

การศึกษาสมรรถนะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบ ต่างๆ ในการรับสรวายน้ำ

Study on Performance of Different Reinforced Concrete Structural Systems for Supporting Swimming Pool

กรกฎ สรณะสังจะชีพ รักษิตพงษ์ สหมิตรมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเฉพาะเรื่องฉบับนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตรับน้ำหนักสรวายน้ำ การศึกษาเริ่มจากการเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างระบบพื้น-คานจริงที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม CSI ETABS จนได้แบบจำลองที่สามารถแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างถูกต้อง จากนั้นนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในระบบต่างๆ เช่น ระบบคานพื้น ระบบคานแบน ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา และระบบพื้นท้องเรียบ และทำการเปรียบเทียบโดยคำนึงถึงพฤติกรรม และความคุ้มค่า รวมถึงข้อควรระวังในการออกแบบและก่อสร้าง เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกวิธีการก่อสร้างโครงสร้างสรวายน้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสรวายน้ำในสภาวะการรับน้ำหนักด้วยโปรแกรม CSI ETABS เปรียบเทียบกับพฤติกรรมของโครงสร้างจริงที่วัดได้ พบว่าค่าการแอ่นตัวของพื้นและคานในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 11.50 และ 10.18 ตามลำดับ เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในระบบต่างๆ ด้วยโปรแกรม CSI SAFE พบว่าค่าการโก่งตัวสูงสุด ค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุด มีค่าสูงขึ้นทั้งในระบบคานแบน ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา และระบบพื้นท้องเรียบ การก่อสร้างจึงต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กในบริเวณที่มีค่าหน่วยแรงสูง รวมถึงบริเวณที่มีค่าความกว้างของรอยร้าวสูง จากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบอีกว่าโครงสร้างระบบพื้นท้องเรียบช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายของแบบหล่อคอนกรีต รวมถึงใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าระบบคานพื้น

คำสำคัญ: ค่าการโก่งตัวสูงสุด / ค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุด / ค่าหน่วยแรงสูงสุด / ระบบพื้นคาน / คานแบน / พื้นท้องเรียบ / สรวายน้ำ

Abstract

This study aims to compare behavior of different concrete structural systems for supporting swimming pool under the service load through the use of CSI ETABS software. The study started by comparing between on-site behavior of actual structure and the analyzed behavior. The model was then calibrated and subsequently applied to analyze behavior of various structural systems (e.g., Beam-Slab, Band Beam,

Drop Panel, and Flat Slab). CSI SAFE software was applied to calculate the structural behavior of different floor systems. The comparison was done regarding the structural performance, worthiness, as well as cautions for design and construction. The results could be used as information for a suitable selection of structural system supporting swimming pool. It was found that the computational model applied in this study could predict deflections of slabs and beams in beam-floor system with an average discrepancy of 11.50 % and 10.18 %, respectively. When applying similar numerical model to simulate other structural systems by CSI SAFE, it was found that maximum deflection, maximum stress, and maximum crack width were higher in Band Beam, Drop Panel, and Flat Slab systems. As a result, one must be cautious on sufficient provision of reinforcement in the area with high stress. Additional steel mesh should also be provided in the area with high level of crack width. However, despite these additional requirements, it was found that the use of Flat Slab system can save cost of concrete formwork, and the duration of construction can also be shortened.

Keywords: Band Beam / Beam-Slab / Flat Slab / Maximum Crack Width / Maximum Deflection / Maximum Stress / Swimming pool

1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำมักจะเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอาคารหลายแห่ง เช่น อาคารที่เป็นศูนย์กีฬา, โรงแรม รวมทั้งอาคารชุด ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะก่อสร้างโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำเป็นระบบคานพื้น (beam – slab) โดยพื้นของสระว่ายน้ำจะก่อสร้างเป็นพื้นวางบนคาน ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองไม้แบบและเวลาในการก่อสร้าง เนื่องจากในการก่อสร้างต้องทำทีละชั้นตอนโดยจะต้องผูกเหล็กคาน ตั้งแบบคาน เทคอนกรีตคาน แล้วต้องเสียเวลาในการรื้อถอดแบบคาน จึงจะดำเนินการตั้งแบบพื้นผูกเหล็กพื้นและเทคอนกรีตพื้น และต้องรอรระยะเวลาในการถอดแบบพื้นก่อนจึงจะสามารถดำเนินการในชั้นตอนต่อไปได้ นอกจากนี้โครงสร้างคานที่มีขนาดใหญ่อาจจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการติดตั้งงานระบบอาคารได้ ดังกล่าวบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตรับน้ำหนักสระว่ายน้ำรูปแบบต่างๆ ซึ่งรวมถึง ระบบคาน-พื้น

(beam-slab) , ระบบคานแบน (band beam) , ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) และ ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) โดยคำนึงถึง สมรรถนะเชิงโครงสร้างและความคุ้มค่า เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินความเป็นไปได้ในการปรับเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำเป็นรูปแบบอื่นๆ ได้อย่างเหมาะสม

2. ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและข้อกำหนดที่อ้าง

2.1 โครงสร้างสระว่ายน้ำต้นแบบที่ทำการศึกษา

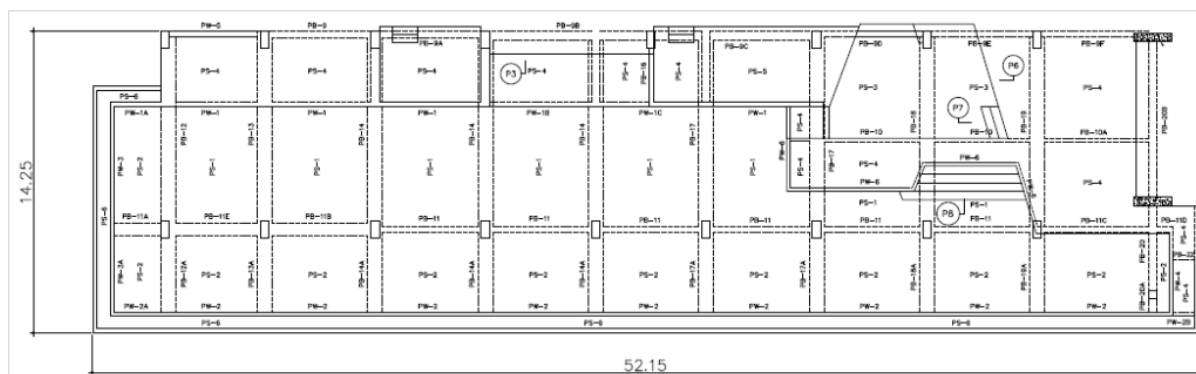
โครงสร้างที่ใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอาคารชุด 24 ชั้น จากรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) สระว่ายน้ำมีขนาดกว้าง 5 เมตร, ยาว 50 เมตร, มีความลึกอยู่ระหว่าง 1.20-1.25 เมตร (ความลึกของสระว่ายน้ำไม่คงที่เนื่องจากพื้นสระน้ำมีความลาดเอียง

(2) รับน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวที่ไม่ใช่ น้ำหนักของตัวพื้นเอง (super-imposed dead load) $1,000\text{kg./m.}^2$ และ

รับน้ำหนักบรรทุกจรที่เป็นน้ำหนักของน้ำ 1,200-1,250

kg./m.² (ขึ้นอยู่กับความลึกของสระว่ายน้ำ)



รูปที่ 1 แพลนโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำระบบคานพื้น (beam-slab)

(3) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่าง 28 วัน ของพื้นและผนังมีค่าเท่ากับ 331 kg./m.² และ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเท่ากับ 414 kg./cm.²

(4) ใช้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 5,118 kg./cm.² (เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ)

2.2 ข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้

ในการวิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้น โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงวิศวกรรมในแต่ละรูปแบบ จะต้องมีการตรวจสอบกับข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง โดยในการศึกษานี้จะมีเกณฑ์พิจารณาดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ EN 1992-1-1:2004 , Section 7.4.1 [1]

ลักษณะของแผ่นพื้น	ค่าที่ยอมให้
พื้นที่ไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้	L/250
พื้นที่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้	L/500

ตารางที่ 2 ความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน BS 8007:1987 [2]

สถานะเปิดเผยต่างๆ	ความกว้างสูงสุดของรอยร้าว (มม.)
โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำหรือกันน้ำ	0.2
โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำหรือกันน้ำที่ต้องการความสวยงามของพื้นผิว	0.1

2.3 การวิเคราะห์และออกแบบระบบแผ่นพื้นของ

โปรแกรม CSI SAFE

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองรูปแบบของโครงสร้างเสร็จแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าที่ทุกหน้าตัดของการออกแบบ ซึ่งโปรแกรมจะแสดงผลของการวิเคราะห์ให้เห็น เช่น ลักษณะของการโก่งตัวของแผ่นพื้น และแสดงหน่วยแรงที่คำนวณได้นั้นผ่านตามข้อกำหนดของมาตรฐานหรือไม่ และหากมีหน้าตัดของการออกแบบใดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมให้จำเป็นต้องเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนบริเวณหัวเสา หรือบางครั้งกรณีเหล็กเสริมยังไม่เพียงพออาจต้องเพิ่ม Drop Panel บริเวณหัวเสา เมื่อทำการแก้ไขแบบจำลองรูปแบบของโครงสร้างเสร็จแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมตรวจสอบผลอีกครั้ง และเมื่อผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมผ่านข้อกำหนดแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมแสดงรายละเอียด

ของเหล็กเสริม โดยโปรแกรมจะทำการกำหนดเหล็กเสริมและคำนวณปริมาณให้โดยอัตโนมัติ

3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การตรวจสอบพฤติกรรมของโครงสร้างรับสรวายน้ำระบบคาน-พื้น และเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

3.1.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำในโปรแกรมวิเคราะห์ CSI SAFE

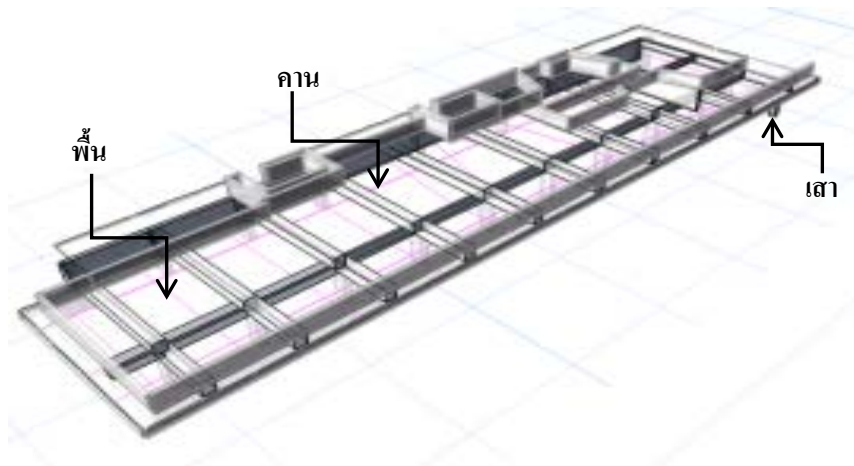
ในขั้นตอนการศึกษานี้ได้นำโปรแกรม CSI SAFE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของระบบแผ่นพื้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กและกำหนดหน่วยที่ใช้สำหรับการแสดงผลของโปรแกรมเป็นกิโลกรัมและมิลลิเมตร โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ได้จากการทดสอบก่อนตัวอย่าง 28 วันเท่ากับ

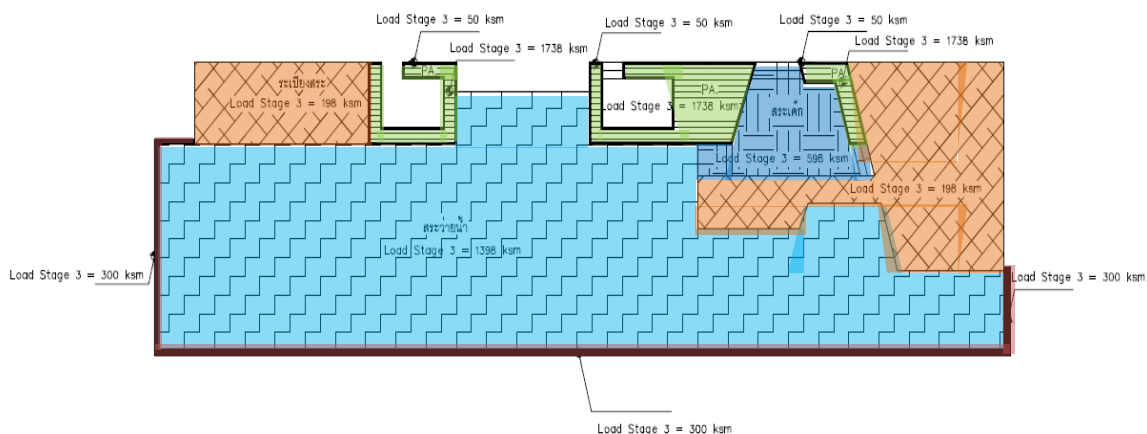
331 kg./cm.² กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเท่ากับ 414 kg./cm.² และใช้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 5,118 kg./cm.² (เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ) ตามลำดับให้กับโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดรูปแบบน้ำหนักบรรทุกให้กับโปรแกรมดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 แสดงน้ำหนักบรรทุกตามจริงในสภาวะการรับน้ำหนักเป็นพื้นที่ ซึ่งในแต่ละพื้นที่จะมีน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากในแต่ละพื้นที่จะมีวัสดุปิดผิวและมีการใช้งานที่แตกต่างกันไป เช่น พื้นที่ที่เป็นสรวายน้ำวัสดุปิดผิวจะเป็นกระเบื้องเพราะฉะนั้นน้ำหนักบรรทุกจะเกิดจากการรวมน้ำหนักกระเบื้องและน้ำหนักของน้ำ ในการคิदनน้ำหนักบรรทุกตามจริงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CSI SAFE ให้ผลที่ถูกต้อง



รูปที่ 2 แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของระบบแผ่นพื้นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 3 ลักษณะน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำที่กำหนดให้กับโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่าการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำจากการวิเคราะห์ของ โปรแกรม CSI SAFE เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่น ตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำที่วัด ได้จริงว่ามีผลที่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

3.1.2 การตรวจวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างรับ น้ำหนักสระว่ายน้ำ

ในการตรวจวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างรับสระว่ายน้ำ มีขั้นตอนดังนี้

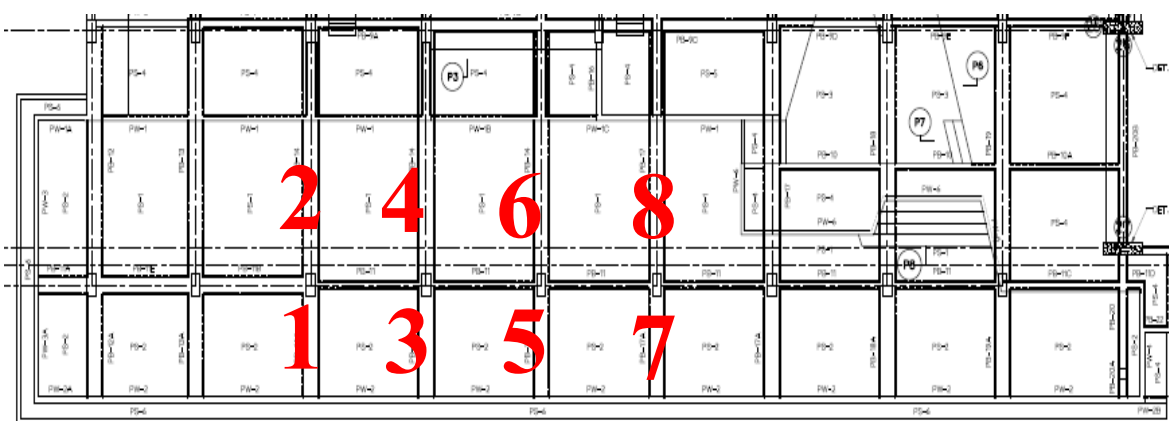
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตำแหน่งการวัดการแอ่นตัวของ พื้นและคาน โดยคำนึงถึงตำแหน่งที่คาดว่าจะอยู่ในช่วงการ

แอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ ดัง แสดงในรูปที่ 4 และ 5

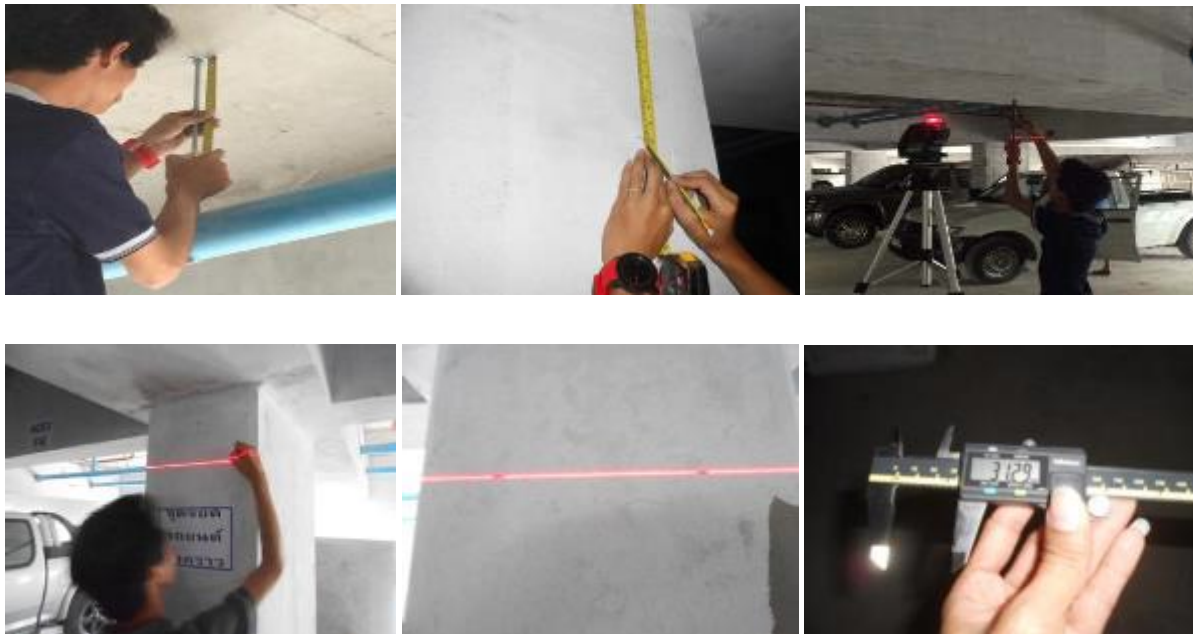
จากรูปที่ 4 และ 5 แสดงตำแหน่งที่อ่านค่าการแอ่นตัวของ คานรับสระว่ายน้ำและพื้นสระว่ายน้ำ โดยกำหนดเป็น ตัวเลขเพื่อแสดงตำแหน่งในการวัดค่าการแอ่นตัวในแต่ละ ตำแหน่ง ซึ่งในการกำหนดตำแหน่งในการวัดค่าการแอ่น ตัวเหล่านี้จะคำนึงถึงตำแหน่งที่น้ำจะเกิดการแอ่นตัวสูง เนื่องจากตำแหน่ง 2,4,6 และ 8 เป็นตำแหน่งในโซนสระ ว่ายน้ำจึงทำให้เป็นบริเวณที่รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ส่วน ในตำแหน่งหมายเลข 1,3,5 และ 7 เป็นตำแหน่งที่พื้นและ คานยื่นออกไปจากองค์อาคารหลัก และเพื่อให้ได้ผลการ วัดค่าการแอ่นตัวที่ถูกต้อง จะทำการวัดในสภาวะการรับ



รูปที่ 4 ตำแหน่งที่กำหนดในการอ่านค่าการแอ่นตัวของพื้นสระว่ายน้ำ



รูปที่ 5 ตำแหน่งที่กำหนดในการอ่านค่าการแอ่นตัวของคานสระว่ายน้ำ



รูปที่ 6 ตำแหน่งและระดับอ้างอิงที่หน้างานในการวัดการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ

น้ำหนักระดับต่างๆ (load stage) เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดในแต่ละตำแหน่งและในแต่ละสถานะการรับน้ำหนัก ระดับต่างๆว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่อย่างไร

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดตำแหน่งและระดับอ้างอิงบริเวณท้องพื้นและคาน เพื่อวัดการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 ระดับอ้างอิงได้รับการกำหนดโดยวัดจากท้องพื้นหรือคานลงมา เป็นระยะ 30 เซนติเมตร เพื่อเป็นระดับอ้างอิงในการใช้เวอร์เนียส การ์ลิปเปอร์วัดค่าการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ โดยเมื่อกำหนดระดับอ้างอิงได้แล้ว จะใช้เครื่องเลเซอร์จับระดับตามเส้นที่กำหนดเป็นระดับอ้างอิง แทนการใช้เชือกหรือเอ็นซิง เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการหย่อนตัวของเอ็นซิง

3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของพื้นโครงสร้างรับสระว่ายน้ำรูปแบบต่างๆ

การศึกษานี้ได้นำโปรแกรม CSI SAFE มาใช้วิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

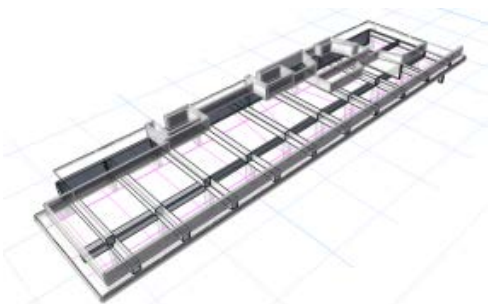
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดหน่วยที่ใช้สำหรับการแสดงผลของโปรแกรมเป็น kgf.m. และ ตัวคูณลดกำลังสำหรับ

โมเมนต์ดัด 0.9 และแรงเฉือน 0.75 ตามมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบซึ่งในที่นี้ใช้ของ ACI 318- 14 [3] และกำหนดคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ได้จากการทดสอบก่อนตัวอย่าง 28 วันเท่ากับ 331 kg./cm.^2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเท่ากับ 414 kg./cm.^2 และใช้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก เท่ากับ $5,118 \text{ kg./cm.}^2$ (ค่าจากการทดสอบ)

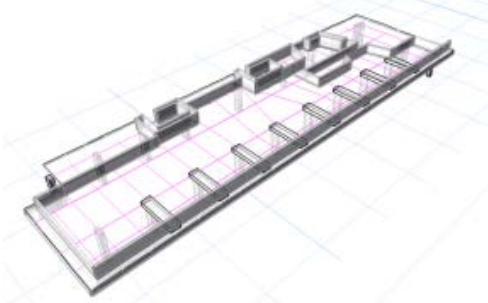
ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำในรูปแบบต่างๆเพื่อการเปรียบเทียบสมรรถนะในทางวิศวกรรม สำหรับการศึกษานี้ได้กำหนดไว้ 4 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยที่กำหนดระบบโครงสร้างคือระบบคานพื้น (beam-slab), ระบบคานแบน (band-beam), ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel), และระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab)

รูปที่ 7 แสดงแบบจำลองระบบโครงสร้างแต่ละแบบซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

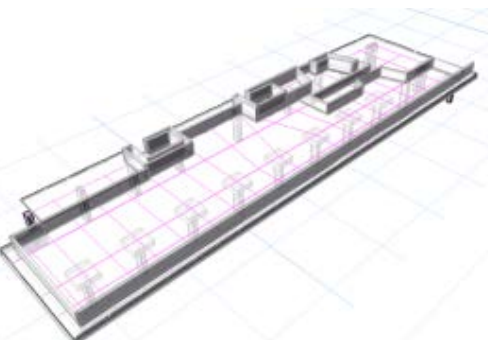
(1) แบบจำลองระบบโครงสร้างคานพื้น (beam-slab) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาน และพื้น โดยที่ พื้นของสระว่ายน้ำจะก่อสร้างเป็นพื้นวางบนคาน ซึ่งเหมือนเสาและคานของ อาคารที่ทำการตรวจสอบ



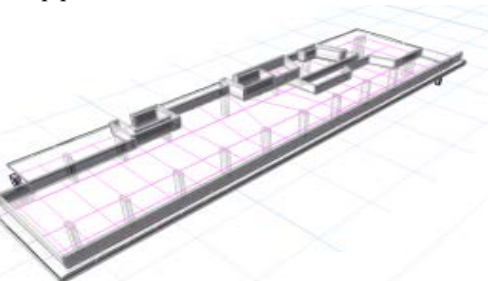
(ก.) แบบจำลองระบบโครงสร้างคานพื้น (beam-slab)



(ข.) แบบจำลองระบบโครงสร้างคาน แบน (band-beam)



(ค.) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel)



(ง.) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบ (flat slab)

รูปที่ 7 แบบจำลองระบบโครงสร้างที่ศึกษาในโปรแกรม

CSI SAFE

(2) แบบจำลองระบบโครงสร้างคานแบน (band beam) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคานแบน (band beam) และพื้น ซึ่งคานแบนจะมีขนาดความกว้าง 1.00 เมตร และหนา 0.45 เมตร โดย ที่คานแบนจะถูกจัดวางในตำแหน่งที่เป็นพื้น สระว่ายน้ำที่ขึ้นออกจากกองอาคารหลัก เพื่อช่วยลดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างรับน้ำหนัก สระว่ายน้ำ

(3) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย แป้นหัวเสา (drop panel) เพื่อช่วยในการรับ-ถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์คดขันดลระหว่างแผ่นพื้นกับเสา ซึ่งมีขนาดความกว้างและความยาว 2.25 X 2.25 เมตร และหนา 0.50 เมตร

(4) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบ (flat slab) เป็นโครงสร้างระบบแผ่นพื้น ไร้คานที่มีลักษณะของแผ่นพื้นท้องเรียบที่รองรับโดยเสา ซึ่งจะต้องเพิ่มเหล็กเสริมเพื่อรับแรงเฉือนบริเวณหัวเสา รวมถึงจะต้องเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นจาก ความหนาเดิม 22 เซนติเมตร เป็น ความหนา 27 เซนติเมตร เพื่อลดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างรับ น้ำหนักสระว่ายน้ำด้วย

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์แผ่นพื้นของแต่ละกรณีศึกษา เพื่อหาค่าและลักษณะการโก่งตัวของแผ่นพื้น, หน่วยแรงที่คำนวณได้ และความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่ตำแหน่งต่างๆ หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวข้างต้น มาตรวจสอบกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้ โดย ค่าการโก่งตัวสูงสุดของแผ่นพื้นที่โปรแกรมวิเคราะห์ได้จะนำมาตรวจสอบกับเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้ตาม EN 1992-1-1:2004, Section 7.4.1 [1] และค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่โปรแกรมวิเคราะห์ได้จะนำมาตรวจสอบกับเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้ตาม BS 8007:1987 [2] เมื่อผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมผ่านข้อกำหนดแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมแสดงรายละเอียดการเสริมเหล็ก รวมถึงปริมาณของเหล็กเสริม

3.3 การเปรียบเทียบเรื่องระยะเวลาการทำงาน และค่าใช้จ่าย

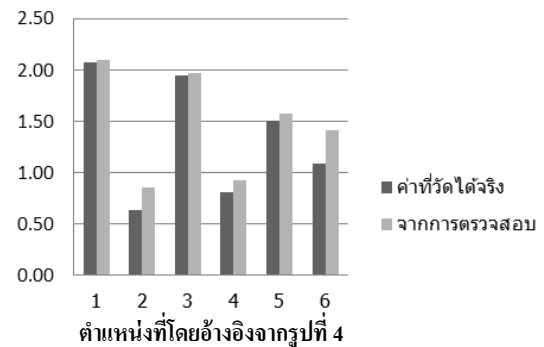
เมื่อออกแบบแผ่นพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำของแต่ละกรณีศึกษาเสร็จแล้ว จากนั้นทำการหาปริมาณวัสดุ เพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบราคาก่อสร้าง และ คำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างเพื่อเปรียบเทียบของระบบโครงสร้างในแต่ละรูปแบบ โดยการคำนวณราคาก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากบัญชีค่าวัสดุและค่าแรงงานสำหรับปีงบประมาณ 2558/2559 ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน [4] และการคำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากสถิติปริมาณงานก่อสร้างเฉลี่ยต่อวัน ของสำนักพัฒนามาตรฐานระบบอุตสาหกรรม [5]

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 พฤติกรรมของโครงสร้างรับสรวายน้ำระบบคาน-พื้น และเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

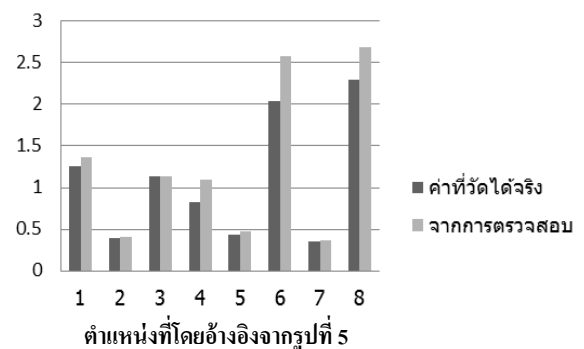
จากผลการวิเคราะห์การแอ่นตัวของพื้นและคานโครงสร้างสรวายน้ำด้วยโปรแกรม CSI SAFE เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวของพื้นและคานโครงสร้างสรวายน้ำที่วัดได้จากงานจริงจะได้ผลการเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9

ค่าการแอ่นตัว (มม.)



รูปที่ 8 ค่าการแอ่นตัวของพื้นสรวายน้ำระบบคาน-พื้น (beam-slab) ที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวของพื้นสรวายน้ำที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CSI SAFE

ค่าการแอ่นตัว (มม.)



รูปที่ 9 ค่าการแอ่นตัวของคานสรวายน้ำระบบคาน-พื้น ที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวของคานสรวายน้ำที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CSI SAFE

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความแตกต่างในด้านสมรรถนะของพื้น โครงสร้างรับสรวายน้ำในแต่ละกรณีศึกษา

ระบบโครงสร้าง	ค่าการโก่งตัวสูงสุดของพื้น (mm.)	ค่าหน่วยแรงสูงสุด(kg/cm ²)				ค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุด (mm.)	
		พื้นผิวล่าง		พื้นผิวนบน		พื้นผิวล่าง	พื้นผิวนบน
		ดึง	อัด	ดึง	อัด		
คาน-พื้น	1.51	46.42	45.50	194.99	29.69	0.186	0.176
คานแบน	4.19	90.57	442.63	627.64	55.11	0.193	0.193
พื้นที่รองรับมีเป็นหัวเสา	9.25	74.49	334.86	472.25	42.59	0.196	0.197
พื้นที่รองรับ	13.20	179.16	554.81	939.79	35.11	0.221	0.223

จากรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของพื้นและคานจากการวิเคราะห์กับค่าที่วัดได้จริงพบว่า ค่าการแอ่นตัวของพื้นในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างอยู่ที่ 11.50 % และ 10.18 % ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าที่ไม่แตกต่างจากโครงสร้างจริงมากจนเกินไป และน่าจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพื้นระบบอื่นๆ ได้ อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์มีแนวโน้มมากกว่าผลจากการตรวจสอบ ซึ่งอาจเป็นเพราะความต่อเนื่องของระบบโครงสร้างระหว่างระบบโครงสร้างสรวายน้ำกับโครงสร้างอาคารจึงทำให้มีการกระจายของสดีฟเนสไปยังโครงสร้างอาคาร และส่งผลให้ค่าการโก่งตัวจากการตรวจสอบน้อยกว่าค่าการโก่งตัวที่ได้จากการวิเคราะห์เล็กน้อย

4.2 สมรรถนะของพื้นโครงสร้างรับสรวายน้ำรูปแบบต่างๆ

จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CSI SAFE นั้นแสดงพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างจากโครงสร้างจริงมากจนเกินไป และน่าจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพื้นระบบอื่นๆ ได้ ซึ่งค่าการโก่งตัวสูงสุด, ค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุด และค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นในระบบโครงสร้างทั้ง 4 รูปแบบ สามารถแสดงดังตารางที่ 3

(1) ค่าการโก่งตัวสูงสุดของพื้นในระบบคานพื้น (beam-slab) มีค่าน้อยที่สุด และในระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) มีค่าการโก่งตัวของพื้นมากที่สุด เมื่อ เปลี่ยนรูปแบบระบบโครงสร้างจากคาน-พื้น (beam-slab) เป็นคานแบน (band-beam), ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) และ ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) พบว่าค่าการโก่งตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าที่มากที่สุดเท่ากับ 13.20 มม. ใน ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) จากกระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน EN 1992-1-1:2004, Section 7.4.1 [1] เมื่อพิจารณาโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำที่ทำการศึกษาใน ครั้งนี้จัดอยู่ในลักษณะ ของแผ่นพื้นที่ไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง(non-

structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากเกินไป เนื่องจากโครงสร้างรับน้ำหนัก สรวายน้ำดังกล่าวไม่มีส่วนใดที่เชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ดังนั้นการพิจารณาการโก่งตัวตามตารางที่ 1 จะพิจารณาจากการโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่า $L/250$ หรือ 15.20 มม.

(2) ในการวิเคราะห์ค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของโปรแกรม CSI SAFE จะคำนวณค่าความกว้างของรอยร้าวตามสมการในมาตรฐาน EN 1992-1-1:2004, Section 7.3.4 [1] จากตารางที่ 3 พบว่าค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของพื้นผิวล่างและผิวบนในระบบคานพื้น (beam-slab) มีค่าน้อยที่สุด ส่วนในระบบคานแบน (band beam) และ ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) มีค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของพื้นผิวล่างมากที่สุด ส่วนในระบบพื้น ท้องเรียบ (flat slab) มีค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของพื้นผิวบนมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.223 มม. จากตารางที่ 2 ค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน BS 8007:1987 [2] คือเท่ากับ 0.2 มม. ดังนั้นโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำที่ทำการศึกษาในครั้งนี้พบว่าค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดในระบบพื้นท้องเรียบเกินเกณฑ์มาตรฐาน BS 8007:1987 [2]

(3) ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นผิวบนและผิวล่าง ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เป็นบวกคือค่าการรับแรงดึงสูงสุด (tension stress) และค่าที่เป็นลบคือค่าการรับแรงอัดสูงสุด (compressive stress) จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม CSI SAFE พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เป็นหน่วยแรงดึงและแรงอัดของพื้นผิวบนและผิวล่าง ของพื้นในระบบคาน-พื้น (beam-slab) มีค่าน้อยที่สุด ส่วนในระบบคานแบน (band beam) พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นผิวบนซึ่งเป็นหน่วยรับแรงอัดสูงสุดของพื้นมีค่ามากที่สุด และในระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) จะมีค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นผิวล่างซึ่งเป็นหน่วยรับแรงดึงและรับแรงอัดมีค่ามากที่สุด

เมื่อเปลี่ยนรูปแบบระบบโครงสร้างจากคาน-พื้นเป็นระบบคานแบน ,ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา และระบบพื้นท้องเรียบ พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มมาก

ขึ้น ซึ่งค่าที่มากที่สุดคือในระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างของโปรแกรม CSI SAFE ถ้าตำแหน่งใดมีค่าหน่วยแรงสูงสุดมากก็จะมีเสริมเหล็กใน ตำแหน่งนั้นมากขึ้นด้วยเพื่อช่วยในการรับหน่วยแรงสูงสุด และให้ผ่านตามมาตรฐาน ACI 318-14 [3].

4.3 ระยะเวลาการทำงาน และ ค่าใช้จ่าย

เมื่อออกแบบแผ่นพื้น โครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ ของแต่ละกรณีศึกษาเสร็จแล้วจากนั้น ทำการหาปริมาณวัสดุ ซึ่งได้แก่ปริมาณคอนกรีตและไม้แบบที่ใช้ รวมไปถึงถึงปริมาณเหล็กเสริมด้านทานแรงเฉือนและเหล็กตะแกรง เพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบราคาก่อสร้างและคำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างเพื่อเปรียบเทียบของระบบโครงสร้างในแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 โดยการคำนวณราคาก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากเอกสารบัญชีค่าวัสดุและค่าแรงงานสำหรับปีงบประมาณ 2558/2559 ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน [4] และการคำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากเอกสารสถิติปริมาณงาน

ก่อสร้างเฉลี่ยต่อวัน ของสำนักพัฒนามาตรฐานระบบวัสดุภาครัฐ [5]

จากตารางที่ 4 สามารถสรุปได้ดังรายการต่อไปนี้

(1) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบคานพื้น (beam-slab) มีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างสูงที่สุด

(2) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) มีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างต่ำที่สุด

(3) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบคานแบน (band-beam) และระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) มีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งระบบคานแบน (band-beam) จะมีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างสูงกว่าระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4 ปริมาณวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการก่อสร้างในแต่ละกรณี

ระบบ โครงสร้าง	รายละเอียด	หน่วย	ปริมาณ	ค่าวัสดุ		ค่าแรง		จำนวนเงิน รวม (บาท)
				ราคา/ หน่วย (บาท)	รวม (บาท)	ราคา/ หน่วย (บาท)	รวม (บาท)	
คาน-พื้น	คอนกรีต	ลบ.ม.	327.16	2,630	860,430	391	127,919	2,577,122
	เหล็กเสริม	ตัน	19.43	20,630	400,840	2,807	54,540	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,794.22	498.69	894,759	133	238,631	
คานแบน	คอนกรีต	ลบ.ม.	234.55	2,630	616,866	391	91,709	2,070,532
	เหล็กเสริม	ตัน	21.87	20,630	451,178	2,807	61,389	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,344.63	498.69	670,553	133	178,835	
พื้นท้องเรียบ มีแป้นหัวเสา	คอนกรีต	ลบ.ม.	234.77	2,630	617,445	391	91,795	1,967,609
	เหล็กเสริม	ตัน	17.81	20,630	367,420	2,807	49,992	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,331.28	498.69	663,896	133	177,060	
พื้นท้องเรียบ	คอนกรีต	ลบ.ม.	180.41	2,630	474,478	391	70,540	1,851,522.
	เหล็กเสริม	ตัน	20.94	20,630	431,992	2,807	58,778	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,291.35	498.69	643,983	133	171,749	

ตารางที่ 5 ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำของ แต่ละกรณีศึกษา

ระบบ โครงสร้าง	รายละเอียด	ปริมาณ	หน่วย	งานที่ได้/วัน (8 ชั่วโมง)		ใช้เวลาในการ ทำงาน (วัน)	ใช้เวลาในการทำงาน รวม (วัน)
				ปริมาณ	หน่วย		
คาน-พื้น	คอนกรีต	327.16	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	9.3	1,321.46
	เหล็กเสริม	19,430	กก.	22.50	กก.	863.6	
	ไม้แบบ	1,794.22	ตร.ม.	4.00	ตร.ม.	448.6	
คานแบน	คอนกรีต	234.55	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	6.7	1,146.66
	เหล็กเสริม	21,870	กก.	26.00	กก.	841.2	
	ไม้แบบ	1,344.63	ตร.ม.	4.50	ตร.ม.	298.8	
พื้นที่รองรับ มีเป็นหัวเสา	คอนกรีต	234.77	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	6.7	962.18
	เหล็กเสริม	17,810	กก.	27.00	กก.	659.6	
	ไม้แบบ	1,331.28	ตร.ม.	4.50	ตร.ม.	295.8	
พื้นที่รองรับ	คอนกรีต	180.41	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	5.2	942.45
	เหล็กเสริม	20,940	กก.	29.00	กก.	722.1	
	ไม้แบบ	1,291.35	ตร.ม.	6.00	ตร.ม.	215.2	

จากตารางที่ 5 สามารถสรุปได้ว่า ระบบคาน-พื้น (beam-slab) ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างมากที่สุด และ ระบบพื้นที่รองรับ (flat slab) ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยที่สุด

5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

(1) ถ้าเป็นโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำที่มีลักษณะแผ่นพื้น ไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหาย จากการโก่งตัวมากเกินไป โดยการศึกษาในครั้งนี้พบว่าโครงสร้างระบบพื้นที่รองรับ มีค่าการโก่งตัวสูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 13.20 มม. แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน EN 1992-1-1:2004, Section 7.4.1 [1]

(2) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่ระบบคาน-พื้นจะมีค่าความกว้างของรอยร้าวที่สูงขึ้นจึงต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กตะแกรงเพื่อลดความกว้างของรอยร้าว โดยเฉพาะระบบโครงสร้างระบบพื้นที่รองรับที่จากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม CSI SAFE พบว่ามีค่ารอยร้าวสูงสุดเท่ากับ 0.223 มม. ซึ่งเกินค่าที่ยอมให้ตาม BS 8007:1987 [2]

(3) ในการก่อสร้างระบบพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำระบบพื้นที่รองรับสามารถลดการสูญเสียไม้แบบได้มากกว่าการก่อสร้างระบบคาน-พื้นและทำให้สามารถนำไม้แบบไปใช้งานในการก่อสร้างหลายๆ โครงการจะทำให้หมุนเวียนไม้แบบและใช้ไม้แบบได้อย่างคุ้มค่า รวมถึงเพิ่มพื้นที่การใช้งานได้โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำได้เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

(4) ในการก่อสร้างระบบพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำระบบพื้นที่รองรับสามารถลดระยะเวลาและงบประมาณในการก่อสร้างได้สูงที่สุดแต่มีข้อควรระวังในเรื่องความกว้างของรอยร้าวสูงที่สุดเนื่องจากมีค่าเกินเกณฑ์ที่ยอมให้ตามมาตรฐาน BS 8007:1987 [2]

(5) ข้อควรระวังในการออกแบบระบบโครงสร้างที่เป็นระบบอื่นๆ ในกรณีการศึกษาในครั้งนี้โดยเฉพาะระบบโครงสร้างพื้นที่รองรับจะต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กในบริเวณที่มีค่าหน่วยแรงสูง และในการเสริมเหล็กพิเศษในบริเวณหัวเสา เพื่อรองรับแรงเฉือนทะลุรวมถึงค่าความกว้างของรอยร้าวสูงขึ้น จึงต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กตะแกรงเพื่อลดความกว้างของรอยร้าว

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (CE-KMUTT-FTERO 6002) และความกรุณาจากบริษัท Computer and Structures, Inc ที่ได้อนุเคราะห์โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง CSI ETABS และ CSI SAFE ให้ทางผู้วิจัยได้ใช้และศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] British Standard Eurocode 1992-1, 2004, Euro code Design of concrete structure (BS EN 1992-1-1:2004), British Standards Institute, London, pp. 1-230
- [2] British Standard Eurocode 8007, 1987, Design of concrete structures for retaining aqueous liquids (BS 8007:1997), British Standards Institute, London, pp.1-150
- [3] ACI Committee 318, 2014, Building code requirements for structural concrete (ACI318-14) and commentary (ACI318R-14), American Concrete Institute. Farmington Hill, MI, pp. 63-235
- [4] Design and construction team, Office of the basic education commission of Thailand, Cost Reference for construction material and labor for the fiscal year 2015/2016, Bureau of trade and economic indices, Ministry of commerce, pp. 1 – 90. (in Thai)
- [5] Thai government procurement office, 2007, Details of calculation for labor cost and operation cost per unit, The Comptroller General's Department (CGD), pp. 1–81. (in Thai)