ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190733

การวิเคราะห์ทางสถิติของสัดส่วนของเส้นโค้งที่ทดสอบในสามมิติ ด้วยหลักการของการแยกโดยระเบียบวิธีซิมเพล็กซ์

นายเกรียงไกร ตันอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

b00255838

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190733

การวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ ด้วยพิกัดทรงกระบอกโดยระเบียบวิธียิงเป้า

นายเกรียงไกร กลิ่นอ่อน วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.บุญมี ชินนาบุญ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล)

..... กรรมการ
(ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ ด้วยพิกัดทรงกระบอกโดยระเบียบวิธียิงเป้า
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายเกรียงไกร กลิ่นอ่อน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

190733

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ของเคเบิลใต้ทะเลที่ยึดตัวได้ในสามมิติ ด้วยพิกัดทรงกระบอก แรงที่มากระทำต่อเคเบิลจะประกอบด้วย แรงดึงประสิทธิผล น้ำหนักประสิทธิผล และแรงลากเนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำ การแก้ปัญหาของเคเบิลจะเป็นการแก้ปัญหาแบบเงื่อนไขขอบเขตสองจุด โดยกำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นให้กับสมการครอบคลุมปัญหาแบบไม่เชิงเส้น ส่วนการแก้ปัญหาจะใช้ระเบียบวิธียิงเป้าร่วมกับระเบียบวิธีรุงเง-คุตตาอันดับที่สี่ ในการหาคำตอบเชิงตัวเลข กระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้จะต้องใช้สมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งทั้งหมดแปดสมการ ได้แก่ สมการสมดุลสามสมการ สมการเรขาคณิตของชิ้นส่วนย่อยของเคเบิลสามสมการ สมการนิยามความเครียดหนึ่งสมการ และสมการแรงดึงประสิทธิผลหนึ่งสมการ เมื่อนำผลการคำนวณเชิงตัวเลขกรณีกำหนดแรงดึงที่ปลายบนและกรณีกำหนดความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยึดตัวไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยในอดีตพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังนำเสนอลักษณะที่น่าสนใจของเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัวในสามมิติ

คำสำคัญ : เคเบิลใต้ทะเลในสามมิติ / พิกัดทรงกระบอก / ระเบียบวิธียิงเป้า / ระเบียบวิธีรุงเง-คุตตา / สมการครอบคลุมปัญหาแบบไม่เชิงเส้น / เคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว

Thesis Title	Static Equilibrium of a Three-Dimensional Marine Cable in Cylindrical Coordinates via Shooting Method
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Kriangkrai Klinon
Thesis Advisor	Prof. Dr. Somchai Chucheepsakul
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

190733

This thesis presents static equilibrium analysis of three-dimensional steady-state behavior of an extensible marine cable in cylindrical coordinates. The forces acting on the cable are the effective tension, the effective weight, and hydrodynamic drag forces. The cable problem can be classified as a two-point boundary-value problem. The boundary conditions are transformed into a set of nonlinear governing equations about the initial values, then the shooting method is employed to solve the three-dimensional cable equations with the fourth-order Runge-Kutta method. In the procedure, eight first-order differential equations which are three equilibrium equations, three geometric cable segment relations equations, one strain definition equation, and one effective tension equation, are solved. Numerical results for the case of specified top tension and a specified cable unstrained length are in very good agreement with those reported in literature. The interesting features of neutrally buoyant marine cables are also highlighted.

Keywords : Three-Dimensional Marine Cables / Cylindrical Coordinates / Shooting Method / Runge-Kutta Method / Nonlinear Governing Equations / Neutrally Buoyant Marine Cables

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.บุญมี ชินนาบุญ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์นี้ สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลอีกหลายท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและมิได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค

กิตติกรรมประกาศ ง

สารบัญ จ

รายการตาราง ช

รายการรูปประกอบ ญ

รายการสัญลักษณ์ ต

ประมวลศัพท์และคำย่อ บ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 การวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเล 1

1.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง 2

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 6

2. ทฤษฎี 7

2.1 สมมติฐานของการวิเคราะห์ 7

2.2 รูปแบบจำลองของการวิเคราะห์ 7

2.3 การวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเล 13

3. วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข 26

3.1 สมการอนุพันธ์ 26

3.2 เงื่อนไขขอบเขต 31

3.3 ขั้นตอนการหาคำตอบ 32

4. ตัวอย่างและผลการวิเคราะห์ **33**

4.1 ผลการวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป 35

4.2 ผลการวิเคราะห์เคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว 70

5. สรุปผล **89**

5.1 สรุปผลการวิจัย 89

5.2 ข้อเสนอแนะ 91

เอกสารอ้างอิง **92**

ภาคผนวก **96**

ก ตำแหน่งการวางตัวของเคเบิล ณ สภาวะวิกฤต 96

ข ระเบียบวิธียิงเป้า 127

ค ระเบียบวิธีรุงเง-คุตตา 130

ง ระเบียบวิธีนิวตัน 133

จ สมการสมดุลของเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว 136

ประวัติผู้วิจัย **139**

รายการตาราง

ตาราง หน้า

4.1 ข้อมูลทางกายภาพของเคเบิลที่ใช้ในการวิเคราะห์กรณีเคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป 35

4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่ปลายล่างและความยาวของเคเบิลหลังเกิดการยืดตัว เมื่อทำการกำหนดค่าแรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล (T_H) เท่ากับ 25 kN 36

4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่ปลายล่างและความยาวของเคเบิลหลังเกิดการยืดตัว เมื่อทำการกำหนดค่าความยาวของเคเบิลก่อนเกิดการยืดตัว (S_L) เท่ากับ 550 m 37

4.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $R/z_H = 1$ 38

4.5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 38

4.6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 39

4.7 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 39

4.8 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 40

4.9 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 40

4.10 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ V_{cx} = 2.0 m/s 45

4.11 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 30 องศา 46

4.12 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 60 องศา 46

4.13 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 90 องศา 46

4.14 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 120 องศา 47

4.15 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 150 องศา 47

4.16 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ W_c = 30 N/m 52

4.17 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผล ของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 52

4.18 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผล ของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 53

4.19 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผล ของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 53

4.20 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผล ของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 53

4.21 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผล ของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 54

4.22 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $E = 1 \times 10^6$ kN/m^2 58

4.23 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 59

4.24 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 59

4.25 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 59

4.26 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 60

4.27 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 60

4.28 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 30 องศา 65

4.29 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 60 องศา 65

4.30 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 90 องศา 66

4.31 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 120 องศา 66

4.32 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 150 องศา 67

4.33 ข้อมูลทางกายภาพของเคเบิลที่ใช้ในการวิเคราะห์กรณีเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว 70

4.34 ผลการเปรียบเทียบเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัวของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Friswell [15] ณ สภาวะวิกฤต 71

4.35 ผลการเปรียบเทียบเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัวของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Chucheepsakul และ Wang [17] ณ สภาวะสมดุล 73

4.36 ผลการเปรียบเทียบเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัวตามแบบจำลองของ Berteaux [1] กับแบบจำลองของ Seck-Hong [6] ณ สภาวะสมดุล 74

4.37 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $R/z_H = 1$ 76

4.38 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 30 องศา 76

4.39 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 60 องศา 77

4.40 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 90 องศา 77

4.41 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 120 องศา 77

4.42 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 150 องศา 78

4.43 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 30 องศา 83

4.44 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 60 องศา 83

4.45 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 90 องศา 84

4.46 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 120 องศา 84

4.47 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 150 องศา 85

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	ลักษณะการวางตัวของเคเบิลใต้ทะเลในสามมิติที่สภาวะสมดุล	8
2.2	ทิศทางของเวคเตอร์ และการวางตัวของเคเบิลในสามมิติ	9
2.3	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดเคเบิลภายใต้แรงกระทำ	12
2.4	แรงที่มากระทำกับเคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป	13
2.5	แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนย่อย ds_0 ในสภาวะสมดุล กรณีเคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป	18
2.6	การเปลี่ยนแปลงทิศทางของเคเบิล	20
2.7	แรงที่มากระทำกับเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว	21
2.8	แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนย่อย ds_0 ในสภาวะสมดุล กรณีเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว	23
4.1	ตำแหน่งการวางตัวของเคเบิลในสามมิติ	34
4.2	ทิศทางของกระแสน้ำ	34
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $R/z_H = 1$	41
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $R/z_H = 1$	41
4.5	ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $R/z_H = 1$	42
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา	42
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา	43
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา	43
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา	44
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา	44

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ V_{cr} = 2.0 m/s 48

4.12 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ V_{cr} = 2.0 m/s 48

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 30 องศา 49

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 60 องศา 49

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 90 องศา 50

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 120 องศา 50

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 150 องศา 51

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ W_e = 30 N/m 54

4.19 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ W_e = 30 N/m 55

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 55

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 56

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 56

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 57

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 57

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ E = 1 x 10^6 kN/m^2 61

4.26 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ E = 1 x 10^6 kN/m^2 61

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 62

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 62

4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 63

4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 63

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(W_eL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 64

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(W_eL)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ R/z_H = 1 ที่ θ_H = 30 องศา 67

4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(W_eL)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ R/z_H = 1 ที่ θ_H = 60 องศา 68

4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(W_eL)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ R/z_H = 1 ที่ θ_H = 90 องศา 68

4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(W_eL)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ R/z_H = 1 ที่ θ_H = 120 องศา 69

4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(W_eL)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ R/z_H = 1 ที่ θ_H = 150 องศา 69

4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่ปลายบนกับความยาวของเคเบิลใต้ทะเลแบบไร้หน่วย ในงานวิจัยของ Friswell [15] 72

4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่ปลายบนกับความยาวของเคเบิลใต้ทะเลแบบไร้หน่วย ในงานวิจัยนี้ 72

4.39 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง r/R กับ z/z_H ของงานวิจัยนี้ กับงานวิจัยของ Chucheepsakul และ Wang [17] ณ สภาวะสมดุล 73

4.40 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_xL)$ กับ s_L/L ตามแบบจำลอง ของ Berteaux [1] กับแบบจำลองของ Seck-Hong [6] 74

4.41 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_xL)$ กับ ψ_H ตามแบบจำลอง ของ Berteaux [1] กับแบบจำลองของ Seck-Hong [6] 75

4.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_xL)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ R/z_H = 1 78

4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $R/z_H = 1$ 79

4.44 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่า θ_H ที่ $R/z_H = 1$ 79

4.45 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_x L)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 30 องศา 80

4.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_x L)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 60 องศา 80

4.47 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_x L)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 90 องศา 81

4.48 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_x L)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 120 องศา 81

4.49 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_H/(q_x L)$ กับ s_{total}/L เมื่อแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 150 องศา 82

4.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(q_x L)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 30 องศา 85

4.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(q_x L)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 60 องศา 86

4.52 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(q_x L)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 90 องศา 86

4.53 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(q_x L)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 120 องศา 87

4.54 ความสัมพันธ์ระหว่าง s_0/s_{total} กับ $T/(q_x L)$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 150 องศา 87

ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 97

ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 97

ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 98

ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 98

ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 99
ก.6 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 99
ก.7 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 100
ก.8 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 100
ก.9 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 101
ก.10 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความลึกของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 101
ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 30 องศา 102
ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 60 องศา 102
ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 90 องศา 103
ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 120 องศา 103
ก.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 150 องศา 104
ก.16 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 30 องศา 104
ก.17 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 60 องศา 105
ก.18 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 90 องศา 105
ก.19 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 120 องศา 106
ก.20 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าความเร็วของกระแสน้ำ ที่ θ_H = 150 องศา 106

ก.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 107

ก.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 107

ก.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 108

ก.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 108

ก.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 109

ก.26 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 109

ก.27 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 110

ก.28 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 110

ก.29 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 111

ก.30 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าน้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 111

ก.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 112

ก.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 112

ก.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 113

ก.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 113

ก.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 114

ก.36 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 30 องศา 114

ก.37 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 60 องศา 115

ก.38 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 90 องศา 115

ก.39 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 120 องศา 116

ก.40 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเคเบิล ที่ θ_H = 150 องศา 116

ก.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 30 องศา 117

ก.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 60 องศา 117

ก.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 90 องศา 118

ก.44 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 120 องศา 118

ก.45 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 150 องศา 119

ก.46 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 30 องศา 119

ก.47 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 60 องศา 120

ก.48 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 90 องศา 120

ก.49 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 120 องศา 121

ก.50 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะวิกฤต เมื่อแปรเปลี่ยน ค่าระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ ที่ θ_H = 150 องศา 121

ก.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (s) สภาวะวิกฤต (cr) และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ (u) เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ θ_H = 30 องศา 122

ก.52 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (s) สภาวะวิกฤต (cr) และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ (u) เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 60$ องศา 122

ก.53 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (s) สภาวะวิกฤต (cr) และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ (u) เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 90$ องศา 123

ก.54 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (s) สภาวะวิกฤต (cr) และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ (u) เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 120$ องศา 123

ก.55 ความสัมพันธ์ระหว่าง z/L กับ r/L ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (s) สภาวะวิกฤต (cr) และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ (u) เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 150$ องศา 124

ก.56 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 30$ องศา 124

ก.57 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 60$ องศา 125

ก.58 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 90$ องศา 125

ก.59 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 120$ องศา 126

ก.60 ตำแหน่งของเคเบิลบนพิกัด $r-\theta$ ณ สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ สภาวะวิกฤต และสภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ เมื่อ $R/z_H = 1$ ที่ $\theta_H = 150$ องศา 126

ข.1 การหาคำตอบของปัญหาด้วยระเบียบวิธียิงเป้า 129

รายการสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของเคเบิลขณะที่ยังไม่เกิดความเครียด
A_0	=	พื้นที่หน้าตัดของเคเบิลขณะที่เกิดความเครียด
C_{DN}	=	สัมประสิทธิ์ของแรงลากในแนวตั้งฉากกับเคเบิล
C_{DT}	=	สัมประสิทธิ์ของแรงลากในแนวสัมผัสกับเคเบิล
C_N	=	สัมประสิทธิ์รวมของแรงลากในแนวตั้งฉากกับเคเบิล
C_T	=	สัมประสิทธิ์รวมของแรงลากในแนวสัมผัสกับเคเบิล
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเคเบิลขณะที่ยังไม่เกิดความเครียด
D_0	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเคเบิลขณะที่เกิดความเครียด
D_F	=	เวคเตอร์แรงลากเนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำ
dT	=	แรงดึงในเคเบิลที่เปลี่ยนแปลง
ds	=	ความยาวส่วนโค้งของชิ้นส่วนเล็กๆ ขณะยังไม่เกิดความเครียด (Unstrained arc-length)
ds_0	=	ความยาวส่วนโค้งของชิ้นส่วนเล็กๆ ขณะเกิดความเครียด (Strained arc-length)
$d\hat{t}$	=	การเปลี่ยนแปลงทิศทางของเคเบิล
dz_0	=	ดิฟเฟอเรนชิเอท z_0
E	=	โมดูลัสความยืดหยุ่น
$\bar{e}_r, \bar{e}_\theta, \bar{e}_z$	=	เวคเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตามแนวแกน r, θ, z
F	=	แรงลากในแนวสัมผัสกับเคเบิล มีทิศทางตาม $\hat{t}$
F_r, F_θ, F_z	=	องค์ประกอบของแรงลาก F ตามแนวแกน r, θ, z
f	=	แฟกเตอร์ในการปรับค่า เนื่องจากผลของอัตราส่วนป๋วซอง
G	=	แรงลากในแนวตั้งฉากกับเคเบิล มีทิศทางตาม $\hat{n}$
G_r, G_θ, G_z	=	องค์ประกอบของแรงลาก G ตามแนวแกน r, θ, z
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
H	=	แรงลากในแนวตั้งฉากกับเคเบิล มีทิศทางตาม $\hat{b}$
H_r, H_θ, H_z	=	องค์ประกอบของแรงลาก H ตามแนวแกน r, θ, z
$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$	=	เวคเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตามแนวแกน x, y, z
L	=	ระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวเอียง
q_r	=	องค์ประกอบของแรงลากในแนวราบในทิศทาง $\bar{e}_r$
q_x	=	องค์ประกอบของแรงลากในแนวราบในทิศทาง $\bar{i}$

q_y = องค์ประกอบของแรงลากในแนวราบในทิศทาง $\bar{j}$

q_z = องค์ประกอบของแรงลากในแนวดิ่งในทิศทาง $\bar{k}$

q_θ = องค์ประกอบของแรงลากในแนวราบในทิศทาง $\bar{e}_\theta$

$\bar{q}$ = เวคเตอร์ของแรงลากในแนวราบเนื่องจากความเร็วของกระแสน้ำ

P_i = แรงลากในแนวราบ มีทิศทางตาม $\bar{i}$

$\bar{P}_i$ = เวคเตอร์แรงลากในแนวราบ มีทิศทางตาม $\bar{i}$

$\bar{P}_{\hat{t}}, \bar{Q}_{\hat{t}}, \bar{R}_{\hat{t}}$ = เวคเตอร์แรงลากของ P_i, Q_j, และ R_k ในแนวสัมผัสกับเคเบิล มีทิศทางตาม $\hat{t}$

$\bar{P}_{\hat{n}}, \bar{Q}_{\hat{n}}, \bar{R}_{\hat{n}}$ = เวคเตอร์แรงลากของ P_i, Q_j, และ R_k ในแนวตั้งฉากกับเคเบิล มีทิศทางตาม $\hat{n}$

$\bar{P}_{\hat{b}}, \bar{Q}_{\hat{b}}, \bar{R}_{\hat{b}}$ = เวคเตอร์แรงลากของ P_i, Q_j, และ R_k ในแนวตั้งฉากกับเคเบิล มีทิศทางตาม $\hat{b}$

Q_j = แรงลากในแนวราบ มีทิศทางตาม $\bar{j}$

$\bar{Q}_j$ = เวคเตอร์แรงลากในแนวราบ มีทิศทางตาม $\bar{j}$

R = ระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ

R_k = แรงลากในแนวดิ่ง มีทิศทางตาม $\bar{k}$

$\bar{R}_k$ = เวคเตอร์แรงลากในแนวดิ่ง มีทิศทางตาม $\bar{k}$

$\bar{R}$ = เวคเตอร์บอกตำแหน่งในสภาวะการเคลื่อนที่

$\bar{R}_0$ = เวคเตอร์บอกตำแหน่งในสภาวะสมดุล

r_0 = ตำแหน่งการวางตัวตามแนวแกน r

$\bar{r}_0$ = ตำแหน่งการวางตัวตามแนวแกน r แบบไร้หน่วย $\left(\bar{r}_0 = \frac{r_0}{L}\right)$

s = ความยาวเคเบิล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ขณะยังไม่เกิดความเครียด

s_0 = ความยาวเคเบิล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ขณะเกิดความเครียด

s_L = ความยาวทั้งหมดของเคเบิล ขณะยังไม่เกิดความเครียด

s_{total} = ความยาวทั้งหมดของเคเบิล ขณะเกิดความเครียด

s_0^* = ความยาวเคเบิล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ขณะเกิดความเครียดต่อความยาวทั้งหมดของเคเบิล ขณะเกิดความเครียด $\left(s_0^* = \frac{s_0}{s_{total}}\right)$

$\bar{s}$ = ความยาวเคเบิล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ขณะยังไม่เกิดความเครียดแบบไร้หน่วย $\left(\bar{s} = \frac{s}{L}\right)$

$\bar{s}_0$ = ความยาวเคเบิล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ขณะเกิดความเครียด แบบไร้หน่วย $\left(\bar{s}_0 = \frac{s_0}{L}\right)$

$\bar{s}_L$ = ความยาวทั้งหมดของเคเบิล ขณะยังไม่เกิดความเครียด แบบไร้หน่วย $\left(\bar{s}_L = \frac{s_L}{L}\right)$

$\bar{s}_{total}$ = ความยาวทั้งหมดของเคเบิล ขณะเกิดความเครียด แบบไร้หน่วย $\left(\bar{s}_{total} = \frac{s_{total}}{L}\right)$

T = แรงดึงประสิทธิผล

T_B = แรงดึงที่ปลายล่างของเคเบิล

T_H = แรงดึงที่ปลายบนของเคเบิล

T_r, T_θ, T_z = องค์ประกอบของแรงดึง T ตามแนวแกน r, θ, z

T_x, T_y, T_z = องค์ประกอบของแรงดึง T ตามแนวแกน x, y, z

$\bar{T}_g$ = แรงดึงประสิทธิผลของเคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป แบบไร้หน่วย $\left(\bar{T}_g = \frac{T}{W_e L}\right)$

$\bar{T}_n$ = แรงดึงประสิทธิผลของเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว แบบไร้หน่วย $\left(\bar{T}_n = \frac{T}{q_x L}\right)$

$\hat{t}, \hat{n}, \hat{b}$ = เวคเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตามแนวแกน t, n, b

u_s = ขนาดความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\hat{t}$

V_N = เวคเตอร์ความเร็วกระแสน้ำในแนวตั้งฉากกับเคเบิล

V_T = เวคเตอร์ความเร็วกระแสน้ำในแนวสัมผัสกับเคเบิล

V_x = องค์ประกอบความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\bar{i}$

V_y = องค์ประกอบความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\bar{j}$

V_z = องค์ประกอบความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\bar{k}$

V_r = องค์ประกอบความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\bar{e}_r$

V_θ = องค์ประกอบความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\bar{e}_\theta$

V_{cx} = องค์ประกอบของความเร็วของกระแสน้ำคงที่ในทิศทาง $\bar{i}$

V_{cy} = องค์ประกอบของความเร็วของกระแสน้ำคงที่ในทิศทาง $\bar{j}$

V_{cz} = องค์ประกอบของความเร็วของกระแสน้ำคงที่ในทิศทาง $\bar{k}$

V_{lx} = องค์ประกอบของความเร็วของกระแสน้ำแปรเปลี่ยนตามความลึกในทิศทาง $\bar{i}$

V_{Ly} = องค์ประกอบของความเร็วของกระแสน้ำแปรเปลี่ยนตามความลึกในทิศทาง $\bar{j}$

$\overline{V}$ = เวคเตอร์ความเร็วของกระแสน้ำ

$\overline{V}_x$ = ความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\bar{i}$ แบบไร้หน่วย $\left(\overline{V}_x = \frac{V_x}{\sqrt{gL}}\right)$

$\overline{V}_y$ = ความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\bar{j}$ แบบไร้หน่วย $\left(\overline{V}_y = \frac{V_y}{\sqrt{gL}}\right)$

v_s = ขนาดความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\hat{n}$

W_c = น้ำหนักของเคเบิลในอากาศ ต่อหน่วยความยาวของเคเบิลขณะที่ยังไม่เกิดความเครียด $(\varepsilon_0 = 0)$

W_e = น้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ต่อหน่วยความยาวของเคเบิลขณะที่ยังไม่เกิดความเครียด $(\varepsilon_0 = 0)$

W_{e0} = น้ำหนักประสิทธิผลของเคเบิล ต่อหน่วยความยาวของเคเบิลขณะที่เกิดความเครียด $(\varepsilon_0 \neq 0)$

w_s = ขนาดความเร็วของกระแสน้ำในทิศทาง $\hat{b}$

z_0 = ความลึกของเคเบิล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

$\overline{z}_0$ = ความลึกของเคเบิล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา แบบไร้หน่วย $\left(\overline{z}_0 = \frac{z_0}{L}\right)$

z_H = ความลึกของเคเบิล

θ_0 = ตำแหน่งการวางตัวตามแนวแกน θ

θ_H = มุมระหว่างแกน x กับระยะห่างปลายบนกับปลายล่างตามแนวราบ

ϕ = มุมระหว่างแกน x กับโปรเจคชันของเวคเตอร์ $\hat{t}$ ในระนาบ $x-y$

ϕ_B = ค่ามุม ϕ ที่ปลายล่างของเคเบิล

ϕ_H = ค่ามุม ϕ ที่ปลายบนของเคเบิล

ψ = มุมระหว่างระนาบ $x-y$ กับเวคเตอร์ $\hat{t}$

ψ_B = ค่ามุม ψ ที่ปลายล่างของเคเบิล

ψ_H = ค่ามุม ψ ที่ปลายบนของเคเบิล

ψ_a = ค่ามุมเอียงของเคเบิลแขวนต่างระดับเทียบกับแนวราบ

β_1 = ตัวแปรไร้หน่วย ในกรณีของเคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป $\left(\beta_1 = \frac{W_c L}{EA}\right)$

β_2 = ตัวแปรไร้หน่วย ในกรณีของเคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว $\left(\beta_2 = \frac{q_x L}{EA}\right)$

ε_0	=	ความเครียดในแนวแกน ณ ตำแหน่งสมดุล
ε_i	=	ความเครียดทางขวาง ณ ตำแหน่งสมดุล
ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำทะเล
ν	=	อัตราส่วนปัวซอง

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Bisection method	=	ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง
Bottom end	=	ปลายล่าง
Boundary condition	=	เงื่อนไขขอบเขต
Catenary marine cables	=	เคเบิลใต้ทะเลภายใต้น้ำหนักกระทำของตัวเอง
Closed-form solution	=	คำตอบที่มีรูปแบบแน่นอน
Critical state	=	สภาวะวิกฤต
Critical tension	=	แรงดึงวิกฤต
Cylindrical coordinates	=	พิกัดทรงกระบอก
Differential equation	=	สมการอนุพันธ์
Dimensionless	=	ไร้หน่วย
Drag force	=	แรงลาก
Effective tension	=	แรงดึงประสิทธิผล
Effective weight	=	น้ำหนักประสิทธิผล
Equilibrium equation	=	สมการสมดุล
General marine cables	=	เคเบิลใต้ทะเลแบบทั่วไป
Geometry of element equation	=	สมการเรขาคณิตของชิ้นส่วนย่อย
Horizontal uniformly drag force	=	แรงลากคงที่ในแนวราบ
Hydrostatic pressure	=	แรงดันน้ำสถิต
Inclined cable	=	เคเบิลแขวนต่างระดับ
Initial value problem	=	ปัญหาขอบเขตเริ่มต้น
Neutrally buoyant marine cables	=	เคเบิลใต้ทะเลแบบสะเทินลอยตัว
Nonlinear differential equation	=	สมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น
Nonlinear finite element method	=	วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น
Nonlinear governing equation	=	สมการครอบคลุมปัญหาแบบไม่เชิงเส้น
Numerical method	=	ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
Ordinary differential equation	=	วิธีการเชิงอนุพันธ์สามัญ
Runge-Kutta method	=	ระเบียบวิธีรุงเง-คุตตา
Shooting method	=	ระเบียบวิธียิงเป้า
Stable equilibrium state	=	สภาวะสมดุลแบบมีเสถียรภาพ
Strain definition	=	นิยามความเครียด

Strained arc-length	=	ความยาวส่วนโค้งขณะเกิดความเครียด
Tolerance	=	ความคลาดเคลื่อน
Top end	=	ปลายบน
Towed cable	=	เคเบิลลากจูง
Two-point boundary value problem	=	ปัญหาแบบเงื่อนไขขอบเขตสองจุด
Unstable equilibrium state	=	สภาวะสมดุลแบบไร้เสถียรภาพ
Unstrained arc-length	=	ความยาวส่วนโค้งขณะยังไม่เกิดความเครียด
Variational method	=	วิธีการแปรผัน