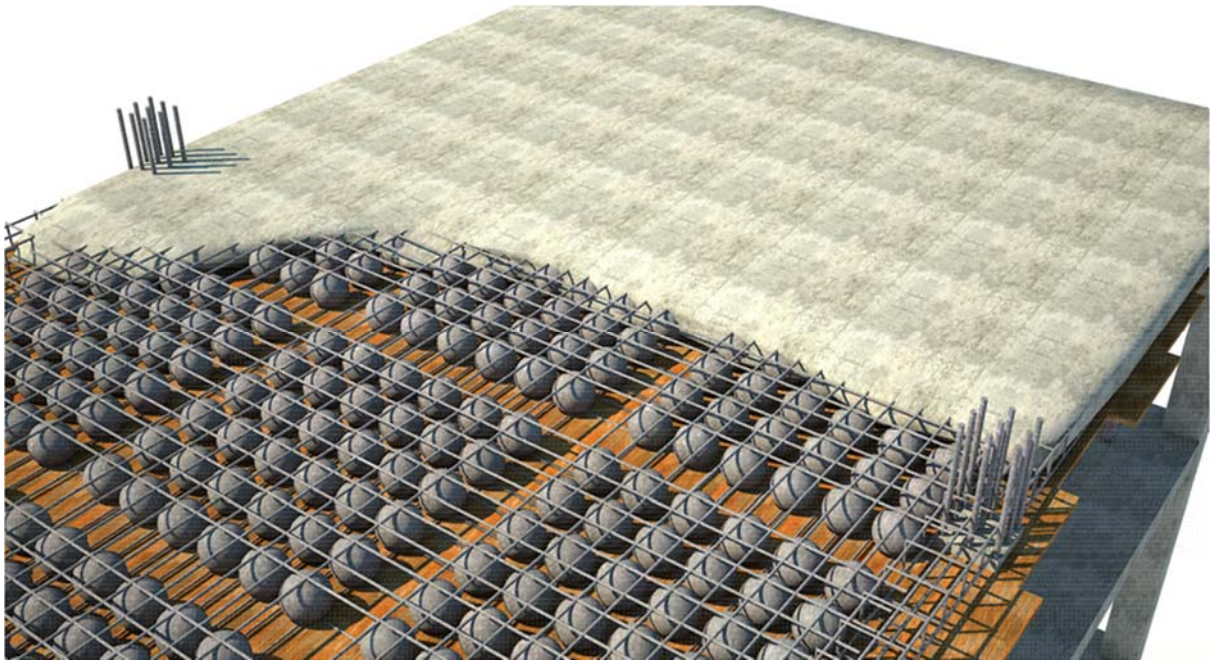
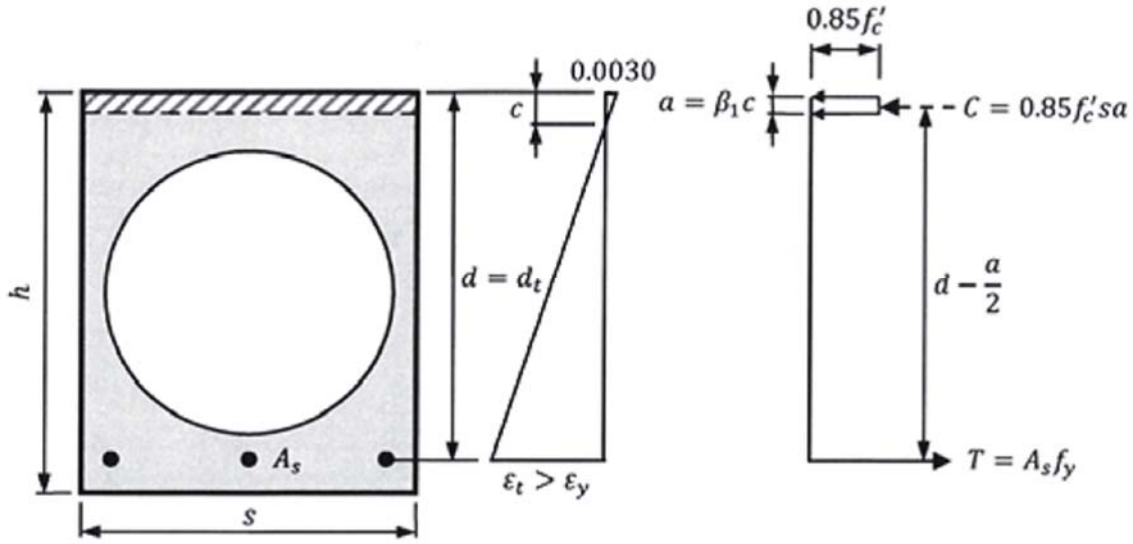
ระบบพื้นไร้คานท้องเรียบแบบกลวง

Flat plate voided biaxial slab systems or Bubble deck



ระบบพื้นไร้คานท้องเรียบแบบกลวง เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดยใช้แนวคิดเดียวกับแผ่นพื้นสำเร็จแบบกลวง (Hollow core precast slab) ต่างกันที่ไม่ได้เป็นพฤติกรรมแบบพื้นทางเดียวเหมือนแผ่นพื้นสำเร็จแบบกลวง แต่เป็นพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบพื้นสองทาง (Two way slab)

พิจารณาแรงภายในและความสอดคล้องของความเครียด (Strain compatibility) จะเห็นว่าส่วนที่รับแรงอัดเหนือแกนสะเทินสำหรับพื้นจะอยู่สูงมาก และมีพื้นที่ด้านล่างที่รับแรงดึงอยู่มาก จึงมีแนวคิดในการเอาคอนกรีตบริเวณใต้แกนสะเทินบางส่วนออกได้



เทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการสร้างช่องโล่งในคอนกรีต คือการใส่ลูกบอลพลาสติก (plastic voided former) ทรงกลมหรือทรงรี ฝังไว้ในความหนาพื้นก่อนเทคอนกรีต โดยมีเหล็กเสริมประคองไว้และเป็นตัวกำหนดระยะและความสูงของลูกบอล

ระบบพื้นโล่งโดยบอลพลาสติก (Plastic Voided Slab Systems)

ลูกบอลพลาสติก (Plastic voided former) ส่วนใหญ่เริ่มพัฒนาและผลิตในยุโรป วัสดุที่นำมาใช้เป็น HDPE plastic ball (High Density recycled PolyEthylene) โดยมีคุณสมบัติดังนี้

Material: **HDPE**

Compressive strength: **30,000 kN/m2**

Young Modulus: **8.00x105 kN/m2**

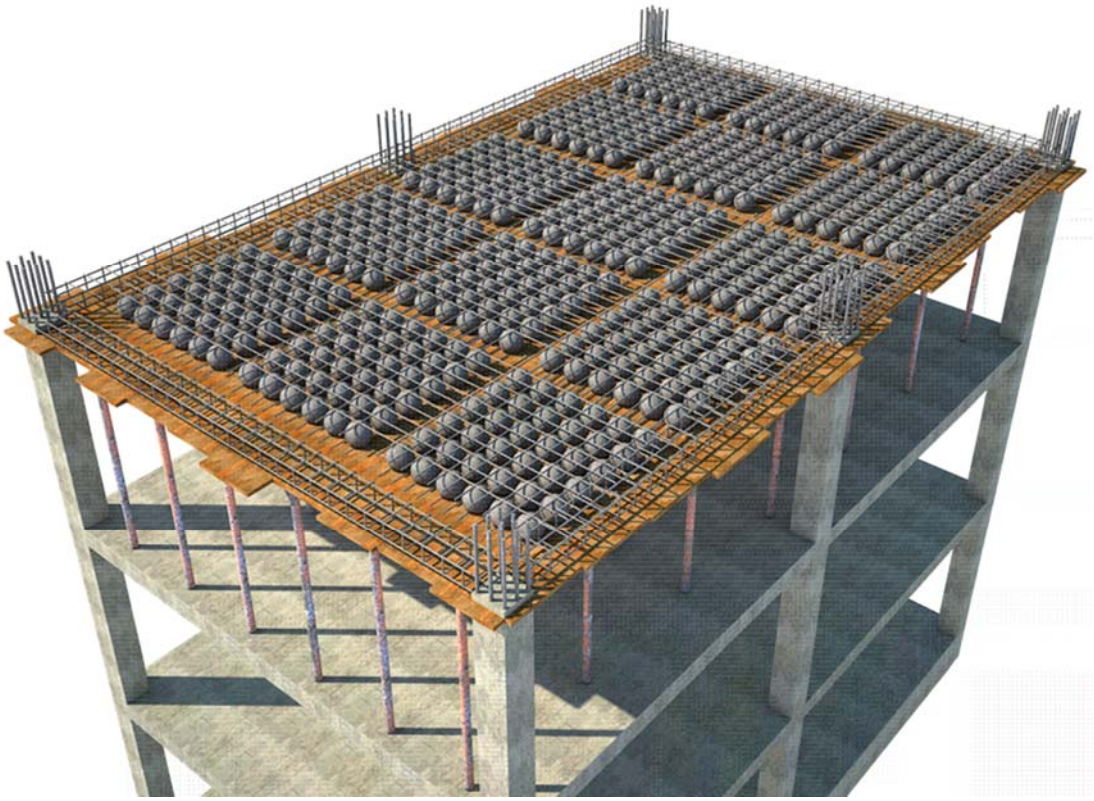
Poisson's Ratio: **0.42**

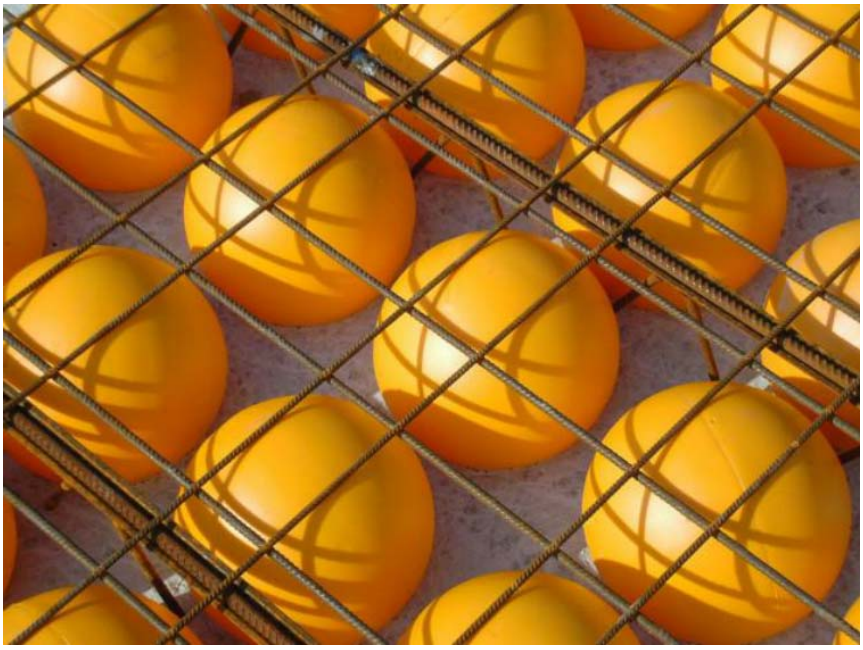
Thermal Expansion: **2.0x10-5**

Density: **10.01 kN/m3**

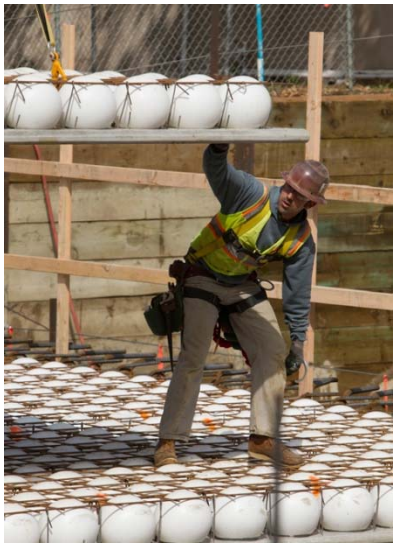
โดยทั่วไปมีสองบริษัทที่นิยมใช้กันมากในสหรัฐอเมริกาคือ Bubble deck และ Cobiax ซึ่งใช้ลูกบอลทรงกลมหรือทรงรี ส่วนระบบ U-Boot beton เป็นระบบของบริษัทที่พัฒนาขึ้นในประเทศอิตาลีที่ใช้พลาสติกรูปร่างที่ต่างออกไปเพื่อสร้างแนวคอนกรีตให้เป็นรูปตัวไอ ช่วยในการรับน้ำหนักให้ดีขึ้น โดยแต่ละระบบมีรายละเอียดดังนี้

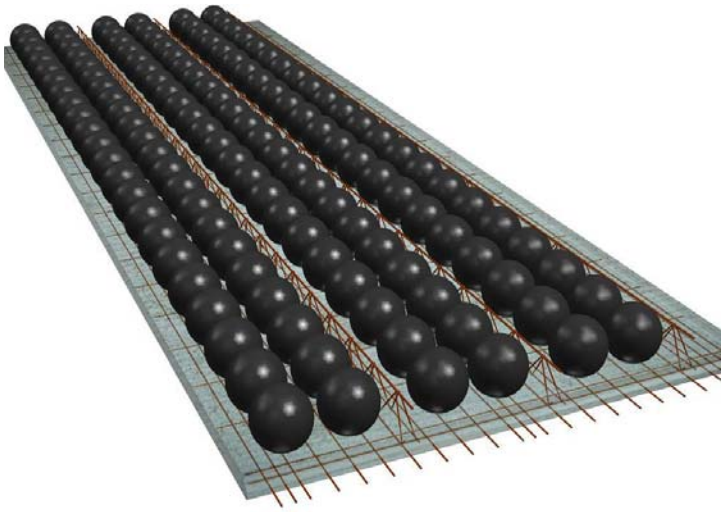
1. ระบบของ Bubble Deck

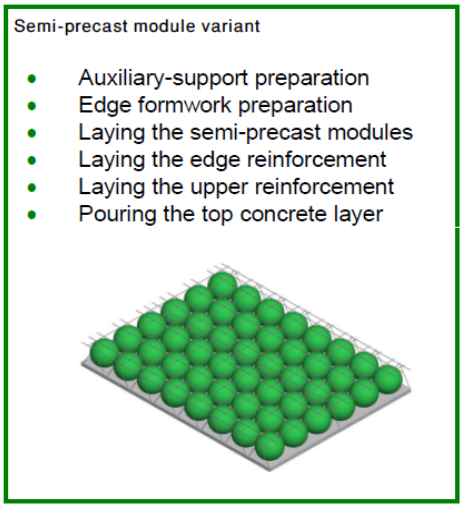




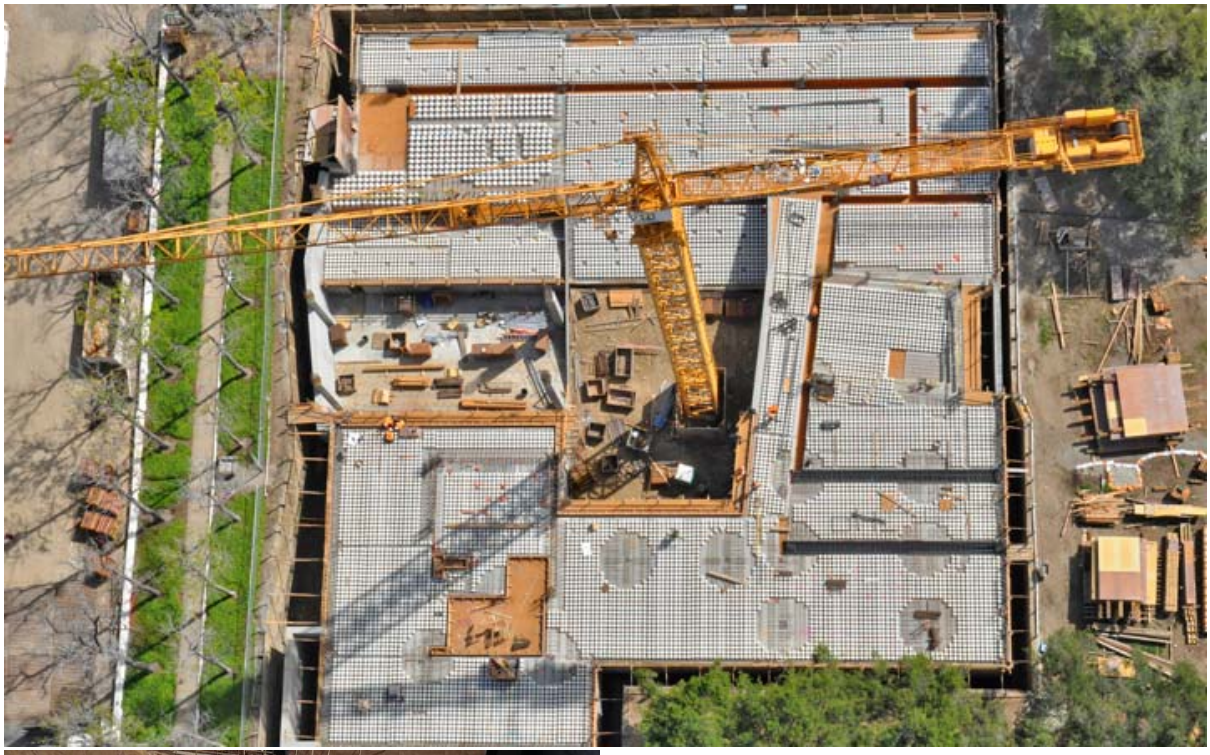
1.1 Semi-precast system เป็นระบบที่หล่อพื้นส่วนล่างมาจากโรงงานเพื่อใช้เป็นแบบหล่อเพื่อติดตั้งและติดตั้งลูกบอลและเหล็กเสริมมาแล้วเป็นแผงสำเร็จรูป แสดงดังรูปด้านล่าง

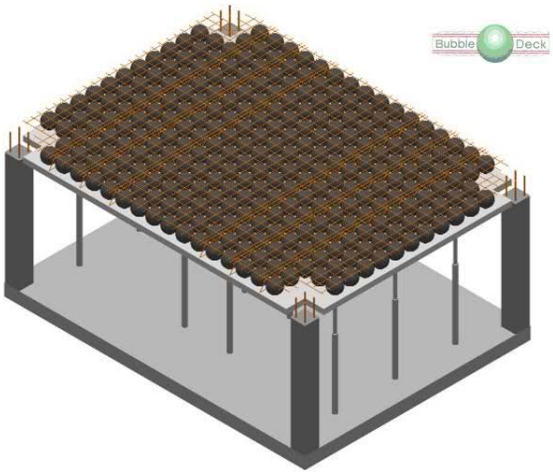






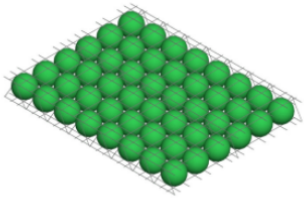
1.2 Cast-in-place system ติดตั้งเหล็กเสริมและลูกบอลตามตำแหน่งที่ระบุในแบบก่อสร้างที่หน่วยงานก่อสร้าง แล้วเทคอนกรีต





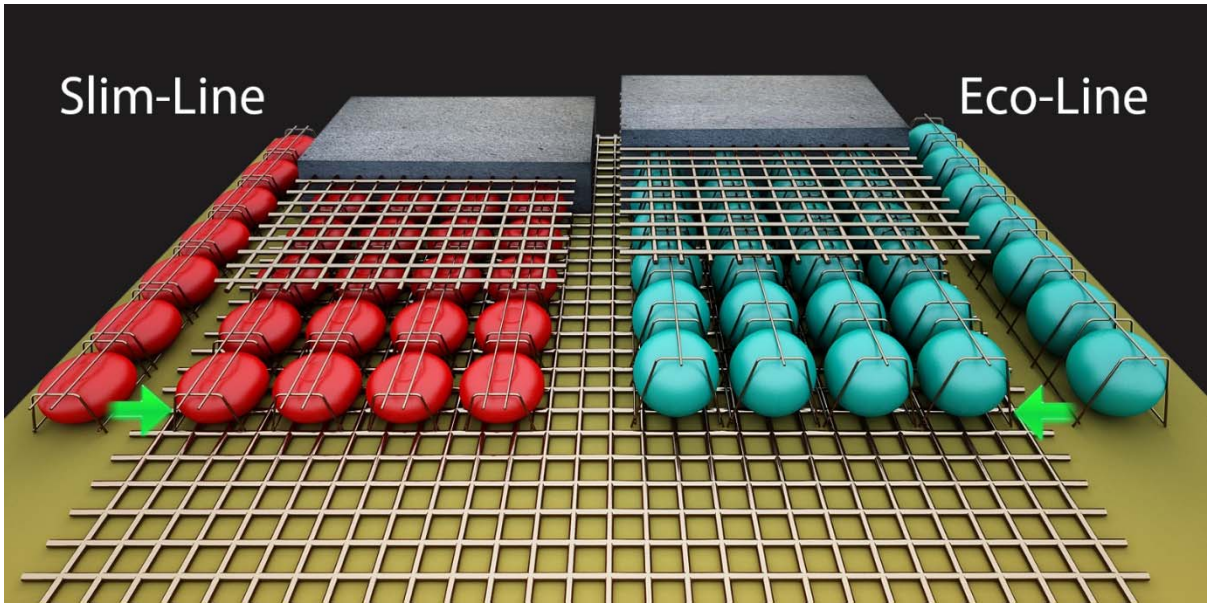
In-situ concrete variant

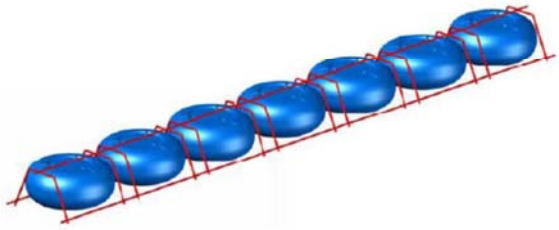
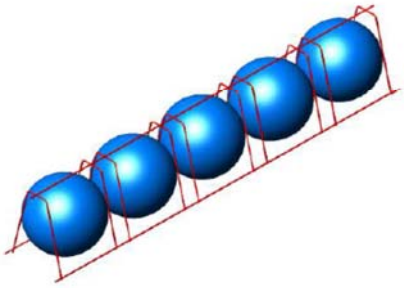
- Formwork preparation
- Laying the lower reinforcement
- Installation of the basic modules
- Laying the upper reinforcement
- Pouring the bottom concrete layer
- Pouring the top concrete layer



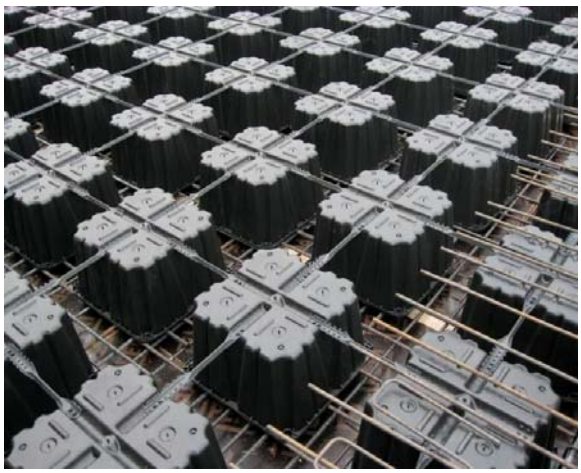
2. ระบบของ Cobiax

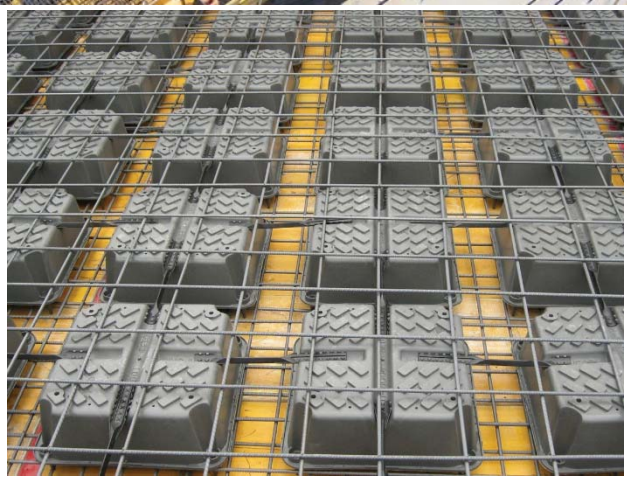
Cobiax เป็นระบบที่ก่อสร้างหน้างาน มีลูกบอล 2 แบบให้เลือกใช้คือแบบทรงกลม (Sphere) และทรงรี (Ellipse) สำหรับลูกบอลทรงรีจะมีลักษณะคือ เมื่อมองจากด้านบนจะมีรูปร่างเป็นวงกลม และเมื่อมองด้านข้างจะมีลักษณะเหมือนแคปซูล การติดตั้งเริ่มจากติดตั้งแบบหล่อพื้นพร้อมกับติดตั้งเหล็กเสริมล่าง จากนั้นติดตั้งลูกบอลและยึดติดกับเหล็กเสริมตามตำแหน่งที่ระบุในแบบก่อสร้าง จากนั้นติดตั้งเหล็กเสริมบน การเทคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ครั้ง ชั้นแรกจะเทให้คลุมเหล็กเสริมล่างและอมลูกบอลลางส่วนเพื่อยึดลูกบอลให้ตรงตามตำแหน่งเมื่อคอนกรีตแข็งตัว เมื่อคอนกรีตที่เทครั้งแรกเริ่มแข็งตัว (ประมาณ 2-3 ชั่วโมง) ให้เทครั้งที่สองจนเต็มความหนาพื้น จุดเด่นของระบบนี้คือ ลักษณะของลูกบอลที่มีสองแบบดังรูปด้านล่าง ลูกบอลในลักษณะทรงรีจะทำให้สามารถออกแบบพื้นได้บางกว่าลูกบอลทรงกลม



Cobiax **Slim-Line** cage modules, designated **CBCM-S-xxx** (identified by a number [xxx] which is the respective void former's height in mm).	Cobiax **Eco-Line** cage modules, designated **CBCM-E-xxx** (identified by a number [xxx] which is the respective void former's height in mm).
	
For slab depths 200 mm to 340 cm	**For slab depths 350 mm to 600⁺ mm**

3. ระบบของ U-boot Beton (U-boot)





เป็นระบบที่มาจากประเทศอิตาลี ซึ่งไม่ได้ทำช่องโล่งด้วยลูกบอลทรงกลมหรือทรงรี แต่มีลักษณะคล้ายกล่อง แสดงดังรูปด้านล่าง

u-boot beton

การทำช่องโล่งในพื้นลักษณะนี้ จุดประสงค์เพื่อจะทำให้สร้างชิ้นส่วนคอนกรีตรูปตัวไอ (I-shape) เพื่อทำให้พื้นมีความแข็งแรง (ดูรูปด้านล่างประกอบ) วิธีการติดตั้งจะหมือนวิธีของ Cobiax คือติดตั้งที่หน้างานและแบ่งเทคอนกรีต 2 ครั้ง

การออกแบบพื้น Post tension สำหรับ Voided slab

ระบบพื้นไร้คานท้องเรียบแบบกลวง เริ่มต้นใช้งานในพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นจึงเริ่มนำมาใช้ในงานพื้น Post tension ในปัจจุบันเราสามารถใช้โปรกรมคอมพิวเตอร์ที่วิเคราะห์โครงสร้างด้วย Finite Element Method (FEM) ได้อย่างแพร่หลาย จึงมีความเห็นว่าควรที่จะวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ FEM

เพื่อที่จะได้ค่าแรงภายในที่เกิดขึ้นและการโก่งตัวอย่างแม่นยำ และนำค่าที่ได้มาออกแบบ ขั้นตอนในการออกแบบมี ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือกชนิดของ Plastic ball

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณคุณสมบัติของวัสดุ

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดน้ำหนักบรรทุก SDL, LL หรือ น้ำหนักบรรทุกอื่นๆ

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือน

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดบริเวณ Solid slab และ Voided slab

ขั้นตอนที่ 6 วางแนวและโปรไฟล์ของลวดอัดแรง

ขั้นตอนที่ 7 วิเคราะห์โครงสร้างด้วย Finite Element

ขั้นตอนที่ 8 กำหนดแนว design strip

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบ stress ที่ผิวบนและผิวล่าง

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบการออกแบบกำลังรับแรงดัด

ขั้นตอนที่ 1 เลือกชนิดของ Plastic ball

ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะ plastic ball ที่นิยมใช้กันทั่วไปคือของ Bubble deck ที่เป็นลูกบอลทรงกลมและ Cobiax ที่เป็นลูกบอลทรงกลมและทรงรี โดยดูคุณสมบัติของวัสดุเพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณคุณสมบัติของวัสดุ

ทั้งสองผลิตภัณฑ์มีข้อมูลทางเทคนิคดังนี้

BubbleDeck® Design Guide

Ball diameter	[cm]	18.00	22.50	27.00	31.50	36.00	40.50	45.00
Minimum axis spacing	[cm]	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
Maximum number of balls	[1/m^2]	25.00	16.00	11.11	8.16	6.25	4.94	4.00
Recommended minimum slab thickness	[cm]	23.00	28.00	34.00	40.00	45.00	52.00	58.00
Load reduction per ball	[kN]	0.08	0.15	0.26	0.41	0.61	0.87	1.19
Maximum load reduction per sq. metre	[kN/m^2]	1.91	2.39	2.86	3.34	3.82	4.29	4.77
Rigidity factor	[-]	0.88	0.87	0.87	0.88	0.87	0.88	0.88
Shear factor	[-]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60

Main parameter of cobiax cage modules

Slab depth	[mm]	200	225	250	275	300	325	350	400	450	500	550	600
		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Recommended Cobiax cage module type	[-]	CBCM-S-100	CBCM-S-120	CBCM-S-140	CBCM-S-160	CBCM-S-180	CBCM-S-200	CBCM-S-220	CBCM-E-270	CBCM-E-315	CBCM-E-360	CBCM-E-405	CBCM-E-450
Dead load reduction* per m²	[kN/m²]	-1.40	-1.64	-1.88	-2.10	-2.32	-2.56	-2.80	-2.86	-3.34	-3.82	-4.29	-4.77
Stiffness correction factor	[-]	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89
Shear reduction factor	[-]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Cage module support height	[mm]	110	130	150	170	190	210	230	275	320	366	411	457
Void former height	[mm]	100	120	140	160	180	200	220	270	315	360	405	450
Void former horizontal diameter	[mm]	315	315	315	315	315	315	315	270	315	360	405	450
Spacing between void formers	[mm]	35	35	35	35	35	35	35	30	35	40	45	50
Void former centre line spacing	[mm]	350	350	350	350	350	350	350	300	350	400	450	500
Number of void formers per m²	[-]	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16	11.11	8.16	6.25	4.94	4.00
Concrete displacement per m²	[m³/m²]	0.056	0.066	0.075	0.084	0.093	0.102	0.112	0.114	0.134	0.153	0.172	0.191
Void formers per cage module**	[-]	7	7	7	7	7	7	7	8	7	6	5	5
Equivalent area per cage module	[m²]	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.72	0.86	0.96	1.01	1.25

*) assuming a concrete density of 25 kN/m³ **) made to fit the 2.50 m long cages

คำนวณค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Sectional area ratio

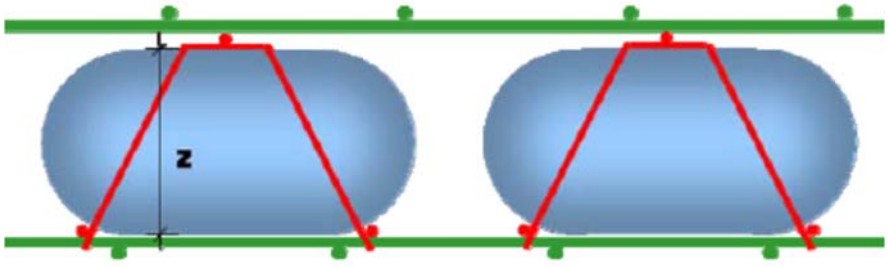
ดูค่า spacing ของลูกบอล และความหนาของพื้น แล้วนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด ดังนี้ เช่น เลือกใช้ลูกบอลทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100mm clear spacing ระหว่างลูกบอล 30mm ความหนาพื้นเท่ากับ 210mm

ดังนั้น **Area** **= 210x(100+30)** **= 27,300 mm²**

Ball Area $= \frac{\pi}{4} D^2$ **= 7,854 mm²**

Sectional area ratio $= \frac{\text{Area - Ball Area}}{\text{Area}} = \frac{27{,}300-7{,}854}{27{,}300} = 0.71$

ในกรณีที่ เลือกใช้ลูกบอลทรงรี ลูกบอลลักษณะนี้เมื่อมองจากด้านบนจะมีรูปร่างเป็นวงกลม และเมื่อมองด้านข้างจะมีลักษณะเหมือนแคปซูล ดังรูป



ยกตัวอย่าง ใช้ลูกบอลทรงรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 170mm ความสูงของลูกบอล 110mm clear spacing ระหว่างลูกบอล 30mm ความหนาพื้นเท่ากับ 210mm

ดังนั้น Area = 210x(170+30) = 42,000 mm²

Ball Area $= \frac{\pi}{4}110^2 + 110x(170\text{-}110) = 16{,}103\ mm^2$

Sectional area ratio $= \frac{\text{Area - Ball Area}}{\text{Area}} = \frac{42{,}000-16{,}103}{42{,}000} = 0.62$

คำนวณค่าอัตราส่วนของน้ำหนัก Weight ratio

เมื่อกำหนดความหนาพื้น ให้คำนวณค่าน้ำหนักต่อตารางเมตรของพื้นคอนกรีตเต็ม จากนั้นดูน้ำหนักที่หายไปต่อตารางเมตรจากตาราง

เช่น เลือกพื้นหนา **0.23m** น้ำหนักต่อตารางเมตรเท่ากับ **552 kg/m²** เลือกใช้ ลูกบอลเส้นผ่านศูนย์กลาง 18cm จากตาราง สามารถลดน้ำหนักได้ **1.91 kN/m²** หรือ **1.91x101.97 = 194.76 kg/m²**

$$\textbf{Weight ratio} = \frac{(552-194.76)}{552} = 0.65$$

ค่าอัตราส่วน Rigidity factor หรือ Stiffness correction factor

เมื่อพื้นที่เราใช้งานมีช่องโล่งอยู่ภายในจะทำให้ค่า stiffness ของพื้นมีค่าลดลง จึงต้องมีการปรับแก้ค่า I โดยจะมีค่าระบุให้ในตาราง เรียกว่าค่า Rigidity factor หรือ Stiffness correction factor เป็นค่า

I_{pvs}/I_{slab}

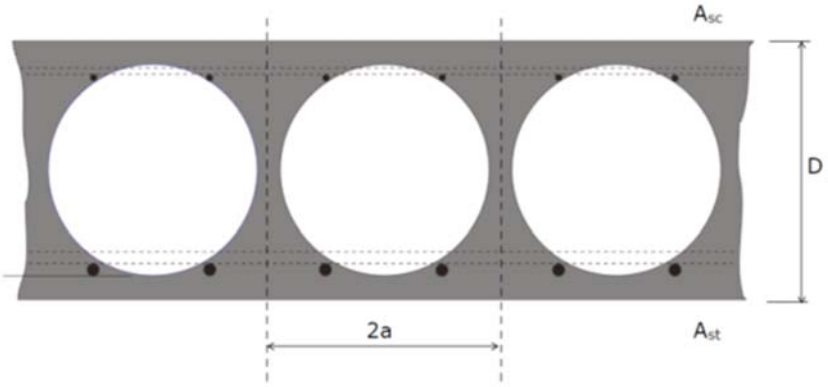
โดยที่ I_{pvs} = ค่า I ของ plastic voided slab

I_{slab} = ค่า I ของ solid slab

สำหรับกรณีที่ไม่ได้ใช้ค่าจากตาราง สามารถใช้สูตรอย่างง่ายในการคำนวณ I_{pvs} ต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง สำหรับลูกบอลแบบทรงกลมเท่านั้นโดยใช้สูตร $I_{pvs} = \frac{D^3}{12} - 0.124a^3$

โดยที่ D = Overall thickness of slab

a = distance from the center of one void to the center of a solid section

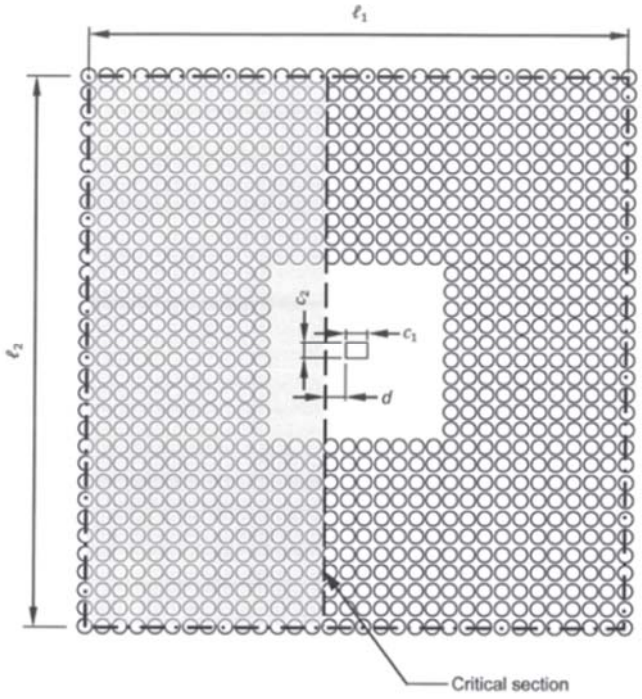


Basic Bubbledeck Geometry

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดน้ำหนักบรรทุก SDL, LL หรือ น้ำหนักบรรทุกอื่นๆ

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบแรงเฉือน

4.1 One way shear or Beam shear

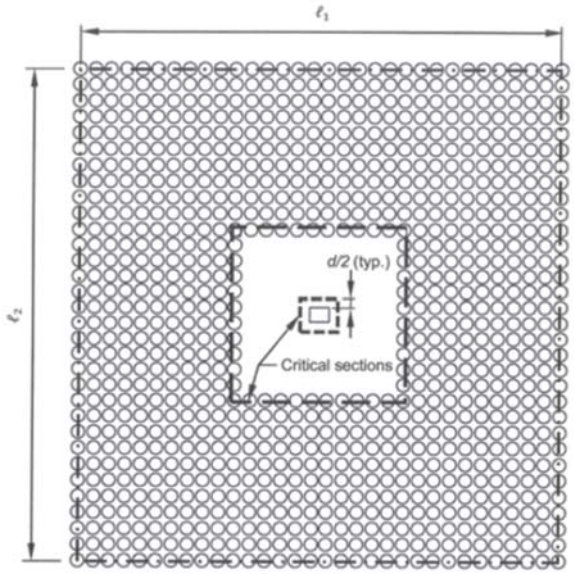


การตรวจสอบ One way shear ที่ระยะ d จากหน้าเสา จะเห็นว่าแนวหน้าตัดวิกฤติผ่านทั้งส่วนที่เป็นพื้นเต็มและพื้นที่เป็น voided slab การคิดน้ำหนักจะต้องลดน้ำหนักเนื่องจาก voided slab ด้วย ส่วนกำลังรับแรงเฉือนของพื้น คำนวณจากสูตร

$$\emptyset \boldsymbol{Vc} = \emptyset \mathbf{0.53} \boldsymbol{f_{sr}} \sqrt{\boldsymbol{fc'}} . \boldsymbol{b} . \boldsymbol{d}$$ โดยที่ f_{sr} = Voided shear reduction factor

มีค่าประมาณ 0.50-0.60 ซึ่งจะระบุไว้ในตารางข้อมูลจากผู้ผลิต

4.2 Two way shear or Punching shear



การตรวจสอบ Two way shear จะตรวจสอบที่หน้าตัดวิกฤติ 2 ตำแหน่งคือ ที่ระยะ d/2 จากหน้าเสา และที่ระยะ d/2 จากขอบพื้นเต็ม การคิดน้ำหนักจะต้องลดน้ำหนักเนื่องจาก voided slab ด้วย

ส่วนกำลังรับแรงเฉือนของพื้น ที่ระยะ d/2 จากหน้าเสา คำนวณจากสูตรปกติ คือ

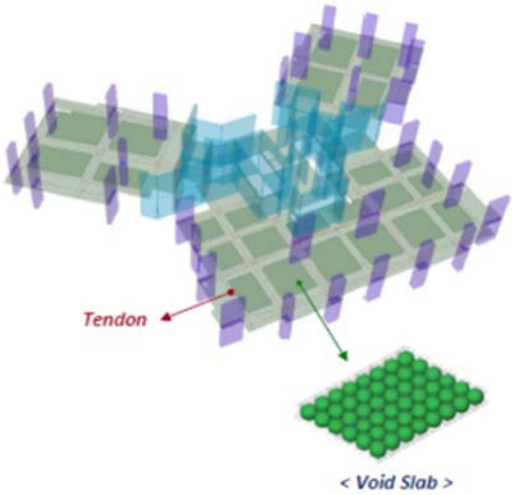
$$\emptyset Vc = minimum\ of \begin{Bmatrix} \emptyset 1.06\sqrt{fc'}b_o d \\ \emptyset\left(0.53+\frac{1.06}{\beta}\right)\sqrt{fc'}b_o d \\ \emptyset 0.265\left(2+\frac{\alpha_s d}{\beta}\right)\sqrt{fc'}b_o d \end{Bmatrix}$$

ส่วนกำลังรับแรงเฉือนของพื้น ที่ระยะ d/2 จากหน้าขอบพื้นเต็ม ซึ่งจะไปตกอยู่ในบริเวณ voided slab คำนวณจากสูตร

$$\emptyset Vc = minimum\ of \begin{Bmatrix} \emptyset 1.06 f_{sr}\sqrt{fc'}b_o d \\ \emptyset\left(0.53+\frac{1.06}{\beta}\right) f_{sr}\sqrt{fc'}b_o d \\ \emptyset 0.265\left(2+\frac{\alpha_s d}{\beta}\right) f_{sr}\sqrt{fc'}b_o d \end{Bmatrix}$$

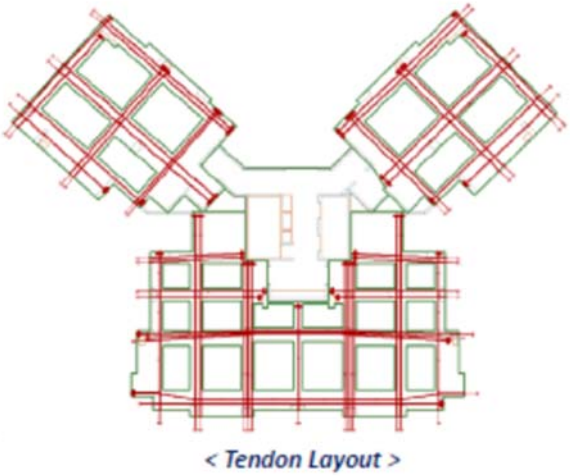
โดยที่ f_{sr} = Voided shear reduction factor มีค่าประมาณ 0.50-0.60 ซึ่งจะระบุไว้ในตารางข้อมูลจากผู้ผลิต

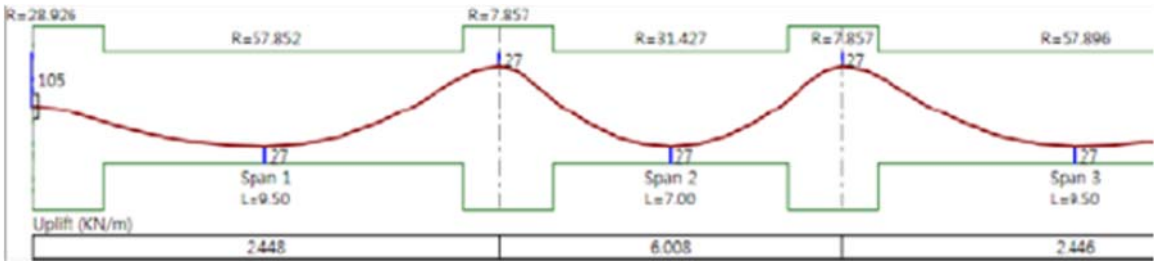
ขั้นตอนที่ 5 กำหนดบริเวณ Solid slab และ Voided slab



โดยปกติ เมื่อตรวจสอบแรงเฉือนแล้ว ก็จะใช้ระยะที่แรงเฉือนเจาะทะลุผ่านเป็นแนวพื้นเต็มทั้งสองทิศทาง เพื่อให้ลวดอัดแรงสามารถวิ่งผ่านได้

ขั้นตอนที่ 6 วางแนว และโปรไฟล์ของลวดอัดแรง

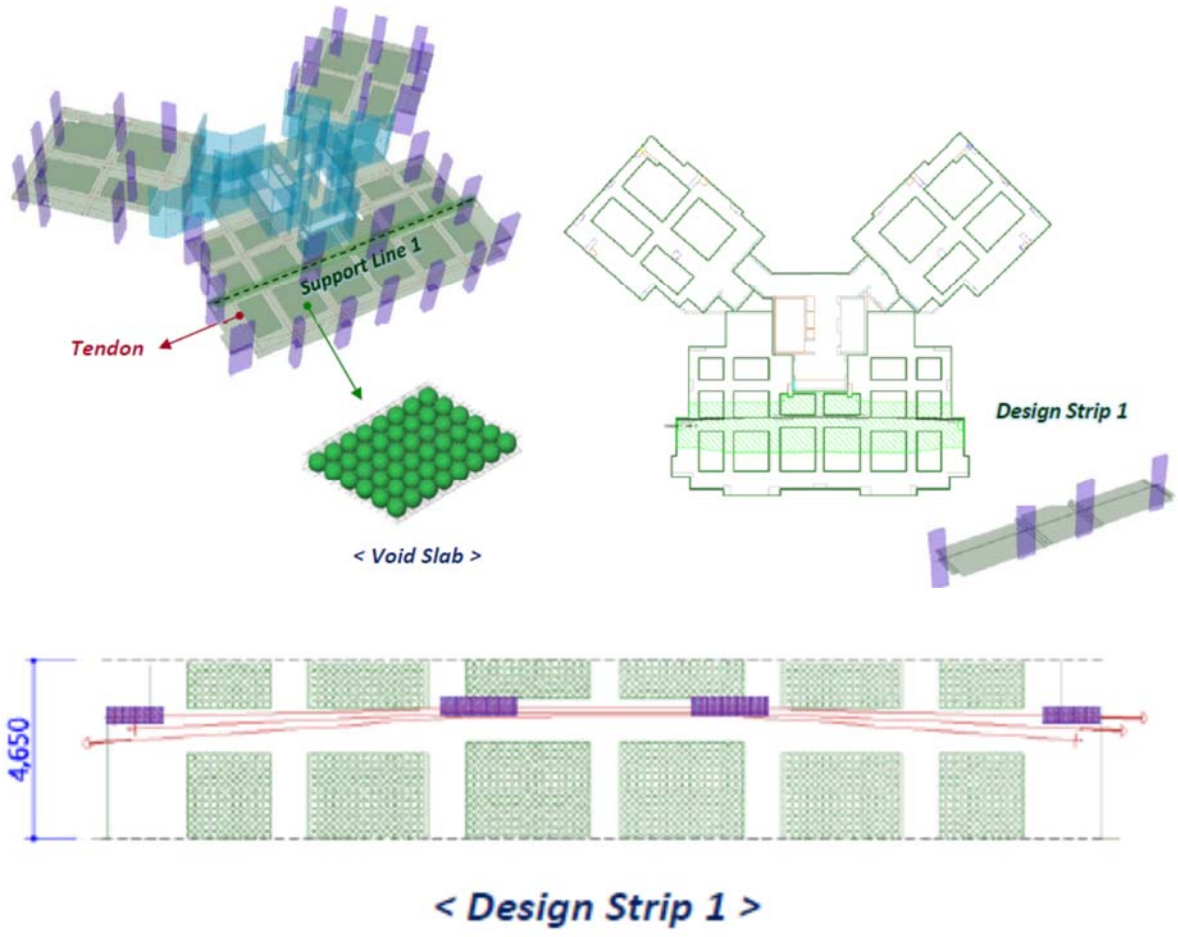




ขั้นตอนที่ 7 วิเคราะห์โครงสร้างด้วย Finite Element

โดยบริเวณที่เป็นพื้นเต็มให้ใช้ค่า พารามิเตอร์ปกติ ส่วนในบริเวณที่เป็น voided slab ให้ปรับแก้ค่าต่างๆ ตามที่คำนวณไว้ในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 8 กำหนดแนว design strip



< Design Strip 1 >

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบ stress ที่ผิวบนและผิวล่าง

$$\Sigma = \frac{P}{A'} \pm \frac{P.e.c}{I'} \pm \frac{M.c}{I'} \leq \textbf{Allowable stress}$$

โดยที่ A’ = Sectional area ratio x Solid sectional area

I’ = Rigidity factor x I_{slab}

สำหรับค่า Allowable stress ค่าที่แนะนำตามเอกสารอ้างอิงจะใช้เพียง 90% ของค่า Allowable stress ปกติ

At transfer

Allowable compression stress = **0.90x0.60fc'$_i$**

Allowable tensile stress = **0.90x0.795**$\sqrt{fc_i'}$

fc'I = compressive stress at transfer

At service

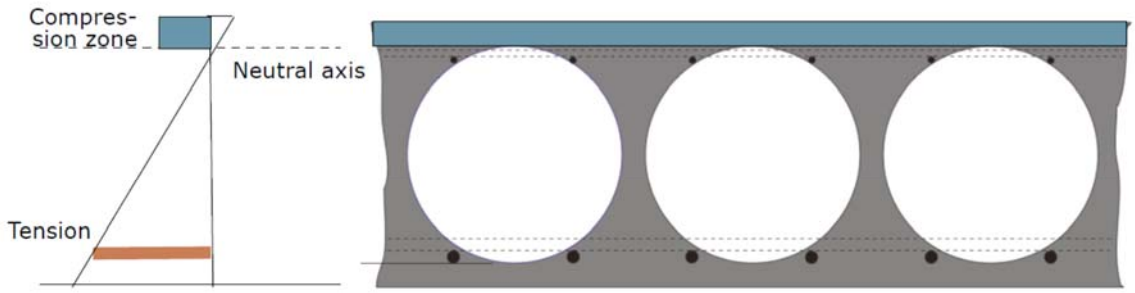
Allowable compression stress = 0.90x0.45fc'

Allowable tensile stress = 0.90x0.1.59$\sqrt{fc_i'}$

fc'= compressive stress at 28 days

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบการออกแบบกำลังรับแรงดัด

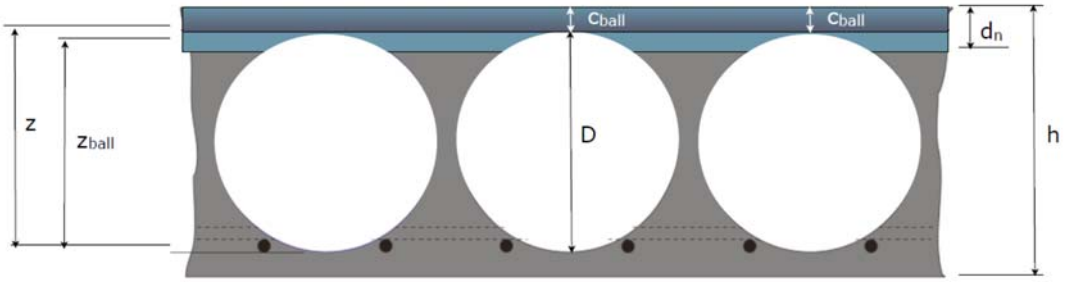
ตามสมมติฐานที่เราตั้งไว้ในการออกแบบกำลังรับแรงดัดคือ ในบริเวณที่เป็น voided slab เมื่อรับแรงดัด ส่วนที่เป็น compression zone จะอยู่ในส่วนที่เป็นพื้นเต็ม หรือ แนวแกนสะเทินลงมาไม่ถึงลูกบอล



Stress distribution trough BubbleDeck under normal loading

กำลังรับโมเมนต์ของพื้นคำนวณได้จากวิธีปกติ $\boldsymbol{M_n = A_s f_y\left(d - \frac{a}{2}\right)}$ **โดยที่** $\mathbf{a = \frac{Asfy}{0.85fc'b}}$

แต่ถ้าพื้นต้องรับน้ำหนักมาก มีโอกาสที่แนวแกนสะเทินจะลงมาถึงลูกบอลทำให้ compression zone มีบางส่วนที่เลยลงไปในช่องโล่ง จากการศึกษาและการทดลองในประเทศเยอรมัน สามารถสรุปเป็นข้อแนะนำที่ระบุไว้ใน DIN 1045 ว่า ให้ตรวจสอบด้วยวิธีอย่างง่าย คือค่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ที่ต้านโดย voided slab กับโมเมนต์สำหรับพื้นเต็ม **(M_{ball}/M_u)** จะต้องไม่เกิน 0.20 ระยะของ stress block และความสอดคล้องของความเครียดจึงจะกระจายซ้ำออกไป สามารถยอมให้ใช้การคำนวณ stress block แบบปกติได้



Compression zone can encroach on bubble zone for heavily reinforced slabs

$$\mu_{ms} = \frac{M_u 1.96D}{fc'h^3} \leq 0.20$$

โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล

h = ความหนาของพื้น

M_u = โมเมนต์ที่ออกแบบ

วีดีโอตัวอย่าง

1. ระบบของ Bubble Deck

2. ระบบของ Cobiax

3. ระบบของ U-boot Beton (U-boot)

เอกสารอ้างอิง

1.“Frequently Asked Questions (FAQ) About Flat Plate Voided Concrete Slab System”, CRSI (Concrete Reinforcing Steel Institute)

2.“Economic Application of Post-Tensioning in Korean Residence Building”, DAELIM Industrial Co.,Ltd. , Adapt Corporation (2012)

3.“Bubble Deck Design Guide for Compliance with BCA using AS3600 and EC2”, Bubble deck company (Australia and New Zealand) (2008)

4.“Plastic Voided Slab Systems : Applications and Design”, C.J. Midkiff (2013)

5.“The Biaxial Hollow Deck; The way to new solutions”, Bubble deck company

6.“Engineering Manual Issue 2010”, Cobiax (2010)

7.“Analysis of Bubble Deck Slab Design by Finite Element Method”;M.Pandey, M.Srivastava (2016)

PHOTO CREDIT

1. Bubble Deck

2. Cobiax

3. U-Boot beton

เรียบเรียงโดย

ภาคภูมิ วานิชกมลนันท์ [วย. 1924]