blast and fragment, compared to fragment loading alone, considering different concrete strengths and thicknesses, which highlighted its severity. Based on the above study, the response of a semi-buried concrete box structure with a blast door (with and without protective sand layer) is studied under the two simultaneous cased charge explosions using the FE analysis software LS DYNA. A comparative study of semi-buried box structure is performed by varying the blast-scaled distances and point of fragment impact considering three cased explosive charges of 6, 9, and 12 kg TNT, each with a casing weight of 36 kg.

Keywords: Vertical shock tube, stress wave, peak particle acceleration, combined blast and fragment loading, semi-buried structure, diaphragm, driver gas, fragment penetration, scabbing.

सार

वर्तमान परिदृश्य में, आकस्मिक या जानबूझकर विस्फोटों में वृद्धि के कारण, विस्फोट और प्रभाव–प्रतिरोधी संरचनाओं के निर्माण की आवश्यकता है। अर्ध–दफन बॉक्स संरचनाएं राष्ट्रीय और सामरिक महत्व की महत्वपूर्ण सैन्य सुरक्षात्मक संरचनाएं हैं और इन्हें हथियार विस्फोटों से अत्यधिक लोडिंग खतरों का सामना करना पड़ता है, जो आमतौर पर संयुक्त विस्फोट और प्रभाव (टुकड़ा) लोडिंग के रूप में होता है। इन संरचनाओं की स्थिरता ब्लास्ट लोडिंग के तहत मिट्टी के व्यवहार से भी काफी प्रभावित होती है, इसलिए ब्लास्ट–प्रेरित जमीन के झटके और मिट्टी मीडिया में इसके प्रसार के अध्ययन की विस्तृत जांच की आवश्यकता है।

प्रारंभ में, ऊर्ध्वाधर शॉक ट्यूब (वीएसटी) के प्रदर्शन का मूल्यांकन दो अलग–अलग डायाफ्राम प्रकारों पर विचार करके उत्पन्न ब्लास्ट तरंगों को चिह्नित करके किया गया है; एल्यूमिनियम और लेक्सन, और दो चालक गैसें; नाइट्रोजन और हीलियम. वीएसटी में उत्पन्न विस्फोट तरंगों के गुण डायाफ्राम प्रकार (सामग्री और मोटाई), और ड्राइवर गैस से काफी प्रभावित होते हैं। वर्तमान वीएसटी नाइट्रोजन और हीलियम को ड्राइवर गैस के रूप में उपयोग करने पर क्रमशः 0.59 - 2.04 एमपीए और 0.68-5.60 एमपीए तक के चरम परावर्तित दबाव के साथ विस्फोट तरंगों का अनुकरण कर सकता है। इसके अलावा, संख्यात्मक सिमुलेशन भी किया गया है, और परिणामों को प्रयोगात्मक परिणामों के साथ मान्य किया गया है। इसके बाद वीएसटी का उपयोग एयर-ब्लास्ट लोडिंग के तहत दो अलग-अलग सापेक्ष घनत्व (मध्यम–घने और घने) के साथ चार अलग–अलग रेत की तनाव तरंग क्षीणन और कंपन विशेषताओं की जांच करने के लिए किया गया है। रेत के सभी नमूनों की शीर्ष एक-तिहाई परत पर अधिकतम दबाव में लगभग 1.01 - 2.76 गुना की तनाव वृद्धि देखी गई है। रेत के सभी नमूनों की गहराई के साथ शिखर कण त्वरण का आयाम भी क्षीण होता देखा गया है। इसके अलावा, केस चार्ज विस्फोट के परिणामस्वरूप विस्फोट और टुकड़े की संयुक्त लोडिंग के अधीन प्रबलित कंक्रीट (आरसी) दीवार में हुई क्षति का भी परिमित तत्व (एफई) विश्लेषण विधि का

उपयोग करके अध्ययन किया गया है। अकेले टुकड़े को लोड करने की तुलना में विस्फोट और टुकड़े के संयुक्त लोडिंग के तहत अलग–अलग कंक्रीट की ताकत और मोटाई पर विचार करते हुए, टुकड़े के प्रवेश में वृद्धि (5.4% - 23.1%), वेध, और अत्यधिक स्कैबिंग को नोट किया गया है, , जिसने इसकी गंभीरता को उजागर किया है। उपरोक्त अध्ययन के आधार पर, ब्लास्ट डोर के साथ अर्ध–दबे हुए कंक्रीट बॉक्स संरचना (सुरक्षात्मक रेत परत के साथ और बिना) की प्रतिक्रिया का एक साथ दो आवरण वाले चार्ज विस्फोटों के तहत एफई विश्लेषण सॉफ्टवेयर एलएस डायना (LS DYNA) का उपयोग करके अध्ययन किया जाता है। अर्ध–दबे हुए बॉक्स संरचना का तुलनात्मक अध्ययन विस्फोट–स्केल की दूरी और टुकड़े के प्रभाव के बिंदु को अलग–अलग करके किया गया है, जिसमें 6, 9 और 12 किलोग्राम टीएनटी के तीन आवरण वाले विस्फोटक चार्ज हैं, जिनमें से प्रत्येक का आवरण वजन 36 किलोग्राम है।

कीवर्ड: ऊर्ध्वाधर शॉक ट्यूब, तनाव तरंग, चरम कण त्वरण, संयुक्त विस्फोट और टुकड़ा लोडिंग, अर्ध–दफन संरचना, डायाफ्राम, चालक गैस, टुकड़ा प्रवेश, स्कैबिंग।

Table of Contents

List of figures

List of tables