

แผนผังความต้องการกำลังเพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว โดยหลักการความเสียหายคงที่และวิธีการสเปกตรัมของความสามารถ

Strenght Demand Diagram for Seismic Design based on
Constant-Damage Concept and Capacity Spectrum Technique

ไพบูลย์ ปัญญากระบือ*

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นผลงานวิจัยจากการพัฒนาวิธีการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวแบบใหม่ โดยใช้แผนผังความต้องการกำลังที่ประยุกต์หลักการให้โครงสร้างมีค่าระดับความเสียหายคงที่ร่วมกับวิธีการสเปกตรัมของความสามารถ แผนผังความต้องการกำลังนี้ได้มาจากการคำนวณโดยวิธีผลตอบสนองไม่เชิงเส้นจากข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 134 คลื่น ซึ่งบันทึกบนสภาพธรณีวิทยา 3 ประเภท คือ ก) สภาพชั้นหิน ข) สภาพชั้นดินตะกอน และ ค) สภาพชั้นดินอ่อน โดยใช้พฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างแบบวิภูจักร 5 แบบ เพื่อใช้เป็นตัวแทนของโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แผนผังนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการกำลังและการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง โดยมีแนวทางใหม่จากเดิมคือ เป็นความต้องการกำลังที่แสดงค่าระดับความเสียหายเป้าหมายอยู่ด้วย และสามารถแสดงอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของโครงสร้างและสัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐานของอาคารเมื่อโครงสร้างเป็นระบบอิลาสติก รวมทั้งค่าตัวประกอบของการลดกำลังจากระบบอิลาสติกเป็นระบบอิลาสติกสำหรับค่าระดับความเสียหายที่กำหนด ค่าความเหนียวของโครงสร้างและค่าคาบการสั่นธรรมชาติของโครงสร้าง จากแผนผังความต้องการกำลังนี้ ได้มีการตรวจสอบการประยุกต์ใช้งานในการออกแบบโครงสร้างอาคารโดยวิธีการออกแบบและการหาค่า จากการตรวจสอบให้ความมั่นใจได้ว่าแผนผังความต้องการกำลังนี้ให้ค่าระดับความเสียหายที่สม่ำเสมอตลอดช่วงค่าคาบการสั่นธรรมชาติ และให้ค่าระดับความเสียหายใกล้เคียงกันกับค่าดัชนีความเสียหายเป้าหมายที่กำหนดไว้

Abstract

This paper presents the research result of a new development of earthquake resistant design. The strength demand diagrams are developed based on the constant-damage concept and capacity spectrum technique. These strength demand diagrams are computed by nonlinear response analysis for SDOF systems subjected to 134 earthquake records for three site conditions, i.e., a) rock sites, b) alluvium deposits, and c) soft soil sites. Five hysteretic behaviors of structures are employed to

* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

represent
ship bet
These ar
ment and
target se
demand
confirm t
period ra
damage.

1. บทนำ

ใน
สามารถด
มีพื้นฐาน
ความเห็น
ต้องการก
Ductility
โดยที่ CD
ของระบบ
(SDOF) ที่
เคลื่อนที่ขอ
การเคลื่อน
เป็นค่าอัตรา
เป็นการเชิ
ระบบโครง

ถึงแ
กว้างขวางใ
และวิศวกร
แสดงความ
เชื่อถือได้สำ
ทั้งนี้เนื่องจา

represent structural steel systems and reinforced concrete structures. The diagrams show the relationship between strength demands and displacements of structures for a set of target seismic damage. These are presented in terms of mathematical models, which are the relationships between displacement and four important parameters, i.e., elastic base shear coefficient, strength reduction factor for target seismic damage, target ductility ratio, and natural period of vibration. From this strength demand diagram, its applicability is investigated by design-and-evaluation process. The results confirm that the diagram provides a uniform level of seismic damage throughout the whole natural period range. In addition, the computed levels of seismic damage are close to the target seismic damage.

1. บทนำ

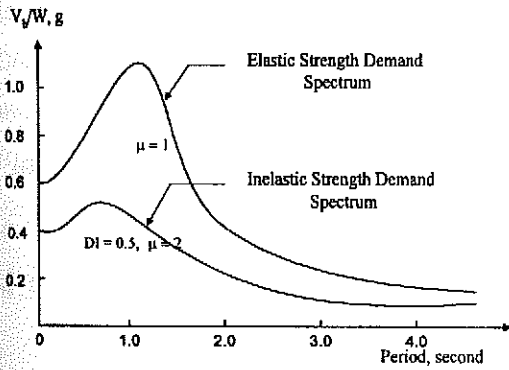
ในปัจจุบันนี้ วิธีการออกแบบอาคารเพื่อให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีพื้นฐานโดยใช้หลักการออกแบบให้โครงสร้างมีความเหนียวคงที่ ซึ่งแสดงในรูปของกราฟความต้องการกำลังสำหรับค่าความเหนียวคงที่ (Constant-Ductility Strength Demand Spectra, CDDSDS) โดยที่ CDDSDS เป็นการเขียนกราฟของค่ากำลังครากของระบบโครงสร้าง Single-Degree-Of-Freedom (SDOF) ที่ต้องการสำหรับโครงสร้างเพื่อจำกัดค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้างสูงสุดที่ $\mu\delta_y$, เมื่อ δ_y เป็นค่าการเคลื่อนที่ ณ จุดครากของระบบโครงสร้าง และค่า μ เป็นค่าอัตราส่วนความเหนียวเป้าหมาย ค่ากำลังครากนี้เป็นการเขียนกราฟกับคาบการสั่นตามธรรมชาติของระบบโครงสร้าง

ถึงแม้ว่า CDDSDS จะเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในระหว่างผู้พัฒนา Seismic Design Codes และวิศวกรผู้ออกแบบ ในการศึกษาในระยะหลังมีการแสดงความเห็นว่า "ความเหนียวคงที่" อาจจะมีใช้เกณฑ์ที่เชื่อถือได้สำหรับการพิจารณาหาความต้องการกำลัง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเหนียวนั้นไม่สัมพันธ์กับความเสียหาย

สะสมอันเป็นผลมาจากผลตอบสนองของโครงสร้างในช่วง inelastic cycles ในลักษณะกลับไปมา ดังนั้นโครงสร้างที่ออกแบบบนพื้นฐานของ CDDSDS อาจจะไม่มีความปลอดภัยเพียงพอต่อการพังทลาย

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลการวิจัยของ Wamitchai และ Panyakapo (1999); Panyakapo (2001, 2004) ค้นพบว่า แนวทางการออกแบบเดิมไม่สามารถใช้ได้กับกรณีของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน เพราะค่าความเสียหายอันเกิดจากความเสียหายที่สะสมจากโครงสร้างถูกแรงกระทำกลับไปมา มีค่าสูงมากและได้เสนอวิธีการออกแบบแนวทางใหม่โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของความต้องการกำลังสำหรับค่าความเสียหายคงที่ (Constant-Damage Strength Demand Spectra, CDASDS) ความคิดพื้นฐานของการออกแบบนี้เป็นการเปลี่ยนจาก "ความเหนียวคงที่" เป็นความคิดของการออกแบบใหม่คือ "ความเสียหายคงที่" นั่นคือการออกแบบจะต้องมุ่งที่จะจำกัดค่าความเสียหายทั้งหมดของโครงสร้างเพื่อให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งระดับความเสียหายนี้จะกำหนดให้มีค่าเป้าหมายค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าคงที่ตลอดทุกๆ โครงสร้างอาคาร

เนื่องจาก
บนชั้นดิน
การพัฒนา
ความเสียหาย
ของความ
แบบใหม่
ค่าความ
แบบที่ว่าจะ



รูปที่ 2 Strength Demand Diagram

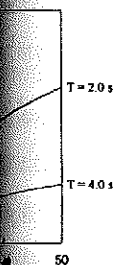
3. ขั้นตอนการดำเนินการ

ในการวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการทำงานเป็นดังนี้

ก. รวบรวมคลื่นแผ่นดินไหวที่เป็นตัวแทนจากเหตุการณ์ต่างๆ กันทั่วโลก โดยเก็บรวบรวมจากแหล่งข้อมูล National Geophysical Data Center (NGDC) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Dunbar, P. และ Row, L. W. (1996) มาจำแนกเป็นกลุ่มตามลักษณะสภาพของชั้นดินที่บันทึกข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหวเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ

- (1) สภาพชั้นหิน (Rock Sites) จำนวน 38 คลื่น
- (2) สภาพชั้นดินตะกอน (Alluvium Deposits) จำนวน 60 คลื่น
- (3) สภาพชั้นดินอ่อน (Soft Soil Sites) จำนวน 36 คลื่น

ทั้งนี้การจำแนกลักษณะชั้นดินจะสอดคล้องกันกับการจำแนก โดย Uniform Building Code, UBC-97 (ICBO, 1997) ข้อมูลคลื่นเหล่านี้แสดงในตารางที่ 1-3



ตาม

ตารางที่ 1 คลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้บนชั้นหิน

สถานที่เกิด	ปี ค.ศ., ขนาด
ซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา	(1957), $M_L = 5.3$
ซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา	(1971), $M_L = 6.5$
ซิลีตอนกลาง	(1985), $M_L = 7.8$
เม็กซิโก	(1985), $M_L = 8.1$
ซานซาลวาดอร์เทียร์-แนร์โรว์ สหรัฐอเมริกา	(1986), $M_s = 5.4$
สหรัฐอเมริก	(1987), $M_L = 6.1$
โลมาเปรียตา สหรัฐอเมริกา	(1989), $M_s = 7.1$

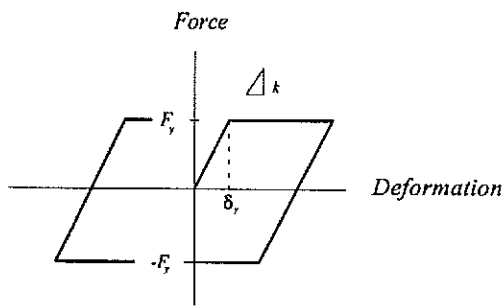
ตารางที่ 2 คลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้บนชั้นดินตะกอน

สถานที่เกิด	ปี ค.ศ., ขนาด
อิมพีเรียลวัลเลย์ สหรัฐอเมริกา	(1940), $M_L = 6.3$
เคอร์นคันทรี สหรัฐอเมริกา	(1952), $M_s = 7.7$
มิยาซากิฟิรเฟคเจอร์ ญี่ปุ่น	(1970), $M_s = 6.7$
เออิชิฟิรเฟคเจอร์ ญี่ปุ่น	(1971), $M_s = 6.1$
เฟอร์นันโด	(1971), $M_L = 6.5$
อิมพีเรียลวัลเลย์ สหรัฐอเมริกา	(1979), $M_L = 6.6$
วิทเทียร์-แนร์โรว์ สหรัฐอเมริกา	(1987), $M_L = 6.1$
โลมาเปรียตา สหรัฐอเมริกา	(1989), $M_s = 7.1$

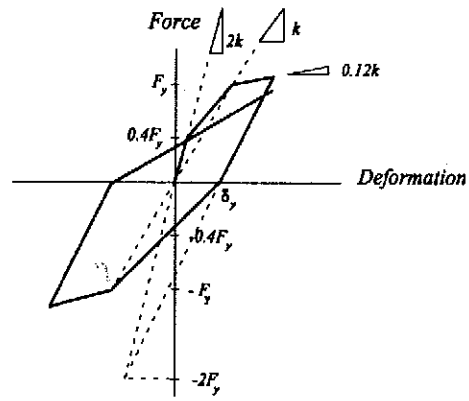
ตารางที่ 3 คลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้บนชั้นดินอ่อน

สถานที่เกิด	ปี ค.ศ., ขนาด
ไฮยูกานาดา ญี่ปุ่น	(1968), $M_s = 7.5$
ฮอนชู ญี่ปุ่น	(1968), $M_s = 7.9$
โรมานี	(1977), $M_s = 7.1$
มิยาซากิฟิรเฟคเจอร์ ญี่ปุ่น	(1978), $M_s = 7.4$
ซิลี	(1985), $M_s = 7.8$
เม็กซิโก	(1985), $M_s = 8.1$
โลมาเปรียตา สหรัฐอเมริกา	(1989), $M_s = 7.1$

ข. สร้าง Design Spectra สำหรับระดับความเสียหายคงที่สำหรับระดับความเสียหายเป้าหมาย ค่าความอ่อนเหนียว พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic behaviors) และสภาพธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน โครงสร้างอาคารจะสมมุติเป็น Single-Degree-Of-Freedom (SDOF) Lumped Mass Systems มีฐานยึดแน่น วิธีการคำนวณจะใช้ Nonlinear Response Analysis โดยใช้ Hysteretic Behavior เป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มตัวแทนของโครงสร้างเหล็ก ได้แก่แบบ Elastic-Perfectly Plastic (EPP) และ Bilinear (BI) 2) กลุ่มตัวแทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ แบบ Clough (CL), Modified Takeda (MT) และ Park's general three parameter models (PA) โดยมี Park-Ang Damage Model เป็นแบบจำลองในการคำนวณค่าความต้องการกำลังสำหรับระดับความเสียหายคงที่ ลักษณะของพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรแบบ EPP และ MT แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามลำดับ



รูปที่ 3 พฤติกรรมโครงสร้างแบบ Elastic-Perfectly Plastic (EPP)



รูปที่ 4 พฤติกรรมโครงสร้างแบบ Modified Takeda (MT)

ค. สร้างกราฟตัวประกอบของการลดกำลัง (Strength Reduction Factors) จากกำลังที่อีลาสติก (Elastic Design Spectra) สำหรับระดับความเสียหายเป้าหมาย ค่าความอ่อนเหนียว พฤติกรรม hysteretic behaviors และสภาพธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน โดยการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากค่ากำลังของ Elastic Design Spectra และ Inelastic Design Spectra ที่ระดับความเสียหายที่กำหนด ซึ่งได้จากการคำนวณในขั้นตอน ข.

ง. วิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวประกอบของการลดกำลัง (Strength Reduction Factors) สำหรับระดับความเสียหายคงที่ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้ ใช้โปรแกรม Statistical Package for the Social Science (SPSS) Version 9.0 มาช่วยในการวิเคราะห์ Nonlinear Regression Analysis เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม

จ. สร้างกราฟการออกแบบความต้องการกำลัง (Strength Demand Diagram) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นนี้ ในรูปกราฟความสัมพันธ์ของแรงเฉือนที่ฐานอาคารและการเคลื่อนตัวที่ยอดของอาคาร

โดยการคำนวณ Design Spectra และแบบจำลองการลดกำลัง

4. กราฟสำหรับระดับ

โดยที่การ Spectra จำเป็น Response Ar แผ่นดินไหวที่มากและเนื่อง

Damage Design เป้าหมาย ระดับของ Hysteretic ของโครงสร้าง การคำนวณหา เป็นขบวนการ ระดับค่าความ อ่อนเหนียวเป่า behavior แต่

และแต่ละประย เป็นขบวนการ ขบวนการคำนวณ อาคารทั่วไปไม่

แต่เนื่อง ในการออกแบบ อันเนื่องพฤติกรรม ค่ากำลังของโค ดังนั้น Inelastic มาจาก Elastic ระดับของ Elastic ประกอบของ

โดยการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากข้อมูล Design Spectra สำหรับระดับความเสียหายคงที่ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวประกอบของการลดกำลัง

4. กราฟตัวประกอบของการลดกำลัง สำหรับระดับความเสียหายคงที่

โดยที่การคำนวณหา Constant-Damage Design Spectra จำเป็นต้องมีการคำนวณโดยวิธี Nonlinear Response Analysis สำหรับ CDASDS โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้บนชั้นดินแต่ละสภาพเป็นจำนวนมากและเนื่องจากขนาดและรูปร่างของ Constant-Damage Design Spectra ขึ้นอยู่กับระดับความเสียหายเป้าหมาย ระดับค่าความอ่อนเหนียวเป้าหมาย รูปแบบของ Hysteretic behavior คาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้าง และสภาพชั้นดินของแต่ละแห่ง ดังนั้นการคำนวณหา Constant-Damage Design Spectra เป็นขบวนการ Iterative Procedure สำหรับแต่ละระดับค่าความเสียหายเป้าหมาย แต่ละระดับค่าความอ่อนเหนียวเป้าหมาย แต่ละรูปแบบของ Hysteretic behavior แต่ละคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้าง และแต่ละประเภทของสภาพชั้นดินของแต่ละแห่ง ซึ่งเป็นขบวนการที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ซึ่งขบวนการคำนวณเหล่านี้ วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างอาคารทั่วไปไม่สามารถที่จะกระทำได้ง่าย

แต่เนื่องจากค่ากำลังการรับแรงทางด้านข้างที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวอันมีพฤติกรรมเป็น Inelastic behavior จะน้อยกว่าค่ากำลังของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก ดังนั้น Inelastic Design Spectra จึงสามารถสร้างขึ้นมาจาก Elastic Design Spectra ได้ โดยการลดค่าระดับของ Elastic Design Spectra ด้วยค่าตัวประกอบของการลดกำลัง (Strength Reduction

Factors) โดยที่ค่า Strength Reduction Factors กำหนดจาก

$$R_D = \frac{F_y(\mu = 1)}{F_y(DI = \overline{DI}, \mu = \mu_i)} \quad (1)$$

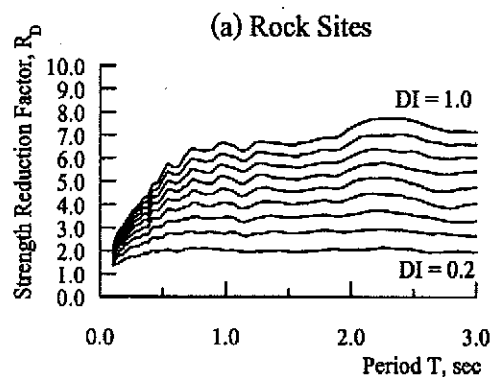
เมื่อ R_D = ตัวประกอบของการลดกำลัง (Strength Reduction Factor)

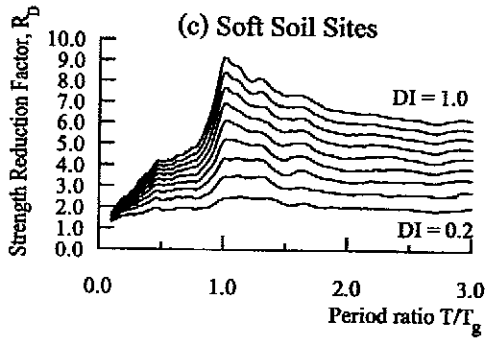
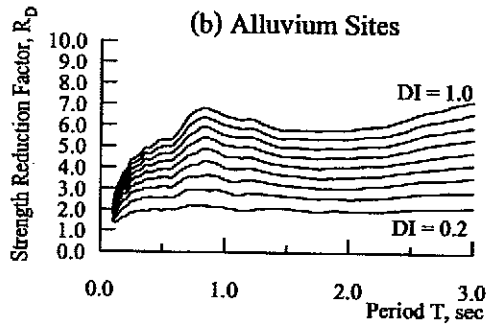
$F_y(\mu = 1)$ = ค่ากำลังการรับแรงทางด้านข้างสำหรับระบบอีลาสติก

$F_y(DI = \overline{DI}, \mu = \mu_i)$ = ค่ากำลังการรับแรงทางด้านข้างสำหรับโครงสร้างมีค่าความเสียหายน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า \overline{DI} ที่กำหนดไว้ และมีค่า Ductility μ เท่ากับค่า μ ที่กำหนด

การที่จะคำนวณหา Inelastic Design Spectra ได้อย่างถูกต้องแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับ การประเมินหาค่าตัวประกอบของการลดกำลังมาอย่างดี ทั้งนี้ต้องอาศัยการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง Inelastic Design Spectra และ Elastic Design Spectra อย่างเหมาะสม

ผลการคำนวณหากราฟตัวประกอบของการลดกำลังสำหรับระดับความเสียหายคงที่จากข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวโดยใช้พฤติกรรมโครงสร้างแบบ EPP สามารถแสดงค่าเฉลี่ย (Mean) ได้ดังรูปที่ 5a-5c.





รูปที่ 5 กราฟตัวประกอบของการลดกำลัง สำหรับความเสียหายคงที่, EPP, $\mu = 4$

5. แผนผังความต้องการกำลังสำหรับค่าความเสียหายคงที่

แผนผังความต้องการกำลังนี้เป็นแนวทางใหม่จากเดิมกล่าวคือเป็นความต้องการกำลังที่แสดงค่าระดับความเสียหายเป้าหมายอยู่ด้วย โดยการเปลี่ยนค่าจาก Strength Demand Spectrum มาเป็น Strength Demand Diagram ในทางปฏิบัติ สามารถสร้างแผนผังความต้องการกำลังนี้จากค่าตัวประกอบของการลดกำลัง (Strength Reduction Factors, R_D) และค่า Elastic Design Spectra โดยการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพัฒนาขึ้นมาจากการคำนวณหาค่าตัวประกอบของการลดกำลัง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้แสดงความสัมพันธ์ของค่าการเคลื่อนที่ (Displacement) เป็นฟังก์ชันกับค่าตัวประกอบของการลดกำลัง

(Strength Reduction Factors, R_D) สำหรับค่าระดับความเสียหายที่กำหนด (Target Seismic Damage, DI) ค่าระดับความอ่อนเหนียวที่กำหนด (Target ductility ratio, μ) ค่าคาบการสั่นตามธรรมชาติ T และค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคาร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของโครงสร้าง (Hysteretic behavior) แต่ละประเภทและสภาพธรณีวิทยา แต่ละแห่ง

ในการคำนวณค่าแผนผังความต้องการกำลังนี้ จึงสามารถคำนวณได้ ดังนี้

ค่ากำลังของโครงสร้าง

$$\frac{V_b}{W} = \frac{\left(\frac{V_b}{W}\right)_{\mu=1}}{R_D} \quad (2)$$

ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง

$$D = f\left(R_D, \left(\frac{V_b}{W}\right)_{\mu=1}, \mu, T, Hys, SC\right) \quad (3)$$

เมื่อ D คือ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง

R_D คือ Strength Reduction Factor สำหรับความเสียหายคงที่

$\frac{V_b}{W}$ คือ กำลังการรับแรงทางด้านข้างในรูปของสัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐานอาคาร สำหรับพฤติกรรมโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นเทียบต่อน้ำหนักอาคาร (Inelastic behavior)

$\left(\frac{V_b}{W}\right)_{\mu=1}$ คือ สัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐานอาคาร สำหรับพฤติกรรมโครงสร้างอีลาสติกเทียบต่อน้ำหนักอาคาร (Elastic behavior)

μ คือ ค่าระดับความอ่อนเหนียวที่กำหนด

T
 Hys
 SC
 ดังนั้น
 สามารถหา
 ความต้องการ
 สภาพชั้นดิน
 $D = \frac{1}{(7.92DI)^{1.4}}$
 สภาพชั้นดินค
 $D = \frac{1}{\{(6.79 - 0.5\}}$
 สภาพชั้นดินอ่อน
 $D = \frac{1}{(9.0DI)^{1.4}}$
 โดยที่
 $Z_1 = 1 + \frac{1}{2.34(\dots)}$
 $Z_2 = 1 + \frac{1}{3.63(\dots)}$

- T คือ ค่าคาบการสั่นตามธรรมชาติ
- H_{ys} คือ พหุนามการรับแรงแบบวิจัการของโครงสร้าง
- SC คือ สภาพธรณีวิทยาแต่ละแห่ง

ดังนั้น จากกราฟตัวประกอบของการลดกำลังจะสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผนผังความต้องการกำลังได้ดังนี้

สภาพชั้นหิน

$$D = \frac{Z_1 \mu \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2}{(7.92DI - 0.55)(0.25\mu) + Z_1 \left(\frac{V_b}{W}\right)_{\mu=1}} \quad (2)$$

สภาพชั้นดินตะกอน

$$D = \frac{Z_2 \mu \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2}{((6.79 - 0.76DI)DI - 0.21)(0.25\mu) + Z_2 \left(\frac{V_b}{W}\right)_{\mu=1}} \quad (3)$$

สภาพชั้นดินอ่อน

$$D = \frac{Z_3 \mu \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2}{(9.0DI^{1.45})(0.25\mu)^{-1} + Z_3 \left(\frac{V_b}{W}\right)_{\mu=1}} \quad (4)$$

โดยที่

$$Z_1 = 1 + \frac{1}{2.34(DI)^{-0.86}T}$$

$$\frac{1}{\left(4.56 + \frac{0.23}{DI}\right)T} \text{EXP} \left[-\left(7.51 - \frac{1.19}{DI}\right) \ln(T) + 0.30 \right]^2$$

$$Z_2 = 1 + \frac{1}{3.63(DI)^{-0.87}T}$$

$$\frac{1}{\left(1.39 + \frac{1.79}{DI}\right)T} \text{EXP} \left[-\left(7.00 + \frac{0.78}{DI}\right) \ln(T) + 0.10 \right]^2 \quad (8)$$

$$Z_3 = 1 + \frac{1}{0.44(DI)^{-1.92}T/T_g}$$

$$\frac{1}{(208 - 1.63DI)T/T_g} \text{EXP} \left[-4.0 \ln(T/T_g) - 0.20 \right]^2 \quad (9)$$

5.1 การสร้างแผนผังความต้องการกำลัง สำหรับค่าระดับความเสียหายคงที่

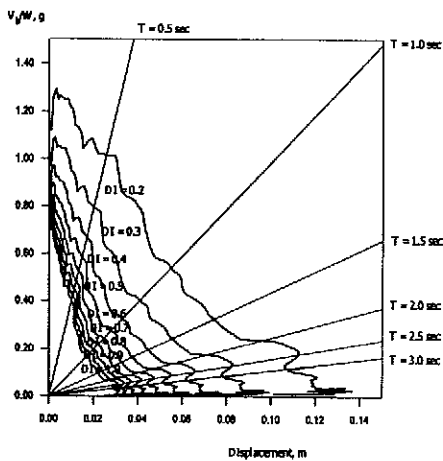
ขั้นตอนการสร้างแผนผังความต้องการกำลังสำหรับค่าระดับความเสียหายคงที่มีดังนี้

ก. คำนวณค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารจากค่า Elastic Design Spectra และค่าตัวประกอบของการลดกำลังโดยสมการที่ 2 และคำนวณค่าการเคลื่อนที่สูงสุดสำหรับแต่ละค่าระดับความเสียหาย $DI=0.2-1.0$ ค่าระดับความอ่อนเหนียวที่กำหนด (เลือก $\mu = 4$) สำหรับพฤติกรรมของโครงสร้างและสำหรับสภาพชั้นดิน โดยสมการที่ 4-6 เขียนกราฟแผนผังของแรงเฉือนที่ฐานอาคารและค่าการเคลื่อนที่สูงสุด

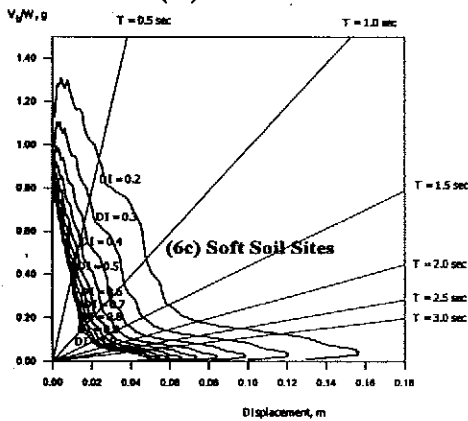
ข. คำนวณหาค่าการเคลื่อนที่กับค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคาร โดยสมการที่ 4-6 สำหรับแต่ละคาบเวลา $T = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ วินาที เขียนกราฟสำหรับแต่ละคาบเวลาเหล่านี้ลงในแผนผังที่ได้จากข้อ ก.

กราฟแผนผังของแรงเฉือนที่ฐานอาคารและค่าการเคลื่อนที่สูงสุดที่ได้จากการคำนวณแสดงในรูปแบบที่ 6a-6c.

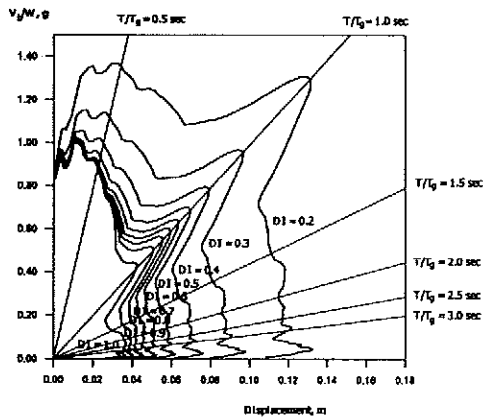
(6a) Rock Sites



(6b) Alluvium Sites



(6c) Soft Soil Sites



รูปที่ 6 แผนผังความต้องการกำลังสำหรับระดับความเสียหายคงที่; EPP, $\mu = 4$

6. การตรวจสอบการประยุกต์ใช้งานของแผนผังความต้องการกำลัง

หลังจากได้แผนผังความต้องการกำลังของการออกแบบ ซึ่งอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบว่าแผนผังที่ได้นี้สามารถนำไปใช้งานได้โดยโครงสร้างอาคารต้องมีความปลอดภัยเพียงพอ

หลักเกณฑ์การพิจารณา

วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวคือ การป้องกันมิให้โครงสร้างอาคารพังทลาย เนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวอย่างรุนแรงได้ หากนำหลักเกณฑ์นี้มาประกอบกับดัชนีความเสียหายที่เสนอโดย Park-Ang (1985) จะพิจารณาได้ว่าโครงสร้างที่ได้รับการออกแบบอย่างดีเมื่อถูกแรงกระทำจากแผ่นดินไหวอย่างรุนแรงควรมีค่าดัชนีความเสียหายที่สม่ำเสมอตลอดทุกคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างและมีค่า DI ไม่เกิน 1.0 จึงจะถือได้ว่าอาคารนั้นปลอดภัยและการออกแบบที่ถือว่าน่าพอใจก็คือการออกแบบที่สามารถให้ผลลัพธ์อย่างดีเช่นนั้น

6.1 ขั้นตอนการตรวจสอบ โดยวิธีการออกแบบและการหาค่า (Design and Evaluation Approach)

ก. พิจารณาโครงสร้างอาคารเป็น Single Degree of Freedom (SDOF) ตั้งอยู่บนชั้นหิน กำหนดค่าเริ่มต้นของคาบเวลาการสั่นธรรมชาติ $T = 0.1$ sec, $DI = 0.2 - 1.0$, $\mu = 4$, $m = 1.0$.

ข. เลือกค่าคลื่นแผ่นดินไหว 1 ค่า จากข้อมูลคลื่นที่เก็บไว้สำหรับสภาพชั้นหิน และคำนวณหาค่า PGA

ค. ค่า Strength Capacity ของโครงสร้างถูกกำหนดให้เท่ากับค่า Strength Demand ที่ใช้ในการออกแบบ เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวที่ได้คัดเลือกไว้นั้นคือ

$$F_y = \frac{V_b}{L}$$

ง. ค่า Ductility Ratio) μ

จ. โครงสร้างคลื่นแผ่นดินไหวที่โครงสร้างของโครงสร้าง (histories) สำหรับซึ่งค่าแรงและค่าที่ใช้ในการคำนวณ

ฉ. ขั้นตอนระดับค่าคาบเวลาตั้งนั้นค่า Damage ที่เลือกไว้จะคำนวณ

ช. ขั้นตอนคลื่นแผ่นดินไหวที่นั้นคือ สำหรับทุก

กำหนดให้มีการออกแบบในรูปแบบของ D ขั้นตอนเดียวกันนี้

ซ. ทำการคำนวณ Mean ซึ่งค่า Mean ค่าเฉลี่ยของความอาคารที่ได้รับการ

ผลการคำนวณโครงสร้างแสดง Spectra ในแต่ละจากกราฟเหล่านี้

ใช้แบบชอบ

$$F_y = \frac{\left(\frac{V_b}{W}\right)_{\mu=1}}{R_D} \cdot m \cdot PGA \quad (10)$$

จ. ค่า Ductility Capacity ของระบบโครงสร้าง ถูกสมมติให้สอดคล้องเท่ากับ Minimum Performance ที่ต้องการสำหรับค่าความอ่อนเหนียว (Target Ductility Ratio) μ

ฉ. โครงสร้างถูกสมมติให้ถูกแรงกระทำโดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ ค่าแรงและค่าการโก่งตัวของโครงสร้าง (Force and Deformation time histories) สำหรับค่า yield strength F_y แต่ละระดับ ซึ่งค่าแรงและค่าการโก่งตัวของโครงสร้างเหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณความเสียหายของโครงสร้างอาคาร

ค. ขั้นตอน ค. - จ. จะถูกคำนวณซ้ำสำหรับ แต่ละระดับค่าคาบเวลาการสั่นธรรมชาติ T จาก 0.1-3.0 sec. ดังนั้นค่า Damage Spectra สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว ที่เลือกไว้ก็จะคำนวณหาได้

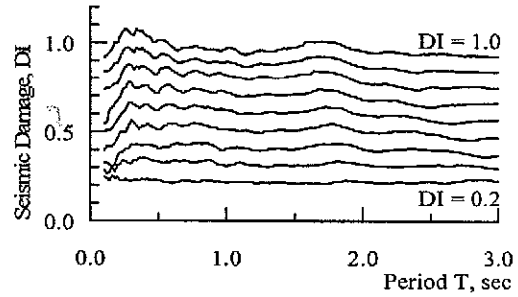
ช. ขั้นตอน ข. - ฉ. จะถูกคำนวณซ้ำสำหรับทุกๆ คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบสำหรับสภาพชั้นดิน นั่นคือ สำหรับทุกๆ คลื่นแผ่นดินไหว โครงสร้างจะถูกกำหนดให้มีการออกแบบตามข้างต้น และความเสียหายในรูปแบบของ Damage Spectra จะถูกคำนวณด้วยขั้นตอนเดียวกันนี้

ซ. ทำการคำนวณค่า Damage Spectra จะเพื่อหา Mean ซึ่งค่า Mean DI spectra จะเป็นตัวแทนของระดับค่าเฉลี่ยของความเสียหายที่จะเกิดขึ้นของโครงสร้างอาคารที่ได้รับการออกแบบมานี้

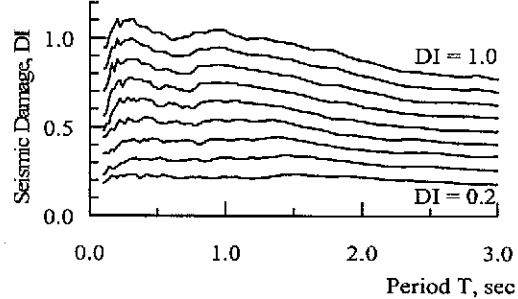
ผลการคำนวณหาค่าระดับความเสียหายของโครงสร้างแสดงด้วยกราฟของ Seismic Damage Spectra ในแต่ละสภาพชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 7a-7c จากกราฟเหล่านี้จะสังเกตได้ว่าค่าระดับความเสียหายของ

โครงสร้างอาคารค่อนข้างคงที่สม่ำเสมอตลอดช่วงของคาบการสั่นธรรมชาติทั้งสามสภาพชั้นดิน

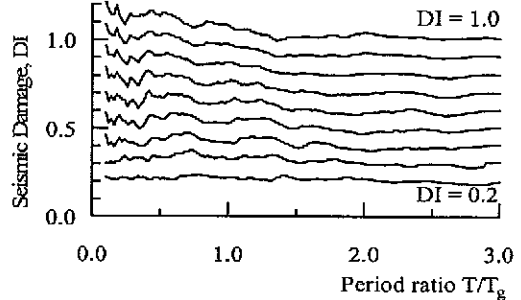
(a) Rock Site



(b) Alluvium Site



(c) Soft Soil Site



รูปที่ 7 ค่าระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบ โดยการใส่แผนผังความต้องการกำลังสำหรับระดับความเสียหายคงที่, EPP, $\mu = 4$

7. ลสรุป

แผนผังความต้องการกำลังของโครงสร้างนี้เป็นการพัฒนาเพื่อการออกแบบอาคารแนวทางใหม่ซึ่งประยุกต์หลักการให้โครงสร้างมีค่าระดับความเสียหายที่ร่วมกันกับวิธีการสเปคตรัมของความสามารถ แผนผังความต้องการกำลังนี้มีลักษณะที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการซึ่งแยกได้ดังนี้

ก. ค่าระดับความเสียหายที่กำหนด

ค่ากำลังการรับแรงทางด้านข้างของโครงสร้างจะมีความต้องการเพิ่มขึ้นเมื่อกำหนดค่าระดับความเสียหายลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดค่าระดับความเสียหายที่ลดลงเป็นการเพื่อให้ค่าความปลอดภัยที่มากขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้กำลังในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวสูงขึ้น

ข. ค่าระดับความอ่อนเหนียวที่กำหนด

ค่าความอ่อนเหนียวขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างประเภทต่างๆ รวมทั้งรายละเอียดของจุดต่อระหว่างคานและเสา จำนวนการเสริมเหล็กปลอกและเหล็กเสริมตามยาวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหากโครงสร้างมีการเสริมเหล็กให้มีความอ่อนเหนียวเพิ่มขึ้น จะทำให้ความต้องการกำลังในการรับแรงทางด้านข้างต่ำลง เนื่องจากโครงสร้างมีการดูดซับพลังงานบริเวณรอยต่อระหว่างคานและเสา เมื่อโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวไปสู่พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น

ค. ค่าคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้าง

ค่าคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างขึ้นกับความสูงของอาคารนั้น อาคารที่เตี้ยจะมีค่าคาบการสั่นที่น้อยกว่าอาคารที่สูง และอาคารเตี้ยจะมีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างน้อย แต่มีความต้องการกำลังรับแรงทางด้านข้างเทียบต่อน้ำหนักอาคารที่มากกว่าอาคารสูง สำหรับอาคารสูงจะมีความต้องการกำลังเทียบต่อน้ำหนักอาคารที่น้อยกว่าอาคารเตี้ย แต่จะมีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมากกว่าสอดคล้องกันกับลักษณะของแผนผัง

ความต้องการกำลังที่แสดงนี้

ง. พฤติกรรมของโครงสร้างแต่ละประเภท

โครงสร้างแต่ละประเภทมีพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรที่ต่างกันทำให้มีการดูดซับพลังงาน เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวได้ไม่เท่ากัน ในการออกแบบอาคารจึงจำเป็นต้องพิจารณาคณสมบัตินี้เพื่อใช้ในการเลือกแผนผังความต้องการกำลังที่เหมาะสมด้วยโครงสร้างที่แข็งแรงมีพฤติกรรมการรับแรงที่มั่นคง เช่น แบบจำลอง EPP และ BI ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างเหล็กจะมีค่าความต้องการกำลังและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างต่ำกว่าแบบจำลอง CL, MT และ PA ซึ่งแบบหลังนี้เป็นของคอนกรีตเสริมเหล็ก พฤติกรรมการรับแรงจะมีการลดค่าสติเฟนสและกำลัง ทำให้มีความเสียหายสะสมมากกว่าแบบแรก

จ. สภาพธรณีวิทยาแต่ละแห่ง

สำหรับสภาพชั้นหินและสภาพชั้นดินตะกอนลักษณะของแผนผังความต้องการกำลังมีความคล้ายคลึงกัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวของทั้งสองชุดนี้มีลักษณะคล้ายกัน แต่สำหรับชั้นดินอ่อน กราฟแผนผังมีจุดเด่นชัดเจนที่ค่า $T/T_g = 1.0$ ซึ่งค่ากำลังและการเคลื่อนตัวที่จุดนี้สูงมากเป็นพิเศษ เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวในกรณีนี้มีลักษณะเป็นแบบ narrow band มีคาบเวลาการสั่นสำคัญของพื้นดินที่ค่าๆหนึ่ง คลื่นแผ่นดินไหวแบบนี้จะทำให้โครงสร้างที่มีค่าคาบการสั่นตามธรรมชาติใกล้เคียงกับคาบการสั่นสำคัญของพื้นดินเกิดการสั่นไหวที่รุนแรงได้

จากการตรวจสอบค่าระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยแผนผังความต้องการกำลังโดยจำลองวิธีการออกแบบและหาค่าระดับความเสียหายผลปรากฏว่า กราฟของค่าระดับความเสียหายค่อนข้างคงที่สม่ำเสมอ ตลอดคาบการสั่นธรรมชาติและค่าดัชนีความเสียหายใกล้เคียงกันกับค่าความเสียหาย เป้าหมาย

ที่กำหนดไว้ด้วยแผนผังเพียงพอ

สำหรับต้องการกำลังต่อการตรวจ (Check) โดยแรงแผ่นดินที่ต้องการตรวจแผ่นดินไหวตรวจสอบที่เคลื่อนที่ฐานการเคลื่อนที่

ที่กำหนดไว้ทำให้มั่นใจได้ว่า โครงสร้างอาคารที่ออกแบบ ด้วยแผนผังความต้องการกำลังนี้ มีความปลอดภัย เพียงพอ

สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงของแผนผังความต้องการกำลังสำหรับค่าความเสียหายคงที่มีประโยชน์ ต่อการตรวจสอบสมรรถนะของอาคาร (Performance Check) โดยการคำนวณหากราฟ ความสามารถต้านทาน แรงแผ่นดินไหว (Capacity Diagram) สำหรับอาคาร ที่ต้องการตรวจสอบ แล้วนำมาเขียนลงในรูปเดียวกับ แผนผังความต้องการกำลังในรูปแบบของแผนผัง ความต้องการกำลังและความสามารถต้านทานแรง แผ่นดินไหว (Demand-Capacity Diagram) เพื่อใช้ ตรวจสอบหาจุดสมรรถนะของอาคาร ซึ่งจะทราบค่าแรง เฉือนที่ฐานอาคารรวมทั้งค่าระดับความเสียหายและค่า การเคลื่อนที่ของอาคารที่เหมาะสมในการออกแบบได้

บรรณานุกรม

- Applied Technology Council (1996). **Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings**, (Report No. ATC-40), California.
- Dunbar, P. and Row, L. W. (1996). **An Earthquake Strong-Motion Data Catalog for Personal Computers**, National Geophysical Data Center, NOAA, Code E/GC1, 325 Broadway, Boulder, Colorado, USA.
- FEMA (1997). **NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of buildings (FEMA 273); and NEHRP Commentary on the guidelines for the Seismic Rehabilitation of buildings (FEMA 274)**, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- ICBO (1997). International Conference of Building Officials, **Uniform Building Code**, Whittier, California, 1636: 2-23 - 2-30.
- Panyakapo, P. (2001). **Constant-Damage Design Spectra for Reinforced Concrete Structures**, Proceedings of the 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Nanyang Technological University, Singapore.
- Panyakapo, P. (2004). **Evaluation of Site-Dependent Constant-Damage Design Spectra for Reinforced Concrete Structures**, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.33, No.12, 1211-1231.
- Park, Y. J. and Ang, A. H. (1985). **Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete**, Journal of Structural Engineering, ASCE, 111(4), 722-739.
- Warnitchai, P. and Panyakapo, P. (1999). **Constant-Damage Design Spectra**, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 3, 329-347.