



भारतीय वैज्ञानिक एवं औद्योगिक अनुसंधान पत्रिका
वर्ष 29 अंक (2) दिसम्बर 2021 पृ. 85-97



शीयर बिल्डिंग के गतिशील प्रतिक्रिया मूल्यांकन के लिए डायनेमिक हाइब्रिड सिमुलेशन का कार्यान्वयन

मोहित वर्मा एवं सी. भारती प्रिया
उन्नत भूकंपीय परीक्षण और अनुसंधान प्रयोगशाला
सीएसआईआर-स्ट्रक्चरल इंजीनियरिंग रिसर्च सेंटर, सीएसआईआर कैंपस, तारामणि 600 113 (चेन्नई)

सारांश : डायनेमिक हाइब्रिड सिमुलेशन (DHS) एक परीक्षण विधि है, जिसे पिछले कुछ दशकों में एक संरचना की गतिशील प्रतिक्रिया खोजने के लिए विकसित किया गया है। इसमें संरचना को दो भागों में विभाजित करना शामिल है: भौतिक अवसंरचना जिसमें रुचि का प्रमुख क्षेत्र होता है, जिसे प्रयोगशाला में परीक्षण किया जाता है, और वर्चुअल उपसंरचना जिसमें संरचना का शेष भाग संख्यात्मक मॉडल के रूप में होता है। यह शोधपत्र शीयर बिल्डिंग के प्रतिक्रिया मूल्यांकन के लिए (DHS) के कार्यान्वयन को प्रस्तुत करता है। प्रयोगशाला में अकेले नीचे की मंजिल का भौतिक परीक्षण किया गया था। शेष संरचना के प्रभाव का अनुकरण करने के लिए इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर का उपयोग किया गया था। DHS संरचनाओं के गतिशील प्रतिक्रिया मूल्यांकन के लिए एक प्रभावी उपकरण पाया गया है।

Implementation of dynamic hybrid simulation for response evaluation of shear building

Mohit Verma & C Bharathi Priya
Advanced Seismic Testing and Research Laboratory (ASTaR)
CSIR-Structural Engineering Research Centre, CSIR Campus, Taramani 600 113 (Chennai)

Abstract

Dynamic hybrid simulation is a testing method, which is developed in the past few decades, to find the dynamic response of a structure. It involves splitting of the structure into two parts: physical substructure that contains the key region of interest, which is tested in a laboratory, and virtual substructure that contains the remaining part of the structure in the form of a numerical model. This paper presents the implementation of DHS for response evaluation of a shear building. The bottom storey alone was tested physically in the laboratory. Electromagnetic shaker was used to emulate the effect of the remaining structure. DHS is found to be an effective tool for dynamic response evaluation of structures.

प्रस्तावना

भूकम्प एक प्राकृतिक आपदा है जिसके कारण भूमि में कम्पन्न होता है। जब भूकंप आता है, तो संरचना का आधार जमीन के साथ चलने के लिए मजबूर होता है। संरचना के शेष भाग को विराम अवस्था (इसकी जड़ता के कारण) में रहने की प्रवृत्ति है। यह अंतर आंदोलन भूकंप के दौरान संरचना पर अतिरिक्त गतिशील भार को प्रेरित करता है। संरचना का आधार भूकंप (बेसशीयरफोर्स के रूप में जाना जाता है) के लिए अधिकतम बल के अधीन है और क्षति के लिए सबसे कमजोर

स्थान होता है। बड़े आधार अपरूपण बल से पूरी संरचना की विनाशकारी क्षति हो सकती है। भूकंप प्रतिरोधी संरचनाओं की डिजाइन में इन अतिरिक्त भूकंप बलों पर विचार करने की आवश्यकता होती है। अत्यधिक पार्श्वभार के तहत संरचनाओं की प्रतिक्रिया को समझने के लिए प्रयोग एक आवश्यक उपकरण के रूप में कार्य करते हैं। कंक्रीट संरचनाओं के जटिल अरेखीय व्यवहार के कारण, भूकंप के दौरान उनकी प्रतिक्रिया की भविष्यवाणी करना मुश्किल हो जाता है। एक चरम घटना के दौरान प्रतिक्रिया की भविष्यवाणी के लिए कई कम्प्यूटेशनल

मॉडल विकसित किए गए हैं। इनमें से अधिकांश उपकरणों में किसी प्रकार का सन्निकटन या आदर्शिकरण शामिल है। यह जानना दिलचस्प है कि इन उपकरणों का सत्यापन प्रयोगात्मक परिणामों पर आधारित है। सौंदर्य की दृष्टि से आकर्षक संरचनाओं के निर्माण के साथ, मॉडलिंग का कार्य चुनौती पूर्ण हो जाता है। जब एक नई सामग्री, जिसका व्यवहार अच्छी तरह से समझ में नहीं आता है, निर्माण के लिए उपयोग किया जाता है, तो कम्प्यूटेशनल मॉडल को फिर से मान्य करने की आवश्यकता होती है। यह एक प्रयोग करने के अलावा कोई अन्य विकल्प नहीं छोड़ता है।

निम्नलिखित कारणों से प्रयोगों की आवश्यकता है।¹¹

अत्यधिक लोडिंग के तहत कंक्रीट संरचना का अत्यधिक अप्रत्याशित व्यवहार। सौंदर्य की दृष्टि से आकर्षक जटिल संरचनाओं का निर्माण सटीक मॉडलिंग को एक चुनौती पूर्ण कार्य बनाता है।

यहां तक कि कम्प्यूटेशनल मॉडल को प्रयोगात्मक परिणामों के साथ सत्यापित करने की आवश्यकता है। जब एक निश्चित घटना को अच्छी तरह से नहीं समझा जाता है और मॉडलिंग संभव नहीं है, तो प्रयोग गतिशील प्रतिक्रिया का सटीक मूल्यांकन करने का एक तरीका प्रदान करते हैं।

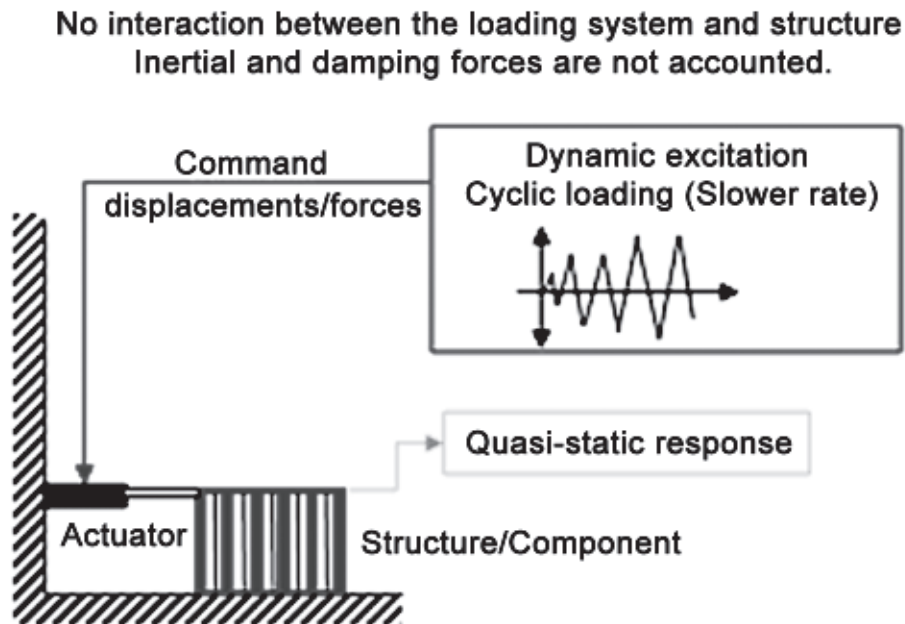
कई कोडल सिफारिशों और संशोधन प्रयोगात्मक परिणामों पर आधारित हैं।

पारंपरिक गतिशील परीक्षण विधियाँ

दो प्रकार की गतिशील परीक्षण विधियाँ हैं। खुला और बंद लूप। खुला लूप डायनेमिक टेस्टिंग विधियाँ वे हैं जिनमें किसी संरचना पर लगाया जाने वाला विस्थापन/बल मापा संरचनात्मक प्रतिक्रिया पर निर्भर नहीं करता है। दूसरे शब्दों में, कोई प्रतिक्रिया तंत्र नहीं है। दूसरी ओर बंद लूप गतिशील परीक्षण विधियों में, संरचना पर लागू होने वाला विस्थापन/बल संरचनात्मक प्रतिक्रिया पर निर्भर करता है। यह खंड पारंपरिक खुले और बंद लूप गतिशील परीक्षण विधियों का अवलोकन प्रदान करता है। इन परीक्षण विधियों की व्यापक समीक्षा¹² में पाई जा सकती है।

अर्ध-स्थैतिक परीक्षण (Quasi-static testing, QST)

अर्ध-स्थैतिक परीक्षण (QST) एक खुला लूप परीक्षण विधि है जिसमें हाइड्रोलिक एक्ट्यूएटर्स के माध्यम से धीमी दर पर परीक्षण करने के लिए संरचनात्मक घटक पर एक पूर्व निर्धारित विस्थापन या बल लागू किया जाता है जैसे कि उत्पन्न जड़त्वीय बल नगण्य होते हैं। फ्रैक्चर के लिए योजनाबद्ध चित्र-1 में दिखाए गए हैं। चूंकि विस्थापन/बल धीमी दर (दूसरे शब्दों में, एक विस्तारित समय पैमाने पर) पर लागू होता है। इस प्रकार की परीक्षण पद्धति का उपयोग आमतौर पर एक घटक के संरचनात्मक व्यवहार का अध्ययन करने के लिए किया जाता है जिसमें पतन और हिस्टेरिटिकया चक्रीय व्यवहार¹² का पदानुक्रम शामिल है।



चित्र 1 – QST की योजनाएँ

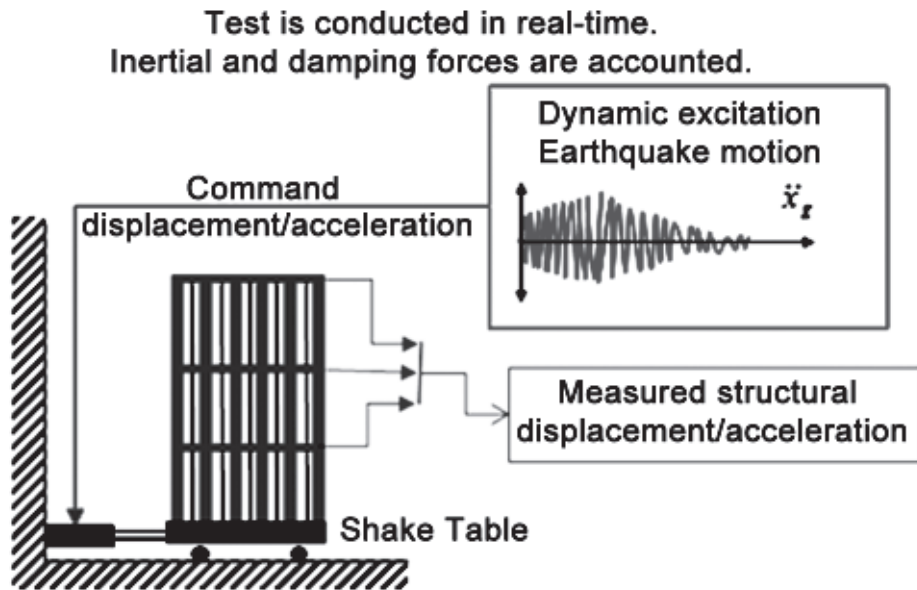
शेक टेबल परीक्षण (Shake table testing, STT)

शेक टेबल परीक्षण (STT) में, संरचना की गतिशील प्रतिक्रिया की जांच एक शेक टेबल[3] के माध्यम से लागू किए गए आधार एक्सेलरेशन टाइम हिस्ट्री के अधीन करके की जाती है। STT भी एक खुला लूप परीक्षण मेथड है, जिसको चित्र 2 में दिखाया गया है। STT वास्तविक समय में परीक्षण के रूप में जड़त्वीय प्रभावों और दर पर निर्भर व्यवहार को ध्यान में रखता है। परीक्षण की जाने वाली संरचना का आकार शेक टेबल की क्षमता के आधार पर सीमित या छोटा किया जाता है। ऐसे मामले में, स्केल किए गए मॉडल की प्रतिक्रिया वास्तव में पूर्ण पैमाने की संरचना का प्रतिनिधित्व नहीं कर सकती है। इसके अलावा, विभिन्न स्थानीय प्रभाव जैसे दरार प्रसार और स्थानीय बकलिंग को आकार-प्रभावों के लिए जाना जाता है। ये प्रभाव वास्तव में स्केल डाउन मॉडल में परिलक्षित नहीं होते हैं और इसलिए परिणामों की सटीकता को प्रभावित करते हैं। STT केवल बेस उत्तेजना के अधीन संरचनाओं पर लागू होता है। संरचनाओं पर गतिशील उत्तेजनाओं (जैसे हवा के कारण) के अन्य रूपों का अध्ययन STT के माध्यम से नहीं किया जा सकता है।

स्यूडोडायनेमिक परीक्षण (Pseudodynamic, PsD)

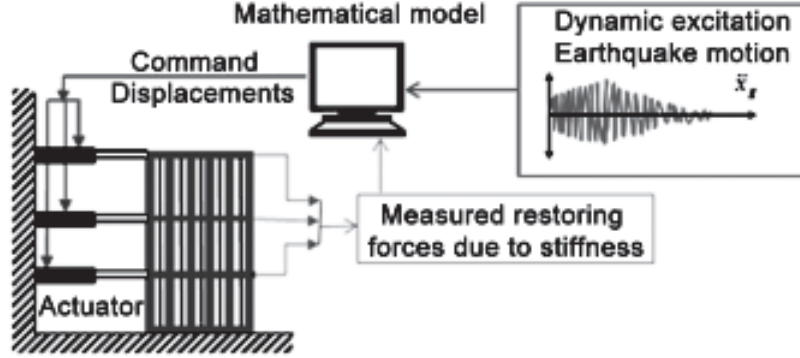
स्यूडोडायनेमिक (PsD) परीक्षण एक बंद लूप हाइब्रिड परीक्षण विधि है जो गतिशील प्रतिक्रिया^[4] प्राप्त करने के लिए एक संरचना के स्थिर परीक्षण की अनुमति देता है। PsD परीक्षण के

योजनाबद्ध चित्र 3 में दिखाए गए हैं। PsD परीक्षण एक गणितीय मॉडल का उपयोग कमांड विस्थापन की गणना करने के लिए करता है, जो तब होता है जब संरचना गतिशील उत्तेजना के अधीन होती है। संरचनात्मक कठोरता के कारण प्रत्यावर्तन बल प्रयोगात्मक रूप से प्राप्त किया जाता है जबकि जड़त्वीय और अवमंदन बलों को संख्यात्मक मॉडल में शामिल किया जाता है। परीक्षण के दौरान, गांठदार द्रव्यमान के स्थान पर संरचनात्मक विस्थापन की गणना समय एकीकरण योजनाओं का उपयोग करके संरचना के संख्यात्मक मॉडल से की जाती है। गणना किए गए विस्थापन तब हाइ ड्रोलिक एक्ट्यूएटर्स का उपयोग करके संरचना पर लगाए जाते हैं। संरचना से पुनर्स्थापना बल को लोड कोशिकाओं के साथ मापा जाता है। संरचना के संख्यात्मक मॉडल के साथ पुनर्स्थापन बलों का उपयोग अद्यतन विस्थापन को निर्धारित करने के लिए किया जाता है जिसे गतिशील योजना के परिणामस्वरूप संरचना पर लगाया जाना चाहिए। ये विस्थापन एक विस्तारित समय के पैमाने पर लगाए जाते हैं। PsD परीक्षण केवल उन संरचनाओं पर लागू होता है जिनके लिए गांठदार द्रव्यमान धारणा मान्य है (जैसे कतरनी भवन, पानी की टंकी)। इसके अलावा, जड़त्वीय प्रभाव और दर पर निर्भर व्यवहार पर कब्जा नहीं किया जाता है क्योंकि परीक्षण एक विस्तारित समय के पैमाने पर किया जाता है। संरचना के संख्यात्मक मॉडल के साथ पुनर्स्थापना बलों का उपयोग अद्यतन विस्थापन को निर्धारित करने के लिए किया जाता है जिसे गतिशील उत्तेजना के



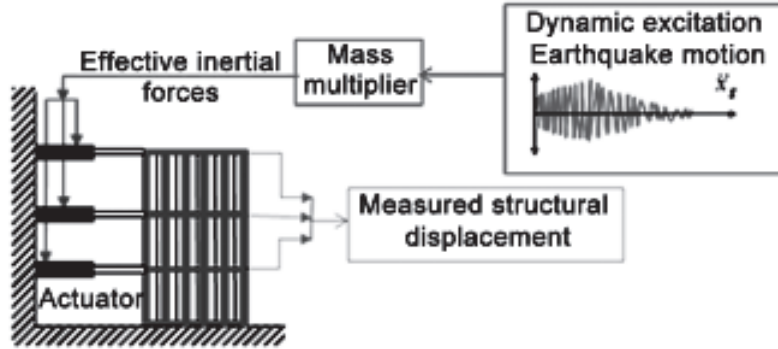
चित्र 2 – शेक टेबल परीक्षण की योजनाएँ

Test is conducted on extended time-scale.
Inertial and damping forces are simulated numerically.



चित्र 3 – स्यूडोडायनेमिक परीक्षण की योजनाएँ

Effective forces are evaluated numerically.



चित्र 4 – प्रभावी बल परीक्षण की योजनाएँ

परिणामस्वरूप संरचना पर लगाया जाना चाहिए। ये विस्थापन एक विस्तारित समय के पैमाने पर लगाए जाते हैं। PsD परीक्षण केवल उन संरचनाओं पर लागू होता है जिनके लिए गांठदार द्रव्यमान धारणा मान्य है (जैसे कतरनी भवन, पानी की टंकी)। इसके अलावा, जड़त्विय प्रभाव और दर पर निर्भर व्यवहार का पता नहीं किया जा सकता क्योंकि परीक्षण एक विस्तारित समय के पैमाने पर किया जाता है।

प्रभावी बल परीक्षण (Effective force testing, EFT)

प्रभावी बल परीक्षण (EFT), PsD के विपरीत विस्थापन नियंत्रण एल्गोरिद्म के बजाय बल नियंत्रण पर आधारित है। EFT में गतिशील बल, द्रव्यमान समय के जमीनी त्वरण के बराबर, हाइड्रोलिक एक्ट्यूएटर्स^[5] की मदद से लागू होते हैं। ईएफटी के योजनाबद्ध चित्र 4 में दिखाए गए हैं। ईएफटी एक खुलालूप परीक्षण है जिसमें एक संरचना पर लागू होने वाले बलों

को पीएसडी परीक्षण के विपरीत एक विशेष भूकंप उत्तेजना के लिए एक प्राथमिकता के रूप में जाना जाता है जिसमें लागू किए जाने वाले विस्थापन माप प्रतिक्रिया पर निर्भर करते हैं। EFT का अनुप्रयोग भी संरचनाओं तक सीमित है, जिसे ढेलेदार द्रव्यमान की एक श्रृंखला के रूप में आदर्श बनाया जा सकता है।

वर्तमान परीक्षण विधियों की सीमाएं

पिछले खंड में वर्णित प्रत्येक पारंपरिक परीक्षण विधियों में कुछ कमियां हैं जो इसके आवेदन को सीमित करती हैं। QST में, लोडिंग को इस तरह से लागू किया जाता है कि जड़त्विय बल के कारण प्रतिरोधन गण्य हो। इस प्रकार, जड़त्विय और दर पर निर्भर प्रभावों का पता नहीं किया जाता है। STT एक संरचना के स्केल डाउन मॉडल पर किया जाता है। प्रतिरोध तंत्र की जांच करना या छोटे पैमाने पर संरचनात्मक नियंत्रण उपकरणों के प्रभाव को प्रदर्शित करना मुश्किल है। स्थानीय विफलता के

कारण एक संरचना विफल हो सकती है जिसे कोई स्केल डाउन मॉडल में नहीं देख सकता है। संरचना का आकार जिसे STT का उपयोग करके परीक्षण किया जा सकता है, शेक टेबल के आयाम और क्षमता द्वारा सीमित है। STT का उपयोग केवल उन संरचनाओं के लिए किया जा सकता है जो बेस उत्तेजना के अधीन हैं। PsD परीक्षण भी एक विस्तारित समय के पैमाने पर किया जाता है, जिसके कारण यह विधि जड़त्वीय और दर पर निर्भर प्रभावों को पकड़ने में सक्षम नहीं है। EFT वास्तविक समय में आयोजित किया जाता है लेकिन यह संरचना के बल नियंत्रण में कठिनाइयों का सामना करता है। PsD और EFT का अनुप्रयोग उन संरचनाओं तक सीमित है जिन्हें गांठदार द्रव्यमान की श्रृंखला के रूप में आदर्श बनाया जा सकता है।

डायनेमिक हाइब्रिड सिमुलेशन (Dynamic hybrid simulation, DHS)

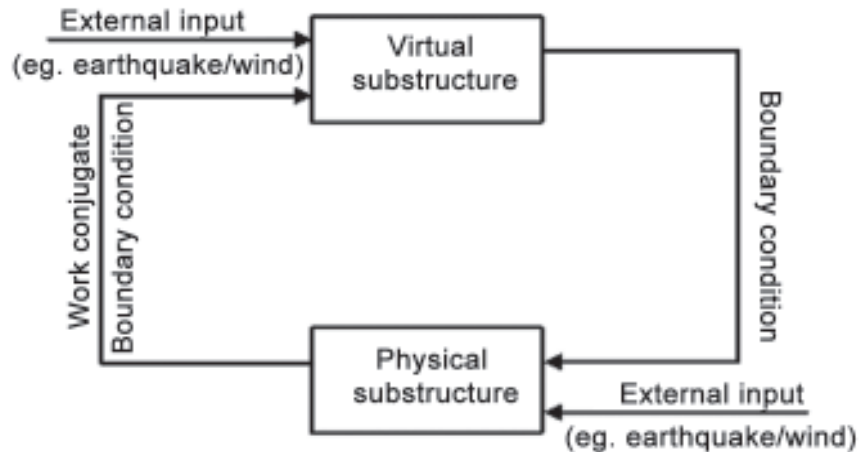
डायनेमिक हाइब्रिड सिमुलेशन (DHS) वह तरीका है जो पारंपरिक परीक्षण विधियों की कमियों को दूर करता है। DHS में दो भागों में परीक्षण की जाने वाली संरचना को विभाजित करना शामिल है: भौतिक उप संरचना (संरचना का वह हिस्सा जो संभावित रूप से गंभीर क्षति का सामना कर सकता है या उच्च गैर-रैखिकता प्रदर्शित कर सकता है) जिसे बेहतर ढंग से समझने की आवश्यकता है और वर्चुअल उप संरचना जिसमें शामिल है संरचना का शेष भाग। इसमें वास्तविक प्रयोगशाला परीक्षण और संख्यात्मक अनुकरण दोनों शामिल हैं। दो उप संरचना के बीच संगतता और संतुलन की स्थिति DHS एल्गोरिद्म द्वारा सुनिश्चित की जाती है। DHS में पूर्ण संरचना को अक्सर एमुलेटेड सिस्टम के रूप में जाना जाता है।

महत्वपूर्ण संरचनात्मक घटकों का प्रयोगशाला वातावरण में भौतिक रूप से परीक्षण किया जा सकता है, जबकि शेष को संख्यात्मक रूप से तैयार किया जाता है।

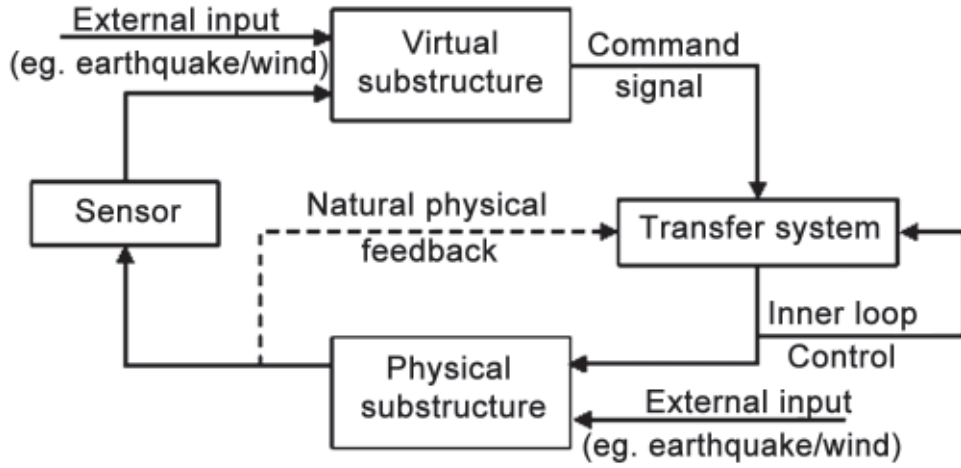
वेग-निर्भर घटनाएं जैसे भौतिक गुणों को प्रयोगात्मक माध्यमों द्वारा किया जा सकता है क्योंकि परीक्षण वास्तविक समय में किया जाता है।

DHS का सिद्धांत

DHS संरचनात्मक विभाजन के सिद्धांत पर आधारित है। इस तकनीक में, परीक्षण की जाने वाली संरचना को दो भागों में विभाजित किया जाता है। (क) भौतिक उपसंरचना (Physical substructure, PS) जिसमें संरचना का वह हिस्सा शामिल होता है जिसका भौतिक रूप से परीक्षण किया जाता है और (ख) वर्चुअल उप संरचना (Virtual substructure, VS) जिसमें शेष भाग शामिल होता है संरचना जो संख्यात्मक रूप से मॉडलिंग की जाती है। दो उप संरचना के बीच फीडबैक इंटरैक्शन को चित्र- 5 में दिखाया गया है। दो उपसंरचना के बीच इंटर फेस बाउंड्रीकंडीशन को भौतिक उप संरचना पर लगाया जाता है और संबंधित कार्य संयुग्म को मापा जाता है। मापा कार्य संयुग्म को फिर वर्चुअल उपसंरचना में वापस भेजा जाता है। विस्थापन आधारित DHS के मामले में लगाई गई सीमा की स्थिति विस्थापन है और मापा कार्य संयुग्म बल है जहां बल आधारित DHS के मामले में यह इसके विपरीत है। वास्तव में, दो उप-संरचनाओं के बीच इंटरफेस पर सीमा की स्थिति आंतरिक है और इसलिए स्वाभाविक रूप से लागू होती है। हालांकि, DHS के मामले में इसे ट्रांसफर सिस्टम (Transfer system), TS (एक्ट्यूएटर्स/शेकटेबल) और सेंसर (विस्थापन



चित्र 5 – एक सब स्ट्रक्चर्ड सिस्टम में फीडबैक इंटरैक्शन



चित्र 6 – DHS में विभिन्न घटकों के बीच बातचीत

तालिका 1 – पारंपरिक तरीकों के साथ DHS की तुलना

तरीका	रियलटाइम	उप-संरचना	गतिशील प्रभाव	लोड हो रहा है	
				गति देने वाला	शेकटेबल
QST	नहीं	हां	एक्ट्यूएटर पूर्व निर्धारित विस्थापन लगाता है। कोई जड़त्वीय प्रभाव नहीं।	जिला/बल	..
PsD	नहीं	हां	वर्चुअल उपसंरचना के साथ इंटरफेस इंटरैक्शन हित गतिशील प्रतिक्रिया गति के समीकरणों से सिमुलेटेड है और एक्ट्यूएटर द्वारा लागू की जाती है।	जिला/बल	..
STT	हां	नहीं	स्ट्रक्चरल असंबली में यथार्थवादी जड़त्वीय और दर निर्भर प्रभाव प्राप्त होते हैं।	..	त्वरण
EFT	हां	हां	प्रभावी बल सीधे संरचनात्मक मॉडल के गांठ वाले द्रव्यमान पर लागू होता है।	बल	..
DHS	हां	हां	भौतिक संरचना में यथार्थवादी जड़त्वीय बल प्राप्त किया जाता है और उप-संरचनाओं के बीच इंटरफेस बल एक एक्ट्यूएटर के साथ लागू किया जाता है।	बल	त्वरण

ट्रांसड्यूसर/एक्सेलेरोमीटर) की मदद से कार्यान्वित किया जाता है जैसा कि चित्र-6 में दिखाया गया है। DHS के लिए परीक्षण प्रणाली जिसमें भौतिक उप संरचना, वर्चुअल उपसंरचना, ट्रांसफर सिस्टम और सेंसर को हाइब्रिड सिस्टम कहा जाता है। DHS में प्रयुक्त स्थानांतरण प्रणाली को अक्सर एक ट्रेकिंग नियंत्रक के साथ शामिल किया जाता है। यह DHS का आंतरिक लूपनियंत्रण बनाता है। DHS प्रयोग के दौरान, प्राकृतिक भौतिक प्रतिक्रिया के रूप में स्थानांतरण प्रणाली और भौतिक उपसंरचना के बीच एक अपरिहार्य अंतः क्रिया मौजूद है (चित्र-6 में एक बिंदीदार रेखा द्वारा दिखाया गया है)।

ढांचा

DHS के लिए एक विशिष्ट दृष्टिकोण वर्चुअल उप संरचना से शुरू होता है। इंटर फेस सीमा की स्थिति, जिसे भौतिक उप

संरचना पर लागू करने की आवश्यकता होती है, की गणना वर्चुअल उपसंरचना को बाहरी इनपुट के अधीन करके की जाती है। TS डायनैमिक्स के हस्तक्षेप के कारण भौतिक उपसंरचना वर्चुअल उपसंरचना से गणना किए गए विस्थापन को सीधे महसूस नहीं कर सकता है। इसलिए, ट्रांसफर सिस्टम को भेजे जाने से पहले इस सिग्नल को संशोधित करने की आवश्यकता है। नियंत्रक यह संशोधन करता है। नियंत्रक भूकंप इनपुट और भौतिक उप-संरचना की वर्तमान स्थिति के साथ-साथ वर्चुअल उपसंरचना से वांछित सीमा की स्थिति लेता है। इस जानकारी का उपयोग नियंत्रक द्वारा संशोधित कमांड सिग्नल पर पहुंचने के लिए किया जाता है जिसे ट्रांसफर सिस्टम को भेजा जाना चाहिए ताकि हाइब्रिड सिस्टम में पेश किए गए अतिरिक्त गतिशीलता की भरपाई हो सके। भौतिक अवसंरचना पर वांछित सीमा की स्थिति के आवेदन के बाद, संबंधित कार्य संयुग्म को मापा जाता है और

आभासी उप-संरचना में वापस भेज दिया जाता है। DHS के लिए एक विशिष्ट ढांचा चित्र- 7 में दिखाया गया है। विशिष्ट दृष्टिकोण में नियंत्रण उद्देश्य भौतिक उपसंरचना पर वांछित और महसूस की गई सीमा स्थितियों के बीच अंतर को कम करना है। इसका तात्पर्य यह है कि विस्थापन सीमा की स्थिति के मामले में स्थानांतरण प्रणाली को यांत्रिक रूप से कठोर (उच्च प्रतिबाधा) और बल सीमा की स्थिति के मामले में यांत्रिक रूप से अनुपालन (कम प्रतिबाधा) की आवश्यकता होती है।

DHS में चुनौतियां

विशिष्ट दृष्टिकोण के आधार पर DHS का उपयोग करने में कुछ प्रमुख चुनौतियां नीचे सूचीबद्ध हैं:

- DHS में प्रायोगिक त्रुटियां अपरिहार्य हैं। यह प्रणाली में नकली ऊर्जा का परिचय देता है^[6], जो एक संरचना में उच्च मोड प्रतिक्रिया को उत्तेजित कर सकता है।
- PS की अनुनाद आवृत्तियों को आवरण करने वाली आवृत्तियों की एक विस्तृत श्रृंखला पर ट्रेकिंग की जानी है। PS की अनुनाद आवृत्तियों के पास ट्रेकिंग बहुत संवेदनशील होती है जो अक्सर सिस्टम की अस्थिरता की ओर ले जाती है^[7]।
- नियंत्रक को गलत ट्रेकिंग के प्रभावों को कम करने और हाइब्रिड सिस्टम में TS और ट्रांसड्यूसर की अतिरिक्त गतिशीलता के कारण समय की देरी के लिए क्षतिपूर्ति करने की आवश्यकता है।
- नियंत्रक डिजाइन को PS के साथ जोड़ा जाता है क्योंकि इसे PS के यांत्रिक गुणों के लिए प्रारंभिक अनुमान की

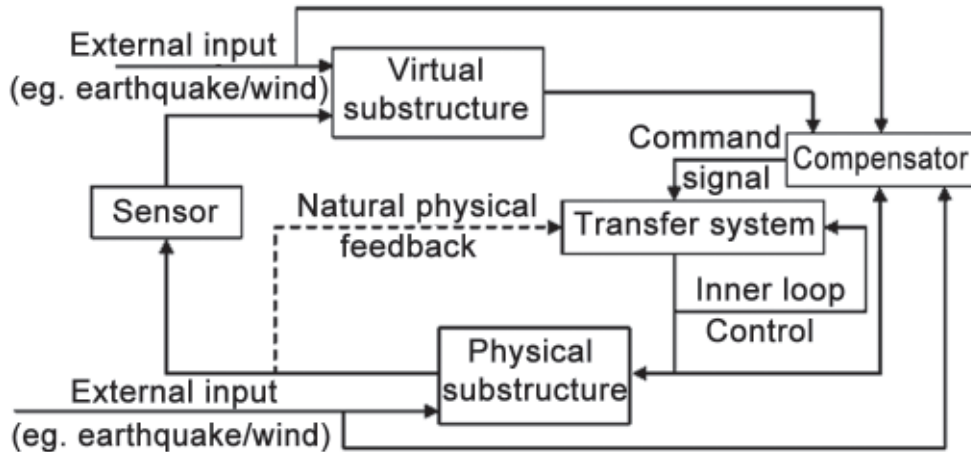
आवश्यकता होती है। साथ ही, गिरावट के कारण प्रयोग के दौरान ये गुण बदल सकते हैं।

- PS से एक अपरिहार्य प्राकृतिक प्रतिक्रिया है। यह अतिरिक्त प्रतिक्रिया अवांछनीय है और इसे पर्याप्त रूप से मुआवजा देने की आवश्यकता है।

DHS का विकास

हाइब्रिड सिमुलेशन का वैचारिक विचार हाकुनो^[8] द्वारा प्रस्तावित किया गया था। एनालॉग कम्प्यूटर और PsD पर आधारित एक इलेक्ट्रोमैग्नेटिक एक्ट्यूएटर का उपयोग करके सिंगल डिग्री ऑफ फ्रीडम (SDOF) संरचना की प्रतिक्रिया का अनुकरण करने का प्रयास किया गया था। उस समय उपलब्ध हार्डवेयर की सीमाओं के कारण नियंत्रण और सटीकता के मामले में यह एक आदर्श परीक्षण नहीं निकला।

पहला सफल PsD परीक्षण ताकानाशी^[9] द्वारा आयोजित किया गया था जिसमें कठोरता के कारण प्रतिक्रिया बलों को प्रयोगात्मक रूप से मापा गया था जबकि जड़त्वीय और अवमंदन घटकों को संख्यात्मक रूप से शामिल किया गया था। गति के गतिशील समीकरणों को डिजिटल कंप्यूटर का उपयोग करके हल किया गया था। इस परीक्षण ने भूकंप लोडिंग के दौरान कठोरता और ताकत में गिरावट को सटीक रूप से पकड़ने के लिए परीक्षण विधियों के विकास का मार्ग प्रशस्त किया। PsD परीक्षण एक विस्तारित समय पैमाने पर किया जाता है। पारंपरिक PsD परीक्षणों में, विस्थापन को रैंप-होल्ड प्रक्रिया का उपयोग करके संरचना पर लागू किया जाता है। दो क्रमिक समय चरणों के बीच



चित्र 7 – एक विशिष्ट DHS ढांचा

की अवधि संरचना पर भार में छूट का कारण बनती है। PsD परीक्षण के परिणामों की सटीकता और स्थिरता को प्रभावित करने के लिए संरचनात्मक आदर्शीकरण, भिगोना और भार छूट का संख्यात्मक प्रतिनिधित्व पाया जाता है।

अगला तार्किक कदम संरचना पर विस्थापन को सुचारू रूप से लागू करना था। ताकानाशी और ओही^[10] ने निरंतर PsD की अवधारणा की शुरुआत की जिसमें परीक्षण कम होल्ड अवधि के साथ पारंपरिक PsD की तुलना में बहुत तेज दर पर किया गया था। परीक्षण सीमित सफलता के साथ मिला क्योंकि एक्चुएटर पिछले चरण की तरह उसी दिशा में आगे बढ़ता रहा जब तक कि नया कमांड सिग्नल प्राप्त नहीं हुआ। इस तकनीक को आगे मैग्नेट^[11] द्वारा विकसित किया गया था, जिन्होंने प्रत्येक पारंपरिक PsD चरण को उप-चरणों की संख्या में विभाजित किया था। इसके परिणामस्वरूप होल्ड टाइम में कमी आई जिससे एक्चुएटर की निरंतर गति सुनिश्चित हुई।

EFT पद्धति का नेतृत्व डिमिंग^[12] ने किया था। इस पद्धति में, संरचना पर प्रभावी जड़त्वीय बल लागू होते हैं। एक्चुएटर्स PsD के विपरीत बल नियंत्रण मोड में संचालित होते हैं। एक्चुएटर-कंट्रोल-स्ट्रक्चर इंटरैक्शन के कारण इस पद्धति का प्रत्यक्ष अनुप्रयोग अप्रभावी पाया गया। प्राकृतिक वेग प्रतिक्रिया और सर्वोच्च गतिशीलता के परिणामस्वरूप संरचना की प्राकृतिक आवृत्तियों के पास प्रभावी बल लागू करने के लिए एक्चुएटर की अक्षमता होती है। डिमिंग^[12] ने एक्चुएटर-कंट्रोल-स्ट्रक्चर इंटरैक्शन के प्रभाव को नकारने के लिए अतिरिक्त वेग फीड बैकलूप को शामिल किया। इस पद्धति को बाद में शील्ड^[13] द्वारा लागू किया गया था। उन्होंने डिमिंग द्वारा प्रस्तावित नियंत्रण-एक्चुएटर-स्ट्रक्चर इंटरैक्शन मॉडल में सुधार किया। श्री-स्टेज सर्वोच्च मॉडल का उपयोग करके झाओ^[14] आवृत्तियों की एक विस्तृत श्रृंखला के लिए सर्वोच्च गतिशीलता का प्रतिनिधित्व करने के लिए एक टुकड़ा वार रैखिक वक्र का उपयोग करके नियंत्रण-एक्चुएटर-संरचना इंटरैक्शन के लिए एक गैर-रेखीयमॉडल विकसित किया। उन्होंने अपने मॉडल के आधार पर EFT के लिए एक गैर-रेखीय वेग प्रतिक्रिया मुआवजा पद्धति का भी प्रस्ताव रखा। हाइड्रोलिक एक्चुएटर्स के प्रभावी बल नियंत्रण के लिए एक नया दृष्टिकोण शिव सेलवन^[15] द्वारा प्रस्तुत किया गया था जिसमें अतिरिक्त अनुपालन और विस्थापन मुआवजे का उपयोग किया गया था।

सब स्ट्रक्चरिंग अवधारणा सबसे पहले डर्मिट्जा किस और माहिन^[16] द्वारा पेश की गई थी। उन्होंने सब स्ट्रक्चर्ड PsD परीक्षण लागू किया जिसमें संरचना का एक हिस्सा, जिसे भौतिक

उपसंरचना कहा जाता है, अकेले परीक्षण किया गया था। इसके तुरंत बाद, उपसंरचित PsD परीक्षण ने लोकप्रियता हासिल की और बाद में कई शोधकर्ताओं^[17-19] द्वारा इसे लागू किया गया। हाइब्रिडसिम्युलेशन और सबस्ट्रक्चरिंग के विचार से रीयल-टाइम सबस्ट्रक्चर्ड PsD टेस्टिंग का विकास हुआ। नकाशिमा^[20] भौतिक अवसंरचना के दर-निर्भर व्यवहार को शामिल करने में सक्षम प्रणाली विकसित करने वाले पहले व्यक्ति थे। डिजिटल सर्वोत्तम का उपयोग करके सटीक विस्थापन और वेग नियंत्रण सुनिश्चित किया गया था। एक्चुएटर गति के दौरान तंत्र ने लगातार 2 एमएस के समय अंतराल के साथ डिजिटल फीडबैक नियंत्रण किया। यह सुनिश्चित करने के लिए कि परीक्षण वास्तविक समय में चलता है, अगली बार चरण के लिए कमांड सिग्नल की गणना समवर्ती रूप से की गई थी। विभिन्न शोधकर्ताओं ने रीयल-टाइम सबस्ट्रक्चर्ड PsD^[21-24] के लिए परीक्षण प्रणाली के विकास की दिशा में काम किया।

कुछ मामलों में (उदाहरण के लिए वितरित द्रव्यमान प्रणाली जैसे मिट्टी-संरचना बातचीत), भौतिक संरचना के जड़त्वीय प्रभावों का संख्यात्मक मॉडल में नहीं माना जा सकता है। इस से DHS का विकास हुआ जो भौतिक उपसंरचना के यथार्थवादी जड़त्वीय प्रभावों को शामिल करने की अनुमति देता है। स्थानांतरण प्रणाली के रूप में शेक टेबल का उपयोग करके DHS को संभव बनाया गया था। इमुरा^[25] और इगारशी^[26] DHS प्रयोग करने वाले पहले कुछ शोधकर्ताओं में से थे। उन्होंने सक्रिय और ट्यून्ड मास डंपिंग उपकरणों के साथ शामिल इमारतों की प्रतिक्रिया का अध्ययन किया। DHS की प्रमुख चुनौती शेक टेबल डायनेमिक्स का मुआवजा है। रेनहॉर्न^[27] ने एक्चुएटर और नमूने के बीच एक लचीले तत्व को पेश करके बल नियंत्रण सबस्ट्रक्चरिंग का प्रदर्शन किया। अधिकांश अध्ययनों में, संरचना के निचले हिस्से का प्रतिनिधित्व करने के लिए शेक टेबल का उपयोग किया गया था। हाल ही में,^[28-31] ने DHS प्रयोग किया जहां संरचना के ऊपरी हिस्से को शेक टेबल का उपयोग करके दर्शाया गया था।

वितरित परीक्षण की अवधारणा को वातानाबे^[32] द्वारा प्रस्तावित किया गया था जहां क्योटो विश्वविद्यालय और ओसाकासिटी विश्वविद्यालय के बीच एक वितरित उपसंरचित PsD परीक्षण किया गया था। वितरित परीक्षण दो या दो से अधिक साइटों पर परीक्षण सुविधाओं के प्रभावी उपयोग की अनुमति देता है। इस तकनीक को बाद में मॉस्केडा^[33] द्वारा निरंतर सबस्ट्रक्चर्ड PsD वितरित करने के लिए विस्तारित किया गया। हाल ही में, किम^[34] ने अर्बाना-शैंपेन में कनेक्टिव विश्वविद्यालय और इलिनोइस विश्वविद्यालय के बीच मैग्नेटो-रियोलॉजिकल (एमआर) डैपर के

साथ एक (दो मंजिला) कतर नीफ्रेम का पहला वितरित रीयल-टाइम सबस्ट्रक्चर्ड PsD परीक्षण किया। हाइब्रिड सिमुलेशन के विभिन्न रूपों के योजनाबद्ध चित्र-8 में दिखाए गए हैं।

चित्र-8: संकर अनुकरण के विभिन्न रूप

DHS प्रयोग

यह खंड दो मंजिला संरचना की गतिशील प्रतिक्रिया प्राप्त करने के लिए DHS के आवेदन को प्रस्तुत करता है। संरचना की केवल निचली मंजिल का भौतिक रूप से परीक्षण किया जाता है जबकि शीर्ष मंजिल को इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर का उपयोग करके अनुकरण किया जाता है।

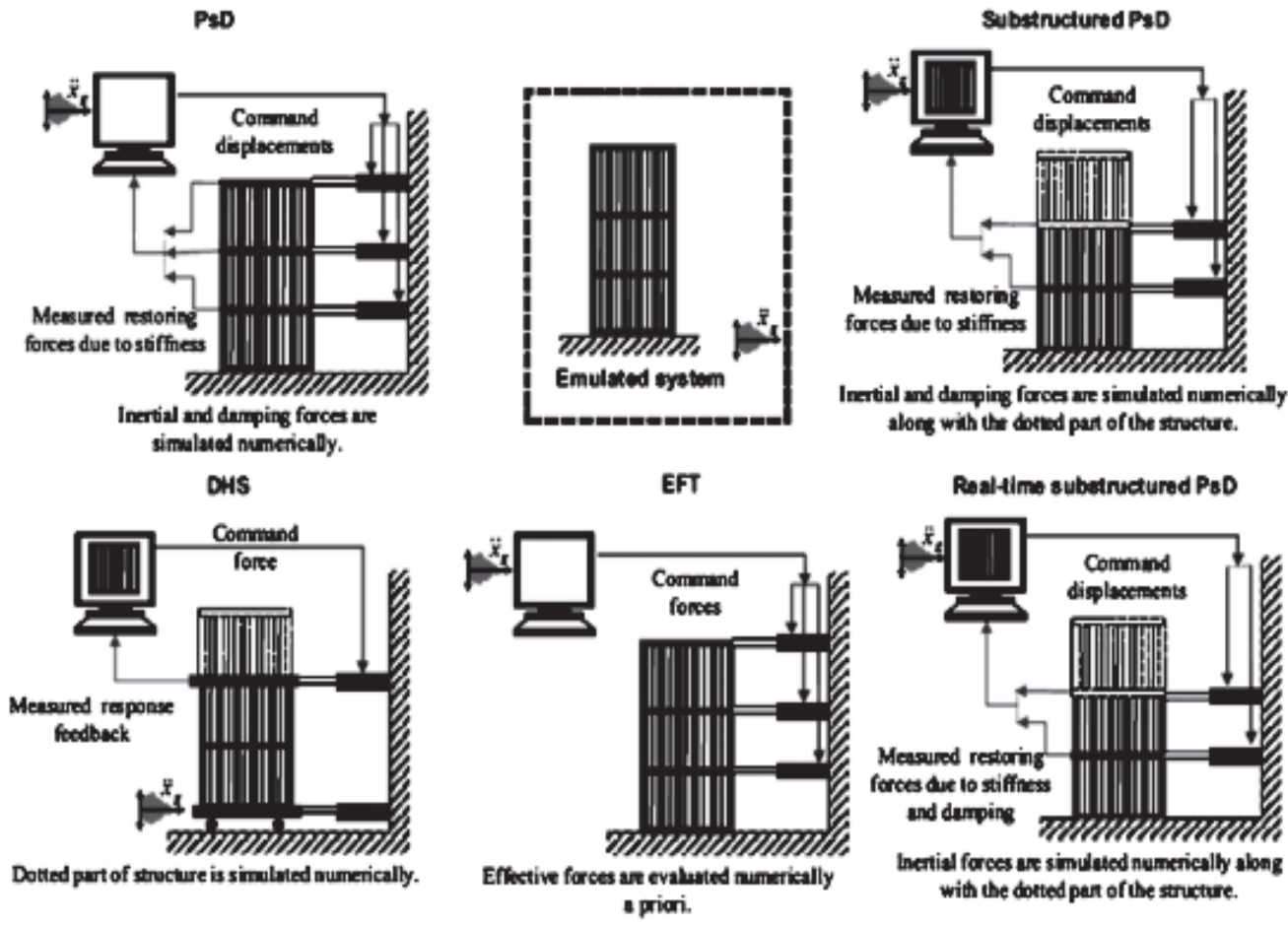
इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर का गणितीय मॉडल

इस खंड में प्रस्तुत इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर का गणितीय मॉडल लैंग [35-36] से अपनाया गया है। विद्युत चुम्बकीय शेकर के मॉडल

को समीकरणों के निम्नलिखित सेट द्वारा दिए गए राज्य अंतरिक्ष रूप में दर्शाया गया है:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_a}{m_a} & -\frac{c}{m_a} & \frac{Bl}{m_a} \\ 0 & -\frac{Bl}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad \dots(1)$$

जहां x_1, x_2 आर्मेचर असेंबली के विस्थापन और वेग को दर्शाता है; x_3 विद्युत धारा है; u इनपुट वोल्टेज है; Bl विद्युत धारा अनुपात के लिए बल है; R और L आर्मेचर कॉइल का प्रतिरोध और अधिष्ठापन हैं; m_a शेकर का गतिमान द्रव्यमान है; c डंपिंग है और k_a निलंबन बैंड की कठोरता है। नियंत्रक डिजाइन के लिए उपयोग किए जाने वाले शेकर के पैरामीटर तालिका-2 में दिए गए हैं।



चित्र 8 – संकर अनुकरण के विभिन्न रूप

हाइब्रिड सिस्टम का गणितीय मॉडल

अनुकरणीय प्रणाली जिसकी प्रतिक्रिया हम हाइब्रिड सिमुलेशन का उपयोग करके मूल्यांकन करना चाहते हैं, में दो मंजिला संरचना होती है। एमुलेटेड सिस्टम के गुण तालिका-3 में दिए गए हैं। हाइब्रिड सिस्टम में नीचे की मंजिल के ऊपर स्थित शेकर होता है (चित्र-9)।

हाइब्रिड सिस्टम का स्टेट-स्पेस मॉडल किसके द्वारा दिया गया है:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 \\ x_2 &= -\frac{k_1}{m_1} x_1 - \frac{c_1}{m_1} x_2 + \frac{k_a}{m_1} x_3 + \frac{c_a}{m_1} x_4 - \frac{Bl}{m_1} x_5 - w \\ x_2 &= x_2 \\ x_4 &= \frac{k_1}{m_1} x_1 + \frac{c_1}{m_1} x_2 - \frac{k_a}{m_{eff}} x_3 - \frac{c_a}{m_{eff}} x_4 + \frac{Bl}{m_{eff}} x_5 \quad X \\ x_5 &= -\frac{Bl}{L} x_4 - \frac{R}{L} x_5 + \frac{u}{L} \end{aligned}$$

कहाँ x_1, x_2 जमीन के सापेक्ष पहली मंजिल का विस्थापन और वेग हैं, x_3, x_4 पहली मंजिल के सापेक्ष आर्मेचर का विस्थापन और

वेग है, x_5 आर्मेचर कॉइल में करंट है, m, k, c संबंधित द्रव्यमान, कठोरता और डंपिंग है, Bl, R, L विद्युत धारा अनुपात के लिए बल हैं, प्रतिरोध और आर्मेचर का अधिष्ठापन और $m_{eff} = m_1 m_a / (m_1 + m_a)$.

नियंत्रण कानून

इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर में दो इनपुट होते हैं। PS एक्सेलरेशन और कंट्रोल इनपुट। शेकर को उतनी ही मात्रा में बल स्थानान्तरित करने की आवश्यकता है जितनी वीएसएमुलेटेड सिस्टम [29-31,37] में स्थानांतरित करेगा। नियंत्रक मूल्यांकन के लिए ब्लॉक आरेख चित्र-2 में दिखाया गया है। नियंत्रक का मूल्यांकन निम्नलिखित समीकरण का उपयोग करके किया जाता है:

$$H_{uw} = \frac{H_{vs} - H_{fw}}{H_{fu}} \quad \dots (3)$$

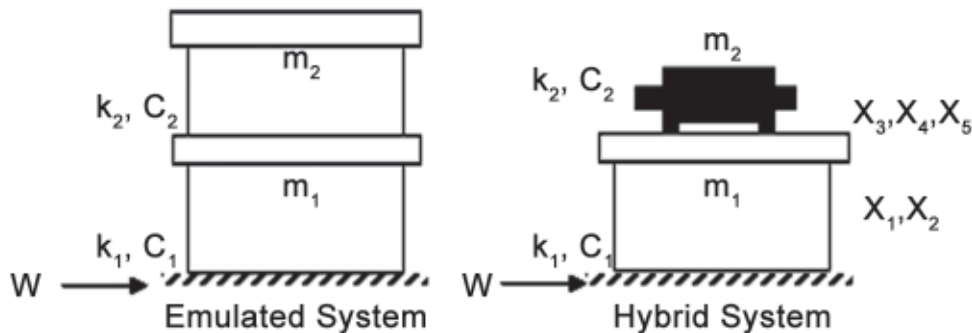
H_{uw} नियंत्रक है, H_{vs} नीचे मंजिला त्वरण से वीएस द्वारा एमुलेटेड सिस्टम में स्थानांतरित करने के लिए स्थानांतरण कार्य है, H_{fw} हाइब्रिड सिस्टम में विद्युत चुम्बकीय शेकर द्वारा स्थानांतरित बल के लिए नीचे मंजिला त्वरण से स्थानांतरण कार्य है और H_{fu} नियंत्रण इनपुट से बल में स्थानांतरण कार्य है जो हाइब्रिड सिस्टम में इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर द्वारा ट्रांसफर किया जाता है।

तालिका - 2 विद्युत चुम्बकीय शेकर के पैरामीटर्स

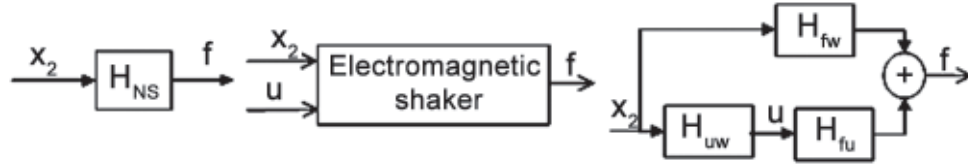
पैरामीटर	मूल्य
विद्युत धारा अनुपात के लिए बल (Bl), N/A	19.62
शेकर का द्रव्यमान (m_a), kg	17.90
वोल्टेज मोड में डंपिंग (c), Ns/m	25
रबर बैंड की कठोरता (k_a), N/m	175
कुंडल अधिष्ठापन (L), H	0.022
कुंडल प्रतिरोध (R), Ω	1.5
एम्प्लीफायर लाभ	-3.43

तालिका - 3 एमुलेटेड सिस्टम के गुण

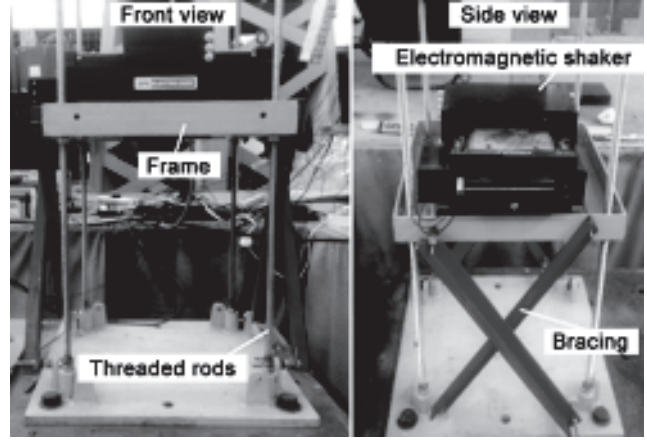
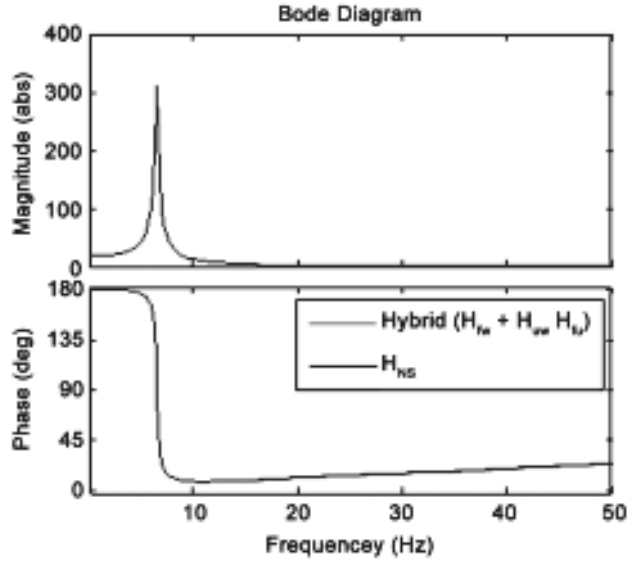
पैरामीटर	मूल्य
m_1 , kg	94
k_1 , N/m	3×10^5
c_1 , Ns/m	106
m_2 , kg	17.9
k_2 , N/m	3×10^4
c_2 , Ns/m	42



चित्र 9 - एमुलेटेड सिस्टम और संकर सिस्टम की योजना



चित्र - 10 : नियंत्रक डिजाइन रणनीति



चित्र 12 – DHS प्रयोग के लिए परीक्षण सेटअप

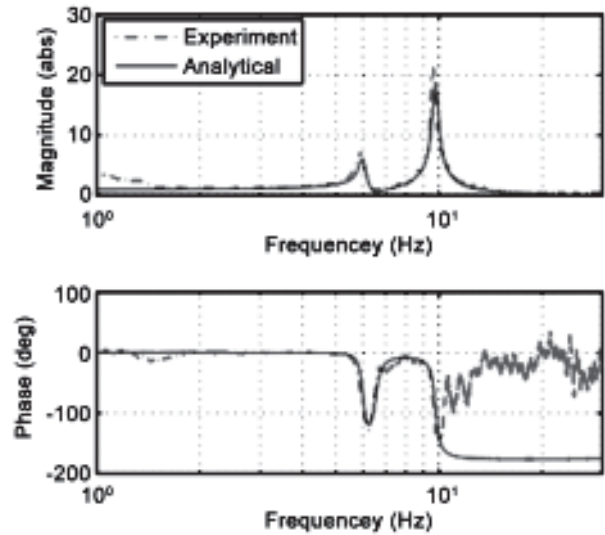
चित्र 11 – आवृत्ति डोमेन में VS और शेकर द्वारा स्थानांतरित बल की तुलना

विद्युत चुम्बकीय शेकर और टैकी आवृत्ति प्रतिक्रिया को नीचे मंजिला त्वरण से स्थानांतरित बल में तुलना की जाती है। विद्युत चुम्बकीय शेकर वीएस की गतिशीलता का अनुकरण करने में सक्षम है।

प्रायोगिक जांच

इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर को एक फ्रेम (चित्र-12) द्वारा दर्शाए गए SDOF सिस्टम के शीर्ष पर रखा गया था। आउट-ऑफ-प्लेन गति को सीमित करने के लिए, फ्रेम के दोनों किनारों पर अनुप्रस्थ दिशा में ब्रेसिज़ प्रदान किए गए थे।

हाइब्रिड सिस्टम की आवृत्ति प्रतिक्रिया इसे स्वीप साइन सॉइडल बेस उत्तेजना के अधीन करके प्राप्त की गई थी, जिसकी आवृत्ति 300 सेकंड में 1 से 30 हर्ट्ज़ तक भिन्न होती है। नीचे की मंजिल का त्वरण मापा गया। प्रयोगों से प्राप्त निचली मंजिल के त्वरण की तुलना चित्र-13 में अनुकरणीय प्रणाली से प्राप्त त्वरण से की जाती है। प्राप्त प्रतिक्रियाएं एक-दूसरे के साथ अच्छे समझौते में पाई जाती हैं।



चित्र 13 – एमुलेटेड और हाइब्रिड सिस्टम में निचली मंजिल के त्वरण की तुलना

सारांश

इस शोधपत्र में इलेक्ट्रोमैकेनिकल शेकर का उपयोग करके गतिशील हाइब्रिड सिमुलेशन का अवलोकन प्रस्तुत किया गया है। DHS के विकास, मूल सिद्धांत और विशिष्ट ढांचे का भी वर्णन

किया गया था। दो मंजिला संरचना की गतिशील प्रतिक्रिया का मूल्यांकन करने के लिए DHS के आवेदन को प्रदर्शित करने के लिए एक उदाहरण लिया गया था। नीचे की मंजिल को भौतिक उपसंरचना (PS) के रूप में लिया गया जबकि ऊपर की मंजिल को वर्चुअल उपसंरचना (VS) के रूप में लिया गया। हाइब्रिड सिस्टम में ऊपरी मंजिल को इलेक्ट्रोमैग्नेटिक शेकर से बदल दिया गया था। DHS के लिए नियंत्रक को प्रतिबद्ध मिलान दृष्टिकोण का उपयोग करके डिजाइन किया गया था। प्रायोगिक जांच डिजाइन किए गए नियंत्रक के साथ की गई थी। हाइब्रिड सिस्टम की आवृत्ति प्रतिक्रिया इसे स्वीप साइन सॉडडलबेस उत्तेजना के अधीन करके प्राप्त की गई थी। यह देखा गया कि DHS से प्राप्त परिणाम अनुकरणीय प्रणाली से प्राप्त विश्लेषणात्मक प्रतिक्रिया के साथ अच्छे समझौते में थे।

आभार

लेखक प्रयोगों को अंजाम देने में ASTaR प्रयोगशाला के कर्मचारियों द्वारा प्रदान किए गए समर्थन का आभार व्यक्त करते हैं।

संदर्भ

1. Carrion J E, Model-based strategies for real-time hybrid testing PhD thesis University of Illinois at Urbana-Champaign (2007).
2. Reinhorn A, Sivaselvan M, Weinreber S & Shao X, Real-time dynamic hybrid testing of structural systems. In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada (2004).
3. Nagarajaiah S, Reinhorn A M, & Constantinou M C Experimental study of sliding isolated structures with uplift restraint, *Journal of Structural Engineering*, 118(6) (1992) 1666-1682.
4. Takanashi K, Udagawa K, Seki M, Okada T, & Tanaka H, Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, 8 (1975) 1-17.
5. Dimig J, Shield C, French C, Bailey F, & Clarkn A, Effective force testing: a method of seismic simulation for structural testing, *Journal of Structural Engineering*, 125(9), (1992) 1028-1037.
6. Mosqueda G, Stojadinovic B, & Mahin S A, Real-time error monitoring for hybrid simulation. Part I: methodology and experimental verification, *Journal of Structural Engineering*, 133(8), (2007) 1100-1108.
7. Dyke S J, Acceleration feedback control strategies for active and semi-active control systems: modeling, algorithm development, and experimental verification. PhD thesis Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame (1996).
8. Hakuno M, Shidawara M, & Hara T Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by an analog-computer, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1969.
9. Takanashi K, Udagawa K, Seki M, Okada T & Tanaka H, Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, 8 (1975) 1-17.
10. Takanashi K & Ohi K, Earthquake response analysis of steel structures by rapid computer-actuator on-line system,(1) a progress report, trial system and dynamic response of steel beams. *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, 16(1983) 103-109.
11. Magonette G, Development and application of large-scale continuous pseudo-dynamic testing techniques, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1786), (2001) 1771-1799.
12. Dimig J, Shield C, French C, Bailey F, & Clark A, Effective force testing: a method of seismic simulation for structural testing, *Journal of Structural Engineering*, 125(9) (1999) 1028-1037.
13. Shield C K, French C. W, & Timm, J, Development and implementation of the effective force testing method for seismic simulation of large-scale structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1786), (2001) 1911-1929.
14. Zhao J, Shield C, French C, & Posbergh T, Nonlinear system modeling and velocity feedback compensation for effective force testing, *Journal of Engineering Mechanics*, 131(3), (2005) 244-253.
15. Sivaselvan M V, Reinhorn A M, Shao X, & Weinreber S, Dynamic force control with hydraulic actuators using added compliance and displacement

- compensation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **37**(15) (2008) 1785-1800.
16. Dermitzakis S N & Mahin S A, Development of substructuring techniques for on-line computer controlled seismic performance testing, UCB/EERC-85/04, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California (1985).
 17. Nakashima M, Integration techniques for substructure pseudodynamic test. In 4th US National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California (1990).
 18. Vannan M T, The pseudodynamic test method with substructuring applications PhD thesis University of Colorado, Boulder (1991).
 19. Pegon P & Pinto A, Pseudo-dynamic testing with substructuring at the ELSA Laboratory, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **29**(7) (2000) 905-925.
 20. Nakashima M, Kato H, & Takaoka E, Development of real-time pseudo dynamic testing, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **21**(1), (1992) 79-92.
 21. Darby A, Blakeborough A, & Williams M, Real-time substructure tests using hydraulic actuator, *Journal of Engineering Mechanics*, **125**(10), (1999) 1133-1139.
 22. Horiuchi T, Inoue M, Konno T, & Namita Y, Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **28**(10), (1999) 1121-1141.
 23. Blakeborough A, Williams M, Darby A & Williams D, The development of real-time substructure testing. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, **359**(1786), (2001) 1869-1891.
 24. Shing P B, Wei Z, Jung R Y & Stauffer E, NEES fast hybrid test system at the University of Colorado, In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada Vol. 3497 (2004).
 25. Iemura H, Igarashi A & Takahashi Y, Substructured hybrid techniques for actuator loading and shaking table tests, In Proceedings of the First International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, 821-826 (1999).
 26. Igarashi A, Iemura H & Suwa T, Development of substructured shaking table test method, In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand (2008).
 27. Reinhorn A, Sivaselvan M, Weinreber S & Shao X, Real-time dynamic hybrid testing of structural systems. In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada (2004).
 28. Nakata N & Stehman M, Substructure shake table test method using a controlled mass: formulation and numerical simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**(14) (2012) 1977-1988.
 29. Stefanaki A, A simple strategy for dynamic substructuring and its application to soil-foundation-structure interaction. PhD thesis University at Buffalo, Buffalo, NY (2016).
 30. Stefanaki A, Sivaselvan MV, Tessari A, & Whittaker A, Soil-Foundation-Structure interaction investigations using hybrid simulation. In Transactions of Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT)-23, Manchester, United Kingdom (2015).
 31. Verma M, Sivaselvan M V, & Rajasankar J, Impedance matching for dynamic substructuring, *Structural Control and Health Monitoring*, **26**(11), (2019) e2402.
 32. Watanabe E, Kitada T, Kunitomo S & Nagata K, Parallel pseudodynamic seismic loading test on elevated bridge system through the Internet. In The Eight East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Singapore (2001).
 33. Mosqueda G, Stojadinovic B & Mahin S, Geographically distributed continuous hybrid simulation, In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (2004).
 34. Kim S J, Christenson R, Phillips B & Spencer Jr, B, Geographically distributed real-time hybrid simulation of MR dampers for seismic hazard mitigation. In 20th Analysis and Computation Specialty Conference, Vancouver, Canada (2012) 382-393.
 35. Lang G F, Electrodynamics shaker fundamentals, *Sound and vibration*, **31**(4), (1997) 14-23.
 36. Lang G F & Snyder D, Understanding the physics of electrodynamic shaker performance. *Sound and Vibration*, **35**(10), (2001) 24-33.
 37. Verma M & Sivaselvan M V, Impedance matching control design for the benchmark problem in real-time hybrid simulation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 134 (2019) 106343.