

บทที่ 4 ผลการศึกษา

การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

4.1 ค่าคาบธรรมชาติจากการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

งานวิจัยในส่วนของการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร มีเป้าหมายในการนำค่าที่ได้ไปพัฒนาเป็นค่าที่แนะนำสำหรับการออกแบบอาคารในประเทศ โดยโครงการวิจัยในระยะที่ 1¹ ที่ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้วก่อนหน้านี้ได้ดำเนินการตรวจวัดกับอาคารในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 50 หลัง ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 5 ถึง 54 ชั้นและความสูง 20-210 เมตร และในการดำเนินการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาสำหรับอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ที่ตั้งอยู่บนชั้นดินที่มีสภาพแตกต่างกันไปจากบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งจากการพิจารณาเบื้องต้นพบว่า ความสูงของอาคารทั้งหมดในจังหวัดเชียงใหม่ไม่เกิน 70 เมตร และข้อมูลที่ตรวจวัดอาคารที่ดำเนินไปแล้วในกรุงเทพมหานครที่มีความสูงไม่เกิน 70 เมตรมีประมาณเพียง 30 หลัง ดังนั้นเพื่อให้ข้อมูลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มอาคารทั้งสองมีปริมาณข้อมูลใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้จึงขยายขอบเขตการศึกษาโดยการเก็บข้อมูลอาคารเพิ่มเติมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลอีก 20 หลัง ทำให้ข้อมูลการศึกษาดังกล่าวมีจำนวนอาคารทั้งหมดรวม 121 หลัง โดยเป็นอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 70 หลัง และอาคารในเขตจังหวัดเชียงใหม่จำนวน 51 หลัง ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลขนาด ความสูงและลักษณะการใช้งานของอาคาร แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 สำหรับอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และตารางที่ 4.2 สำหรับอาคารในเขตจังหวัดเชียงใหม่ ข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 สำหรับอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลและอาคารในเขตจังหวัดเชียงใหม่ ตามลำดับ โดยประกอบด้วย ค่าคาบธรรมชาติในทิศทางเคลื่อนที่ใน 2 แกนที่ตั้งฉากกัน (Transverse and Longitudinal directions) และแนวการบิด (Torsion) ของรูปแบบการสั่นไหวลำดับที่ 1 และบางอาคารสามารถวิเคราะห์ได้ค่าสำหรับรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 และ 3 ได้ด้วย สัญลักษณ์ N.A. สำหรับข้อมูลลักษณะอาคารแสดงถึงไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ เนื่องจากอาคารมีรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอหรือไม่สามารถทำการเก็บข้อมูลได้จากข้อจำกัดในการทำงาน และสัญลักษณ์ N.A. สำหรับข้อมูลค่าคาบธรรมชาติ แสดงถึงการที่ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าสำหรับรูปแบบการสั่นไหวนั้นได้

¹ งานวิจัยเรื่อง “การตรวจวัดและศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร” ทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย พ.ศ. 2545-2547 โดย รองศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย และรองศาสตราจารย์ ดร. นคร กูว์โรดม

ตารางที่ 4.1 ขนาด ความสูงและลักษณะการใช้งานของอาคารในกรุงเทพมหานคร

อาคารที่	ชั้น	สูง	ขนาดอาคาร		ลักษณะการใช้งาน
		(m.)	Trans.	Long.	
1	33	110	N.A	N.A	สำนักงาน
2	26	100	33	33	สำนักงาน
3	25	105.7	36.6	36.6	สำนักงาน
4	29	113.8	23.7	32.7	สำนักงาน
5	32	128.0	22.4	65	สำนักงาน
6	36	128.0	38.2	43.8	สำนักงาน
7	32	140.1	33	45	สำนักงาน
8	41	150	27	45	สำนักงาน
9	8	21	11.2	13.2	ที่พักอาศัย
10	8	22.6	13.1	30.3	ที่พักอาศัย
11	5	22.8	16.9	41.4	อาคารปฏิบัติการ
12	11	34	35	68	ที่พักอาศัย
13	12	40.7	36.8	76.8	ที่พักอาศัย
14	15	50	25	52.5	ที่พักอาศัย
15	14	51.4	24	28.2	ที่พักอาศัย
16	18	57.6	21	37	ที่พักอาศัย
17	18	61.4	41.2	41.2	สำนักงาน
18	19	64.6	23	40	สำนักงาน
19	22	66.5	32	111.5	สำนักงาน
20	23	72	16	32	โรงแรม
21	23	80	27.5	50	ที่พักอาศัย
22	20	70	26	33	สำนักงาน
23	23	68.6	33.5	36.5	ที่พักอาศัย
24	12	48.6	20	25.2	สำนักงาน

25	27	88.4	34	37.7	สำนักงาน
26	32	130.5	41.9	41.9	สำนักงาน
27	42	149	15.5	15.5	โรงแรม
28	24	76.1	18.5	34	ที่พักอาศัย
29	27	84	17	49	ที่พักอาศัย
30	22	94	31	38	อาคารเรียน
31	13	36.7	16	85	ที่พักอาศัย
32	8	28	16	35	ที่พักอาศัย
33	7	22.4	12.7	68	ที่พักอาศัย
34	22	77	25.5	46.5	สำนักงาน
35	12	36	26.7	70.6	ที่พักอาศัย
36	12	33.7	16.5	72.1	ที่พักอาศัย
37	18	58.1	30.5	36	สำนักงาน
38	17	60.1	12.2	25.1	สำนักงาน
39	20	64	22.4	31.5	สำนักงาน
40	19	57	24.9	40.4	สำนักงาน
41	30	105	20.8	46.4	สำนักงาน
42	35	123.1	20	52.8	สำนักงาน
43	12	36	27	75	ที่พักอาศัย
44	11	35.4	27	35.7	ที่พักอาศัย
45	54	210.4	35.1	38.2	สำนักงาน
46	27	95	25.5	30.3	สำนักงาน
47	35	122.6	13.2	25.8	ที่พักอาศัย
48	35	122.6	13.2	25.8	ที่พักอาศัย
49	19	80	24.5	44.1	สำนักงาน
50	32	111.7	13.2	25.8	สำนักงาน
51	○	132	8.3	8.3	สำนักงาน*
52	8	24	14.5	10.2	ที่พักอาศัย
53	5	15.5	35.8	14.4	ตึกแถว

54	5	19	19	15.6	ที่พักอาศัย
55	4	15	42.6	8	ที่พักอาศัย
56	5	17	26	13	ที่พักอาศัย
57	5	16	18	15	ที่พักอาศัย
58	7	30	70	19	สำนักงาน
59	7	24	70	19	สำนักงาน
60	7	24	32	15	ที่พักอาศัย
61	8	24	40	10.2	ที่พักอาศัย
62	8	24	67.5	11.4	ที่พักอาศัย
63	7	21	30	15	ที่พักอาศัย
64	9	28	32	10	ที่พักอาศัย
65	8	25	24	14	ที่พักอาศัย
66	7	26	20	8	สำนักงาน
67	9	30	36	17	ที่พักอาศัย
68	8	28	27	12	ที่พักอาศัย
69	6	22	20	14	ที่พักอาศัย
70	8	28	42	16	ที่พักอาศัย

*หมายเหตุ อาคารที่ 51 มีรูปตัดเป็นวงกลม และเป็นอาคารหอตรวจการ จึงไม่มีชั้นเหมือนกับอาคารทั่วไป

ตารางที่ 4.2 ขนาด ความสูงและลักษณะการใช้งานของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

อาคารที่	ชั้น	สูง	ขนาดอาคาร		ลักษณะการใช้งาน
		(m.)	Trans.	Long.	
1	10	35.2	49.9	50.3	อาคารเรียน
2	5	16.0	12.0	24.0	โรงแรม
3	16	48.0	23.0	51.0	โรงแรม
4	10	29.0	31.0	34.0	ที่พักอาศัย
5	12	42.2	32.0	46.0	อาคารเรียน
6	7	21.0	15.8	26.0	โรงแรม

7	9	26.8	14.7	29.0	โรงแรม
8	9	25.5	18.0	70.0	โรงแรม
9	8	26.5	24.2	40.2	อาคารเรียน
10	6	17.5	12.0	33.0	อาคารเรียน
11	5	14.0	12.0	47.5	อาคารเรียน
12	9	23.0	21.5	22.9	ที่พักอาศัย
13	17	51.3	49.2	58.3	โรงพยาบาล
14	5	14.5	13.7	40.0	อาคารเรียน
15	16	45.2	24.5	50.0	อาคารเรียน
16	7	21.5	14.2	42.5	อาคารเรียน
17	9	32.0	19.6	64.6	อาคารเรียน
18	11	40.5	19.0	60.0	อาคารเรียน
19	9	23.5	12.0	28.0	ที่พักอาศัย
20	5	13.0	14.0	50.0	อาคารเรียน
21	8	22.5	15.5	38.8	ที่พักอาศัย
22	14	41.3	26.0	36.0	อาคารเรียน
23	17	63.0	20.0	64.0	โรงพยาบาล
24	6	16.5	14.5	62.0	อาคารเรียน
25	5	15.2	11.5	59.0	อาคารเรียน
26	5	13.0	11.5	69.0	อาคารเรียน
27	9	22.4	17.0	33.0	ที่พักอาศัย
28	9	22.4	17.0	33.0	ที่พักอาศัย
29	14	40.8	N.A	N.A	ที่พักอาศัย
30	19	60.2	N.A	N.A	ที่พักอาศัย
31	16	56.0	N.A	N.A	โรงแรม
32	10	38	N.A	N.A	อาคารเรียน
33	8	24.3	16.1	39.8	ที่พักอาศัย
34	8	24.4	16.9	28.1	ที่พักอาศัย
35	8	21.0	16.9	27.9	ที่พักอาศัย

36	17	56.6	N.A	N.A	โรงแรม
37	16	50.0	16.0	52.5	โรงแรม
38	8	24.40	18.3	55.1	โรงแรม
39	11	31.2	18.0	70.0	ที่พักอาศัย
40	5	14.0	12.6	30.4	ที่พักอาศัย
41	6	26.3	12.5	72.6	อาคารเรียน
42	7	21.2	35.7	35.7	อาคารเรียน
43	5	20.2	14.3	52.3	อาคารเรียน
44	4	16.0	10.2	30.0	อาคารเรียน
45	10	28.5	17.8	60.4	ที่พักอาศัย
46	10	28.5	17.8	60.4	ที่พักอาศัย
47	4	12.8	8.0	38.0	ที่พักอาศัย
48	5	22.2	32.0	36.0	สำนักงาน
49	5	14.9	16.0	44.0	ที่พักอาศัย
50	5	17.4	25.0	64.0	ที่พักอาศัย
51	22	67.4	19.5	39.8	โรงแรม

ตารางที่ 4.3 ค่าคาบธรรมชาติของอาคาร (วินาที) ของอาคารในกรุงเทพมหานคร

อาคาร ที่	ค่าคาบธรรมชาติ								
	Mode 1			Mode 2			Mode 3		
	Tran.	Long.	Tor.	Tran.	Long.	Tor.	Tran.	Long.	Tor.
1	2.27	2.63	1.82	0.71	0.78	0.63	N.A	N.A	N.A
2	2.04	1.52	1.61	0.67	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
3	1.69	1.54	0.9	0.5	0.37	N.A	N.A	N.A	N.A
4	2.04	1.54	1.23	0.69	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
5	3.57	2.22	N.A	0.88	0.75	N.A	N.A	N.A	N.A
6	2.86	2.44	N.A	0.72	0.75	N.A	N.A	N.A	N.A
7	2.86	2.63	1.54	0.83	0.85	N.A	N.A	N.A	N.A
8	3.13	2.7	2.04	0.85	0.85	0.63	N.A	N.A	N.A

9	0.4	0.3	0.15	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
10	0.39	0.33	0.27	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
11	0.45	0.4	0.36	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
12	0.72	0.64	0.57	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
13	0.85	0.79	0.74	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
14	0.9	1.06	0.72	0.23	0.28	N.A	N.A	N.A	N.A
15	0.97	1.02	0.7	0.33	0.3	N.A	N.A	N.A	N.A
16	0.85	1.18	0.79	N.A	0.31	N.A	N.A	N.A	N.A
17	1.22	1.03	0.61	0.37	0.34	0.21	N.A	N.A	N.A
18	1.32	1.35	0.89	0.32	0.38	0.28	N.A	0.2	N.A
19	1.39	1.23	1.3	0.32	0.34	0.39	0.23	0.17	N.A
20	1.05	1.28	0.7	N.A	0.47	N.A	N.A	0.28	N.A
21	1.33	1.14	1.06	0.38	0.36	0.34	0.18	0.17	0.19
22	1.25	1.22	0.78	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
23	N.A	1.49	1.28	N.A	0.4	0.36	N.A	N.A	0.18
24	0.83	0.94	N.A						
25	1.89	2.17	1.45	0.51	0.56	0.4	N.A	0.3	N.A
26	2.27	2.33	1.67	0.72	0.69	0.5	N.A	N.A	N.A
27	2.08	2.08	1.03	0.56	0.57	0.36	N.A	N.A	N.A
28	1.59	1.22	0.93	0.46	0.35	0.28	0.2	0.18	0.16
29	1.75	1.22	1.08	0.49	0.39	0.34	N.A	N.A	N.A
30	1.69	1.79	1.32	N.A	N.A	0.42	N.A	N.A	0.23
31	0.58	0.53	N.A						
32	0.45	0.38	0.35	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
33	0.37	0.37	N.A						
34	1.92	1.85	1.75	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
35	0.88	1	N.A						
36	0.54	0.65	N.A						
37	1.14	1.3	0.93	0.26	0.33	0.29	N.A	N.A	N.A

38	1.18	1.23	0.72	N.A	0.3	N.A	N.A	N.A	N.A
39	1.1	1.2	0.87	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
40	1.23	1.28	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
41	2.04	2.08	1.16	0.46	0.51	0.3	N.A	N.A	N.A
42	3.03	1.75	2.08	0.91	0.6	0.82	N.A	N.A	N.A
43	0.88	1	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
44	0.74	0.93	0.56	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
45	4	3.23	2.33	1.16	0.96	0.79	0.61	0.56	0.45
46	2.86	1.52	1.89	0.79	0.49	0.59	0.36	N.A	0.31
47	2.86	2.17	1.49	0.71	0.63	0.44	N.A	N.A	N.A
48	2.63	2.08	1.43	0.7	0.62	0.42	N.A	N.A	N.A
49	1.3	1.06	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
50	1.89	1.85	1.11	0.51	0.54	0.4	N.A	N.A	N.A
51	3.906	3.906	0.369	0.624	0.624	N.A	0.216	0.216	N.A
52	0.46	0.40	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
53	0.33	0.24	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
54	0.36	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
55	0.36	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
56	0.33	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
57	0.33	0.29	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
58	0.71	0.50	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
59	0.56	0.50	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
60	0.67	0.45	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
61	0.67	0.53	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
62	0.71	0.56	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
63	0.33	0.30	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
64	0.53	0.35	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
65	0.45	0.36	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A

66	0.76	0.29	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
67	0.49	0.40	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
68	0.41	0.29	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
69	0.34	0.24	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
70	0.37	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A

ตารางที่ 4.4 ค่าคาบธรรมชาติของอาคาร (วินาที) ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

อาคาร ที่	ค่าคาบธรรมชาติ					
	Mode 1			Mode 2		
	Tran.	Long.	Tor.	Tran.	Long.	Tor.
1	0.56	0.52	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
2	0.25	0.28	0.20	N.A.	N.A.	N.A.
3	0.74	0.86	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
4	0.49	0.51	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
5	0.56	0.53	0.38	0.17	0.15	N.A.
6	0.45	0.48	0.32	N.A.	0.15	N.A.
7	0.51	0.46	0.33	N.A.	N.A.	N.A.
8	0.56	0.53	N.A.	0.15	N.A.	N.A.
9	0.40	0.52	0.32	N.A.	0.17	N.A.
10	0.35	0.46	0.27	N.A.	N.A.	N.A.
11	0.31	0.45	0.26	N.A.	N.A.	N.A.
12	0.51	0.41	0.35	0.16	N.A.	N.A.
13	0.81	0.78	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
14	0.26	0.24	0.20	N.A.	N.A.	N.A.
15	0.78	0.93	0.65	0.23	0.29	0.20
16	0.38	0.47	0.35	N.A.	0.14	N.A.
17	0.45	N.A.	0.34	N.A.	N.A.	N.A.
18	0.83	0.78	0.61	0.24	N.A.	N.A.

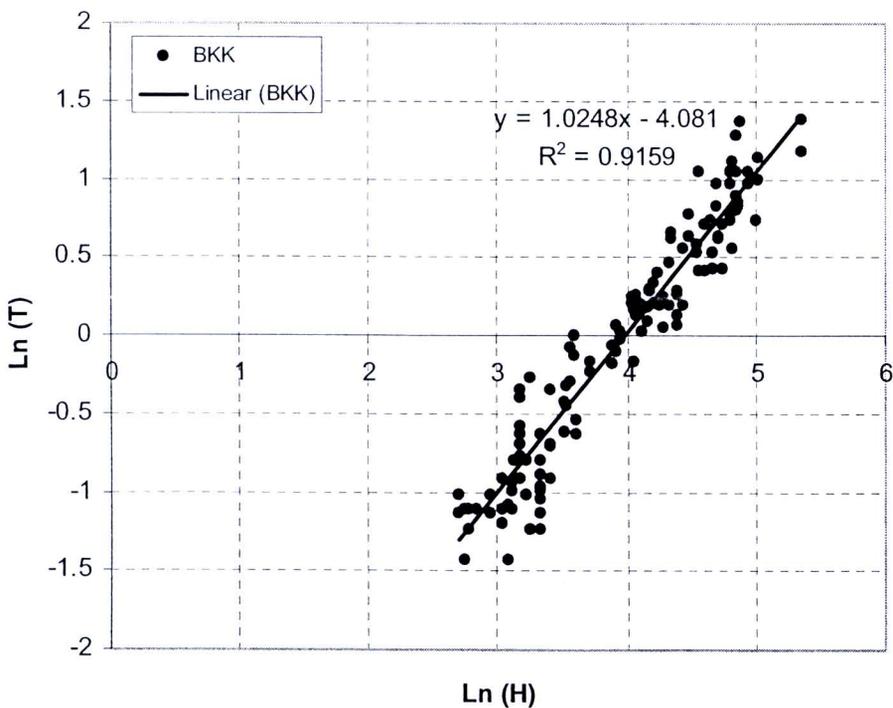
19	0.50	0.46	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
20	0.30	0.26	0.21	N.A.	N.A.	N.A.
21	0.45	0.43	0.36	N.A.	N.A.	N.A.
22	0.71	0.62	0.55	0.22	0.18	0.17
23	0.92	0.92	0.81	N.A.	0.32	N.A.
24	0.30	0.29	0.21	N.A.	N.A.	N.A.
25	0.26	0.33	0.23	N.A.	N.A.	N.A.
26	0.25	0.30	0.22	N.A.	N.A.	N.A.
27	0.41	0.39	0.32	N.A.	N.A.	N.A.
28	0.40	0.39	0.31	N.A.	N.A.	N.A.
29	0.763	0.730	0.610	N.A.	N.A.	N.A.
30	1.053	0.952	1.163	N.A.	N.A.	N.A.
31	1.020	0.694	0.730	N.A.	N.A.	N.A.
32	0.645	0.503	0.602	N.A.	N.A.	N.A.
33	0.43	0.44	0.41	N.A.	0.14	N.A.
34	0.40	0.52	0.37	0.13	0.15	N.A.
35	0.41	0.44	0.35	N.A.	0.14	N.A.
36	1.12	0.88	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
37	0.90	0.74	0.65	N.A.	N.A.	N.A.
38	0.54	0.54	0.41	N.A.	N.A.	N.A.
39	0.89	0.68	0.62	N.A.	N.A.	N.A.
40	0.24	0.29	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
41	0.48	0.55	0.38	N.A.	N.A.	N.A.
42	0.42	0.36	0.30	N.A.	N.A.	N.A.
43	0.42	0.45	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
44	0.24	0.30	0.18	N.A.	N.A.	N.A.
45	0.53	0.53	0.46	N.A.	N.A.	N.A.
46	0.54	0.54	0.45	N.A.	N.A.	N.A.
47	0.12	0.20	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

48	0.43	0.37	0.26	N.A.	N.A.	N.A.
49	0.21	0.29	0.20	N.A.	N.A.	N.A.
50	0.34	0.30	0.29	N.A.	N.A.	N.A.
51	1.19	1.19	0.94	0.38	N.A.	N.A.

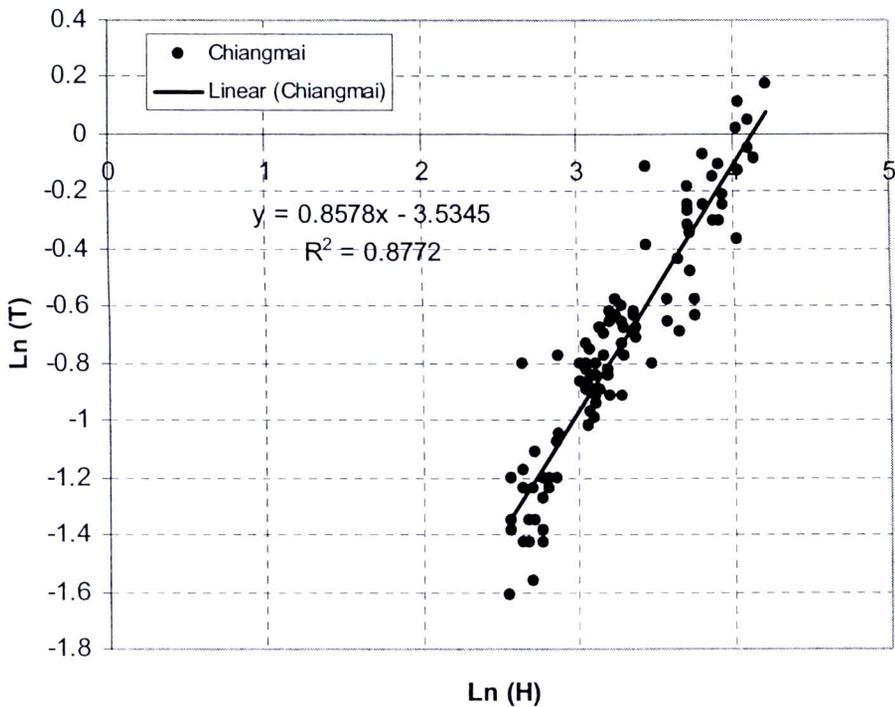
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าคาบธรรมชาติสำหรับประเทศไทย

ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) สำหรับข้อมูลค่าคาบธรรมชาติ สำหรับความสัมพันธ์กับความสูงของอาคาร ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 สำหรับกลุ่มอาคารในกรุงเทพมหานคร จังหวัดเชียงใหม่ และรวมทั้งสองกลุ่มอาคาร ตามลำดับ โดยที่การวิเคราะห์นี้พิจารณาข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารในทิศทางการตัดตัวใน 2 แกนหลักของอาคาร (X และ Y) โดยอาคารหนึ่ง ๆ ใช้ข้อมูลค่าคาบ 2 ค่า จากแต่ละทิศทาง

โดยการวิเคราะห์ Regression ของอาคารใน กทม. ดังรูปที่ 4.1 ได้สมการเส้นตรง $y = 1.0248x - 4.081$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9159 ค่าพารามิเตอร์ α และ β ดังนิยามในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0169 และ 1.0248 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.218 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0136 และ 0.0210 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ

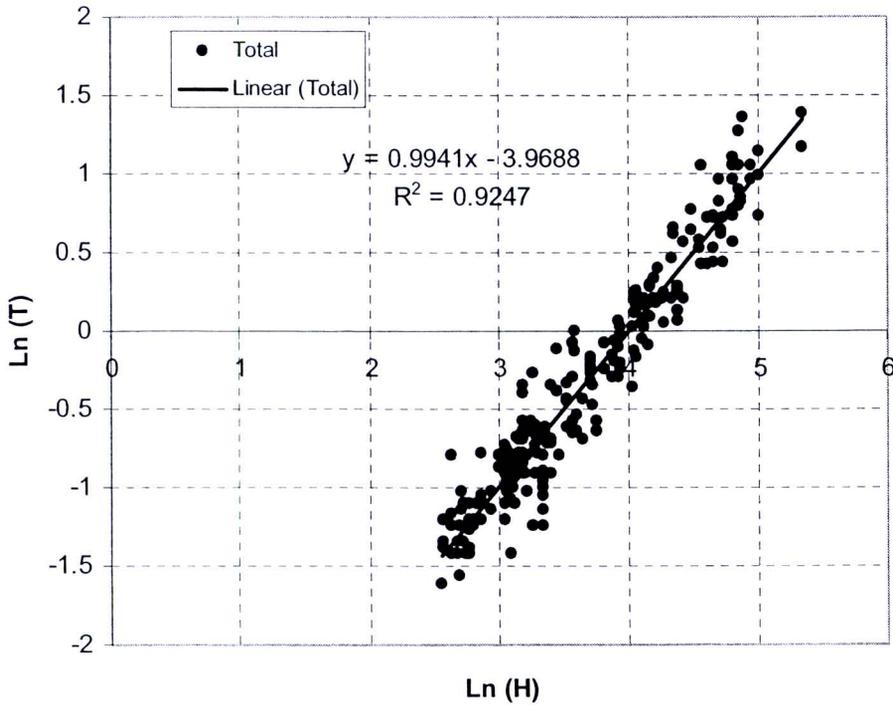


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ Regression ของคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Regression ของคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร จ.เชียงใหม่

ผลการวิเคราะห์ Regression ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ ดังรูปที่ 4.2 ได้สมการเส้นตรง $y = 0.8578 x - 3.5345$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.8772 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ α และ β ตังนียมในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0292 และ 0.8578 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.162 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0248 และ 0.0343 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ



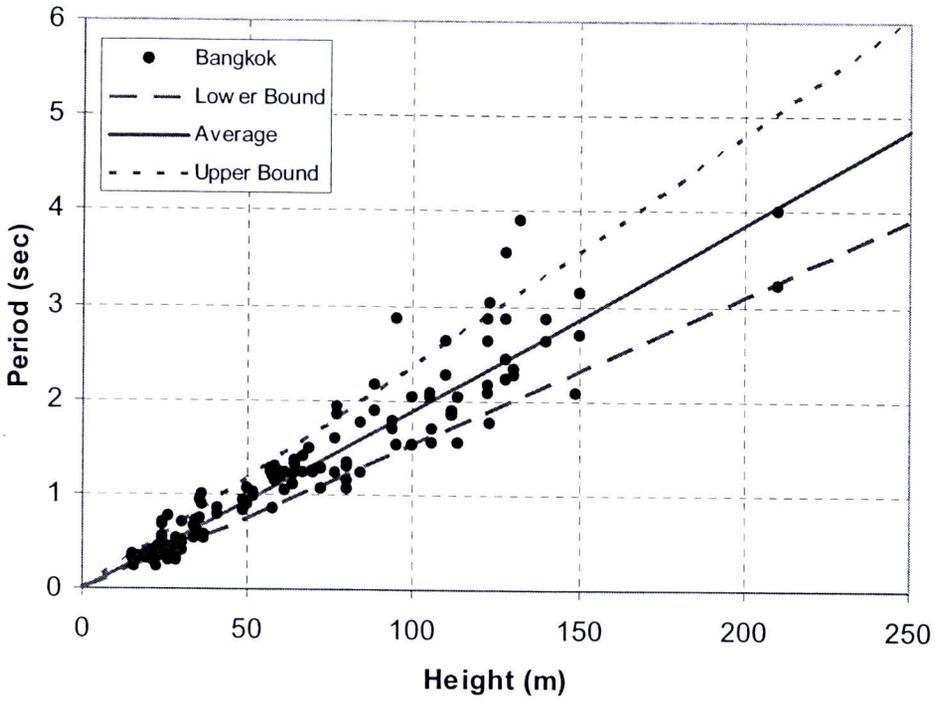
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Regression ของคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ Regression ของอาคารรวมทั้งหมด ดังรูปที่ 4.3 ได้สมการเส้นตรง $y = 0.9941x - 3.9688$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9247 ค่าพจน์ค่าสัมประสิทธิ์ α และ β ดังนิยามในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0189 และ 0.9247 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.197 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0155 และ 0.0230 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ

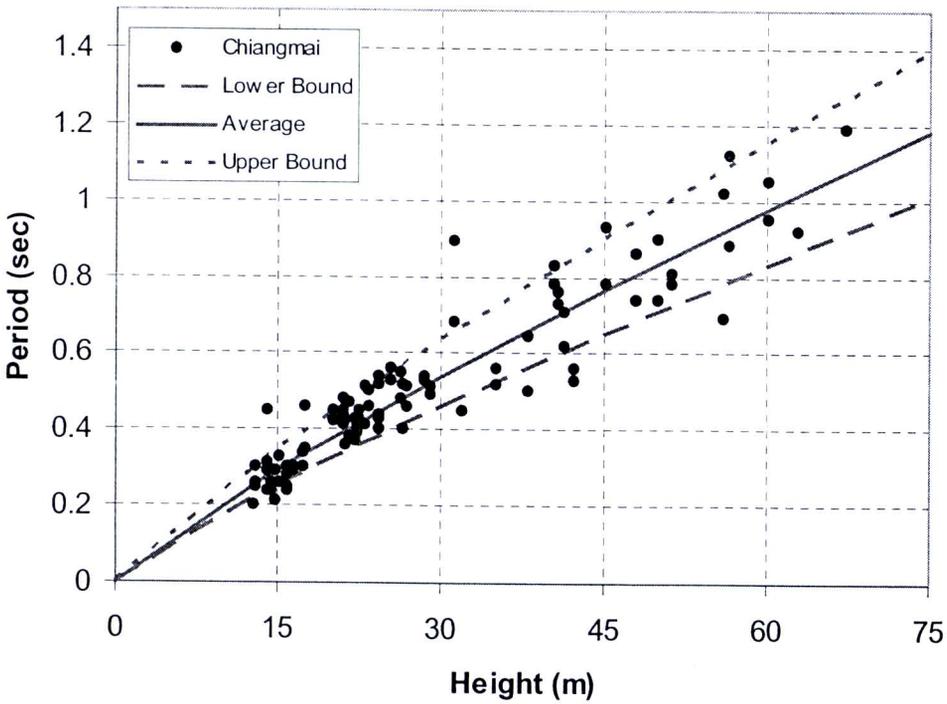
จากข้อมูลผลดังกล่าว สามารถสรุปสมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงผลข้อมูลจากการตรวจวัดและสมการประมาณค่าในรูปแบบ สมการขอบเขตล่าง สมการค่าเฉลี่ย และสมการขอบเขตบน

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติ

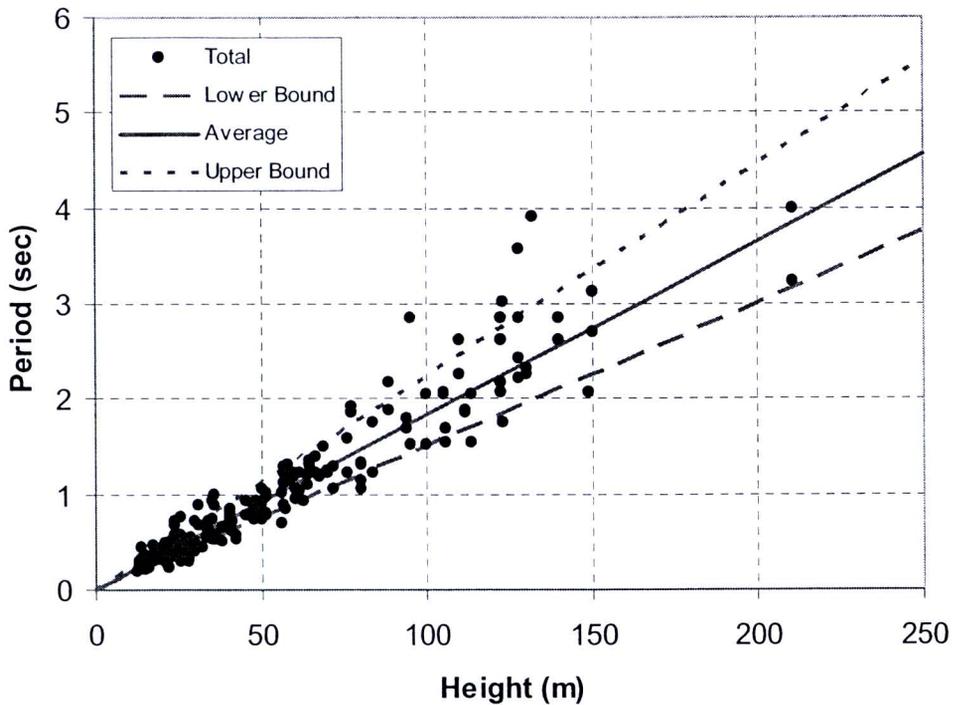
ข้อมูล	สมการค่าคาบธรรมชาติ			
	ขอบเขตล่าง (T_L)	ค่าเฉลี่ย (T_R)	ขอบเขตบน (T_U)	S_e
กทม.	$0.0136H^{1.0248}$	$0.0169H^{1.0248}$	$0.0210H^{1.0248}$	0.218
เชียงใหม่	$0.0248H^{0.8578}$	$0.0292H^{0.8578}$	$0.0343H^{0.8578}$	0.162
รวมทั้งหมด	$0.0155H^{0.9941}$	$0.0189H^{0.9941}$	$0.0230H^{0.9941}$	0.197



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารทั้งหมด

ในการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจากกลุ่มอาคารในกรุงเทพมหานครและจังหวัดเชียงใหม่ เมื่อนำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ Regression มาพิจารณาความแตกต่างได้ดังนี้

สมการการประมาณแบบค่าเฉลี่ยสำหรับกรุงเทพมหานคร

$$T = 0.0169H^{1.0248} \quad (4.1)$$

สมการการประมาณแบบค่าเฉลี่ยสำหรับจังหวัดเชียงใหม่

$$T = 0.0292H^{0.8578} \quad (4.2)$$

สมการการประมาณแบบค่าเฉลี่ยสำหรับอาคารรวมทั้งหมด

$$T = 0.0189H^{0.9941} \quad (4.3)$$

และเมื่อพิจารณาผลความแตกต่างที่ได้จากการใช้สมการเหล่านี้สำหรับอาคารที่มีความสูงต่าง ๆ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.6 และพบว่า ค่าคาบธรรมชาติที่ใช้การประมาณจากสมการของอาคารรวมทั้งหมด (T_{Total}) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการของอาคารในแต่ละพื้นที่ (T_{BKK} สำหรับอาคารในกทม. และ T_{CM} สำหรับอาคารในจังหวัดเชียงใหม่) กล่าวคือ T_{Total} แตกต่างจาก T_{BKK} เพียงประมาณ 2 % สำหรับอาคารที่สูงไม่เกิน 80 เมตร และ T_{Total} แตกต่างจาก T_{CM} เล็กน้อย คือ สำหรับอาคารเตี้ย (ประมาณ 20 เมตร) T_{Total} มีค่าน้อยกว่า T_{CM} ไม่เกิน 3 % และเมื่อ

อาคารมีความสูงมากขึ้น T_{Total} มีค่ามากกว่า T_{CM} โดยสำหรับอาคารสูง 80 เมตร T_{Total} มากกว่า T_{CM} ประมาณ 18 %

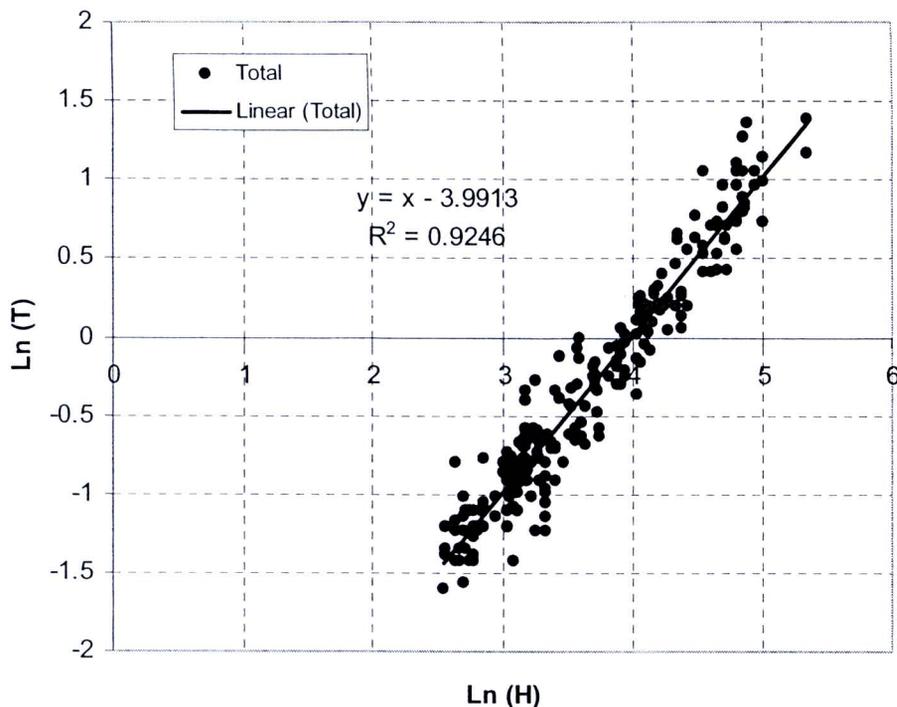
ตารางที่ 4.6 คาบธรรมชาติสำหรับอาคารที่ความสูงต่าง ๆ เมื่อใช้สูตรการประมาณของแต่ละกลุ่มอาคาร

$H(m)$	T_{BKK}	T_{CM}	T_{Total}	T_{Total}/T_{BKK}	T_{Total}/T_{CM}
20	0.364	0.381	0.371	1.020	0.974
40	0.741	0.691	0.740	0.999	1.070
60	1.122	0.979	1.107	0.986	1.131
80	1.507	1.253	1.473	0.978	1.176

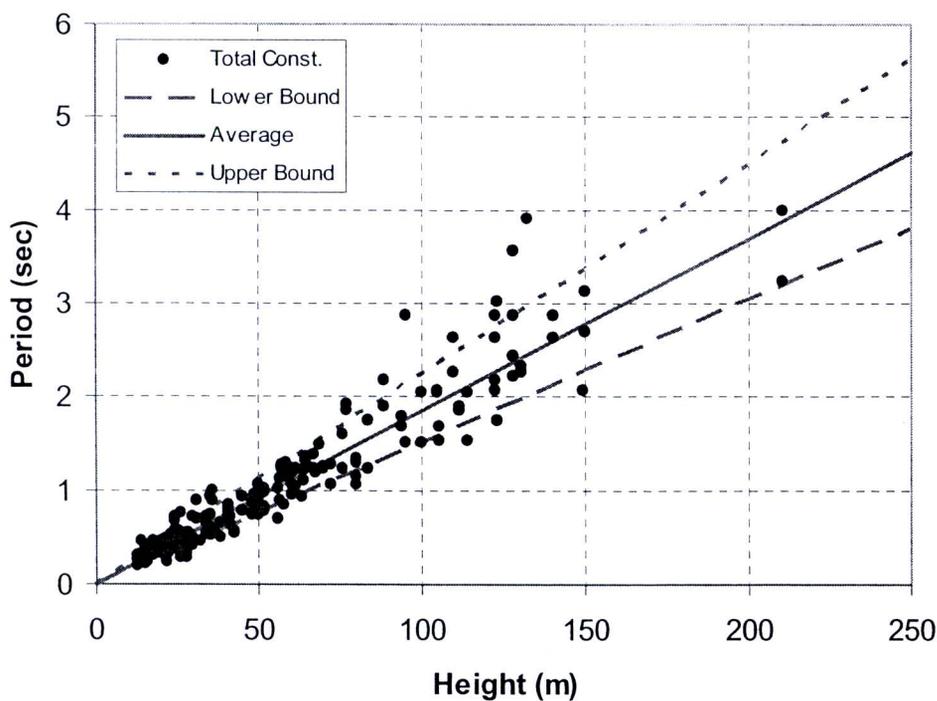
จากผลความแตกต่างที่ได้ พบว่า ความแตกต่างของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติจากอาคารทั้ง 2 กลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอาคารเดี่ยวที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวได้มาก และเพื่อเป็นแนวทางที่สะดวกในการปฏิบัติ จึงควรมีการใช้สมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติเดียวกันสำหรับทั้งสองกลุ่มอาคาร นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมการยกกำลังที่สะดวกต่อการใช้งาน ควรเลือกกำหนดให้ตัวเลขยกกำลังเป็นตัวเลขจำนวนเต็มหรือเลขที่ง่าย โดยสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบมีเงื่อนไข (Constrained Regression) สำหรับข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารรวมทั้งหมดที่มีเลขยกกำลัง 0.9941 การวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบมีเงื่อนไขในขั้นต่อไปเลือกให้เลขยกกำลังมีค่า 1.0 และได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยได้สมการเส้นตรง $y = 1.0x - 3.9913$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9246 ค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์ α และ β ดังนิยามในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0185 และ 1.0 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.197 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0152 และ 0.0225 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ ตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 แสดงผลข้อมูลจากการตรวจวัดและสมการประมาณค่าในรูปแบบ สมการขอบเขตล่าง สมการค่าเฉลี่ย และสมการขอบเขตบน

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติแบบมีเงื่อนไข

ข้อมูล	สมการค่าคาบธรรมชาติ			
	ขอบเขตล่าง (T_L)	ค่าเฉลี่ย (T_R)	ขอบเขตบน (T_U)	S_e
รวมทั้งหมด	$0.0152H$	$0.0185H$	$0.0225H$	0.197

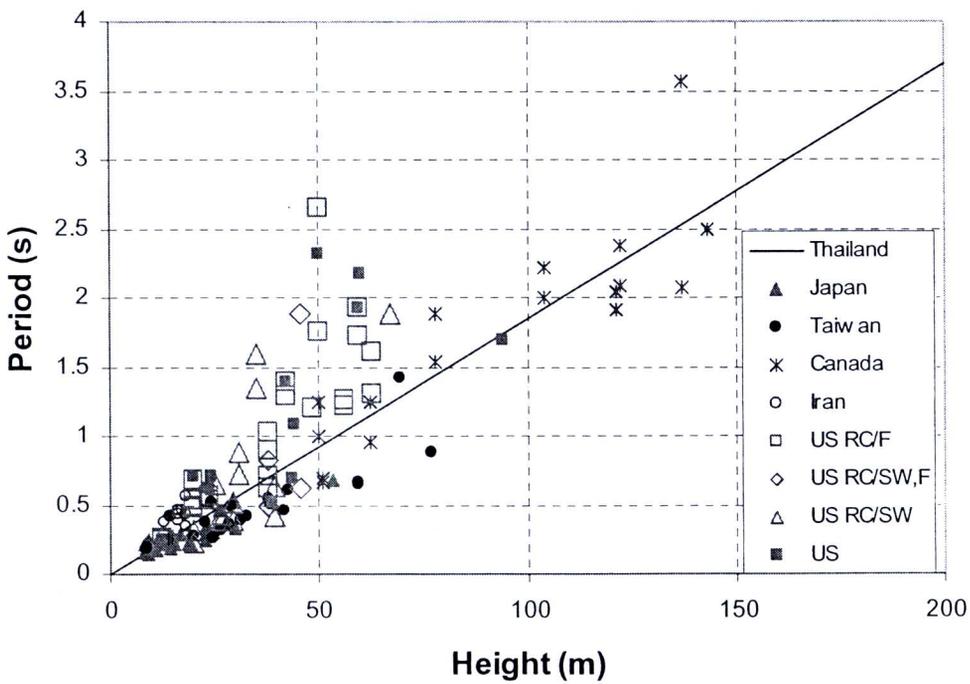


รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ Constrained Regression ($\alpha = 1.0$) สำหรับข้อมูลคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารทั้งหมด

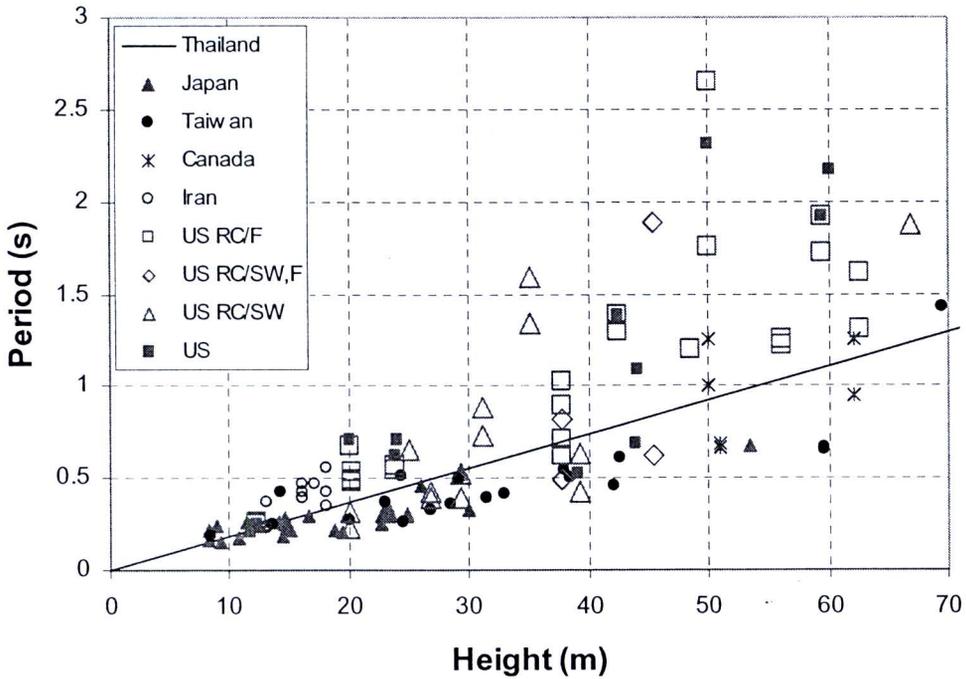


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารทั้งหมดจากการวิเคราะห์ Constrained Regression ($\alpha = 1.0$)

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดในประเทศไทยที่แสดงด้วยสมการค่าเฉลี่ย กับงานวิจัยด้านการตรวจวัดอาคารคอนกรีตในระดับการสั่นไหวต่ำ หรือ Ambient vibration ของประเทศต่าง ๆ คือ สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น ไต้หวัน อิหร่าน และสำหรับงานวิจัยในสหรัฐอเมริกา สามารถจำแนกข้อมูลได้ตามลักษณะของอาคารคือ อาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัด (RC/F) ประเภทกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW) และประเภทผสมระหว่างโครงข้อแข็งรับแรงดัดกับกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW,F) และอาคารบางส่วนที่ไม่มีข้อมูลของโครงสร้าง และเมื่อพิจารณาข้อมูลจากสหรัฐอเมริกาพบว่า ค่าคาบธรรมชาติมีค่าค่อนข้างสูงกว่าข้อมูลของประเทศอื่น ๆ และอาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัดมีแนวโน้มที่จะมีค่าคาบธรรมชาติสูงกว่าอาคารประเภทอื่น



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ตรวจวัดในประเทศไทยกับประเทศต่าง ๆ

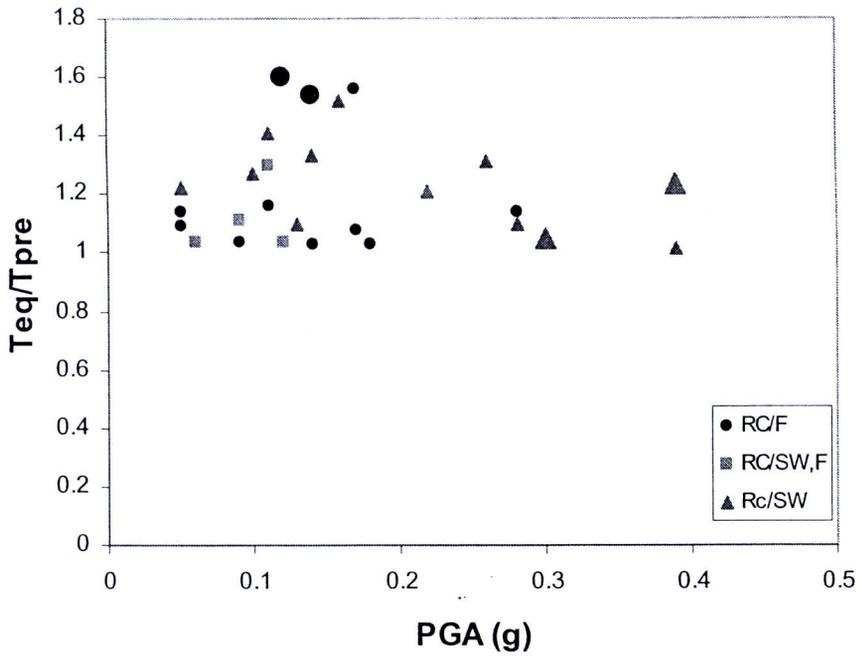


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ตรวจวัดในประเทศไทยกับประเทศต่าง ๆ (ความสูงอาคารไม่เกิน 70 เมตร)

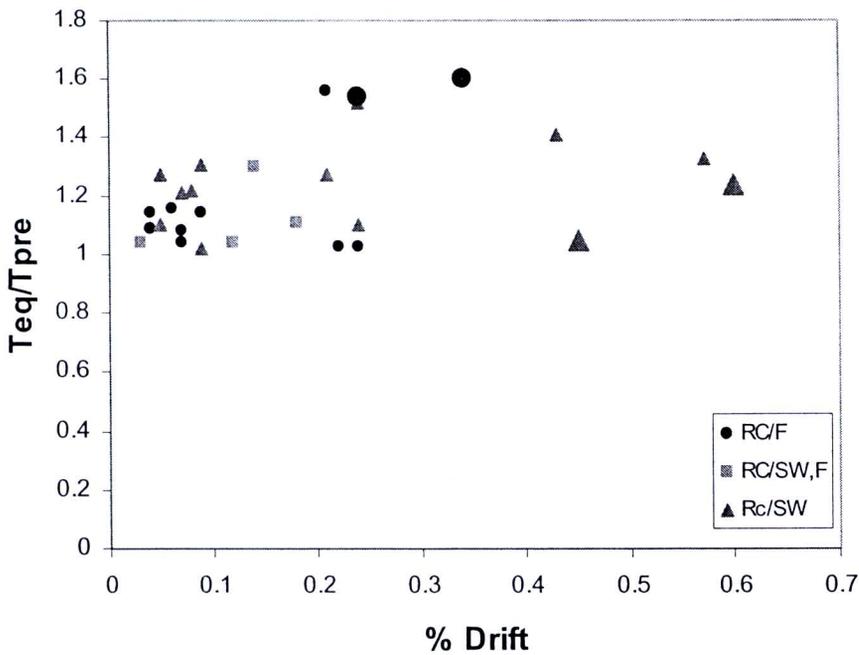
4.3 การปรับค่าคาบธรรมชาติจากผลการวัดแบบ Ambient Vibration เป็นค่าสำหรับผลตอบสนองในระดับรุนแรง

ผลการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้ดำเนินการมาทั้งหมดนั้นได้มาจากการตรวจวัดที่ระดับการสั่นไหวต่ำมาก หรือแบบ Ambient Vibration อย่างไรก็ตาม เมื่ออาคารเกิดการโยกตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว จะเกิดการตอบสนองที่ระดับรุนแรง ดังนั้น ค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมที่ควรใช้พิจารณาในขั้นตอนการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวจึงควรเป็นค่าที่โครงสร้างมีสภาวะที่รับแรงจนถึงกำลังสูงสุดก่อนเกิดการครากหรือวิบัติขององค์อาคาร ซึ่งที่สภาวะดังกล่าว โครงสร้างอาจเกิดความเสียหายในส่วนองค์ประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก และ/หรือเกิดผลปฏิสัมพันธ์ของดินกับโครงสร้าง ซึ่งทำให้ค่าคาบธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับที่ตอบสนองในระดับ Ambient Vibration ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดให้เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหว โดยการดำเนินการศึกษาขั้นต่อไปได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแผ่นดินไหวในต่างประเทศเพื่อประเมินระดับของการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและใช้เป็นแนวทางในการเสนอสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย ซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

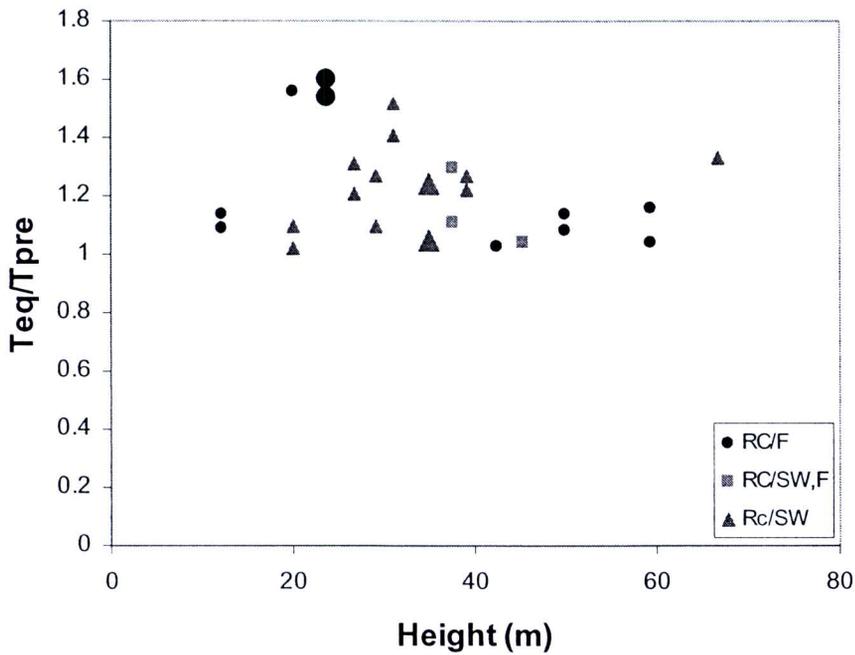
Li and Mau (1997) ได้วิเคราะห์ผลการตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว Loma Prieta ค.ศ. 1989 และ Whittier ค.ศ. 1987 ของอาคารจำนวน 21 หลัง ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการตอบสนองของอาคาร สำหรับผลของอาคารประเภทคอนกรีตจำนวน 15 หลัง ซึ่งสามารถจำแนกต่อออกเป็นอาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัด (RC/F) จำนวน 6 หลัง ประเภทกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW) จำนวน 7 หลัง และประเภทผสมระหว่างโครงข้อแข็งรับแรงดัดกับกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW,F) จำนวน 2 หลัง โดยในอาคารเหล่านี้ มีอาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัด จำนวน 1 หลัง และประเภทกำแพงรับแรงเฉือนจำนวน 1 หลังที่มีรายงานว่าได้รับความเสียหายในระบบโครงสร้างเล็กน้อย ผลการศึกษาของงานวิจัยดังกล่าว สามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติได้ โดยแสดงในอัตราส่วนค่าคาบธรรมชาติในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวต่อคาบธรรมชาติก่อนเกิดแผ่นดินไหวหรือที่ได้จากการตรวจวัดผลตอบสนองในระดับต่ำ (T_{eq}/T_{pre}) ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 และสำหรับข้อมูลของอาคารที่ได้รับความเสียหายได้ถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์ที่มีขนาดใหญ่ ในรูปที่ 4.11 แสดงค่า T_{eq}/T_{pre} กับค่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดิน (Peak ground acceleration, PGA) หน่วยเป็นความเร่งโน้มถ่วงของโลก (g หรือ 9.81 m/s^2) โดยพบว่า ค่าคาบธรรมชาติที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดที่ระดับการสั่นไหวต่ำ โดยอาจเพิ่มขึ้นสูงสุดได้ถึง 60% และมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยประมาณ 20% นอกจากนี้ อาจคาดหมายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตาม ผลของงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้แสดงแนวโน้มที่ชัดเจนเช่นนั้น และพบว่า ลักษณะของโครงสร้างและผลของความเสียหายต่อโครงสร้างก็มีได้มีผลอย่างชัดเจนต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติ ในรูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติกับระดับการเคลื่อนตัวของยอดอาคาร และรูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคาร ซึ่งไม่ปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจนที่เป็นผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติจึงน่าจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบจำนวนมากที่ไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลไว้ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติตามระดับความเร่งสูงสุดที่พื้น (Li and Mau 1997)

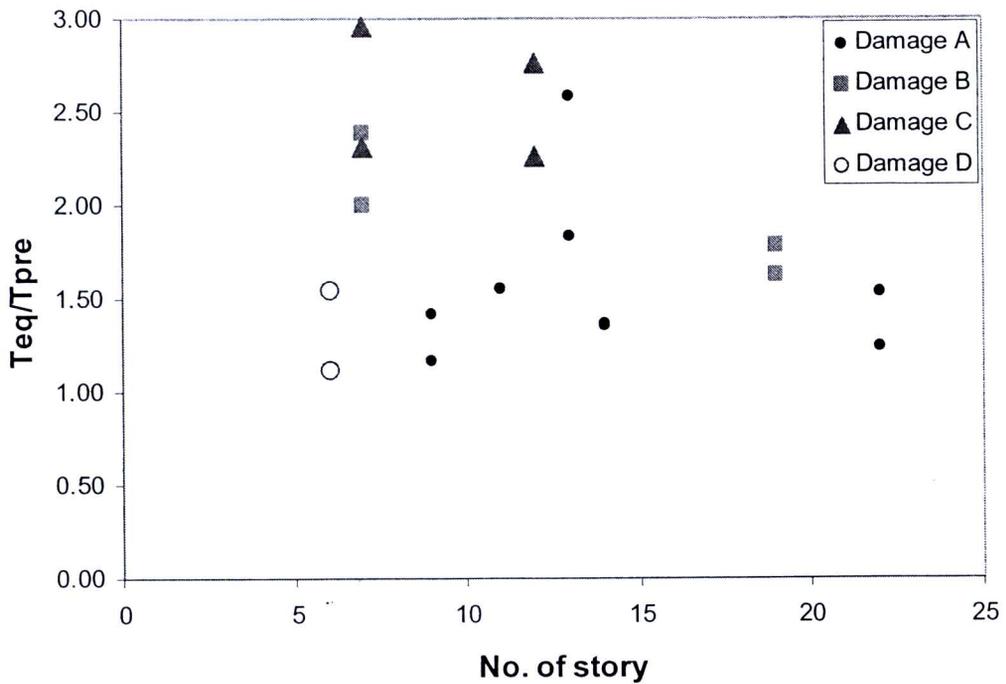


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติตามร้อยละของการเคลื่อนตัวของยอดอาคาร (Li and Mau 1997)



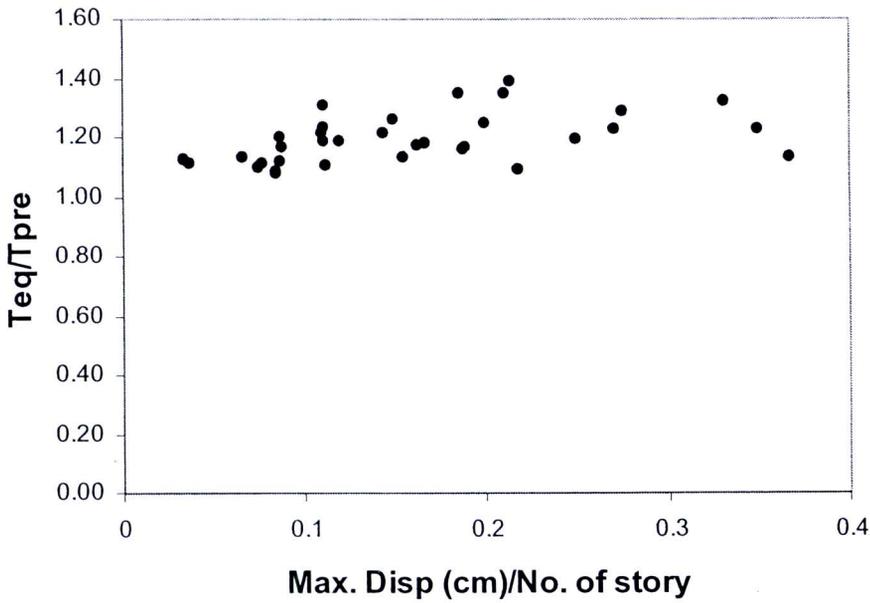
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติตามความสูงของอาคาร (Li and Mau 1997)

จากงานวิจัยของ Anderson และคณะในปี ค.ศ. 1991 ได้มีการทบทวนงานที่เก็บข้อมูลผลการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติของอาคาร สำหรับอาคารคอนกรีตประเภทโครงสร้างรับแรงดัดทั้งสิ้น 14 หลัง ซึ่งมีผลความรุนแรงจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างที่แตกต่างกันจำแนกออกเป็น 4 ระดับคือ ระดับ A ไม่มีความเสียหายต่อโครงสร้างและมีความเสียหายเล็กน้อยกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ระดับ B ไม่มีความเสียหายต่อโครงสร้างและมีความเสียหายกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ระดับ C มีความเสียหายเล็กน้อยต่อโครงสร้างและมีความเสียหายกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ระดับ D มีความเสียหายรุนแรงต่อโครงสร้างและชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ผลแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่า ค่าคาบธรรมชาติในบางกรณีอาจเพิ่มขึ้นสูงสุดได้ถึง 3 เท่า และโดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติขึ้นกับระดับของความเสียหาย นั่นคือ หากเกิดความเสียหายมากการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ยกเว้นอาคารที่เกิดความเสียหายที่ระดับ D) สำหรับอาคารที่เกิดความเสียหายในระดับ A ค่าเฉลี่ยของการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติคือประมาณ 50%



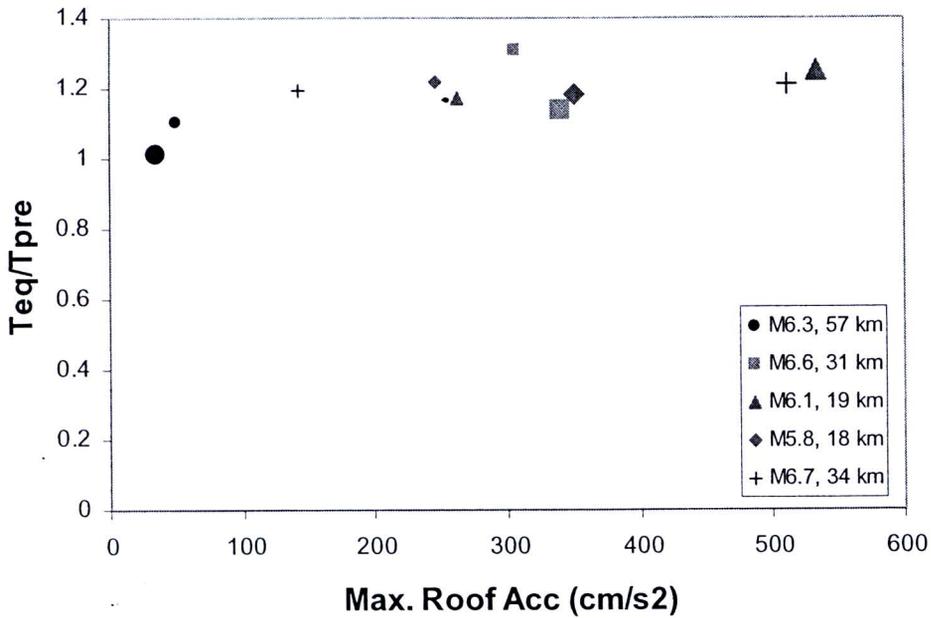
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและระดับความเสียหายจากแผ่นดินไหว (Anderson et.al. 1991)

นอกจากนี้ Anderson และคณะในปี ค.ศ. 1991 ได้รวบรวมผลการศึกษาผลกระทบจากแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 1968 ขนาด 6.1 มีศูนย์กลางประมาณ 45 ก.ม. จากกรุงโตเกียว โดยสำหรับตัวอย่างอาคารประเภทคอนกรีตผสมกับโครงสร้างเหล็กจำนวน 17 หลัง ที่มีความสูงเฉลี่ยประมาณ 10 ชั้น และมีการบันทึกค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของแต่ละอาคารไว้ รูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่หารด้วยจำนวนชั้น พบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 20% และการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติค่อนข้างมีแนวโน้มตามการเพิ่มขึ้นของระดับการเคลื่อนตัวสูงสุดของอาคารหารด้วยจำนวนชั้น



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดจากแผ่นดินไหว (Anderson et.al. 1991)

Clinton และคณะในปี ค.ศ. 2006 ได้ทำการรวบรวมการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีต 9 ชั้น สูง 44 เมตร ลักษณะโครงสร้างเป็นโครงข้อแข็งรับแรงดัดผสมกับกำแพงรับแรงเฉือน โดยกำแพงรับแรงเฉือนให้ผลหลักในแนวเหนือ-ใต้ของอาคาร อาคารหลังนี้ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวขนาดค่อนข้างใหญ่ 5 ครั้ง ได้แก่ ขนาด 6.3 ที่ระยะทางห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว 57 กม., ขนาด 6.6 ที่ระยะทาง 31 กม., ขนาด 6.1 ที่ระยะทาง 19 กม., ขนาด 5.8 ที่ระยะทาง 18 กม. และ ขนาด 6.7 ที่ระยะทาง 34 กม. โดยผลการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเหล่านั้นและค่าความเร่งที่ยอดอาคารสูงสุด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 ผลในแนวตะวันออก-ตก และแนวเหนือ-ใต้ของอาคารได้ถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์ที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามลำดับ พบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 20% และการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติค่อนข้างมีแนวโน้มตามการเพิ่มขึ้นของระดับความเร่งสูงสุดของยอดอาคาร



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและความเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารคอนกรีต 9 ชั้นจากแผ่นดินไหว (Clinton et.al., 2006)

จากผลการทบทวนงานวิจัยที่กล่าวมานั้น มีข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับแก้ค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดแบบ Ambient vibration ที่ดำเนินการในประเทศไทยให้เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหว ดังนี้

- การตอบสนองของอาคารเนื่องจากแผ่นดินไหวทำให้ค่าคาบธรรมชาติของอาคารเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดแบบ Ambient vibration
- โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติเนื่องจากแผ่นดินไหวมีแนวโน้มมากขึ้นตามระดับความรุนแรงของผลตอบสนองของอาคาร (ยกเว้นในงานวิจัยของ Li and Mau 1997 ที่มีข้อมูลบางส่วนที่ไม่แสดงแนวโน้มเช่นนี้)
- การเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มมากขึ้นตามระดับความเสียหายของอาคาร
- งานวิจัยที่ได้ทำการทบทวนแสดงค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 0 ถึง ประมาณ 300% ทั้งนี้อาจมีปัจจัยหลายประการที่ข้อมูลไม่ได้บันทึกได้อย่างสมบูรณ์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างเช่นนี้
- อย่างไรก็ตามอาจสังเกตพบว่สำหรับผลจากแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงค่อนข้างใหญ่ และมีผลทำให้อาคารเกิดการเสียหายที่ไม่รุนแรง ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 40%

ในการเสนอสมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับประเทศไทย มีประเด็นที่ต้องพิจารณาร่วมคือ ผลจากการตรวจวัด และค่าการปรับแก้ที่เหมาะสม ในส่วนของผลการตรวจวัด จำเป็นต้องพิจารณาเลือกค่าที่ทำให้การพิจารณาแรงสำหรับออกแบบให้มีความปลอดภัย ซึ่งโดยทั่วไปคือ

อาคารที่มีค่าคาบธรรมชาติสั้นจะมีแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวสูง ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้สมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติแบบขอบเขตล่าง ($T_L = 0.0152H$) และในส่วนของ การปรับแก้ งานวิจัยนี้สรุปเสนอใช้ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติของอาคารในระดับของแผ่นดินไหวที่ไม่รุนแรงคือ 30% ดังนั้นสมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมแสดงได้ดังนี้

$$T = T_L \times 1.3 = 0.0152H \times 1.3 = 0.01976H \quad (4.4)$$

สมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยที่เสนอคือ

$$T = 0.02H \quad (4.5)$$

นอกเหนือจากการประมาณค่าคาบธรรมชาติจากสูตรการประมาณที่เสนอให้ใช้ในมาตรฐานการออกแบบทั่วไปแล้ว วิธีอื่นที่เป็นการคำนวณตามหลักการของพลศาสตร์โครงสร้างก็สามารถยอมให้ใช้ได้ อย่างไรก็ตาม ค่าคาบธรรมชาติจากการคำนวณไม่ควรมีค่ามากเกินไปจนอาจทำให้แรงแผ่นดินไหวมีค่าต่ำไป จึงต้องกำหนดขอบเขตของค่าที่ได้จากการคำนวณไว้ไม่ให้มากเกินไปเมื่อเทียบกับค่าจากสูตรการประมาณ ค่าขอบเขตดังกล่าวนี้สามารถกำหนดได้จากข้อมูลการตรวจวัด ซึ่งได้ว่าค่าคาบธรรมชาติแบบขอบเขตบน ($T_U = 0.0225H$) และสมการค่าคาบธรรมชาติแบบขอบเขตล่าง ($T_L = 0.0152H$) มีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (T_U/T_L) เท่ากับ 1.480 ดังนั้น จึงเลือกกำหนดให้ หากใช้การคำนวณเพื่อการหาค่าคาบธรรมชาติโดยหลักการของพลศาสตร์โครงสร้าง ค่าคาบธรรมชาติที่ได้ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ

จากสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เสนอสำหรับประเทศไทย ควรมีการพิจารณาเปรียบเทียบกับสูตรการประมาณที่เสนอในมาตรฐานการออกแบบของต่างประเทศที่เป็นสากลเพื่อตรวจสอบความใกล้เคียงของช่วงค่าคาบให้มีค่าที่เหมาะสม โดยสำหรับสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติในมาตรฐานการออกแบบของต่างประเทศที่เป็นสากลที่นำมาเปรียบเทียบคือ มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย และกลุ่มประเทศยุโรป โดยจากการพิจารณาในรายละเอียดของอาคารคอนกรีตสามารถจำแนกลักษณะของสูตรการประมาณได้ 3 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

ก. สูตรประมาณที่มีรูปแบบเหมือนกับใน Uniform Building Code ปี ค.ศ. 1997 ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีสมการดังนี้

$$T = C_1 H^{3/4} \quad (4.6)$$

โดยที่ C_i เท่ากับ 0.0731 (หรือใช้ 0.075 ในมาตรฐานอื่นที่นำ UBC-97 ไปประยุกต์ใช้ต่อ) สำหรับ โครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตสามมิติ และเท่ากับ 0.0488 (หรือใช้ 0.05 ในมาตรฐานอื่นที่นำ UBC-97 ไปประยุกต์ใช้ต่อ) สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่น ๆ H คือความสูงของอาคาร หน่วยเป็นเมตร

ซึ่งสูตรการประมาณใน National Building Code of Canada (NBC) ของประเทศแคนาดา NBCC-2005 และ Eurocodes ของประเทศในทวีปยุโรป Eurocode 8 EN 1998-1:2004 ใช้สมการเดียวกันทั้งสิ้น และ Australian Standard ของประเทศออสเตรเลีย AS 1170.4—2007 ใช้รูปแบบเช่นเดียวกันแต่คูณเพิ่มด้วยค่าประกอบ 1.25

ข. สูตรการประมาณโดย American Society of Engineers (ASCE) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ASCE 7 ค.ศ. 2005 ซึ่งมีที่มาจากการศึกษาวิจัยของ Goel และ Chopra (1997) มีสมการดังนี้

สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต

$$T = 0.0466H^{0.9} \quad (4.7)$$

ส่วนโครงสร้างประเภทอื่น ๆ ได้กำหนดให้ใช้สมการเดียวกับ UBC-97 นั่นคือ

$$T = 0.0488H^{3/4} \quad (4.8)$$

สำหรับโครงสร้างประเภทกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตมีสมการเฉพาะที่ต้องคำนวณปริมาณกำแพงในอาคารด้วย

ค. สูตรการประมาณของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมี 2 ส่วนได้แก่ The Building Standard Law in Japan (BSLJ) ฉบับ ค.ศ.1987 และ Architectural Institute of Japan (AIJ) มาตรฐาน AIJ-2004 สำหรับ BSLJ 1987 เสนอสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติคือ

$$T = (0.02 + 0.01\alpha)H \quad (4.9)$$

โดยที่ α คือสัดส่วนระหว่างโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตของอาคาร โดยทำให้ได้สมการสำหรับโครงสร้างคอนกรีตคือ

$$T = 0.02H \quad (4.10)$$

และโครงสร้างเหล็กคือ

$$T = 0.03H \quad (4.11)$$

สำหรับ AIJ-2004 มีสูตรประมาณที่เพิ่มเติมจาก BSLJ คือ สูตรการประมาณที่สัมพันธ์กับจำนวนชั้น n โดยเสนอเป็นช่วงกว้าง ดังนี้

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$T = (0.06 \pm 0.02)n \quad (4.12)$$

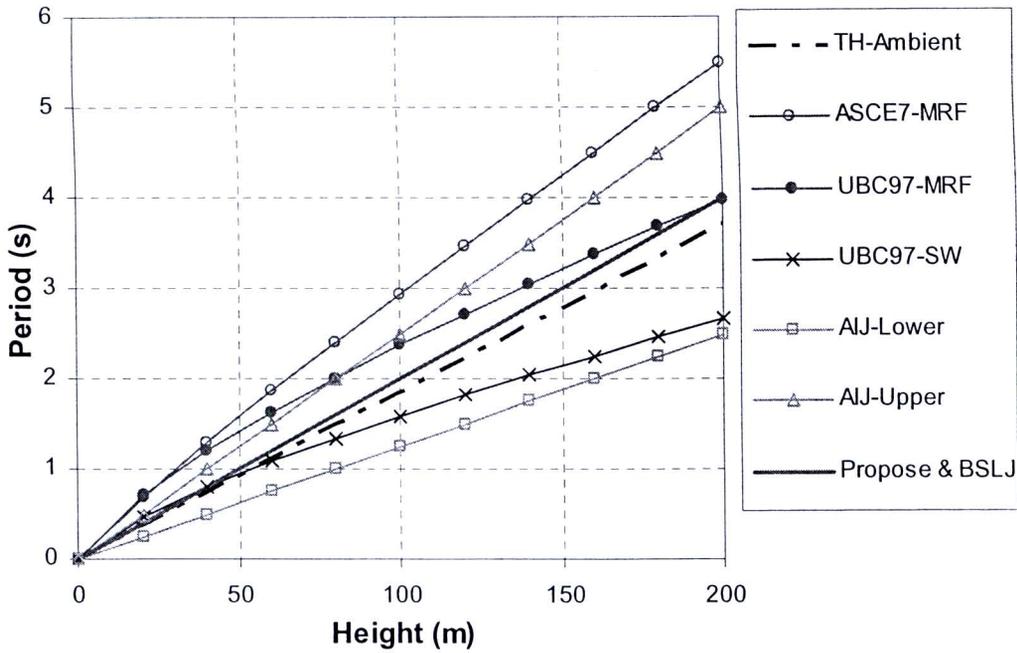
สำหรับโครงสร้างเหล็ก

$$T = (0.1 \pm 0.03)n \quad (4.13)$$

ซึ่งสำหรับอาคารคอนกรีตค้ำอยู่ในช่วง $0.04n \leq T \leq 0.08n$ ซึ่งมีความแตกต่างในค่าจากขอบเขตล่างถึงขอบเขตบนได้ 100%

การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติจากสูตรการประมาณที่นำเสนอสำหรับประเทศไทยและค่าจากสูตรการประมาณของ 3 กลุ่มข้างต้น แสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงข้อมูลที่ประกอบด้วย

- TH-Ambient คือสมการค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดในประเทศไทย
- ASCE7-MRF คือสมการสำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตจาก ASCE7-05
- UBC97-MRF คือสมการสำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตจาก UBC97
- UBC97-SW คือสมการสำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่นๆ จาก UBC97 และ ASCE7-05
- AIJ-Lower คือสมการสำหรับค่าแบบขอบเขตล่างจาก AIJ-2004 (ใช้ความสูงแต่ละชั้นเท่ากับ 3.2 เมตร)
- AIJ-Upper คือสมการสำหรับค่าแบบขอบเขตบนจาก AIJ-2004 (ใช้ความสูงแต่ละชั้นเท่ากับ 3.2 เมตร)
- Propose & BSLJ คือสมการที่นำเสนอสำหรับประเทศไทย ซึ่งเท่ากับ BSLJ-87



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติของสมการที่เสนอและมาตรฐานจากประเทศต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 ค่าคาบจากสมการสำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตจาก ASCE7-05 (ASCE7-MRF) มีค่ามากที่สุด สมการจากค่าแบบขอบเขตล่างจาก AIJ-2004 และสำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่น ๆ จาก UBC97 และ ASCE7-05 ให้ค่าคาบที่น้อยที่สุด และค่าที่ได้จากการตรวจวัดในประเทศรวมถึงสมการที่นำเสนอมีค่าอยู่ในช่วงของขอบเขตทั้งสอง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบก่อนหน้าดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

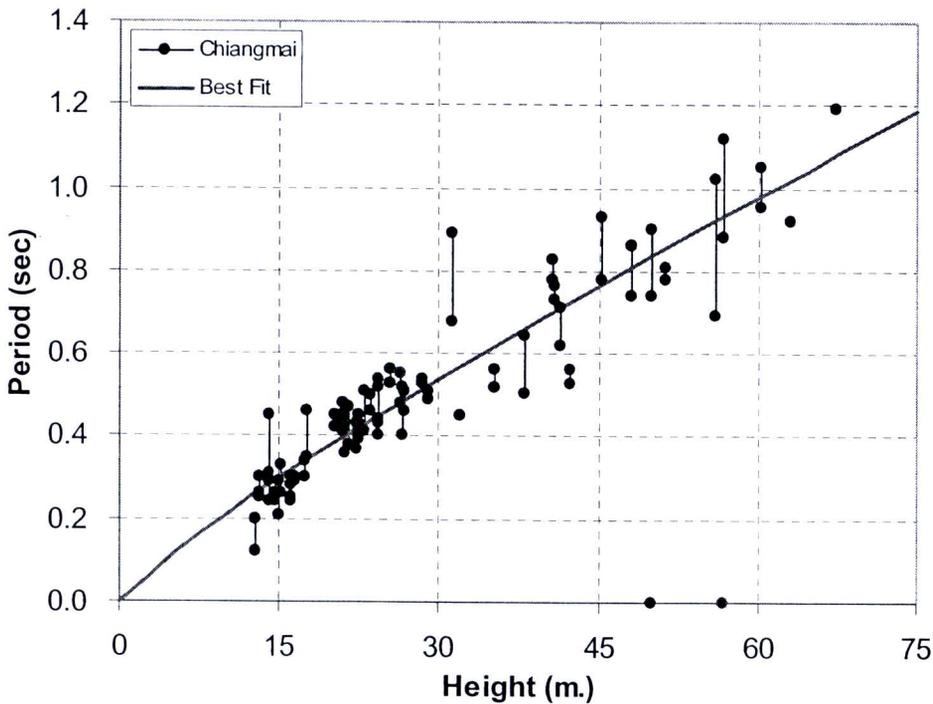
4.4 การพิจารณาข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ศึกษา

ในส่วนนี้ เป็นการวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ได้จากการศึกษาในแง่ต่าง ๆ ได้แก่

- ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติของอาคารกับลักษณะทางกายภาพของอาคาร เช่น ความสูง ความกว้าง ความลึก จำนวนชั้น
- ผลกระทบเนื่องจากชั้นดิน จังหวัดเชียงใหม่ (ดินแข็ง) และกรุงเทพมหานคร (ดินอ่อน) ที่มีผลต่อรูปร่างการสั่นไหวจากการพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดอาคาร
- อัตราส่วนความหน่วงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

จากค่าคาบธรรมชาติที่ตรวจวัดจากอาคารในจังหวัดเชียงใหม่จำนวน 51 หลัง และได้นำเสนอการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับความสูงของอาคารดังที่แสดงไว้ในส่วนต้น และได้แสดงในรูปแบบที่

4.18 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับความสูง จุดแสดงค่าคาบธรรมชาติ เส้นเชื่อมระหว่างจุดหมายถึงเป็นอาคารเดียวกันแต่เป็นค่าในแต่ละทิศทาง เช่น เหนือ-ใต้ และ ตะวันออก-ตะวันตก สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ Regression ที่ดีที่สุด แสดงไว้ด้วยเส้นแนวโน้มต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) มีค่าเท่ากับ 0.8776 และลักษณะข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารแต่ละหลังในแต่ละทิศทางมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.18 คาบธรรมชาติของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ตามความสูง

สำหรับสมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่กำหนดไว้ในกฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 ที่กำหนดไว้คือ

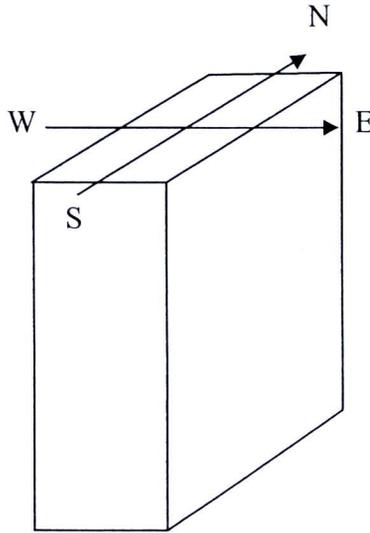
$$\text{สำหรับอาคารทั่วไปทุกชนิด ให้คำนวณตามสูตร } T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{D}} \quad (4.14)$$

$$\text{สำหรับโครงสร้างที่มีความเหนียว ให้คำนวณตามสูตร } T = 0.1N \quad (4.15)$$

h_n คือ ความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุดวัดจากระดับพื้นดินมีหน่วยเป็นเมตร D คือ ความกว้างของโครงสร้างของอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นเมตร และ N คือ จำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

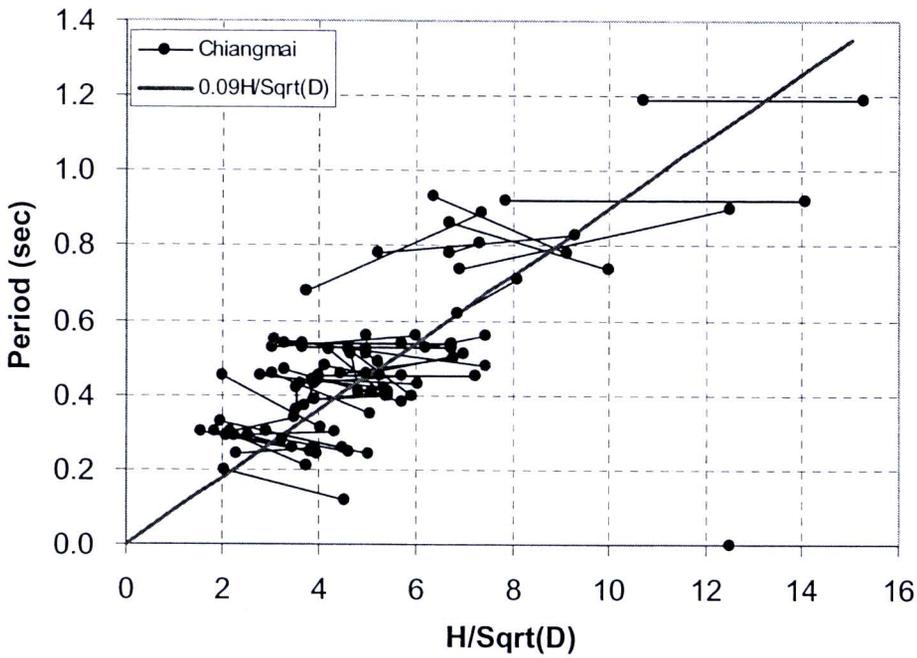
โดยที่สมการแรกของกฎกระทรวงฯ แสดงถึงค่าคาบธรรมชาติที่ขึ้นอยู่กับความสูงและความกว้างของอาคารด้วย โดยค่าคาบธรรมชาติของอาคารในทิศทางขนานกับด้านที่มีความกว้างมากจะ

มีค่าต่ำกว่าอีกด้านหนึ่ง ดังตัวอย่างดังรูปที่ 4.19 ค่าคาบธรรมชาติที่คำนวณตามสมการ 4.14 ในแนว N-S จะมีค่าต่ำกว่าแนว E-W ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะเกิดขึ้นจริงหากอาคารมีการกระจายคุณสมบัติด้านความแข็งแกร่ง และมวล อย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ตัดขวาง



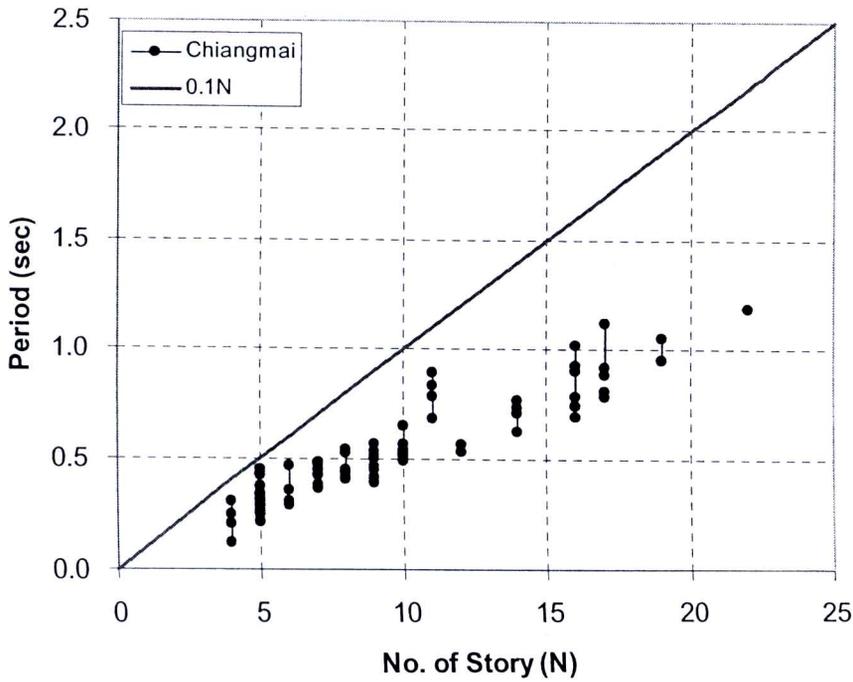
รูปที่ 4.19 มิติของอาคารสำหรับการพิจารณาคาบธรรมชาติในแต่ละทิศทาง

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการตรวจวัดอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับค่า H/\sqrt{D} ดังรูปที่ 4.20 โดยจุดแสดงค่าคาบธรรมชาติ เส้นเชื่อมระหว่างจุดหมายถึงเป็นอาคารเดียวกันแต่เป็นค่าในแต่ละทิศทาง พบว่า ค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มตามค่า H/\sqrt{D} จริง แต่ข้อมูลมีการกระจายตัวมาก โดยจากการวิเคราะห์เชิงถดถอยได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เพียง 0.5116 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาข้อมูลของอาคารแต่ละหลังที่มีค่า H/\sqrt{D} ของแต่ละด้านแตกต่างกัน หากพฤติกรรมเป็นไปตามสมการที่ 4.14 จริง ค่าคาบจะต้องมีแนวโน้มตามค่า H/\sqrt{D} หรือเส้นเชื่อมจุดของแต่ละอาคารควรมีแนวโน้มเฉียงขึ้น แต่กลับพบว่าอาคารส่วนใหญ่ไม่มีพฤติกรรมเช่นนั้น นั่นคือ อาคารที่มี H/\sqrt{D} ของแต่ละด้านต่างกัน ยังมีค่าคาบไม่ต่างกัน และข้อมูลจำนวนมากของอาคารด้านที่มี H/\sqrt{D} มากกลับมีค่าคาบต่ำกว่าอีกด้าน ซึ่งตรงกันข้ามกับพฤติกรรมตามสมการที่ 4.14 นั้นแสดงถึงว่า ในอาคารโดยทั่วไปได้มีการจัดเรียงองค์ประกอบของโครงสร้าง เช่นแนวกำแพงรับแรงเฉือน แนวเสา เพื่อให้อาคารมีความแข็งแรงในแต่ละด้านอย่างเพียงพอ ทำให้ค่าคาบธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับความกว้างด้านนอกอาคาร รูปแบบของสมการที่ 4.14 จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นสูตรการประมาณ



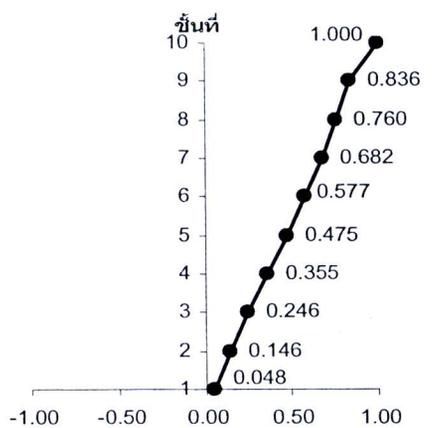
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติกับค่า H/\sqrt{D} ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าคาบกับจำนวนชั้นของอาคารตาม สมการที่ 4.15 จากข้อมูลของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่า ค่าคาบที่ตรวจวัดได้ มีค่าต่ำกว่าค่าจากสมการที่ 4.15 มาก เนื่องจากสมการดังกล่าวนี้ได้พัฒนาใช้สำหรับอาคารในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ออกแบบให้สามารถตอบสนองในช่วงอินีลาสติกได้อย่างดี (หรือมีความเหนียวมาก) สมการนี้จึงให้ค่าคาบที่สูงมาก และอาจไม่ตรงกับพฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยที่ไม่ได้รับการออกแบบให้มีความเหนียวเทียบเท่าได้

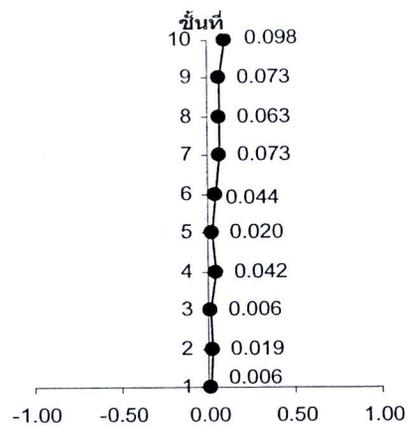


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้นของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

สำหรับผลกระทบเนื่องจากชั้นดินที่มีผลต่อรูปร่างการสั่นไหวจากการพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดอาคาร ดังตัวอย่างที่แสดงดังรูปที่ 4.22 ที่แสดงรูปร่างการสั่นไหวของอาคารตัวอย่าง เลขที่ 1 ของจังหวัดเชียงใหม่ ในการสั่นไหวในแกนหลัก 2 ทิศทาง (X และ Y) มีค่าความถี่ธรรมชาติของแต่ละทิศทางและรูปร่างการสั่นไหวแสดงดังรูป โดยค่าของรูปร่างการสั่นไหวเป็นค่าขนาดการโยกตัวที่ระดับต่างต่างของอาคารเทียบกับค่าสูงที่สุดที่เกิดขึ้น (ค่าสูงที่สุดเทียบเท่า 1.0) ซึ่งนิยามของค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดอาคารคือค่าที่เกิดขึ้นที่ฐานอาคาร เทียบกับค่าสูงสุด ดังรูปที่ 4.22 ค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสำหรับรูปแบบการสั่นไหวตามแนว X มีค่าเท่ากับ 4.8% ของค่าที่ยอด และแนว Y มีค่าเท่ากับ 6.3%

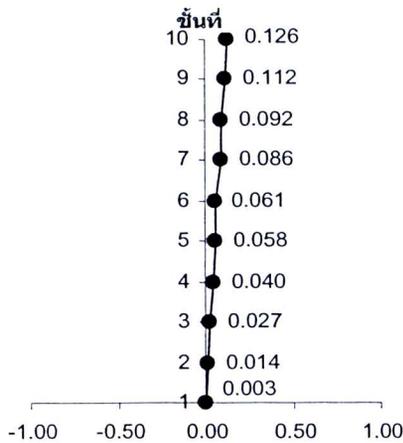


Normalized Mode Shape (X direction)



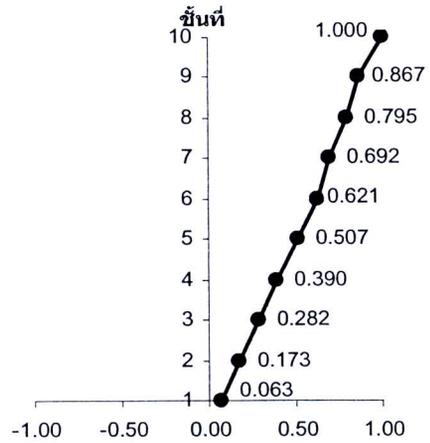
Normalized Mode Shape (Y direction)

1st Mode Translation – X (1.80 Hz)



Normalized Mode Shape (X direction)

1st Mode Translation – X (1.80 Hz)



Normalized Mode Shape (Y direction)

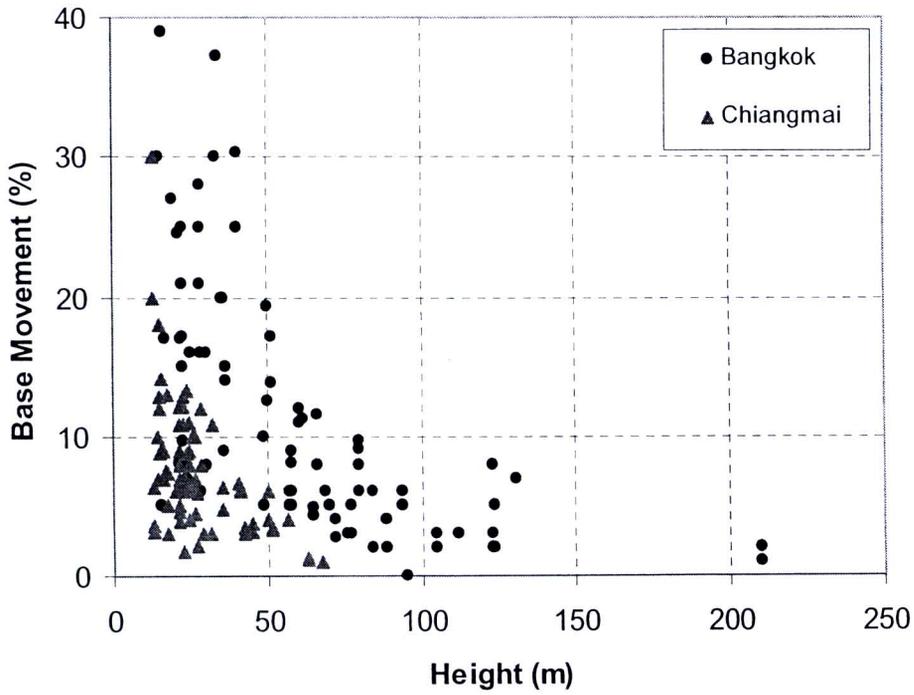
1st Mode Translation – Y (1.93 Hz)

1st Mode Translation – Y (1.93 Hz)

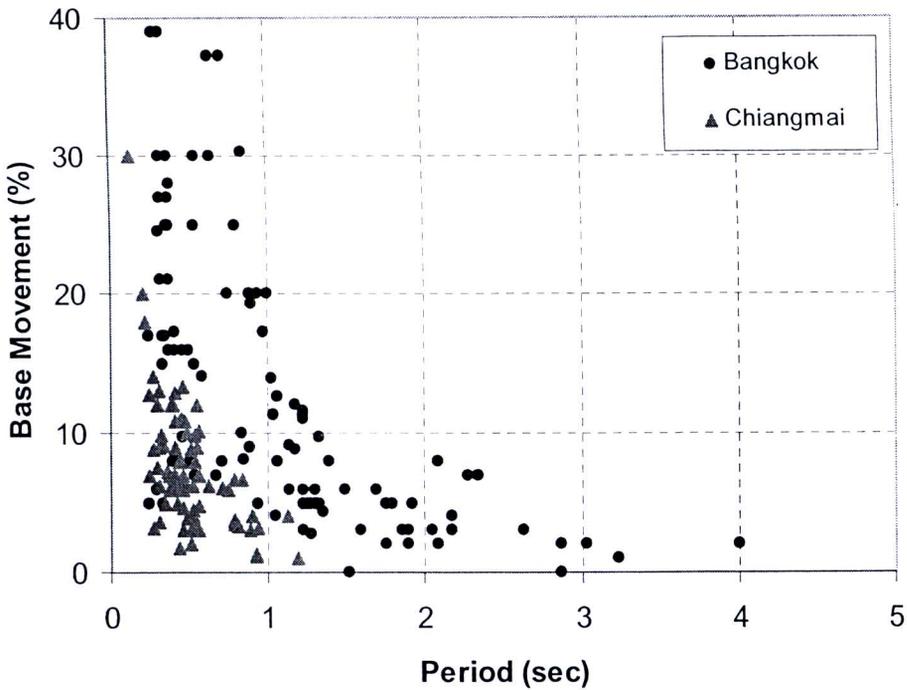
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างรูปแบบการสั่นไหวของอาคาร

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ (ดินแข็ง) และกรุงเทพมหานคร (ดินอ่อน) แสดงเป็นความสัมพันธ์กับความสูง และค่าคาบธรรมชาติของอาคารดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า การเคลื่อนตัวที่ฐานของอาคารมีค่ามากสำหรับอาคารเตี้ย มีคาบธรรมชาติต่ำ หรือมีค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ทางด้านข้างสูง และค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสำหรับกลุ่มอาคารในจังหวัดเชียงใหม่มีค่าในช่วงต่ำกว่ากลุ่มอาคารในกรุงเทพมหานครอย่างชัดเจน การเคลื่อนตัวที่ฐานดังกล่าวนี้ แสดงผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและอาคาร (Soil-Structure Interaction) กล่าวคือ สำหรับระบบอาคารที่ไม่มีการเคลื่อนตัวที่ฐาน หมายถึงไม่มีผลจากดินได้อาคารต่อรูปแบบการโยกตัว และหากมีค่ามากแสดงถึงผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและอาคารมีมาก และมีความสำคัญต่อการพิจารณาในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบอาคารให้ถูกต้อง

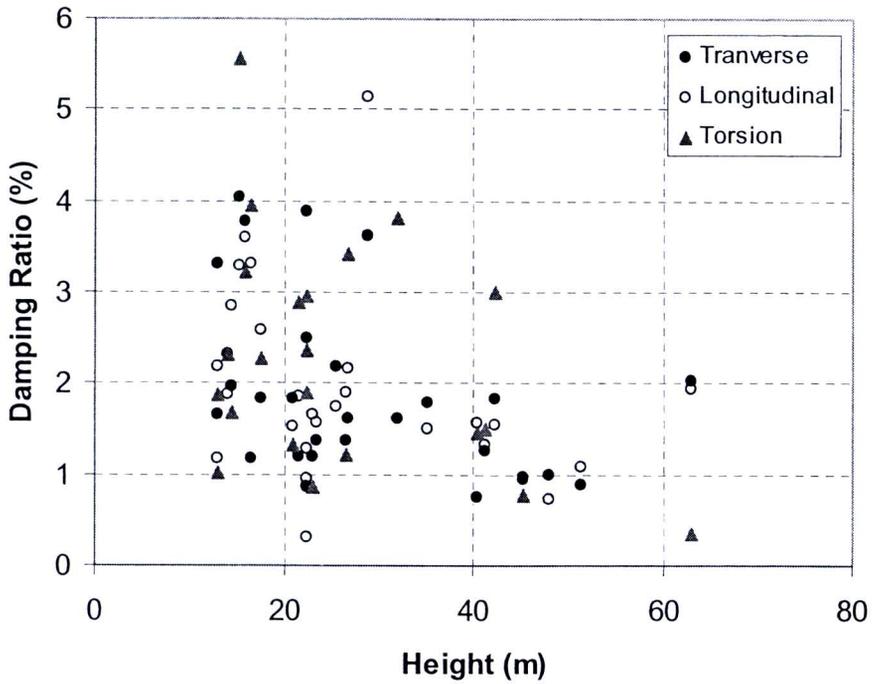
ค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ หาได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Natural Excitation Technique/ Eigensystem Realization Algorithm (NExT/ERA) โดย Juang (1994) และแสดงเป็นความสัมพันธ์กับความสูงและคาบธรรมชาติ ในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าอัตราส่วนความหน่วงส่วนมากอยู่ในช่วง 1-3 % และมีแนวโน้มน้อยลงสำหรับอาคารที่มีความอ่อนตัว ได้แก่ อาคารสูง หรือมีคาบธรรมชาติต่ำ



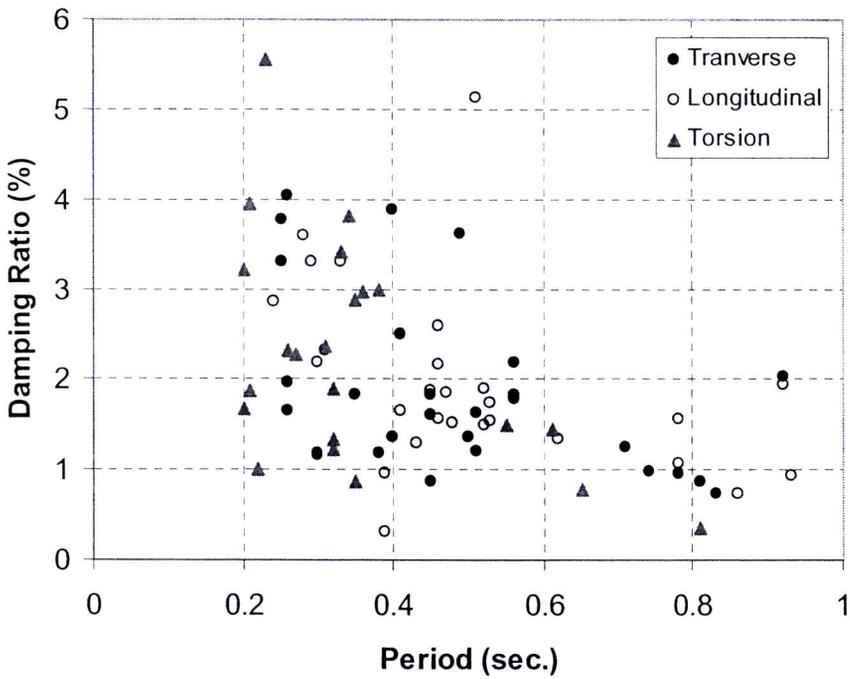
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดกับความสูงของอาคารจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.24 การเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดกับคาบธรรมชาติของอาคารจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.25 อัตราส่วนความหน่วงกับความสูงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.26 อัตราส่วนความหน่วงกับคาบธรรมชาติของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่