LIFE-CYCLE RISK ASSESSMENT OF RC STRUCTURES UNDER EARTHQUAKE AND FIRE

by

Akshay Satishkumar Baheti

(M. Tech., B. Tech.)

Submitted

in fulfilment of the requirements for the joint degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

&

THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND

JUNE 2024

ABSTRACT

Life-cycle assessment of civil engineering infrastructure is necessary for better management of resources during maintenance, strengthening, and repair actions for sustainable development. Current design practices typically consider the structural risk of various loads and their combination at the design stage and do not account for the change in the risk over the service life of a structure. A structure is subjected to multiple hazards over its lifespan, which have a certain permanent effect, though negligible sometimes, which may severely affect its performance to future significant hazard and result in disproportionate structural damages. Therefore, the present doctoral study discusses a holistic risk-based design framework that considers ageing effects in addition to major or minor structural damages on account of independent hazards. The framework is illustrated for independent action of earthquake and fire hazards on reinforced concrete (RC) structures while considering continuous structural deterioration on account of chloride- and carbonation-induced corrosion over the service life.

The earthquake-resistant design is well-developed and applies an objective-based design philosophy through design standards around the world. On the other hand, the response of structures to fire is predominantly articulated in terms of the time of exposure to a nominal fire, such as ISO 834 standard fire. This is despite the fact that this time of exposure is poorly correlated to structural response to fire. The present study discusses a framework for obtaining the most appropriate intensity measure (IM) correlated to the structural response to fire, which in turn is described in terms of an engineering demand parameter (EDP). Such a correlation between IM and EDP leads to reduced uncertainty of structural response to fire. The approach is based on the estimation of certain attributes of the correlation between IM and EDP, including: efficiency, practicality, proficiency, sufficiency, and scaling robustness. The methodology is subsequently demonstrated in application to obtain the most appropriate IM for RC slab, beam, and column elements individually. The appropriateness of a candidate IM is validated through several models that are generated for each member type by varying material and geometric properties, as well as by considering a range of fire models. A single IM is recommended for each structural member at the end of the analysis, independent of any fire model.

Many design regulations around the globe rely on member deflection as a governing criterion for resistance assessment in fire. The deflection evaluation in fire is generally achieved by conducting expensive experiments or computationally expensive finite element analyses, which often restricts practising engineers from using robust performance-based

design philosophy for typical structures in fire. Instead, they rely on objective design guidelines, often resulting in inefficient sizes of RC members. Therefore, semi-empirical relations are derived in the current study to determine the maximum deflection of the RC beam and column in fire. Plausible variables that could affect the overall deflection of the member are first identified, and their proportionality is subsequently determined by performing one-on-one regression analysis. Furthermore, these relations are developed in terms of the most suitable fire IM, which makes them applicable irrespective of the type of fire framework. The credibility of the deflection equations is validated through visual analysis followed by the three popular error indicator parameters – Pearson's correlation coefficient, relative root mean squared error, and performance index. Results indicate that all deflection equations accurately predict the RC member behaviour under fire.

A methodology is devised to obtain building fragility curves for fire using the most suitable IM and regression equations from the current study. The methodology is subsequently used to assess the life-cycle risk in RC structures for independent multi-hazard action of earthquake and fire while considering appropriate structural degradation over the service life. The change in the structure's performance in fire over its service life is also evaluated for the multi-hazard effects of earthquake and fire. The results from this study indicate that there is a significant increase in the risk of post-earthquake fire if minor damage due to earthquake not addressed. Similarly, it is shown that an RC member's performance in fire decreases significantly over its service life due to environmental effects.

ABSTRACT IN HINDI (सार)

शाश्वत विकास के लिए रखरखाव, सुदृढ़ीकरण, और मरम्मत कार्यों के दौरान संसाधनों के बेहतर प्रबंधन के लिए आधारभूत संरचना का जीवन-चक्र मूल्यांकन आवश्यक है। वर्तमान रचना प्रथाएँ आम तौर पर प्रथम चरण में विभिन्न भारों और उनके सम्मिश्रण के संरचनात्मक जोखिम पर विचार करती हैं और किसी संरचना के सेवा जीवन पर जोखिम में बदलाव को ध्यान में नहीं रखती हैं। एक संरचना को अपने जीवनकाल में कई खतरों का सामना करना पड़ता है, जिनका एक निश्चित स्थायी प्रभाव, जो कभी-कभी नगण्य होता है, भविष्य में विशाल खतरों के लिए गंभीर रूप से प्रभावित कर सकता है और परिणामस्वरूप असंगत संरचनात्मक क्षति हो सकती है। इसलिए, वर्तमान अध्ययन एक समग्र जोखिम-आधारित रचना ढांचे पर चर्चा करता है जो स्वतंत्र खतरों के कारण बड़े या छोटे संरचनात्मक नुकसान के अलावा रचनाओंके उम्र बढ़ने के प्रभावों पर भी विचार करता है। सेवा जीवन के दौरान क्लोराइड- और कार्बोनेशन-प्रेरित जंग के कारण निरंतर संरचनात्मक गिरावट पर विचार करते हुए प्रबलित कंक्रीट संरचनाओं पर भूकंप और आग के खतरों की स्वतंत्र कार्रवाई के लिए ढांचे का उपयोग किया गया है।

भूकंप-रोधी उद्देश्य-आधारित रचना अच्छी तरह से विकसित है और दुनिया भर के डिज़ाइन मानक इसे लागु करते है। दूसरी ओर, आग के प्रति संरचनाओंका प्रतिरोध मुख्य रूप से ISO 834 आग जैसी नाममात्र आग के समय के संदर्भ में किया जाता है। यह इस तथ्य के बावजूद है कि यह समय का आग में संरचनात्मक प्रतिक्रिया से बहुत कम संबंध है। वर्तमान अध्ययन में आग के प्रति संरचनात्मक प्रतिक्रिया से संबंधित सबसे उपयुक्त तीव्रता माप प्राप्त करने के लिए एक रूपरेखा बनाई गयी है। तीव्रता और प्रतिक्रिया के बीच इस तरह के सहसंबंध से आग के प्रति संरचनात्मक प्रतिक्रिया की अनिश्चितता कम हो जाती है। यह सहसंबंध कुछ विशेषताओं के अनुमान पर आधारित है, जिसमें शामिल हैं: निपुणता, व्यावहारिकता, प्रवीणता, पर्याप्तता और भार के उतारचढ़ाव के प्रति विभिन्नता। प्रबलित कंक्रीट से बने मंजिल, तंडी, और खम्बे के लिए सबसे उपयुक्त तीव्रता माप प्राप्त करने के लिए इस रूपरेखा का उपयोग किया गया है। एक उम्मीदवार तीव्रता माप की उपयुक्तता को कई सामग्री और ज्यामितीय उदाहरणों के माध्यम से मान्यता दी गई है। यह सहसंबंध विभिन्न अग्नि प्रारूप पर विचार करके उत्पन्न होते हैं। विश्लेषण के अंत में प्रत्येक संरचनात्मक सदस्य के लिए किसी भी अग्नि प्रारूप से स्वतंत्र, एकल तीव्रता माप की सिफारिश की गयी है।

दुनिया भर में कई रचना नियम आग में प्रतिरोध मूल्यांकन के लिए एक शासी मानदंड के रूप में सदस्य झुकाव पर निर्भर करते हैं। आग में झुकाव आकलन में महंगे प्रयोगों या जटिल तकनीको की आवश्यकताए अक्सर सामान्य अभियंता को आग में उद्देश्य-आधारित रचना का उपयोग करने से

प्रतिबंधित करती है। अतः वे वस्तुनिष्ठ रचना दिशानिर्देशों पर भरोसा करते हैं, जिसके परिणामस्वरूप अक्सर प्रबलित कंक्रीट संरचना अनुपयुक्त रहती है। इसलिए, आग में प्रबलित कंक्रीट तंडी और खम्बे के अधिकतम झुकाव को निर्धारित करने के लिए वर्तमान अध्ययन में विशिष्ट समीकरण प्रस्थापित किए गए हैं। सदस्य के झुकाव को प्रभावित करने वाले चीजों को पहले पहचाना गया है, और उनकी आनुपातिकता बाद में एक-पर-एक प्रतिगमन विश्लेषण करके निर्धारित की गयी है। इसके अलावा, इन संबंधों को सबसे उपयुक्त अग्नि तीव्रता माप के संदर्भ में विकसित किया गया है, जो उन्हें अग्नि ढांचे के प्रकार की परवाह किए बिना लागू करता है। झुकाव समीकरणों की विश्वसनीयता को तीन लोकप्रिय त्रुटि संकेतक मापदंडों - पियर्सन के सहसंबंध, गुणांक सापेक्ष त्रुटि, और प्रदर्शन सूचकांक के बाद दृश्य विश्लेषण के माध्यम से मान्य किया गया है। परिणाम दर्शाते हैं कि सभी समीकरण आग के तहत प्रबलित कंक्रीट सदस्य के झुकाव की सटीक भविष्यवाणी करते हैं।

वर्तमान अध्ययन से सबसे उपयुक्त तीव्रता माप और झुकाव समीकरणों का उपयोग करके आग के लिए नाजुकता वक्र प्राप्त करने के लिए एक पद्धति तैयार की गई है। इस पद्धति का उपयोग बाद में सेवा जीवन पर उचित संरचनात्मक गिरावट पर विचार करते हुए भूकंप और आग की स्वतंत्र संयुक्त-खतरे की कार्रवाई के लिए प्रबलित कंक्रीट संरचनाओं में जीवन-चक्र जोखिम का आकलन करने के लिए किया गया है। भूकंप और आग के संयुक्त-प्रभावों के लिए इसकी सेवा अवधि के दौरान आग में संरचना के प्रदर्शन में परिवर्तन का भी मूल्यांकन किया जाता है। इस अध्ययन के नतीजों से संकेत मिलता है कि अगर भूकंप के कारण होने वाली मामूली क्षति पर ध्यान नहीं दिया गया तो भूकंप के बाद आग में भारी नुकसान होने का खतरा काफी बढ़ जाता है। इसी तरह, यह दिखाया गया है कि प्रबलित कंक्रीट सदस्य के सेवा जीवन में पर्यावरणीय प्रभावों कारण आग का प्रतिरोध करने की क्षमता काफी कम हो जाती है।