

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการ	19
ผลและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวจากการวิเคราะห์
2	หน่วยแรงในแนวดิ่ง
3	หน่วยแรงในแนวราบ
4	หน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลัก
5	หน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลัก
6	ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวจากการวิเคราะห์เมื่อรวมอิทธิพลจากสิ่งก่อสร้างที่ฐาน และโดยรอบ
7	ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวจากการวิเคราะห์เมื่อรวมอิทธิพลจากสิ่งก่อสร้างที่ฐาน และโดยรอบ และอิทธิพลจากชั้นดิน
8	การเอียงของโครงสร้างในทิศเหนือ-ใต้ ตามแนวแกนของโครงสร้าง
9	การเอียงของโครงสร้างในทิศตะวันออก-ตะวันตก ตามแนวแกนของโครงสร้าง
10	ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวจากการวิเคราะห์เมื่อรวมอิทธิพลจากสิ่งก่อสร้างที่ฐาน และ โดยรอบ อิทธิพลจากชั้นดิน และการเสียหายเนื่องจากการเอียงของโครงสร้าง
11	การเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g
12	การเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g
13	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g
14	หน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์ และน้ำหนักขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g
15	หน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์ และน้ำหนักขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g
16	การเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g
17	การเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g	66
19	หน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์และน้ำหนักขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g	71
20	หน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์และน้ำหนักขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g	72
21	การเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	74
22	การเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	74
23	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	74
24	หน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์และน้ำหนักขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	79
25	หน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์และน้ำหนักขององค์เจดีย์ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	80
26	หน่วยแรงเนื่องจากแรงพลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้นจากหน่วยแรงภายใต้น้ำหนักขององค์เจดีย์	81
ตารางผนวกที่		
1	ความเร่งของถนนจากการตรวจวัดการสั่นไหว	86

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 รูปร่างสัณฐานของเจดีย์ทรงปรางค์	2
2 เจดีย์ประธานทรงปรางค์วัดวรเชษฐเทพบำรุง	3
3 การติดตั้งเครื่องมือในการหารูปแบบการสั่นไหว	12
4 โครงสร้างหลายอันดับความอิสระ	13
5 การตอบสนองของระบบการสั่นไหวอิสระ	15
6 อิลิเมนต์ชนิดต่างๆ	16
7 กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์	16
8 แรงกระทำและการเคลื่อนที่บนวัตถุ	17
9 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดที่ระดับ 9 เมตร ตามแนวแกนของโครงสร้าง	20
10 การตรวจวัดการสั่นไหวของโครงสร้าง	21
11 บริเวณช่องเปิด และช่องกลวงภายใน	22
12 แบบที่ได้รับจากกรมศิลปากร	22
13 แบบจำลองเจดีย์ประธานที่ใช้ในการวิเคราะห์	23
14 แบบจำลองที่ทำการต่อเติมฐานและสิ่งก่อสร้างโดยรอบ	24
15 แพลนแสดงตำแหน่งการเจาะสำรวจดิน	25
16 แสดงลักษณะชั้นดิน และค่ามาตรฐานการตอกทะลวง (Standard Penetration Test)	25
17 แบบจำลองที่ทำการต่อเติมฐาน สิ่งก่อสร้างโดยรอบ และชั้นดิน	26
18 การสำรวจการเอียงขององค์เจดีย์	27
19 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุที่ใช้ใน การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น	28
20 บริเวณที่ตั้งของวัดวรเชษฐเทพบำรุง	29
21 การตรวจวัดการสั่นไหวของถนน	29
22 แบบจำลองรูปร่างอย่างง่ายขององค์เจดีย์	30
23 แรงที่กระทำตามแนวนอนในแบบจำลอง	30
24 แรงสูงสุดประมาณ 0.3 ตัน ที่ทำให้การตอบสนองสูงสุด ของถนนประมาณ 0.01g	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ผลตอบสนองสูงสุดของถนนประมาณ 0.01g (เมตร/วินาที ² – วินาที)	31
26	การตอบสนองของแนวถนนในแบบจำลอง ความถี่อยู่ในช่วง 5 Hz – 25 Hz	32
27	แรงสูงสุดประมาณ 3 ดัน ที่ทำให้การตอบสนองสูงสุดของถนน ประมาณ 0.1g	33
28	ผลตอบสนองสูงสุดของถนนประมาณ 0.1g (เมตร/วินาที ² – วินาที)	33
29	แรงสูงสุดประมาณ 6 ดัน ที่ทำให้การตอบสนองสูงสุดของถนน ประมาณ 0.2g	34
30	ผลตอบสนองสูงสุดของถนนประมาณ 0.2g (เมตร/วินาที ² – วินาที)	34
31	สเปกตรัมของฟูเรียร์แอมพลิจูดจากหัววัดที่ 1	35
32	สเปกตรัมของฟูเรียร์แอมพลิจูดจากหัววัดที่ 2	36
33	ความต่างเฟสระหว่างหัววัดที่ 1 กับ 2	36
34	การสั่นอิสระของโครงสร้างที่ความถี่ 2.2952 Hz	37
35	รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 3.0984 Hz	39
36	รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 9.5208 Hz	39
37	รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 11.1328 Hz	40
38	รูปแบบการสั่นไหวที่ 6 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 12.6770 Hz	40
39	รูปแบบการสั่นไหวที่ 7 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 20.7805 Hz	41
40	รูปแบบการสั่นไหวที่ 9 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 22.8099 Hz	41
41	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวดิ่ง (กก/ซม ²)	44
42	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงในแนวดิ่ง (กก/ซม ²)	44
43	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบ (กก/ซม ²)	45
44	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบ (กก/ซม ²)	45
45	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลัก (กก/ซม ²)	46
46	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลัก (กก/ซม ²)	46
47	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลัก (กก/ซม ²)	47
48	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลัก (กก/ซม ²)	47
49	รูปแบบการสั่นไหวด้านข้างที่ 1 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 3.0786 Hz	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.4444 Hz	50
51	รูปแบบการสั่นไหวด้านข้างที่ 2 ขององค์เจดีย์ ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.5336 Hz	50
52	รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.9036 Hz	51
53	รูปแบบการสั่นไหวที่ 8 ของชั้นดิน ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 3.4925 Hz	51
54	การเอียงของโครงสร้างทั้งสองทิศทาง	53
55	แสดงบริเวณที่เกิดการเสียหายภายในโครงสร้าง	53
56	รูปแบบการสั่นไหวด้านข้างที่ 1 ขององค์เจดีย์ ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.1441 Hz	55
57	รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.4821 Hz	55
58	รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.8931 Hz	56
59	รูปแบบการสั่นไหวที่ 8 ของชั้นดิน ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 3.4975 Hz	56
60	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g (เมตร – วินาที)	58
61	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g (เมตร – วินาที)	58
62	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางแกนดิ่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g (เมตร – วินาที)	59
63	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g (เมตร – วินาที)	59
64	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g (เมตร – วินาที)	60
65	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางแกนดิ่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g (เมตร – วินาที)	60
66	ตำแหน่งการเคลื่อนที่บนสุดและล่างสุดที่พิจารณา	61
67	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
68	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g	62
69	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางแกนนั่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g	63
70	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g และน้ำหนักขององค์เจดีย์ (กก/ชม ²)	64
71	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.01g และน้ำหนักขององค์เจดีย์ (กก/ชม ²)	65
72	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g (เมตร – วินาที)	67
73	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g (เมตร – วินาที)	67
74	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางแกนนั่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g (เมตร – วินาที)	68
75	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g (เมตร – วินาที)	68
76	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g (เมตร – วินาที)	69
77	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางแกนนั่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g (เมตร – วินาที)	69
78	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g	70
79	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g	70
80	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางแกนนั่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
81	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g และน้ำหนักขององค์เจดีย์ (กก/ชม ²)	72
82	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.1g และน้ำหนักขององค์เจดีย์ (กก/ชม ²)	73
83	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g (เมตร – วินาที)	75
84	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g (เมตร – วินาที)	75
85	การเคลื่อนที่ตำแหน่งบนสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางแกนดิ่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g (เมตร – วินาที)	76
86	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g (เมตร – วินาที)	76
87	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g (เมตร – วินาที)	77
88	การเคลื่อนที่ตำแหน่งล่างสุดขององค์เจดีย์ในทิศทางแกนดิ่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g (เมตร – วินาที)	77
89	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางตะวันออก – ตะวันตก เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	78
90	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางเหนือ – ใต้ เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	78
91	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่งบนสุดและล่างสุดในทิศทางแกนดิ่ง เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g	79
92	แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดในแนวแกนหลักเนื่องจากแรงพลศาสตร์เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g และน้ำหนักขององค์เจดีย์ (กก/ชม ²)	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 93 แผนภูมิภาพตัดแสดงค่าหน่วยแรงต่ำสุดในแนวแกนหลักเนื่องจาก
แรงพลศาสตร์เมื่อถนนมีการตอบสนอง 0.2g และน้ำหนักของ
องค์เจดีย์ (กก/ชม²)

81