

บทที่ 7

หน่วยแรงกันในดิน

(Stresses in soil mass)

7.1 เนื้อหาโดยย่อ

7.1.1 ส่วนนำ (introduction)

เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อดิน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเค้นสุทธิ (net stress) ในดิน ซึ่งปกติแล้วจะทำให้หน่วยแรงเค้นสุทธิ (net stress) ในดินเพิ่มขึ้น โดยหน่วยแรงเค้นสุทธิที่เพิ่มขึ้น (net stress increase) จะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น น้ำหนักที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่ (load per unit area), ความลึกของชั้นดินที่พิจารณาได้น้ำหนักที่มากกระทำ เป็นต้น เราจำเป็นต้องพิจารณาหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำนี้เพื่อนำไปคำนวณวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัว (settlement) ของดินต่อไป ดินตามธรรมชาตินั้นบางส่วนจะไม่มีคามยืดหยุ่น, ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด และแต่ละทิศทางมีแรงกระทำไม่เท่ากัน แต่เพื่อให้สามารถประมาณค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในดินได้ เราจึงต้องตั้งสมมติฐานว่า ดินมีความยืดหยุ่น (elastic), มีแรงกระทำเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) เราจึงสามารถประมาณค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นได้โดยทฤษฎีของความยืดหยุ่น (theory of elasticity)

ดังนั้นค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่ง, ค่าของน้ำหนักที่กระทำ, รูปร่างของน้ำหนักที่กระทำ และคุณสมบัติของดินบริเวณที่พิจารณา เราสามารถนำมาเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\Delta P = f(x, y, z, p, \text{shape of } p, \mu, E)$$

หน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นที่มีผลต่อการทรุดตัวของดินมากที่สุดคือ หน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้ง (vertical stress increase) โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดได้บริเวณที่น้ำหนักกระทำโดยตรง

7.1.2 หน่วยแรงเค้นตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนบนระนาบ (Normal and shear stresses on a plane)

พิจารณารูปที่ 7.1.1 ก.) ส่วนประกอบหนึ่งของดินแบบ 2 มิติ ซึ่งถูกกระทำโดยหน่วยแรงเค้นตั้งฉาก (normal stress) และหน่วยแรงเฉือน (shear stress) โดย $\sigma'_y > \sigma'_x$ ในการพิจารณาหาค่าหน่วยแรงเค้นตั้งฉาก (normal stress), σ'_n และหน่วยแรงเฉือน (shear stress), τ_n บนระนาบ EF ที่ทำมุม θ กับระนาบ AB เราจะต้องสร้าง free body diagram ของสามเหลี่ยม EFB ดังรูป 7.1.1 ข.)

$$\overline{EB} = \overline{EF} \cos \theta$$

และ

$$\overline{FB} = \overline{EF} \sin \theta$$

จากผลรวมของแรงในแนวแกน N และแนวแกน T จะได้ว่า

$$\sigma_n(\overline{EF}) = \sigma_x(\overline{EF}) \sin^2 \theta + \sigma_y(\overline{EF}) \cos^2 \theta + 2\tau_{xy}(\overline{EF}) \sin \theta \cos \theta$$

หรือ

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

ดังนั้น หน่วยแรงเค้นตั้งฉาก (normal stress), σ_n มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_n = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad 7.1.1$$

และ

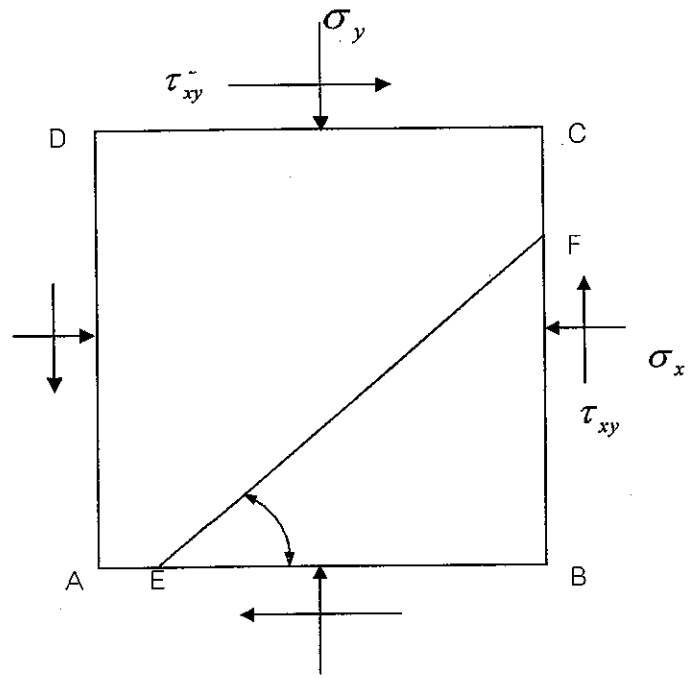
$$\tau_n(\overline{EF}) = -\sigma_x(\overline{EF}) \sin \theta \cos \theta + \sigma_y(\overline{EF}) \sin \theta \cos \theta - \tau_{xy}(\overline{EF}) \cos^2 \theta + \tau_{xy}(\overline{EF}) \sin^2 \theta$$

หรือ

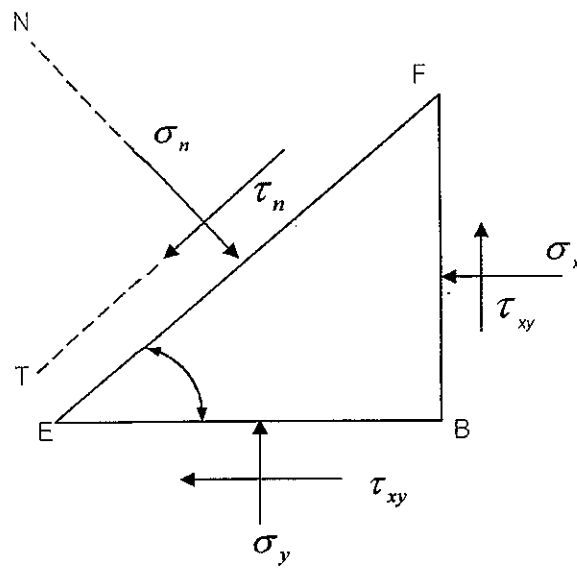
$$\tau_n = \sigma_y \sin \theta \cos \theta - \sigma_x \sin \theta \cos \theta - \tau_{xy}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

ดังนั้น หน่วยแรงเฉือน (shear stress), τ_n มีค่าเท่ากับ

$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \quad 7.1.2$$



ก.)



ข.)

รูปที่ 7.1.1 ก.) ส่วนประกอบหนึ่งของดินที่ถูกกระทำด้วยหน่วยแรงเค้นตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือน
 ข.) free body diagram ของสามเหลี่ยม EFB จากรูป 7.1.1 ก.)

จากสมการ 7.1.2 ถ้าแทนค่า $\tau_n = 0$ จะได้

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x} \quad 7.1.3$$

เมื่อแทนค่า τ_n , σ'_x และ σ'_y ใด ๆ เราจะได้ค่า θ ออกมาสองค่าคือ θ และ $\theta + 90^\circ$ ซึ่งหมายความว่า มีระนาบสองระนาบที่ตั้งฉากกันและมีค่าหน่วยแรงเฉือน (shear stress) เท่ากับศูนย์ เราเรียกระนาบดังกล่าวว่า ระนาบหลัก (principal planes) หน่วยแรงเค้นตั้งฉาก (normal stress) ที่กระทำบนระนาบหลัก (principal planes) นี้เรียกว่า หน่วยแรงเค้นหลัก (principal stresses) และสามารถหาค่าได้จากการแทนค่า $\tan 2\theta$ จากสมการที่ 7.1.3 ลงในสมการที่ 7.1.1 จะได้

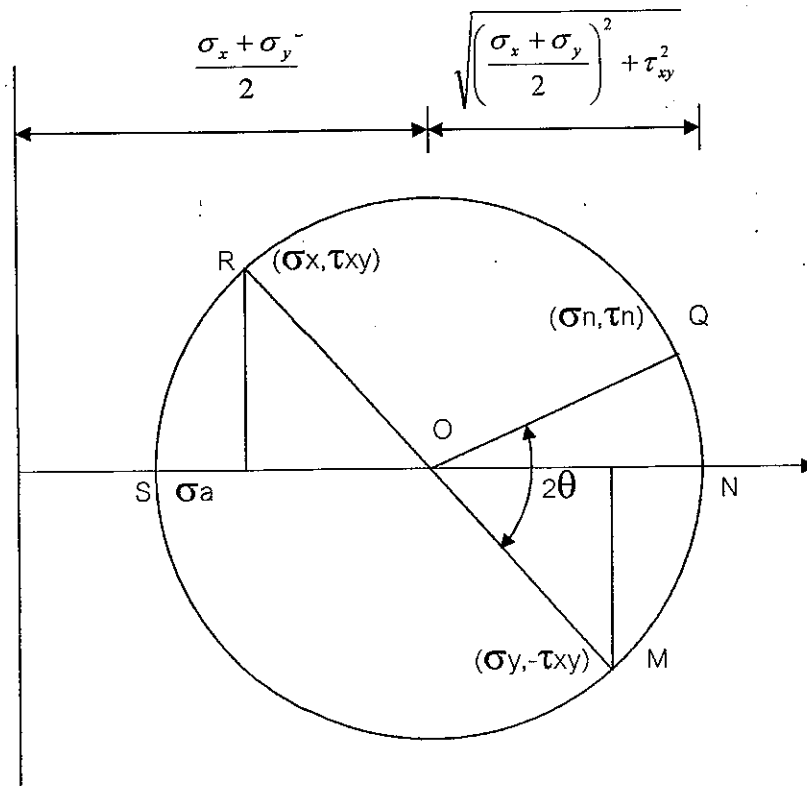
Major principal stress:

$$\sigma_n = \sigma_1 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad 7.1.4$$

Minor principal stress:

$$\sigma_n = \sigma_3 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad 7.1.5$$

เราอาจหาค่าหน่วยแรงเค้นตั้งฉาก (normal stress) และหน่วยแรงเฉือน (shear stress) ที่กระทำบนระนาบใด ๆ ได้โดยการวาดวงกลมมอร์ (Mohr's circle) รูปที่ 7.1.2



รูปที่ 7.1.2 วงกลมมอร์ (Mohr's circle)

7.1.3 หน่วยแรงเค้นที่เกิดจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นจุด

พิจารณารูปที่ 7.1.3 เราสามารถคำนวณหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นที่จุด A เนื่องจากแรงกระทำแบบเป็นจุดมีค่าเท่ากับ P

$$\Delta P_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3x^2z}{L^3} - (1-2\mu) \left[\frac{x^2 - y^2}{Lr^2(L+z)} + \frac{y^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad 7.1.6$$

$$\Delta P_y = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{2y^2z}{L^3} - (1-2\mu) \left[\frac{y^2 - x^2}{Lr^2(L+z)} + \frac{x^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad 7.1.7$$

และ
$$\Delta P_z = \frac{3P z^3}{2\pi L^5} = \frac{3P z^3}{2\pi (r^2 + z^2)^{5/2}} \quad 7.1.8$$

โดยที่
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

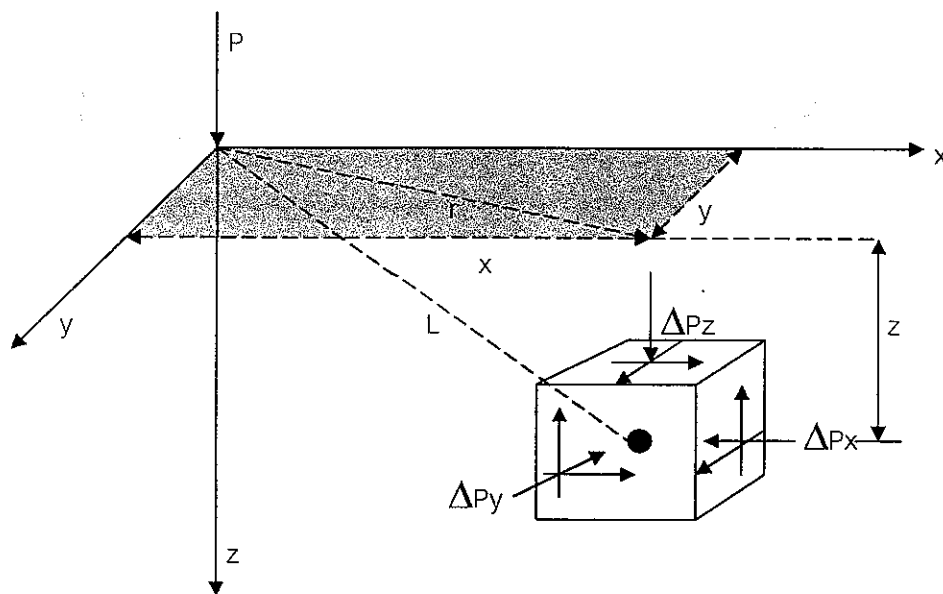
$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{r^2 + z^2}$$

$$\mu = \text{Poisson's ratio}$$

จะเห็นว่าค่า ΔP_z นั้นไม่ขึ้นกับค่า Poisson's ratio เหมือนกับค่า ΔP_x และ ΔP_y จึงอาจเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta P_z = \frac{P}{z^2} \cdot \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{[(r/z)^2 + 1]^{5/2}} = \frac{P}{z^2} I_1 \quad 7.1.9$$

โดยที่
$$I_1 = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{[(r/z)^2 + 1]^{5/2}}$$



รูปที่ 7.1.3 หน่วยแรงเค้นในดินเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นจุด

ตารางที่ 7.1.1 ค่า I_1 ที่ค่า r/z ต่าง ๆ

r/z	I_1	r/z	I_1	r/z	I_1	r/z	I_1
0	0.4775	0.28	0.3954	0.80	0.1386	3.00	0.0015
0.02	0.4770	0.30	0.3849	0.85	0.1226	3.20	0.0011
0.04	0.4765	0.32	0.3742	0.90	0.1083	3.40	0.00085
0.06	0.4723	0.34	0.3632	0.95	0.0956	3.60	0.00066
0.08	0.4699	0.36	0.3521	1.00	0.0844	3.80	0.00051
0.10	0.4657	0.38	0.3408	1.20	0.0513	4.00	0.00040
0.12	0.4607	0.40	0.3295	1.40	0.0317	4.20	0.00032
0.14	0.4548	0.45	0.3011	1.60	0.0200	4.40	0.00026
0.16	0.4482	0.50	0.2733	1.80	0.0129	4.60	0.00021
0.18	0.4409	0.55	0.2466	2.00	0.0085	4.80	0.00017
0.20	0.4329	0.60	0.2214	2.20	0.0058	5.00	0.00014
0.22	0.4243	0.65	0.1978	2.40	0.0040	5.20	0.00011
0.24	0.4151	0.70	0.1762	2.60	0.0028	5.40	0.00010
0.26	0.4054	0.75	0.1565	2.80	0.0021	5.60	0.00008

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.

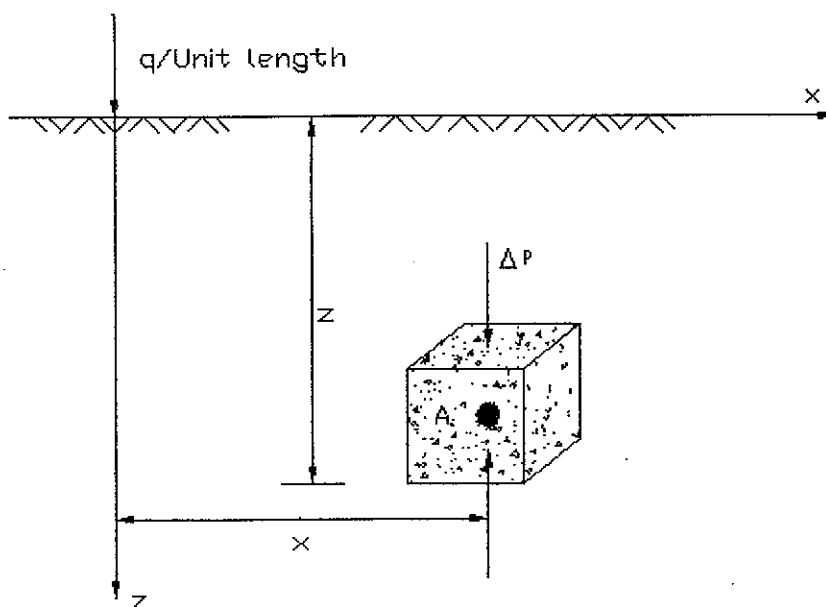
การหาค่าหน่วยแรงเค้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นจุด ยังสามารถประมาณหาได้โดยวิธีของ Westergaard (1938) ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากหนังสือ soil mechanics ทั่วไป

7.1.4 หน่วยแรงเค้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นแนว

พิจารณารูปที่ 7.1.4 เราสามารถคำนวณหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนัก (q) กระทำต่อหน่วยความยาวของดินได้โดยอาศัยทฤษฎียืดหยุ่น (theory of elasticity) จะได้เป็นสมการดังนี้

$$\Delta P = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

หรือ
$$\frac{\Delta P}{(q/z)} = \frac{2}{\pi((x/z)^2 + 1)^2} \quad 7.1.10$$



รูปที่ 7.1.4 หน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นแนว

ตารางที่ 7.1.2 ค่า $\Delta P/(q/z)$ ที่ x/z ต่าง ๆ

x/z	$\Delta P/(q/z)$	x/z	$\Delta P/(q/z)$	x/z	$\Delta P/(q/z)$	x/z	$\Delta P/(q/z)$
0	0.637	0.7	0.287	1.4	0.073	2.2	0.019
0.1	0.624	0.8	0.237	1.5	0.060	2.4	0.014
0.2	0.589	0.9	0.194	1.6	0.050	2.6	0.011
0.3	0.536	1.0	0.159	1.7	0.042	2.8	0.008
0.4	0.473	1.1	0.130	1.8	0.035	3.0	0.006
0.5	0.407	1.2	0.107	1.9	0.030	3.2	0.005
0.6	0.344	1.3	0.088	2.0	0.025	3.4	0.004

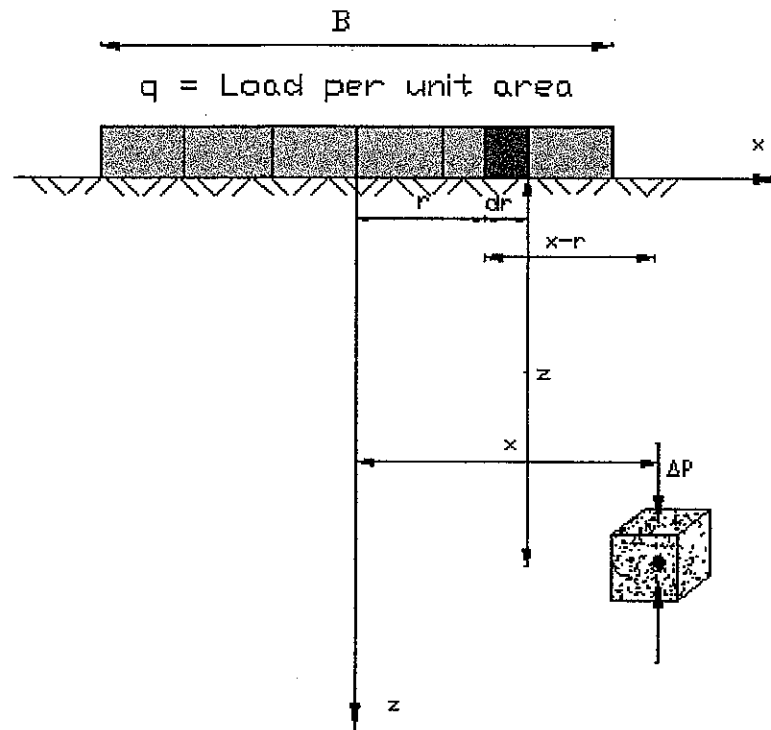
ที่มา : Braja, M. Das, 1998.

7.1.5 หน่วยแรงเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นแถบ

พิจารณารูปที่ 7.1.5 หน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่ง (ΔP) ที่จุด A ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำแบบแถบยาวและความกว้างมีค่าเท่ากับ B สามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P = \frac{q}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{z}{x - (B/2)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{z}{x + (B/2)} \right] - \frac{Bz[x^2 - z^2 - (B^2/4)]}{[x^2 + z^2 - (B^2/4) + B^2 z^2]} \right\} \quad 7.1.11$$

สมการที่ 7.1.11 นี้ยังสามารถใช้หาค่าหน่วยแรงเค้นที่จุดต่าง ๆ ได้น้ำหนักกระทำ จากนั้นนำมาวัดเป็น isobars ดังรูปที่ 7.1.5 ค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งต่อหน่วยน้ำหนัก ($\Delta P/q$) ที่ค่า $2z/B$ และค่า $2x/B$ ต่าง ๆ นั้นยังได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.1.3 เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 7.1.5 หน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงกระทำแบบเป็นแถบ

ตารางที่ 7.1.3 แสดงค่า $\Delta p/q$ ที่ค่า $2z/B$ และค่า $2x/B$ ต่าง ๆ

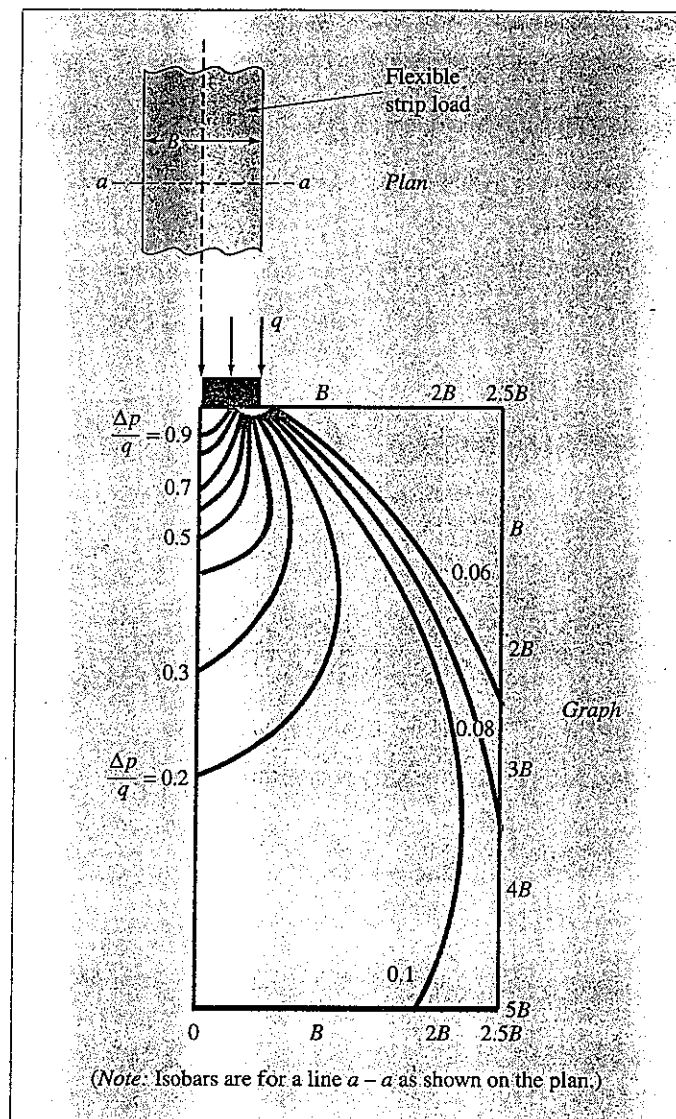
$2z/B$	$2x/B$										
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.10	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.993	0.980	0.909	0.500
0.20	0.997	0.997	0.996	0.995	0.992	0.988	0.979	0.959	0.909	0.775	0.500
0.30	0.990	0.989	0.987	0.984	0.978	0.967	0.947	0.908	0.833	0.697	0.499
0.40	0.977	0.976	0.973	0.966	0.955	0.937	0.906	0.855	0.773	0.651	0.498
0.50	0.959	0.958	0.953	0.943	0.927	0.902	0.864	0.808	0.727	0.620	0.497
0.60	0.937	0.935	0.928	0.915	0.896	0.866	0.825	0.767	0.691	0.598	0.495
0.70	0.910	0.908	0.899	0.885	0.863	0.831	0.788	0.732	0.662	0.581	0.492
0.80	0.881	0.878	0.869	0.853	0.829	0.797	0.755	0.701	0.638	0.566	0.489
0.90	0.850	0.847	0.837	0.821	0.797	0.765	0.724	0.675	0.617	0.552	0.485
1.00	0.818	0.815	0.805	0.789	0.766	0.735	0.696	0.650	0.598	0.540	0.480
1.10	0.787	0.783	0.774	0.758	0.735	0.706	0.670	0.628	0.580	0.529	0.474
1.20	0.755	0.752	0.743	0.728	0.707	0.679	0.646	0.607	0.564	0.517	0.468
1.30	0.725	0.722	0.714	0.699	0.679	0.654	0.623	0.588	0.548	0.506	0.462
1.40	0.696	0.693	0.685	0.672	0.653	0.630	0.602	0.569	0.534	0.495	0.455
1.50	0.668	0.666	0.658	0.646	0.629	0.607	0.581	0.552	0.519	0.484	0.448
1.60	0.642	0.639	0.633	0.621	0.605	0.586	0.562	0.535	0.506	0.474	0.440
1.70	0.617	0.615	0.608	0.598	0.583	0.565	0.544	0.519	0.492	0.463	0.433
1.80	0.593	0.591	0.585	0.576	0.563	0.546	0.526	0.504	0.479	0.453	0.425
1.90	0.571	0.569	0.564	0.555	0.543	0.528	0.510	0.489	0.467	0.443	0.417
2.00	0.550	0.548	0.543	0.535	0.524	0.510	0.494	0.475	0.455	0.433	0.409
2.10	0.530	0.529	0.524	0.517	0.507	0.494	0.479	0.462	0.443	0.423	0.401
2.20	0.511	0.510	0.506	0.499	0.490	0.479	0.465	0.449	0.432	0.413	0.393
2.30	0.494	0.493	0.489	0.483	0.474	0.464	0.451	0.437	0.421	0.404	0.385
2.40	0.477	0.476	0.473	0.467	0.460	0.450	0.438	0.425	0.410	0.395	0.378
2.50	0.462	0.461	0.458	0.452	0.445	0.436	0.426	0.414	0.400	0.386	0.370
2.60	0.447	0.446	0.443	0.439	0.432	0.424	0.414	0.403	0.390	0.377	0.363
2.70	0.433	0.432	0.430	0.425	0.419	0.412	0.403	0.393	0.381	0.369	0.355
2.80	0.420	0.419	0.417	0.413	0.407	0.400	0.392	0.383	0.372	0.360	0.348
2.90	0.408	0.407	0.405	0.401	0.396	0.389	0.382	0.373	0.363	0.352	0.341
3.00	0.396	0.395	0.393	0.390	0.385	0.379	0.372	0.364	0.355	0.345	0.334
3.10	0.385	0.384	0.382	0.379	0.375	0.369	0.363	0.355	0.347	0.337	0.327
3.20	0.374	0.373	0.372	0.369	0.365	0.360	0.354	0.347	0.339	0.330	0.321
3.30	0.364	0.363	0.362	0.359	0.355	0.351	0.345	0.339	0.331	0.323	0.315
3.40	0.354	0.354	0.352	0.350	0.346	0.342	0.337	0.331	0.324	0.316	0.308
3.50	0.345	0.345	0.343	0.341	0.338	0.334	0.329	0.323	0.317	0.310	0.302
3.60	0.337	0.336	0.335	0.333	0.330	0.326	0.321	0.316	0.310	0.304	0.297
3.70	0.328	0.328	0.327	0.325	0.322	0.318	0.314	0.309	0.304	0.298	0.291
3.80	0.320	0.320	0.319	0.317	0.315	0.311	0.307	0.303	0.297	0.292	0.285
3.90	0.313	0.313	0.312	0.310	0.307	0.304	0.301	0.296	0.291	0.286	0.280
4.00	0.306	0.305	0.304	0.303	0.301	0.298	0.294	0.290	0.285	0.280	0.275
4.10	0.299	0.299	0.298	0.296	0.294	0.291	0.288	0.284	0.280	0.275	0.270
4.20	0.292	0.292	0.291	0.290	0.288	0.285	0.282	0.278	0.274	0.270	0.265
4.30	0.286	0.286	0.285	0.283	0.282	0.279	0.276	0.273	0.269	0.265	0.260
4.40	0.280	0.280	0.279	0.278	0.276	0.274	0.271	0.268	0.264	0.260	0.256
4.50	0.274	0.274	0.273	0.272	0.270	0.268	0.266	0.263	0.259	0.255	0.251
4.60	0.268	0.268	0.268	0.266	0.265	0.263	0.260	0.258	0.254	0.251	0.247
4.70	0.263	0.263	0.262	0.261	0.260	0.258	0.255	0.253	0.250	0.246	0.243
4.80	0.258	0.258	0.257	0.256	0.255	0.253	0.251	0.248	0.245	0.242	0.239
4.90	0.253	0.253	0.252	0.251	0.250	0.248	0.246	0.244	0.241	0.238	0.235
5.00	0.248	0.248	0.247	0.246	0.245	0.244	0.242	0.239	0.237	0.234	0.231

ที่มา: Braja, M. Das, 1998.

ตารางที่ 7.1.3 แสดงค่า $\Delta p/q$ ที่ค่า $2z/B$ และค่า $2x/B$ ต่าง ๆ

$2z/B$	$2x/B$									
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.091	0.020	0.007	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
0.20	0.225	0.091	0.040	0.020	0.011	0.007	0.004	0.003	0.002	0.002
0.30	0.301	0.165	0.090	0.052	0.031	0.020	0.013	0.009	0.007	0.005
0.40	0.346	0.224	0.141	0.090	0.059	0.040	0.027	0.020	0.014	0.011
0.50	0.373	0.267	0.185	0.128	0.089	0.063	0.046	0.034	0.025	0.019
0.60	0.391	0.298	0.222	0.163	0.120	0.088	0.066	0.050	0.038	0.030
0.70	0.403	0.321	0.250	0.193	0.148	0.113	0.087	0.068	0.053	0.042
0.80	0.411	0.338	0.273	0.218	0.173	0.137	0.108	0.086	0.069	0.056
0.90	0.416	0.351	0.291	0.239	0.195	0.158	0.128	0.104	0.085	0.070
1.00	0.419	0.360	0.305	0.256	0.214	0.177	0.147	0.122	0.101	0.084
1.10	0.420	0.366	0.316	0.271	0.230	0.194	0.164	0.138	0.116	0.098
1.20	0.419	0.371	0.325	0.282	0.243	0.209	0.178	0.152	0.130	0.111
1.30	0.417	0.373	0.331	0.291	0.254	0.221	0.191	0.166	0.143	0.123
1.40	0.414	0.374	0.335	0.298	0.263	0.232	0.203	0.177	0.155	0.135
1.50	0.411	0.374	0.338	0.303	0.271	0.240	0.213	0.188	0.165	0.146
1.60	0.407	0.373	0.339	0.307	0.276	0.248	0.221	0.197	0.175	0.155
1.70	0.402	0.370	0.339	0.309	0.281	0.254	0.228	0.205	0.183	0.164
1.80	0.396	0.368	0.339	0.311	0.284	0.258	0.234	0.212	0.191	0.172
1.90	0.391	0.364	0.338	0.312	0.286	0.262	0.239	0.217	0.197	0.179
2.00	0.385	0.360	0.336	0.311	0.288	0.265	0.243	0.222	0.203	0.185
2.10	0.379	0.356	0.333	0.311	0.288	0.267	0.246	0.226	0.208	0.190
2.20	0.373	0.352	0.330	0.309	0.288	0.268	0.248	0.229	0.212	0.195
2.30	0.366	0.347	0.327	0.307	0.288	0.268	0.250	0.232	0.215	0.199
2.40	0.360	0.342	0.323	0.305	0.287	0.268	0.251	0.234	0.217	0.202
2.50	0.354	0.337	0.320	0.302	0.285	0.268	0.251	0.235	0.220	0.205
2.60	0.347	0.332	0.316	0.299	0.283	0.267	0.251	0.236	0.221	0.207
2.70	0.341	0.327	0.312	0.296	0.281	0.266	0.251	0.236	0.222	0.208
2.80	0.335	0.321	0.307	0.293	0.279	0.265	0.250	0.236	0.223	0.210
2.90	0.329	0.316	0.303	0.290	0.276	0.263	0.249	0.236	0.223	0.211
3.00	0.323	0.311	0.299	0.286	0.274	0.261	0.248	0.236	0.223	0.211
3.10	0.317	0.306	0.294	0.283	0.271	0.259	0.247	0.235	0.223	0.212
3.20	0.311	0.301	0.290	0.279	0.268	0.256	0.245	0.234	0.223	0.212
3.30	0.305	0.296	0.286	0.275	0.265	0.254	0.243	0.232	0.222	0.211
3.40	0.300	0.291	0.281	0.271	0.261	0.251	0.241	0.231	0.221	0.211
3.50	0.294	0.286	0.277	0.268	0.258	0.249	0.239	0.229	0.220	0.210
3.60	0.289	0.281	0.273	0.264	0.255	0.246	0.237	0.228	0.218	0.209
3.70	0.284	0.276	0.268	0.260	0.252	0.243	0.235	0.226	0.217	0.208
3.80	0.279	0.272	0.264	0.256	0.249	0.240	0.232	0.224	0.216	0.207
3.90	0.274	0.267	0.260	0.253	0.245	0.238	0.230	0.222	0.214	0.206
4.00	0.269	0.263	0.256	0.249	0.242	0.235	0.227	0.220	0.212	0.205
4.10	0.264	0.258	0.252	0.246	0.239	0.232	0.225	0.218	0.211	0.203
4.20	0.260	0.254	0.248	0.242	0.236	0.229	0.222	0.216	0.209	0.202
4.30	0.255	0.250	0.244	0.239	0.233	0.226	0.220	0.213	0.207	0.200
4.40	0.251	0.246	0.241	0.235	0.229	0.224	0.217	0.211	0.205	0.199
4.50	0.247	0.242	0.237	0.232	0.226	0.221	0.215	0.209	0.203	0.197
4.60	0.243	0.238	0.234	0.229	0.223	0.218	0.212	0.207	0.201	0.195
4.70	0.239	0.235	0.230	0.225	0.220	0.215	0.210	0.205	0.199	0.194
4.80	0.235	0.231	0.227	0.222	0.217	0.213	0.208	0.202	0.197	0.192
4.90	0.231	0.227	0.223	0.219	0.215	0.210	0.205	0.200	0.195	0.190
5.00	0.227	0.224	0.220	0.216	0.212	0.207	0.203	0.198	0.193	0.188

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.



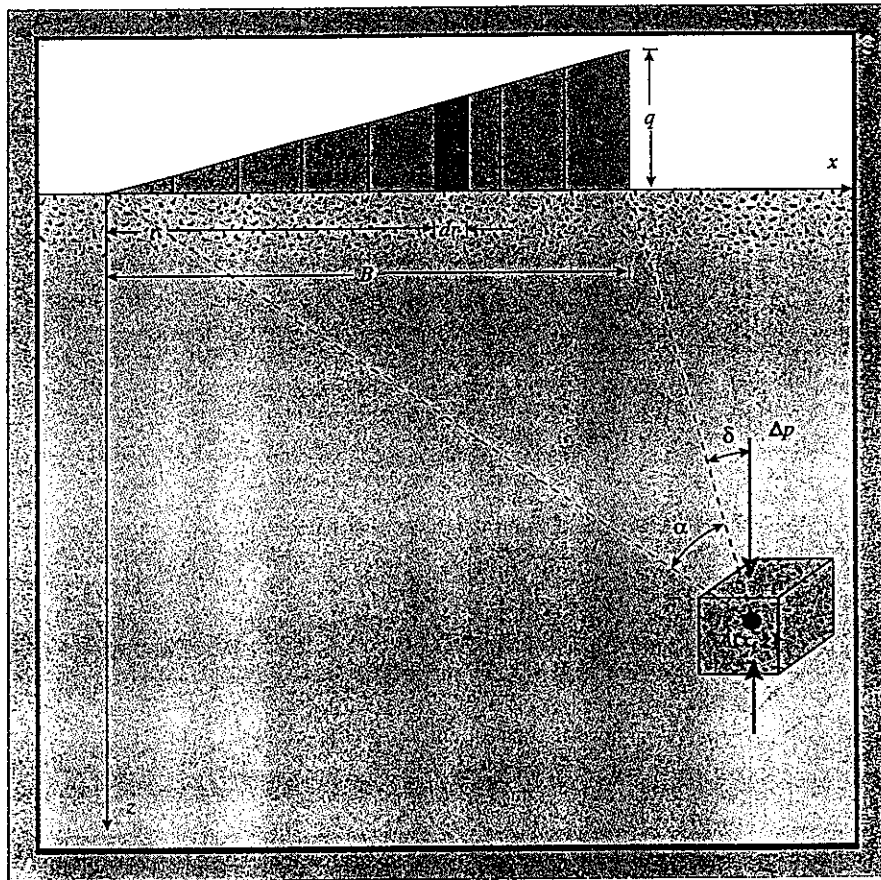
รูปที่ 7.1.6 isobars แสดงแรงดันดินใต้น้ำหนักกระทำแบบเป็นแถบ

7.1.6 หน่วยแรงเค้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

พิจารณารูปที่ 7.1.7 เราสามารถหาค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งทั้งหมดที่จุด A ได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P = \frac{q}{\pi} \left(\frac{x}{B} \alpha - \frac{\sin 2\delta}{2} \right) \quad 7.1.12$$

ค่ามุม α และ δ ดังรูปที่ 7.1.7 ใช้ในการหาค่า $(\Delta P/q)$ ที่ค่า $2z/B$ และค่า $2x/B$ ต่าง ๆ



รูปที่ 7.1.7 แสดงหน่วยแรงเค้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

ตารางที่ 7.1.4 แสดงค่า $\Delta p/q$ ที่ค่า $2x/B$ และค่า $2z/B$ ต่าง ๆ

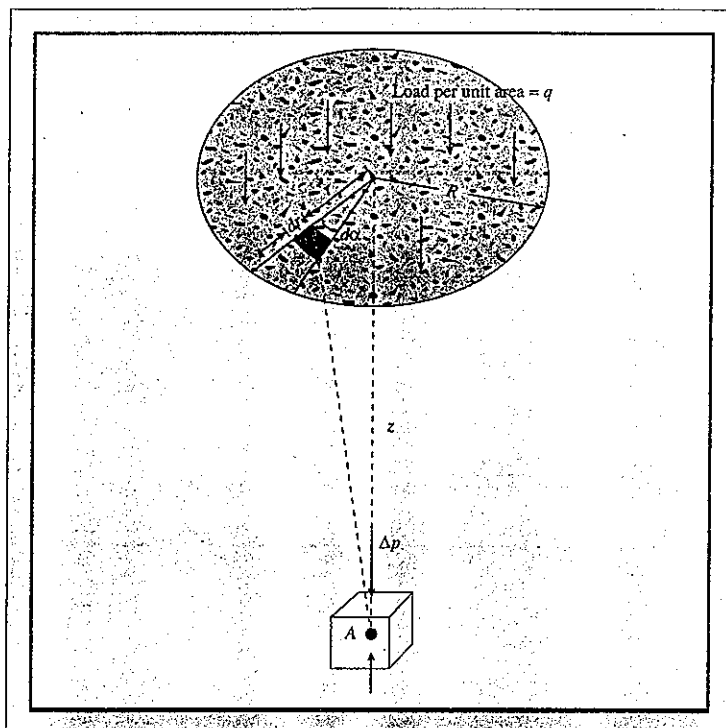
$2x/B$	$2z/B$								
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
-3	0	0.0003	0.0018	0.00054	0.0107	0.0170	0.0235	0.0347	0.0422
-2	0	0.0008	0.0053	0.0140	0.0249	0.0356	0.0448	0.0567	0.0616
-1	0	0.0041	0.0217	0.0447	0.0643	0.0777	0.0854	0.0894	0.0858
0	0	0.0748	0.1273	0.1528	0.1592	0.1553	0.1469	0.1273	0.1098
1	0.5	0.4797	0.4092	0.3341	0.2749	0.2309	0.1979	0.1735	0.1241
2	0.5	0.4220	0.3524	0.2952	0.2500	0.2148	0.1872	0.1476	0.1211
3	0	0.0152	0.0622	0.1010	0.1206	0.1268	0.1258	0.1154	0.1026
4	0	0.0019	0.0119	0.0285	0.0457	0.0596	0.0691	0.0775	0.0776
5	0	0.0005	0.0035	0.0097	0.0182	0.0274	0.0358	0.0482	0.0546

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.

7.1.7 หน่วยแรงเค้นในแนวตั้งที่ได้ศูนย์กลางของน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลม

พิจารณารูปที่ 7.1.8 ค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นที่จุด A เนื่องจากน้ำหนักกระทำ สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta P = q \left\{ 1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}} \right\} \tag{7.1.13}$$



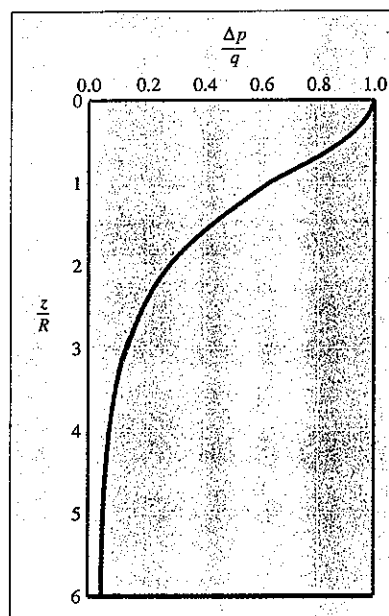
รูปที่ 7.1.8 แสดงหน่วยแรงเค้นในแนวตั้งที่ได้ศูนย์กลางน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลม

ตารางที่ 7.1.5 แสดงค่า $\Delta P/q$ กับค่า z/R ที่วิเคราะห์มาจากสมการที่ 7.1.13 และรูปที่ 7.1.8 แสดงการนำค่าจากตาราง 7.1.5 มา plot ค่าของหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้น (ΔP) จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึกที่เพิ่มขึ้นของชั้นดิน ที่ความลึก $z = 5R$ จะมีค่า q เท่ากับ 6% ซึ่งเป็นค่าแรงเค้นที่ผิวดิน

ตารางที่ 7.1.5 แสดงค่า $\Delta P/q$ กับค่า z/R

z/R	$\Delta p/q$
0	1
0.02	0.9999
0.05	0.9998
0.10	0.9990
0.2	0.9925
0.4	0.9488
0.5	0.9106
0.8	0.7562
1.0	0.6465
1.5	0.4240
2.0	0.2845
2.5	0.1996
3.0	0.1436
4.0	0.0869
5.0	0.0571

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.



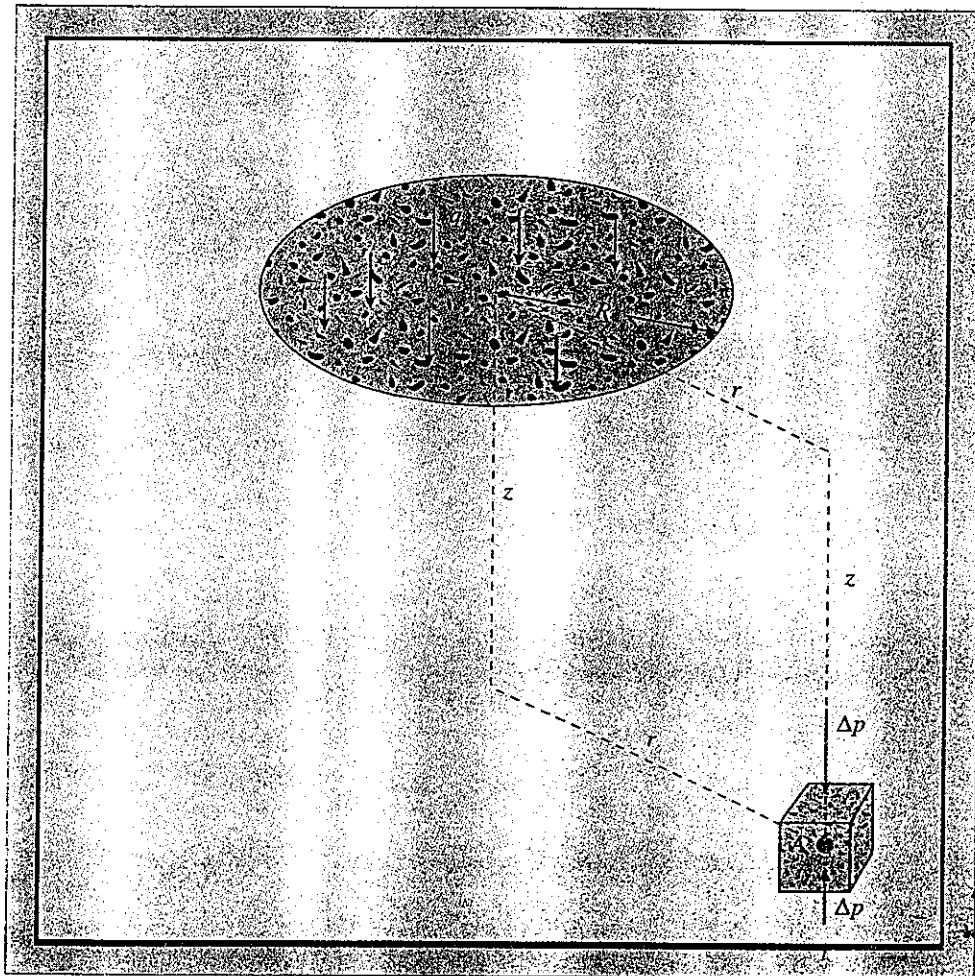
รูปที่ 7.1.8 กราฟจากข้อมูลในตารางที่ 7.1.5

7.1.8 หน่วยแรงเค้นในแนวตั้งที่ได้จุดใด ๆ ของน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลม

พิจารณารูปที่ 7.1.9 แสดงหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นที่จุด A ใด ๆ ที่ความลึก z เป็นระยะ r จากศูนย์กลางของพื้นที่ของน้ำหนักกระทำ โดยสามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P = q(A' + B') \quad 7.1.14$$

โดยที่ A' และ B' เป็นฟังก์ชันของ z/R และ r/R (จากตารางที่ 7.1.6 และ 7.1.7)



รูปที่ 7.1.9 หน่วยแรงเค้นในแนวตั้งที่ได้จุดใด ๆ ของน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลม

ตารางที่ 7.1.6 แสดงค่า A' ที่ค่า z/R และค่า r/R ต่าง ๆ

r/R	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.90550	0.89748	0.88679	0.86126	0.78797	0.43015	0.09645	0.02787	0.00856	0.00211	0.00084	0.00042	0.00048	0.00030	0.00020			
0.2	0.80388	0.79824	0.77884	0.73483	0.63014	0.38209	0.15433	0.05251	0.01680	0.00419	0.00167	0.00083	0.00048	0.00030	0.00020			
0.3	0.71265	0.70518	0.68316	0.62690	0.52081	0.34375	0.17964	0.07199	0.02440	0.00622	0.00250							
0.4	0.62861	0.62015	0.59241	0.53767	0.44329	0.31048	0.18709	0.08583	0.03118									
0.5	0.55279	0.54403	0.51622	0.46448	0.38390	0.28156	0.18556	0.09499	0.03701	0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00025	0.00014	0.00009
0.6	0.48560	0.47681	0.45078	0.40427	0.33676	0.25588	0.17952	0.10010	0.03701									
0.7	0.42654	0.41874	0.39491	0.35428	0.29853	0.21727	0.17124	0.10228	0.04558									
0.8	0.37581	0.36832	0.34729	0.31243	0.26581	0.21297	0.16206	0.10226										
0.9	0.33104	0.32492	0.30669	0.27707	0.23832	0.19488	0.15253	0.10094										
1	0.29289	0.28763	0.27005	0.24697	0.21468	0.17868	0.14329	0.09849	0.05185	0.01742	0.00761	0.00393	0.00226	0.00143	0.00097	0.00050	0.00029	0.00018
1.2	0.23178	0.22795	0.21662	0.19690	0.17626	0.15101	0.12570	0.09192	0.05260	0.01935	0.00871	0.00458	0.00269	0.00171	0.00115	0.00073	0.00043	0.00027
1.5	0.16795	0.16552	0.15877	0.14894	0.13436	0.11892	0.10296	0.08048	0.05116	0.02142	0.01013	0.00548	0.00325	0.00210	0.00141	0.00094	0.00056	0.00036
2	0.10557	0.10453	0.10140	0.09647	0.09011	0.08269	0.07471	0.06275	0.04496	0.02221	0.01160	0.00659	0.00399	0.00264	0.00180	0.00115	0.00068	0.00043
2.5	0.07152	0.07098	0.06947	0.06698	0.06373	0.05974	0.05555	0.04880	0.03787	0.02143	0.01221	0.00732	0.00463	0.00308	0.00214	0.00150	0.00079	0.00051
3	0.05132	0.05101	0.05022	0.04886	0.04707	0.04487	0.04241	0.03839	0.03150	0.01980	0.01220	0.00770	0.00505	0.00384	0.00282	0.00160	0.00099	0.00065
4	0.02986	0.02976	0.02907	0.02802	0.02832	0.02749	0.02651	0.02490	0.02193	0.01592	0.01109	0.00768	0.00536	0.00394	0.00298	0.00179	0.00113	0.00075
5	0.01942	0.01938				0.01895			0.01573	0.01249	0.00949	0.00708	0.00527	0.00394	0.00298	0.00179	0.00113	0.00075
6	0.01361					0.01307			0.01168	0.00883	0.00795	0.00628	0.00492	0.00384	0.00299	0.00188	0.00124	0.00084
7	0.01005					0.00976			0.00894	0.00784	0.00661	0.00548	0.00445	0.00360	0.00291	0.00193	0.00130	0.00091
8	0.00772					0.00755			0.00703	0.00635	0.00554	0.00472	0.00398	0.00332	0.00276	0.00189	0.00134	0.00094
9	0.00612					0.00600			0.00566	0.00520	0.00466	0.00409	0.00353	0.00301	0.00256	0.00184	0.00133	0.00096
10						0.00477			0.00465	0.00438	0.00397	0.00352	0.00326	0.00273	0.00241			

* After Athlin and Utery (1962)

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.

ตารางที่ 7.1.7 แสดงค่า B' ที่ค่า z/R และค่า r/R ต่าง ๆ

z/R	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.09852	0.10140	0.11138	0.13424	0.18796	0.05388	-0.07899	-0.02672	-0.00845	-0.00210	-0.00084	-0.00042	0	0	0	0	0	0
0.2	0.18857	0.19306	0.20772	0.23524	0.25983	0.08513	-0.07759	-0.04448	-0.01593	-0.00412	-0.00166	-0.00083	-0.00024	-0.00015	-0.00010	0	0	0
0.3	0.26562	0.26787	0.28018	0.29483	0.27257	0.10757	-0.04316	-0.04909	-0.02166	-0.00599	-0.00245	0	0	0	0	0	0	0
0.4	0.32016	0.32259	0.32748	0.32273	0.28925	0.12404	-0.00766	-0.04535	-0.02522	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.35777	0.35752	0.35323	0.33106	0.26236	0.13591	0.02165	-0.03455	-0.02651	-0.00991	-0.00388	-0.00199	-0.00116	-0.00073	-0.00049	-0.00025	-0.00014	-0.00009
0.6	0.37831	0.37531	0.36308	0.32822	0.25411	0.14440	0.04457	-0.02101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.7	0.38487	0.37962	0.36072	0.31923	0.24638	0.14986	0.06209	-0.00702	-0.02329	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	0.38091	0.37408	0.35133	0.30699	0.23779	0.15292	0.07530	0.00614	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9	0.36962	0.36275	0.33734	0.29299	0.22891	0.15404	0.08507	0.01795	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.35955	0.34553	0.32075	0.27819	0.21978	0.15355	0.09210	0.02814	-0.01005	-0.01115	-0.00608	-0.00344	-0.00210	-0.00135	-0.00092	-0.00048	-0.00028	-0.00018
1.2	0.31485	0.30730	0.28481	0.24636	0.20113	0.14915	0.10002	0.04378	0.00023	-0.00995	-0.00632	-0.00378	-0.00236	-0.00156	-0.00107	0	0	0
1.5	0.25602	0.25025	0.23338	0.20694	0.17368	0.13732	0.10193	0.05745	0.01385	-0.00669	-0.00410	-0.00371	-0.00278	-0.00202	-0.00148	-0.00094	-0.00050	-0.00033
2	0.17889	0.18144	0.16644	0.15198	0.13375	0.11331	0.09254	0.06371	0.02836	0.00028	-0.00130	-0.00271	-0.00250	-0.00201	-0.00156	-0.00094	-0.00059	-0.00039
2.5	0.12807	0.12633	0.12126	0.11327	0.10298	0.09130	0.07869	0.06022	0.03429	0.00661	-0.00130	-0.00157	-0.00192	-0.00179	-0.00151	-0.00099	-0.00065	-0.00046
3	0.09437	0.09394	0.09099	0.08635	0.08033	0.07325	0.06551	0.05354	0.03511	0.01112	0.00157	0.00134	0.00132	0.00129	0.00109	0.00094	0.00068	0.00050
4	0.05707	0.05666	0.05562	0.05383	0.05145	0.04773	0.04532	0.03995	0.03066	0.01515	0.00595	0.00155	0.00132	0.00132	0.00113	0.00048	0.00061	0.00049
5	0.03772	0.03760	0	0	0	0.03384	0	0	0.02474	0.01522	0.00810	0.00371	0.00132	0.00013	0.00048	0.00061	0.00050	0.00049
6	0.02866	0	0	0	0	0.02468	0	0	0.01968	0.01390	0.00867	0.00496	0.00254	0.00110	0.00028	0.00047	0.00045	0.00045
7	0.01980	0	0	0	0	0.01868	0	0	0.01577	0.01204	0.00842	0.00547	0.00332	0.00185	0.00093	0.00037	0.00029	0.00037
8	0.01526	0	0	0	0	0.01459	0	0	0.01279	0.01034	0.00779	0.00554	0.00372	0.00236	0.00141	0.00035	0.00008	0.00025
9	0.01212	0	0	0	0	0.01170	0	0	0.01054	0.00888	0.00705	0.00533	0.00386	0.00265	0.00178	0.00056	0.00012	0.00012
10	0	0	0	0	0	0	0.00924	0.00879	0.00879	0.00764	0.00631	0.00501	0.00382	0.00281	0.00199	0	0	0

* After Ahlbin and Utery (1962)

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.

7.1.9 หน่วยแรงเค้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

จากรูปที่ 7.1.10 เราสามารถหาค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งได้จากสมการดังนี้

$$\Delta\sigma' = qI_3 \quad 7.1.15$$

โดยที่
$$I_3 = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \left(\frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \right]$$

$$m = \frac{B}{z}$$

$$n = \frac{L}{z}$$

พิจารณารูปที่ 7.1.10 แสดงค่าหน่วยแรงเค้นที่จุดใด ๆ ได้จุด A' ที่ความลึก z เราสามารถแบ่งพื้นที่ของน้ำหนักกระทำออกเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากสี่รูป จุด A' เป็นมุมร่วมของสี่เหลี่ยมมุมฉากทั้งสี่รูป แล้วหาค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นได้จากสมการที่ 7.1.15

$$\Delta P = q[I_{3(1)} + I_{3(2)} + I_{3(3)} + I_{3(4)}] \quad 7.1.16$$

โดยที่ $I_{3(1)}, I_{3(2)}, I_{3(3)}$ และ $I_{3(4)}$ คือค่า I_3 ของสี่เหลี่ยมมุมฉาก 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยทั่วไปเรามักจะต้องคำนวณค่าหน่วยแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นได้ศูนย์กลางของน้ำหนักกระทำสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

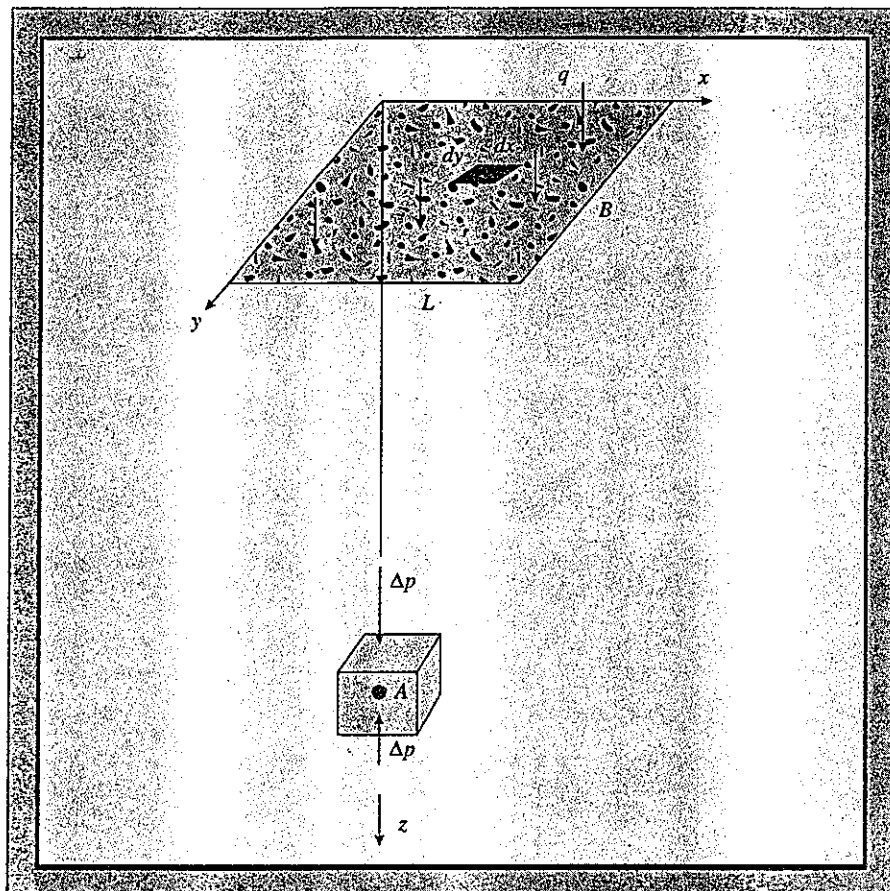
$$\Delta P = qI_4 \quad 7.1.17$$

โดยที่
$$I_4 = \frac{2}{\pi} \left[\frac{m_1 n_1}{\sqrt{1+m_1^2+n_1^2}} \frac{1+m_1^2+2n_1^2}{(1+n_1^2)(m_1^2+n_1^2)} + \sin^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2+n_1^2} \sqrt{1+n_1^2}} \right]$$

$$m_1 = \frac{L}{B}$$

$$n_1 = \frac{z}{b}$$

$$b = \frac{B}{2}$$

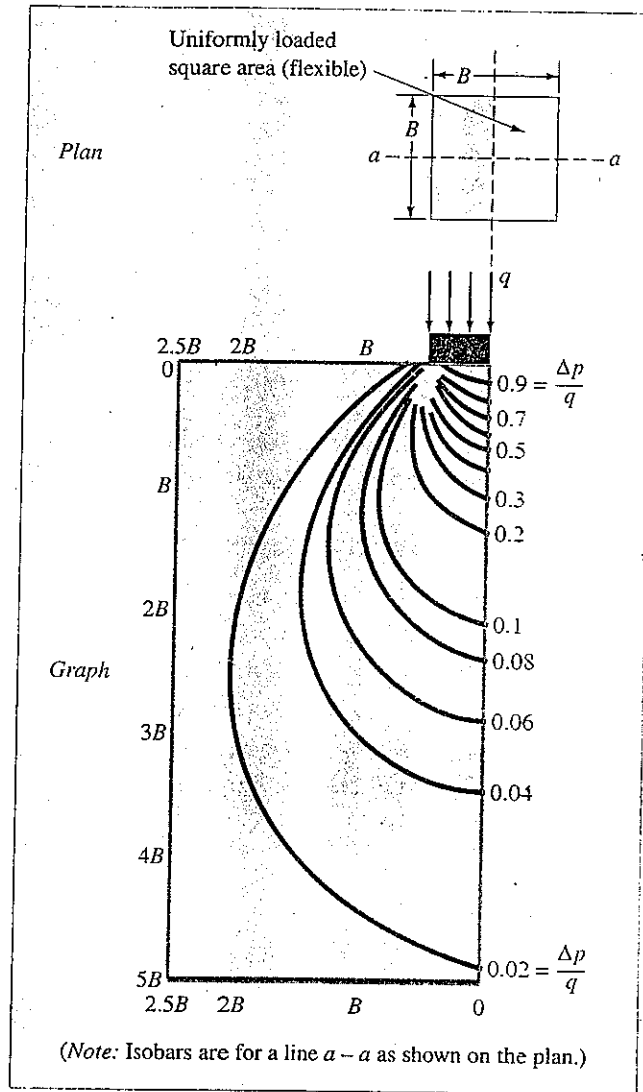


รูปที่ 7.1.10 แสดงค่าหน่วยแรงเค้นในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

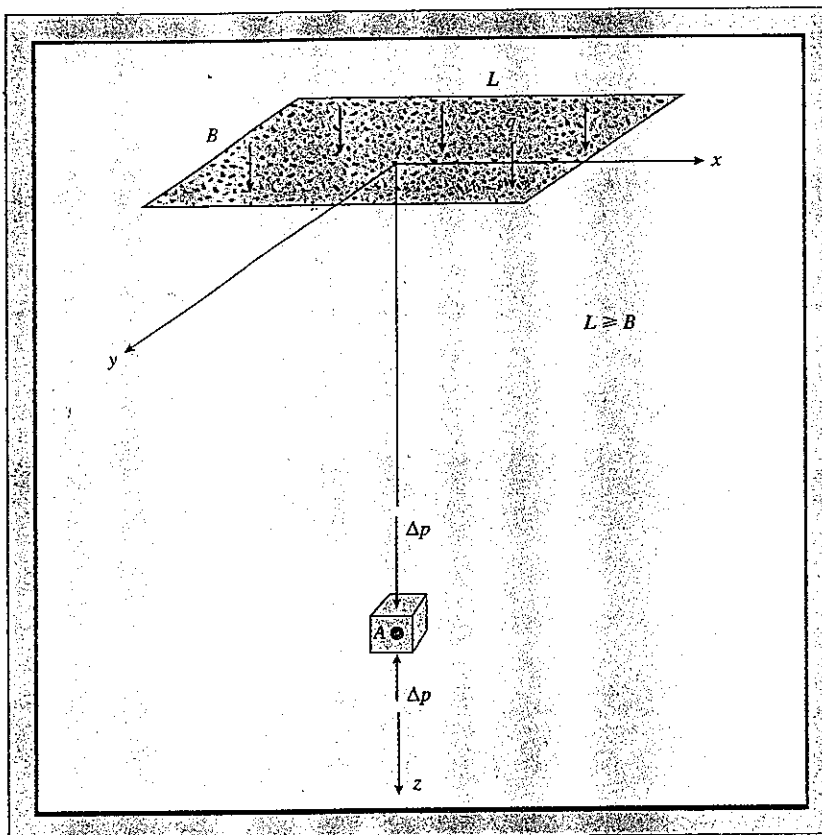
ตารางที่ 7.1.8 แสดงค่า μ_s ที่ค่า m และ k ต่างๆ

k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
0.1	0.0047	0.0092	0.0132	0.0168	0.0198	0.0222	0.0242	0.0258	0.0270	0.0279	0.0293	0.0301	0.0306	0.0309	0.0311	0.0314	0.0315	0.0316	0.0316	0.0316
0.2	0.0092	0.0179	0.0259	0.0328	0.0387	0.0435	0.0474	0.0504	0.0528	0.0547	0.0573	0.0589	0.0599	0.0606	0.0610	0.0616	0.0618	0.0619	0.0620	0.0620
0.3	0.0132	0.0259	0.0374	0.0474	0.0559	0.0629	0.0686	0.0731	0.0766	0.0794	0.0832	0.0856	0.0871	0.0880	0.0887	0.0895	0.0898	0.0901	0.0901	0.0902
0.4	0.0168	0.0328	0.0474	0.0602	0.0711	0.0801	0.0873	0.0931	0.0977	0.1013	0.1063	0.1094	0.1114	0.1126	0.1134	0.1145	0.1150	0.1153	0.1154	0.1154
0.5	0.0198	0.0387	0.0559	0.0711	0.0840	0.0947	0.1034	0.1104	0.1158	0.1202	0.1263	0.1300	0.1324	0.1340	0.1350	0.1363	0.1368	0.1372	0.1374	0.1374
0.6	0.0222	0.0435	0.0629	0.0801	0.0947	0.1069	0.1168	0.1247	0.1311	0.1361	0.1431	0.1475	0.1503	0.1521	0.1533	0.1548	0.1555	0.1560	0.1561	0.1562
0.7	0.0242	0.0474	0.0686	0.0873	0.1034	0.1189	0.1277	0.1365	0.1436	0.1491	0.1570	0.1620	0.1652	0.1672	0.1686	0.1704	0.1711	0.1717	0.1719	0.1719
0.8	0.0258	0.0504	0.0731	0.0931	0.1104	0.1247	0.1365	0.1461	0.1537	0.1598	0.1684	0.1739	0.1774	0.1797	0.1812	0.1832	0.1841	0.1847	0.1849	0.1850
0.9	0.0270	0.0528	0.0766	0.0977	0.1158	0.1311	0.1436	0.1537	0.1619	0.1684	0.1777	0.1836	0.1874	0.1899	0.1915	0.1936	0.1947	0.1954	0.1956	0.1957
1.0	0.0279	0.0547	0.0794	0.1013	0.1202	0.1361	0.1491	0.1598	0.1684	0.1752	0.1851	0.1914	0.1955	0.1981	0.1999	0.2024	0.2034	0.2042	0.2044	0.2045
1.2	0.0293	0.0573	0.0832	0.1063	0.1263	0.1431	0.1570	0.1684	0.1777	0.1851	0.1958	0.2028	0.2073	0.2103	0.2124	0.2151	0.2163	0.2172	0.2175	0.2176
1.4	0.0301	0.0599	0.0856	0.1094	0.1300	0.1475	0.1620	0.1739	0.1836	0.1914	0.2028	0.2102	0.2151	0.2184	0.2206	0.2236	0.2250	0.2260	0.2263	0.2264
1.6	0.0306	0.0599	0.0871	0.1114	0.1324	0.1503	0.1652	0.1774	0.1874	0.1955	0.2073	0.2151	0.2203	0.2237	0.2261	0.2294	0.2309	0.2320	0.2323	0.2325
1.8	0.0309	0.0606	0.0890	0.1126	0.1340	0.1521	0.1672	0.1797	0.1899	0.1981	0.2103	0.2183	0.2237	0.2274	0.2298	0.2333	0.2350	0.2362	0.2366	0.2367
2.0	0.0311	0.0610	0.0897	0.1134	0.1350	0.1533	0.1686	0.1812	0.1915	0.1999	0.2124	0.2206	0.2261	0.2299	0.2325	0.2361	0.2378	0.2391	0.2395	0.2397
2.5	0.0314	0.0616	0.0895	0.1145	0.1363	0.1548	0.1704	0.1832	0.1938	0.2024	0.2151	0.2236	0.2294	0.2333	0.2361	0.2401	0.2420	0.2434	0.2439	0.2441
3.0	0.0315	0.0618	0.0898	0.1150	0.1368	0.1555	0.1711	0.1841	0.1947	0.2034	0.2163	0.2250	0.2309	0.2350	0.2378	0.2420	0.2439	0.2455	0.2461	0.2463
4.0	0.0316	0.0619	0.0901	0.1153	0.1372	0.1560	0.1717	0.1847	0.1954	0.2042	0.2172	0.2260	0.2320	0.2362	0.2391	0.2434	0.2455	0.2472	0.2479	0.2481
5.0	0.0316	0.0620	0.0901	0.1154	0.1374	0.1561	0.1719	0.1849	0.1956	0.2044	0.2175	0.2263	0.2324	0.2366	0.2395	0.2439	0.2460	0.2479	0.2486	0.2489
6.0	0.0316	0.0620	0.0902	0.1154	0.1374	0.1562	0.1719	0.1850	0.1957	0.2045	0.2176	0.2264	0.2325	0.2367	0.2397	0.2441	0.2463	0.2482	0.2489	0.2492

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.



รูปที่ 7.1.11 isobars แสดงหน่วยแรงดันในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักกระทำแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก



รูปที่ 7.1.12 แสดงหน่วยแรงเค้นในแนวตั้งที่ศูนย์กลางของน้ำหนักกระทำแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ตารางที่ 7.1.9 แสดงค่า I_4 ที่ค่า m_1 และ n_1 ต่าง ๆ

n_1	m_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.20	0.994	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
0.40	0.960	0.976	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977
0.60	0.892	0.932	0.936	0.936	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937
0.80	0.800	0.870	0.878	0.880	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881
1.00	0.701	0.800	0.814	0.817	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818
1.20	0.606	0.727	0.748	0.753	0.754	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
1.40	0.522	0.658	0.685	0.692	0.694	0.695	0.695	0.696	0.696	0.696
1.60	0.449	0.593	0.627	0.636	0.639	0.640	0.641	0.641	0.641	0.642
1.80	0.388	0.534	0.573	0.585	0.590	0.591	0.592	0.592	0.593	0.593
2.00	0.336	0.481	0.525	0.540	0.545	0.547	0.548	0.549	0.549	0.549
3.00	0.179	0.293	0.348	0.373	0.384	0.389	0.392	0.393	0.394	0.395
4.00	0.108	0.190	0.241	0.269	0.285	0.293	0.298	0.301	0.302	0.303
5.00	0.072	0.131	0.174	0.202	0.219	0.229	0.236	0.240	0.242	0.244
6.00	0.051	0.095	0.130	0.155	0.172	0.184	0.192	0.197	0.200	0.202
7.00	0.038	0.072	0.100	0.122	0.139	0.150	0.158	0.164	0.168	0.171
8.00	0.029	0.056	0.079	0.098	0.113	0.125	0.133	0.139	0.144	0.147
9.00	0.023	0.045	0.064	0.081	0.094	0.105	0.113	0.119	0.124	0.128
10.00	0.019	0.037	0.053	0.067	0.079	0.089	0.097	0.103	0.108	0.112

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.

7.1.10 การหาค่าแรงดันในแนวคิงจากแผนภูมิอิทธิพล (influence chart)

จากสมการที่ 7.1.13 สามารถนำมาจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{R}{z} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta P}{q}\right)^{-2/3} - 1} \quad 7.1.18$$

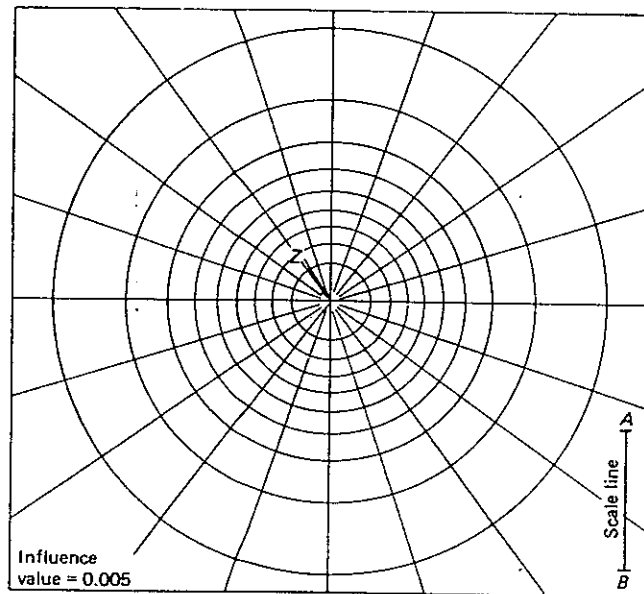
ค่า R/z และ $\Delta P/q$ จากสมการนี้เป็นค่าไร้มิติ (nondimensional quantities) ค่า R/z ที่อัตราส่วนแรงดัน (pressure ratio) ต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.1.8

ตารางที่ 7.1.10 ค่า R/z ที่อัตราส่วนความดันต่าง ๆ

$\Delta p/q$	R/z	$\Delta p/q$	R/z
0	0	0.55	0.8384
0.05	0.1865	0.60	0.9176
0.10	0.2698	0.65	1.0067
0.15	0.3383	0.70	1.1097
0.20	0.4005	0.75	1.2328
0.25	0.4598	0.80	1.3871
0.30	0.5181	0.85	1.5943
0.35	0.5768	0.90	1.9084
0.40	0.6370	0.95	2.5232
0.45	0.6997	1.00	∞
0.50	0.7664		

ที่มา : Braja, M. Das, 1998.

พิจารณารูปที่ 7.1.11 (7.27) แสดงแผนภูมิอิทธิพล (influence chart) ที่สร้างขึ้นโดยการวาดวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยรัศมีของวงกลมจะมีค่าเท่ากับค่า R/z ที่ขึ้นอยู่กับค่า $\Delta P/q$ ที่เท่ากับ 0, 0.1, 0.2, ..., 1. หน่วยความยาวที่ใช้ในการวาดวงกลมให้วัดจากเส้นตรง \overline{AB} วงกลมจะถูกแบ่งออกเป็นระยะเท่า ๆ กันตามแนวรัศมี ค่าอิทธิพลคือ $1/N$ โดยที่ N มีค่าเท่ากับจำนวนส่วนประกอบที่อยู่ในแผนภูมิ เช่นในรูปที่ 7.1.11 มีจำนวนส่วนประกอบทั้งหมด 200 ส่วน ดังนั้นค่าอิทธิพล (influence value) มีค่าเท่ากับ 0.005



รูปที่ 7.1.13 แผนภูมิอิทธิพลแสดงแรงดันดินในแนวดิ่งโดยใช้ทฤษฎีของ Boussinesq (1942)

7.1.11 ขั้นตอนในการหาแรงดันในแนวดิ่งที่จุดใด ๆ ได้พื้นที่น้ำหนักกระทำ

1. วิเคราะห์ความลึก z ได้พื้นที่น้ำหนักกระทำอย่างสม่ำเสมอ ที่ต้องการทราบค่าหน่วยแรงเส้นที่เพิ่มขึ้น
2. วาดรูปพื้นที่ของน้ำหนักกระทำด้วยมาตราส่วนที่ z เท่ากับหน่วยความยาวของแผนภูมิ ซึ่งก็คือ \overline{AB}
3. วางรูปพื้นที่ของน้ำหนักกระทำที่วาดได้จากขั้นตอนที่ 2 ลงบนแผนภูมิอิทธิพล (influence chart) โดยให้จุดที่ต้องการทราบค่าหน่วยแรงเส้นตรงกับจุดศูนย์กลางของแผนภูมิ
4. นับจำนวนส่วนประกอบ (M) ของแผนภูมิภายในผังพื้นที่ของน้ำหนักกระทำ

ค่าหน่วยแรงดันที่เพิ่มขึ้นที่จุดใด ๆ ได้น้ำหนักกระทำสามารถหาได้จาก

$$\Delta P = (IV)qM \quad 7.1.19$$

โดยที่ IV = ค่าอิทธิพล (influence value)

q = แรงดันบนพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำ

7.2 โจทย์ทบทวนความรู้ ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน

1. เมื่อพิจารณาในคืนชั้นเดียวกัน ที่ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน เมื่อมีแรงภายนอกกระทำ ค่า effective stress ที่เพิ่มขึ้นภายในคืนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในชั้นดิน ที่พิจารณานั้นเป็นอย่างไร

ตอบ ค่า effective stress จะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ระดับผิวดิน และจะลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกเดียวกัน แต่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแรงที่กระทำต่างกัน ค่า effective stress ที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจุดที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางของแรงที่กระทำมากกว่า จะเกิด effective stress ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงกระทำมากกว่า

2. เมื่อมีแรงภายนอกกระทำกับดิน แรงที่กระทำนั้นจะกระจายตัวในลักษณะใด ประกอบด้วยหน่วยแรงใดบ้าง และเมื่อพิจารณาค่า effective stress ที่เพิ่มขึ้นในดิน เนื่องจากแรงกระทำภายนอกนั้น เราพิจารณาการกระจายของแรงที่กระทำในทิศทางใด

ตอบ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำกับดิน แรงที่กระทำนั้นจะกระจายตัวไปทุกทิศทุกทาง โดยประกอบด้วย

- หน่วยแรงตั้งฉาก
- หน่วยแรงเฉือน

และเมื่อพิจารณาค่า effective stress ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงกระทำภายนอกนั้น เราจะพิจารณาเฉพาะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งเท่านั้น

3. การวิเคราะห์หาค่า effective stress ที่เกิดขึ้นในดิน เนื่องจากแรงกระทำภายนอกนั้น มีประโยชน์อย่างไรต่องานทางด้านวิศวกรรม

ตอบ การวิเคราะห์หาค่า effective stress ที่เพิ่มขึ้น จากแรงกระทำภายนอกนั้น เพื่อใช้วิเคราะห์หาปริมาณการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างอาคารเหนือดิน ดังนั้นจึงช่วยในการออกแบบฐานรากของโครงสร้างอาคาร

7.3 โจทย์ทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้ความรู้

1. บริษัท พิชญการโยธา จำกัด ได้รับเหมาดอกเสาเข็ม (piling installation) ของบ้านเดี่ยว จำนวน 40 หลัง ในโครงการบ้านจัดสรร พิชญโลกเมืองใหม่ โดยวางแผนใช้ลูกตุ้มหนัก 2 Tons สำหรับการตอกเสาเข็ม เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ปัญหาเรื่องผลกระทบต่อชั้นดินรองรับ โครงสร้างบริเวณข้างเคียง เจ้าของโครงการ ได้ว่าจ้างให้ท่าน ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษากรุณา plot the variation of vertical stress increase (Δp_z), ในระนาบ $x - z$ (จาก $y = 0$) ที่ ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

- 1.1 ระดับความลึก $z = 1$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center
- 1.2 ระดับความลึก $z = 2$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center
- 1.3 ที่ระยะห่าง (x) = 1 m จาก pile center ณ ระดับความลึก $z = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20$ m จากผิวดิน

ทั้งนี้ ให้สมมติว่าผลกระทบจากการปล่อยค้ำน้ำหนักตอกกระทกลงบนหัวเข็มในแบบ dynamic load ทำให้เกิดแรงกระทำต่อหัวเข็มเป็นแบบ static load ที่มีขนาด 5 เท่าของน้ำหนัก ลูกตุ้ม

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

1.1 สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 1$ m จากผิวดิน ที่ ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแบบการ ปล่อยค้อนน้ำหนักตอกระแทกลงบนหัวเข็ม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ point load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น point load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยใช้ สมการ

$$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$$

$$\begin{aligned} P &= 2 \text{ Tons} \times 5 \\ &= 10 \text{ Tons} \\ z &= 1 \text{ m} \end{aligned}$$

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 1$ m จาก ผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

$$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$$

$$P = 5 \times 2 \text{ Tons} = 10 \text{ Tons}$$

$$z = 1 \text{ m}$$

$$z^2 = 1 \text{ m}^2$$

ที่ระยะ $x = 0$ m (จาก pile center)

$$r/z = x/z = 0$$

$$I_1 = 0.4775 \text{ (หาได้จากตารางที่ 7.1 .1)}$$

$$\Delta p_z = \frac{10 \text{ Tons}}{1^2 \text{ m}^2} \cdot 0.4775$$

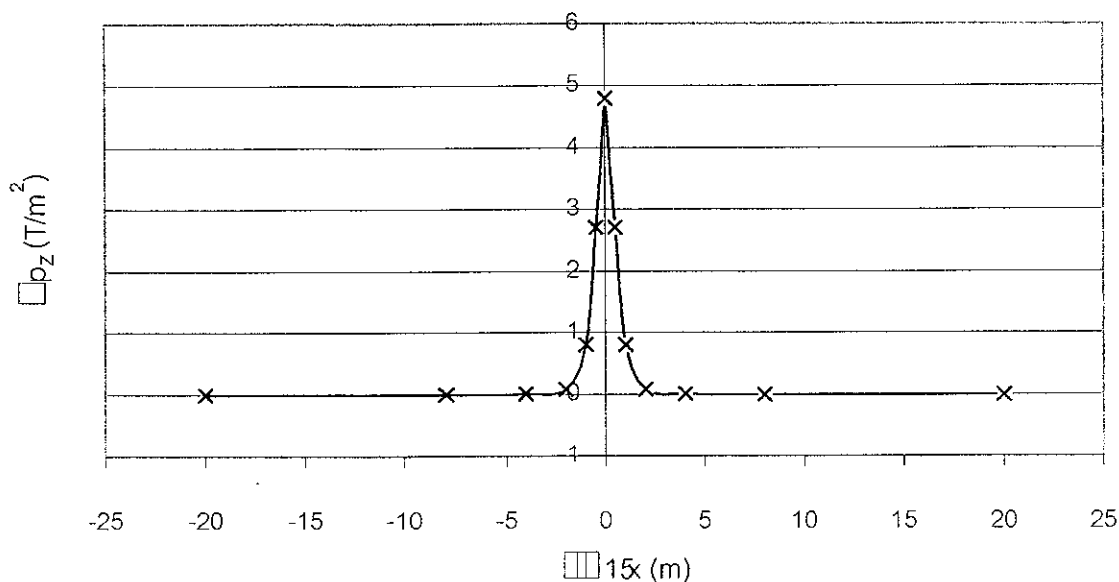
$$= 4.8 \text{ T/m}^2$$

ในทำนองเดียวกัน ของ Δp_z ณ ตำแหน่ง x ที่เหลือ สามารถคำนวณหาได้ ดังสรุปไว้ใน ตารางที่ 7.3.1

ตารางที่ 7.3.1 ผลการคำนวณ Δp_z ณ ระดับความลึก $z = 1$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center

z (m)	x (m)	r (m)	r/z	I_1 (จากตารางที่ 7.1.1)	$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$ (T/m ²)
1	0	0	0	0.4775	4.8
	0.5	0.5	0.5	0.2733	2.7
	1.0	1.0	1.0	0.0844	0.8
	2.0	2.0	2.0	0.0085	0.08
	4.0	4.0	4.0	0.0004	0.004
	8.0	8.0	8.0	1.9×10^{-5}	1.9×10^{-6}
	20.0	20.0	20.0	1.5×10^{-7}	1.5×10^{-8}

จากนั้น นำค่า Δp_z ที่คำนวณหาได้ ไป plot the variation of vertical stress increase (Δp_z) ในระนาบ $x - z$



รูปที่ 7.3.1 the variation of vertical stress increase (Δp_z) ในระนาบ $x - z$

1.2 สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 2$ m จากผิวดิน ที่ ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแบบการปล่อยค้ำน้ำหนักตกกระทบบนหัวเข็ม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ point load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น point load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยใช้สมการ

$$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$$

P = 2 Tons x 5 = 10 Tons

z = 2 m

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 2$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

$$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$$

$$P = 5 \times 2 \text{ Tons} = 10 \text{ Tons}$$

$$z = 2 \text{ m} \text{ และ}$$

$$z^2 = 4 \text{ m}^2$$

$$\text{ที่ระยะ } x = 0 \text{ m (จาก pile center)}$$

$$r/z = x/z = 0$$

$$I_1 = 0.4775 \text{ (หาได้จากตารางที่ 7.1.1)}$$

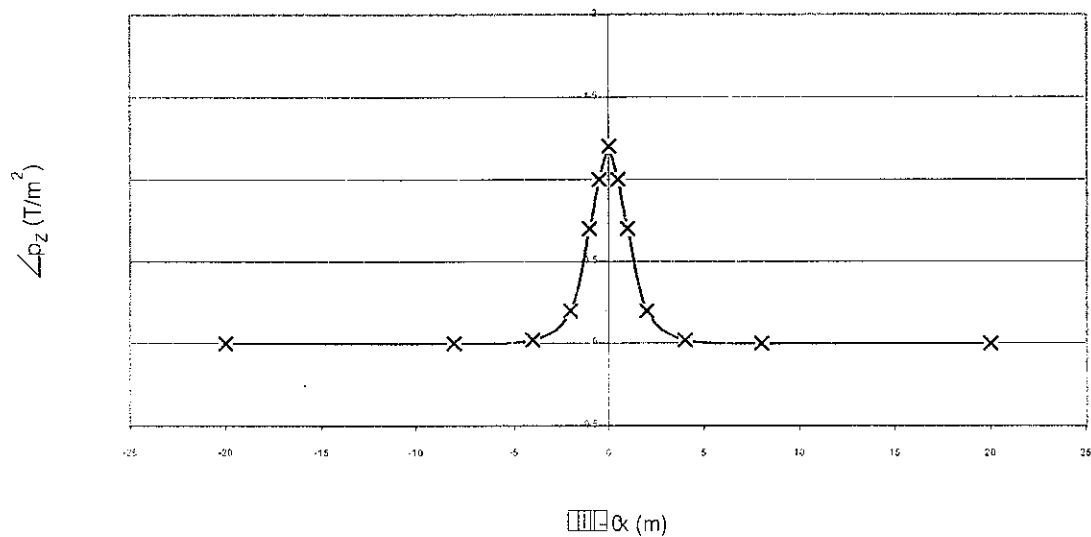
$$\begin{aligned} \Delta p_z &= \frac{10 \text{ Tons}}{2^2 \text{ m}^2} \cdot 0.4775 \\ &= 1.2 \text{ T/m}^2 \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน ของ Δp_z ณ ตำแหน่ง x ที่เหลือ สามารถคำนวณหาได้ ดังสรุปไว้ในตาราง 7.3.2

ตารางที่ 7.3.2 ผลการคำนวณ Δp_z ณ ระดับความลึก $z = 2$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20 m จาก pile center

z (m)	x (m)	r (m)	r/z	I_1 (จากตารางที่ 7.1.1)	$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$ (T/m ²)
2	0	0	0	0.4775	1.2
	0.5	0.5	0.5	0.4103	1.0
	1.0	1.0	1.0	0.2733	0.7
	2.0	2.0	2.0	0.0844	0.2
	4.0	4.0	4.0	0.0085	0.02
	8.0	8.0	8.0	0.0004	0.001
	20.0	20.0	20.0	4.7×10^{-6}	1.2×10^{-5}

จากนั้น นำค่า Δp_z ที่คำนวณหาได้ ไป plot the variation of vertical stress increase (Δp_z) ในระนาบ $x - z$



รูปที่ 7.3.2 the variation of vertical stress increase (Δp_z) ในระนาบ $x - z$

1.3 สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ที่ระยะห่าง (x) = 1 m จาก pile center ระดับความลึก $z = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20$ m จากผิวดิน

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแบบการปล่อยตุ้มน้ำหนักตกกระทบบนหัวเข็ม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ point load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น point load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยใช้สมการดังนี้

$$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$$

$$P = 2 \text{ Tons} \times 5 = 10 \text{ Tons}$$

$$x = 1 \text{ m}$$

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ที่ระยะห่าง (x) = 1 m จาก pile center ระดับความลึก $z = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20$ m จากผิวดิน

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

$$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$$

$$P = 5 \times 2 \text{ Tons} = 10 \text{ Tons}$$

$$x = 1 \text{ m}$$

$$\text{ที่ระยะ } z = 0.5 \text{ m}$$

$$r/z = x/z = 2 \text{ m}$$

$$I_1 = 0.0085 \text{ (หาได้จากตารางที่ 7.1.1)}$$

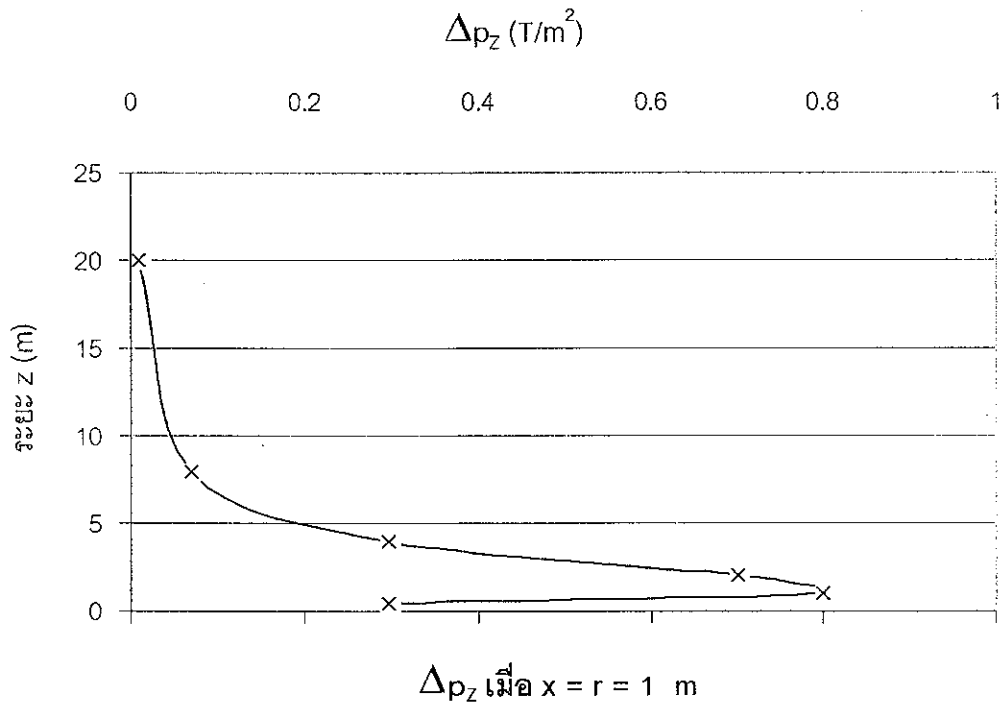
$$\begin{aligned} \Delta p_z &= \frac{10 \text{ Tons}}{0.5^2 \text{ m}^2} 0.0085 \\ &= 0.3 \text{ T/m}^2 \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน ของ Δp_z ณ ตำแหน่ง z ที่เหลือ สามารถคำนวณหาได้ ดังสรุปไว้ในตาราง 7.3.3

ตารางที่ 7.3.3 ผลการคำนวณ Δp_z ณ ที่ระยะห่าง (x) = 1 m จาก pile center ระดับความลึก $z = 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20$ m จากผิวดิน

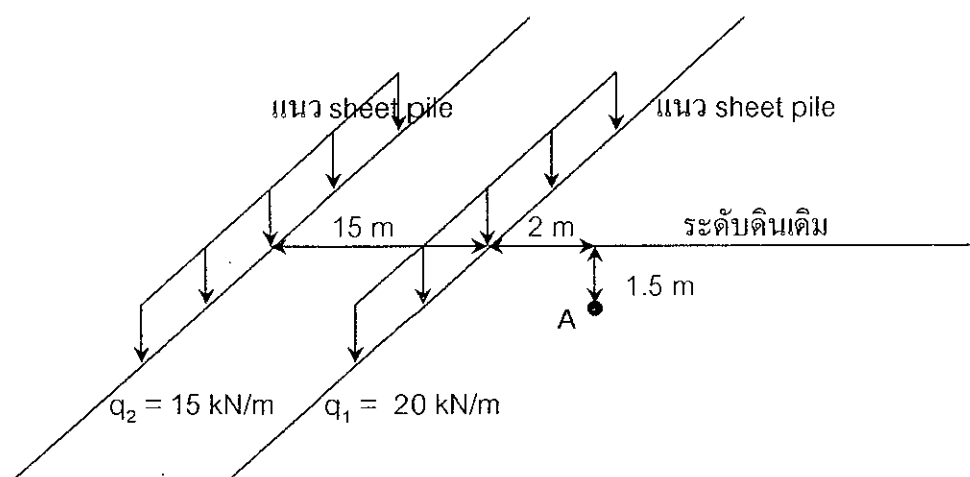
$x = r$ (m)	z (m)	r/z	I_1 (จากตารางที่ 7.1.1)	$\Delta p_z = \frac{P}{z^2} I_1$ (T/m ²)
1	0	-	-	-
	0.5	2.0	0.0085	0.3
	1.0	1.0	0.0844	0.8
	2.0	0.5	0.2733	0.7
	4.0	0.25	0.4103	0.3
	8.0	0.125	0.4592	0.07
	20.0	0.05	0.4744	0.01

จากนั้น นำค่า Δp_z ที่คำนวณหาได้ ไป plot the variation of vertical stress increase (Δp_z)
 ในระนาบ $x - z$



รูปที่ 7.3.3 The variation of vertical stress increase (Δp_z) ในระนาบ $x - z$

2. ในบริเวณที่ต้องทำการซ่อมแซมถนนสาย พิษณุโลก – สุโขทัย เป็นระยะทาง 15 กิโลเมตร พบว่าทั้งสองข้างทางเป็นอาคารบ้านเรือน และสิ่งปลูกสร้างของคนบริเวณนั้น วิศวกรผู้ควบคุมโครงการซ่อมแซมถนน แนะนำว่าควรปัก sheet pile บริเวณ 2 ข้างของถนนที่มีการซ่อมแซม เพื่อป้องกันการกระทบกระเทือนต่อสิ่งปลูกสร้างบริเวณนั้น ซึ่งจากการวิเคราะห์แรงที่จะเกิดขึ้นเมื่อปัก sheet pile ทั้ง 2 ข้างของถนน พบว่า



รูปที่ 7.3.4 sheet pile บริเวณ 2 ข้างของถนนที่มีการซ่อมแซม

ในฐานะวิศวกรผู้ควบคุมการซ่อมแซมถนน กรุณาตอบคำถามของลุงมี ซึ่งเป็นคนในบริเวณนั้นที่ว่า เมื่อปัก sheet pile แล้ว จะเกิดแรงกระทำกับฐานรากดินของโกดังของเขาหรือไม่ มากเท่าใด เมื่อฐานรากโกดังอยู่ที่ระยะลึก 1.5 m จากผิวดินและห่างจาก sheet pile ดังรูปข้างต้น (จุด A)

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)

- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 1.5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 2 m จาก q_1 , 17 m จาก q_2

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแบบการตอก sheet pile เป็นแนวเดียว ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ line load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น line load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)

โดยใช้สมการ

$$\Delta p_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

$$q_1 = 20 \text{ kN/m}$$

$$q_2 = 15 \text{ kN/m}$$

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 1.5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 2 m จาก q_1 , 17 m จาก q_2

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

$$\Delta p_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

เนื่องจาก Δp_z เกิดจาก q_1 และ q_2 จะได้ว่า $\Delta p_z = \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2}$

พิจารณาที่	q	=	q_1	=	20 kN/m
	x	=	2 m	(จากแนว sheet pile)	
	z	=	1.5 m		

$$\begin{aligned}\Delta p_{z1} &= \frac{2q_1 z^3}{\pi (x_1^2 + z^2)^2} \\ &= \frac{2(20 \text{ kN/m})(1.5 \text{ m})^3}{\pi (2^2 \text{ m}^2 + 1.5^2 \text{ m}^2)^2} \\ &= 1.1 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

พิจารณาที่

q	=	q ₂	=	15	kN/m
x	=	17 m	(จากแนว sheet pile)		
z	=	1.5 m			

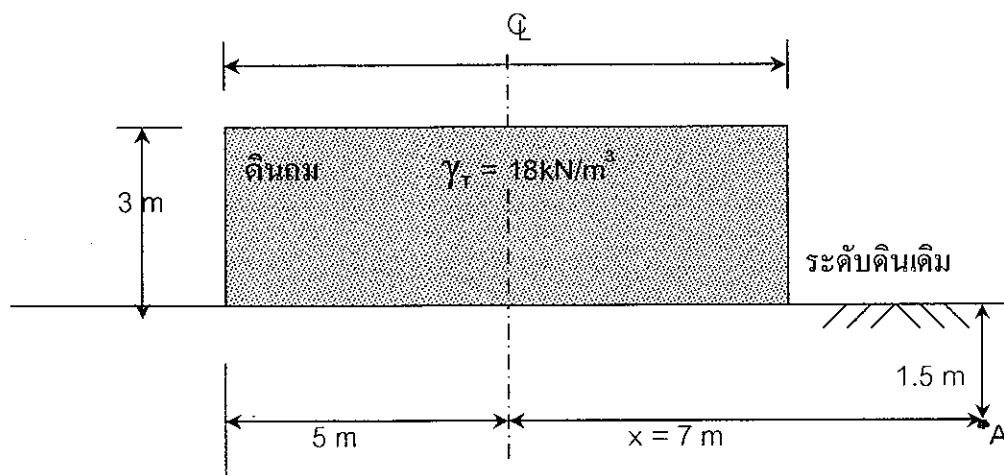
$$\begin{aligned}\Delta p_{z2} &= \frac{2q_2 z^3}{\pi (x_2^2 + z^2)^2} \\ &= \frac{2(15 \text{ kN/m})(1.5 \text{ m})^3}{\pi (17^2 \text{ m}^2 + 1.5^2 \text{ m}^2)^2} \\ &= 0.4 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

จาก

$$\begin{aligned}\Delta p_z &= \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2} \\ &= (1.1 + 0.0004) \text{ kN/m}^2 \\ &\approx 1.1 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

ดังนั้นในฐานะวิศวกรผู้ควบคุมการซ่อมแซมถนน จะตอบคำถามของลุงมี ซึ่งเป็นคนในบริเวณนั้นที่ว่า เมื่อปัก sheet pile แล้ว จะเกิดแรงกระทำกับฐานรากค้ำของ โถงตั้งของเขาด้วยแรงประมาณ 1.1 kN/m² หรือประมาณ 112 kg/m²

3. โครงการก่อสร้างถนน พิษณุโลก - อุดรดิตถ์ สายใหม่เป็นระยะทาง 145 กม. ต้องถมดินเพื่อทำถนนสูง 3 m ขวางตลอดเส้นทาง หน้าตัดของดินถม ซึ่งถนนกว้าง 10 m เป็นดังนี้



รูปที่ 7.3.5 หน้าตัดของดินถมคันทาง พิษณุโลก - อุดรดิตถ์ สายใหม่

อยากทราบว่า ที่ระยะห่างจาก center line ของถนน 7 m ลึก 1.5 m ซึ่งเป็นฐานรากค้ำของเสาไฟฟ้าต้นหนึ่ง (จุด A) จะได้รับผลกระทบจากการถมดินเพื่อทำถนนหรือไม่ เป็นแรงมากเท่าใด

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 1.5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 7 m จาก center line ถนน

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นการถมดินเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบเดี่ยวยาวตลอดเส้นทาง 145 กิโลเมตร ดังนั้นเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ strip load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น strip load ดังนั้นคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.3

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 1.5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 7 m จาก center line ถนน

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

$$x = 7 \text{ m}$$

$$z = 1.5 \text{ m}$$

$$B = 10 \text{ m}$$

$$\gamma_r = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$q = (18 \text{ kN/m}^3)(3 \text{ m}) = 54 \text{ kN/m}^2$$

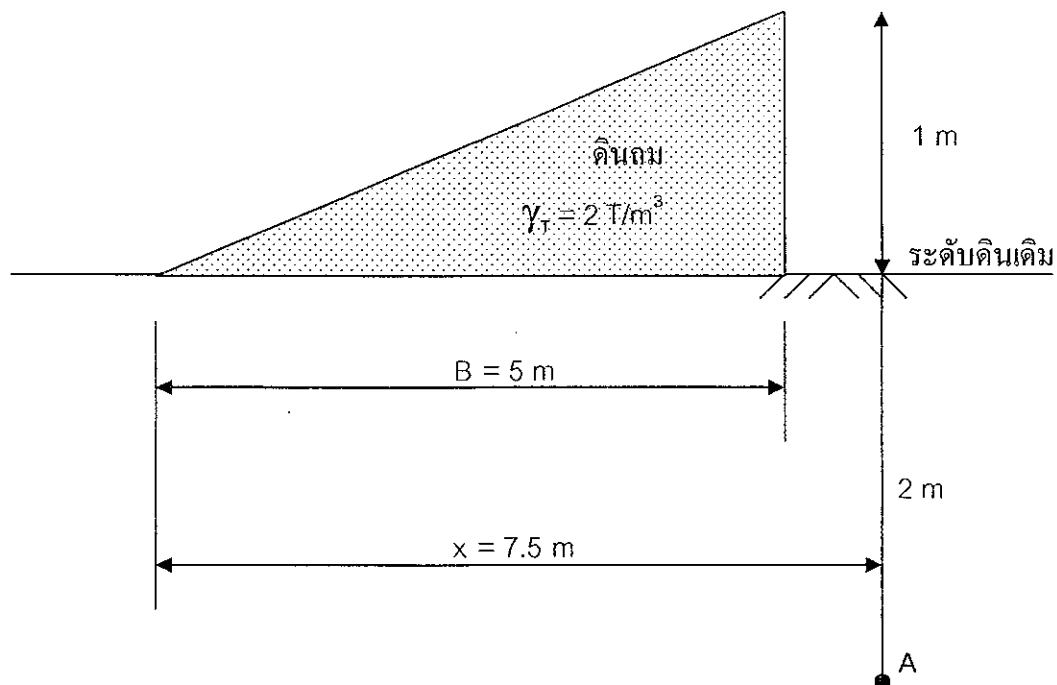
จากตารางเมื่อ $\frac{2z}{B} = 0.3$, $\frac{2x}{B} = 1.4$ จะได้ $\frac{\Delta p_z}{q} = 0.052$

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q(0.052) \\ &= (54 \text{ kN/m}^2)(0.052) \\ &= 2.8 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น ฐานรากคานของเสาไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบจากแรง Δp_z เท่ากับ 2.8 kN/m^2

4. โครงการก่อสร้างสนามกีฬากลางแห่งใหม่ของจังหวัดพิษณุโลก ได้มีการถมดินยกระดับเพื่อทำสนามแข่งจักรยาน ดังรูป



รูปที่ 7.3.6 หน้าตัดของดินถมยกระดับเพื่อทำสนามแข่งจักรยาน

บริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างอยากทราบว่า หากจะวางฐานรากตื้นที่ระยะ $x = 7.5$ m, $z = 2$ m (จุด A) ดังรูป จะมีผลกระทบของแรงจากดินถมหรือไม่ ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษาของโครงการ กรุณาให้คำแนะนำแก่ผู้รับเหมา ว่าหากวางฐานรากตื้นที่ระยะ $x = 7.5$ m, $z = 2$ m (จุด A) จะเกิดแรงกระทำซึ่งเป็นผลมาจากดินถมเท่าใด

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)

- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

ถ้าหวัับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 2$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 7.5 m จากจุดเริ่มของดินถม

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นการถมดินเป็นหน้าตัดสามเหลี่ยมมุมฉากแบบเดี่ยวยาวตลอดทั้งสนาม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ linearly increasing load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น linearly increasing load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.4

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 2$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 7.5 m จากจุดเริ่มของดินถม

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

$$x = 7.5 \text{ m}$$

$$z = 2 \text{ m}$$

$$B = 5 \text{ m}$$

$$\gamma_r = 2 \text{ T/m}^3$$

$$q = (2 \text{ T/m}^3)(1 \text{ m}) = 2 \text{ T/m}^2$$

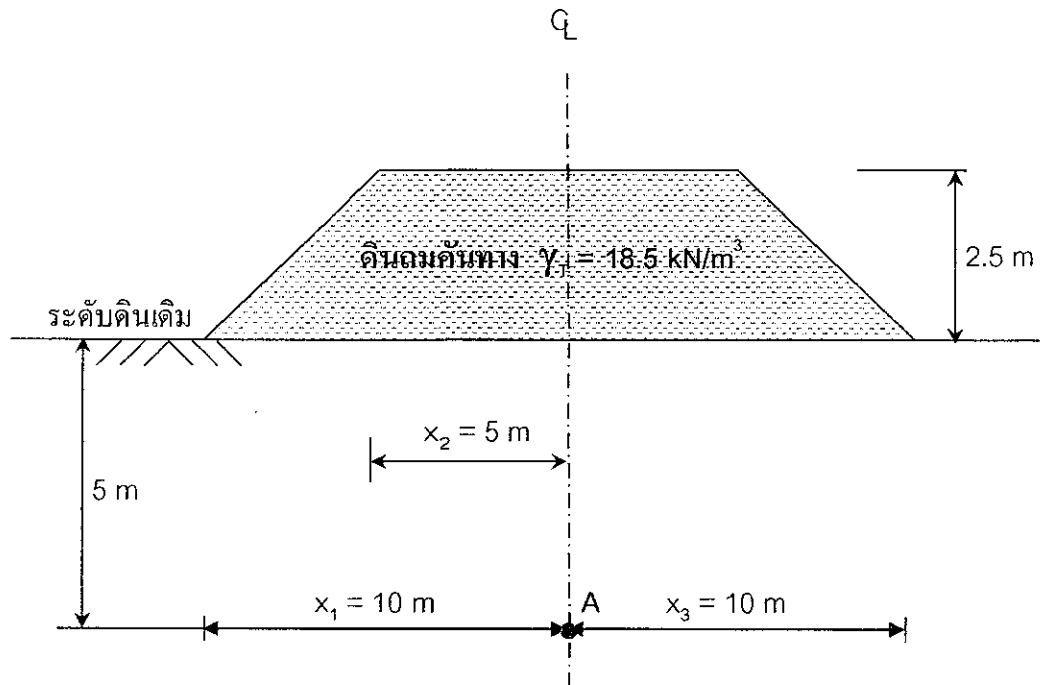
$$\text{จากตารางเมื่อ } \frac{2z}{B} = 0.8, \frac{2x}{B} = 3 \text{ จะได้ } \frac{\Delta p_z}{q} = 0.0434$$

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q(0.0434) \\ &= (2 \text{ T/m}^2)(0.0434) \\ &= 0.07 \text{ T/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้นในฐานะวิศวกรที่ปรึกษาโครงการแนะนำว่า หากวางฐานรากตื้นที่ระยะ $x = 7.5$ m, $z = 2$ m (จุด A) จะเกิดแรงกระทำซึ่งเป็นผลมาจากดินถม ประมาณ 70 kg/m^2

5. โครงการขยายเส้นทางหลวงหมายเลข 12 เส้นทางจาก พิษณุโลก – เพชรบูรณ์ เป็นระยะทาง 200 กิโลเมตร ซึ่งในการก่อสร้างจะต้องมีการถมดิน โดยหน้าตัดของดินถมคันทาง เป็นดังรูป



รูปที่ 7.3.7 หน้าตัดของดินถมคันทางหลวงหมายเลข 12 เส้นทางจาก พิษณุโลก – เพชรบูรณ์

เพื่อวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวของดินถมคันทาง ในฐานะ วิศวกรที่ปรึกษาคำนวณค่า Δp_z ที่ระยะลึก 5 m ใต้ center line ของดินถมคันทาง (จุด A)

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 10 m, 5 m จาก center line ของดินถมคันทาง

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นการถมดินเป็นหน้าตัดดินถมคันทางแบบเดี่ยวยาวตลอดทั้งสนาม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็น 2 แบบ คือ linearly increasing load, และ strip load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น linearly increasing load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.4 และเพราะเป็น strip load คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.3

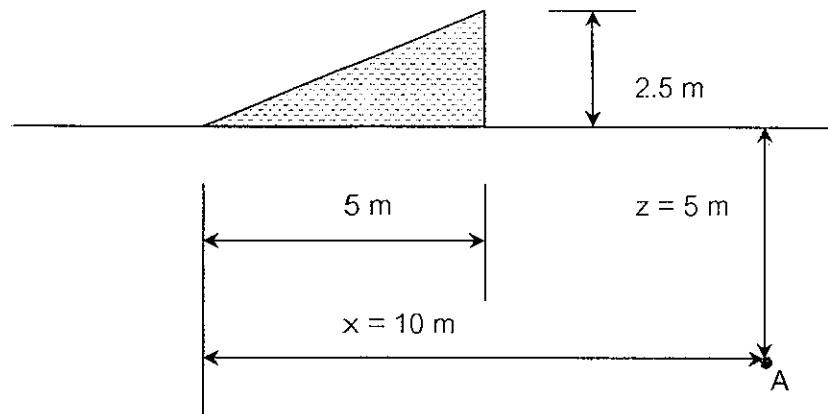
ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 10 m, 5 m จาก center line ของดินถมคันทาง

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

เนื่องจาก Δp_z เกิดจากรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) 2 แบบ คือ linearly increasing load, และ strip load ดังนั้น

$$\Delta p_z = \Delta p_{z \text{ strip load}} + 2\Delta p_{z \text{ linearly increasing load}}$$

สำหรับ Δp_z ของ linearly increasing load คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.4



รูปที่ 7.3.8 หน้าตัดของ linearly increasing load

$$x = 10 \text{ m}$$

$$z = 5 \text{ m}$$

$$B = 5 \text{ m}$$

$$\gamma_T = 18.5 \text{ kN/m}^3$$

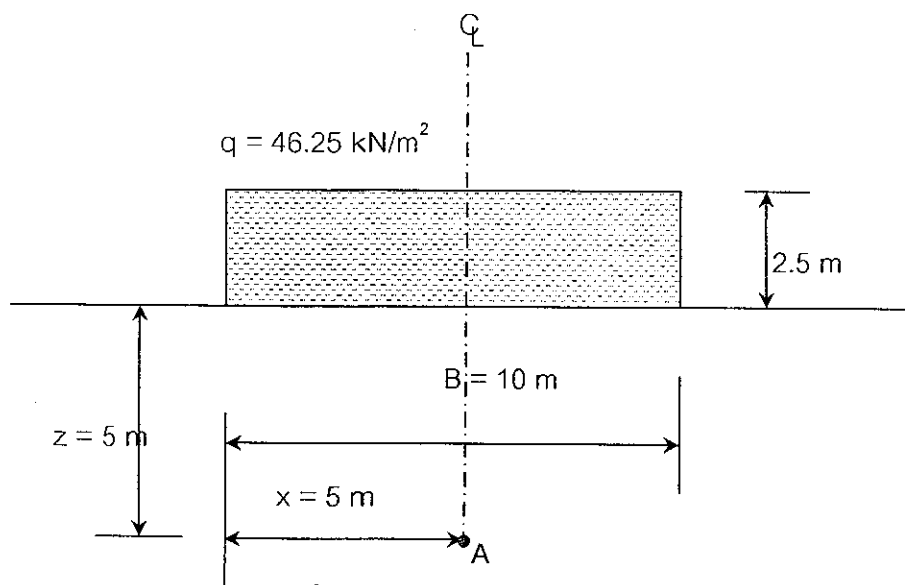
$$q = (18.5 \text{ kN/m}^3)(2.5 \text{ m}) = 46.25 \text{ kN/m}^2$$

จากตารางเมื่อ $\frac{2z}{B} = 4$, $\frac{2x}{B} = 4$ จะได้ $\frac{\Delta p_z}{q} = 0.0457$

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q(0.0457) \\ &= (46.25 \text{ kN/m}^2)(0.0457) \\ &= 2.11 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

สำหรับ Δp_z ของ strip load คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.3



รูปที่ 7.3.9 หน้าตัดของ strip load

$$x = 5 \text{ m}$$

$$z = 5 \text{ m}$$

$$B = 10 \text{ m}$$

$$\gamma_T = 18.5 \text{ kN/m}^3$$

$$q = (18.5 \text{ kN/m}^3)(2.5 \text{ m}) = 46.25 \text{ kN/m}^2$$

จากตารางเมื่อ $\frac{2z}{B} = 1$, $\frac{2x}{B} = 0$ จะได้ $\frac{\Delta p_z}{q} = 0.818$

จะได้

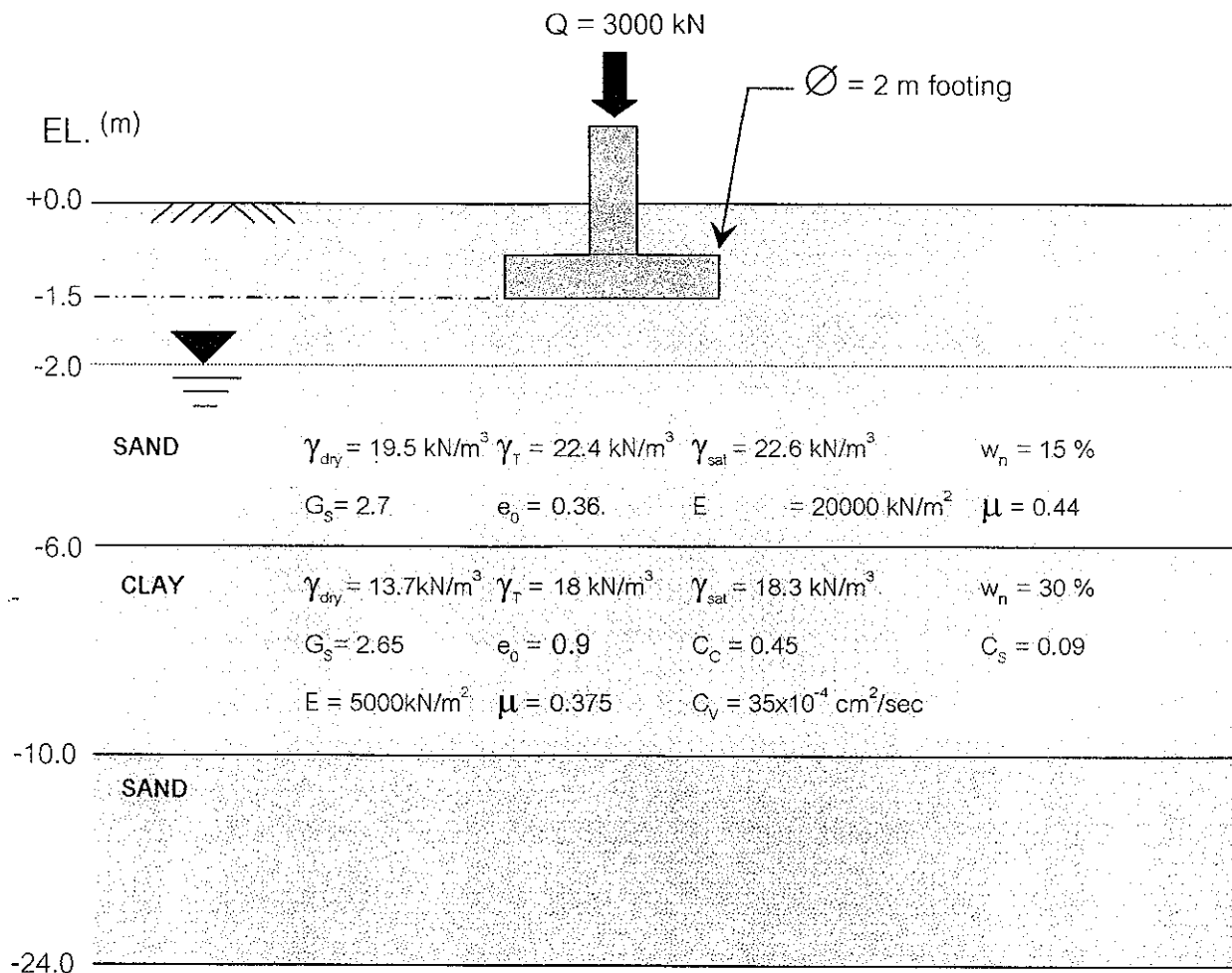
$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q(0.818) \\ &= (46.25 \text{ kN/m}^2)(0.818) \\ &= 37.83 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= \Delta p_{z \text{ strip load}} + 2\Delta p_{z \text{ linearly increasing load}} \\ &= 37.83 \text{ kN/m}^2 + 2(2.11 \text{ kN/m}^2) \\ &= 42.05 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่า Δp_z ที่ระยะลึก 5 m ใต้ center line ของดินถมคันทาง (จุด A) จะเกิดแรงกระทำซึ่งเป็นผลมาจากดินถม ประมาณ 42 kN/m²

6.วิศวกรประจำบริษัทไฟโรจน์การก่อสร้างได้ออกแบบฐานรากค้ำของบ้านเดี่ยวในโครงการบ้าน
กมลวรรณ เฟส 2 ซึ่งตั้งอยู่ที่ อ.เมือง จ.พิจิตร ผลจากการสำรวจชั้นดินพบว่า $Q = 3000 \text{ kN}$



รูปที่ 7.3.10 ชั้นดินบริเวณโครงการก่อสร้างบ้านกมลวรรณ เฟส 2 อ.เมือง จ.พิจิตร

เจ้าของโครงการอยากทราบว่า ฐานรากที่ออกแบบไว้จะมีการทรุดตัวหรือไม่ เพื่อวิเคราะห์
ค่าการทรุดตัวของฐานราก ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบกรุณาคำนวณค่า Δp_z ที่ระยะกึ่งกลางของชั้น
ดินเหนียวใต้ center line ของฐานรากเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวของ
ฐานรากต่อไป

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า
induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 6.5$ m จากใต้ center line ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center line ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแรงจากฐานรากวงกลม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ uniformly loaded circular area

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น uniformly loaded circular area ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จาก

$$\Delta p_z = q \left\{ 1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}} \right\}$$

หรือหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.5

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 6.5$ m จากใต้ center line ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center line ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

จาก

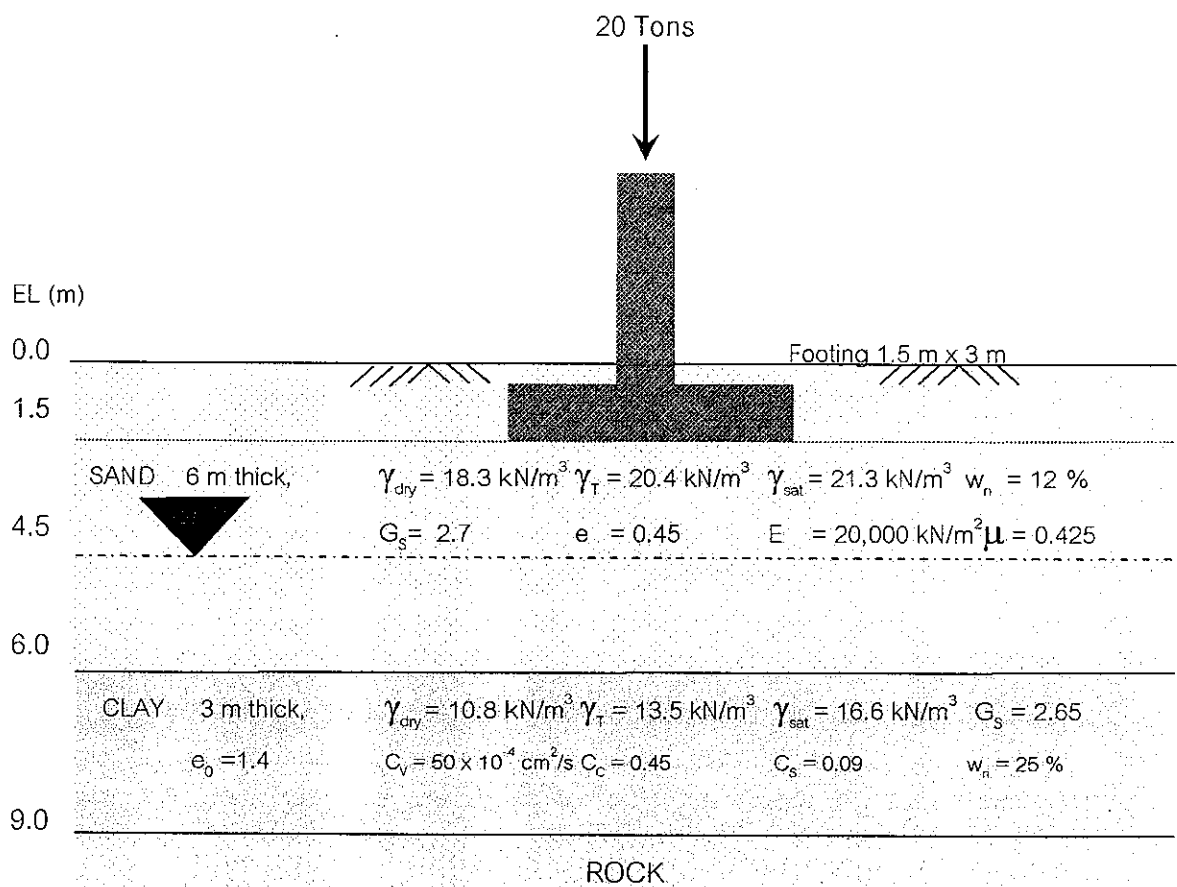
$$\Delta p_z = q \left\{ 1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}} \right\}$$

$$q = \frac{3000 \text{ kN}}{(\pi/4)(2 \text{ m})^2}$$

$$= 955 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้นค่า Δp_z ที่ระยะกึ่งกลางของชั้นดินเหนียวใต้ center line ของฐานรากมีค่าประมาณ 121.2 kN/m^2

7. ฐานรากดินของอาคารพาณิชย์ 5 ชั้น ขนาด $3 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ รับแรง 20 ตัน ดังรูป



รูปที่ 7.3.11 ชั้นดินบริเวณโครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 5 ชั้น

ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบฐานราก กรุณาคำนวณหา Δp_z ที่จุดต่ำสุดของชั้น clay ได้ center line ของฐานราก เพื่อนำค่า Δp_z ที่ได้ไปเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อวิเคราะห์หาค่าการยุบตัวของ ฐานรากต่อไป

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 7.5$ m จากได้ center line ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center line ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแรงจากฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ rectangularly loaded area

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น rectangularly loaded area ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.9

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 7.5$ m จากได้ center line ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center line ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ Δp_z ของ rectangularly loaded area คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.9 เพื่อหาค่า I_4

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \Delta p_z &= q(I_4) \\ x &= 0 \quad \text{m} \\ z &= 7.5 \quad \text{m} \\ B &= 1.5 \quad \text{m} \\ q &= \frac{20 T}{(3 \text{ m})(1.5 \text{ m})} \\ &= 4.44 \quad T/m^2 \end{aligned}$$

$$\text{จากตารางเมื่อ } m_1 = \frac{L}{B} = 2, \quad n_1 = \frac{z}{B/2} = 10 \quad \text{จะได้ } I_4 = 0.037$$

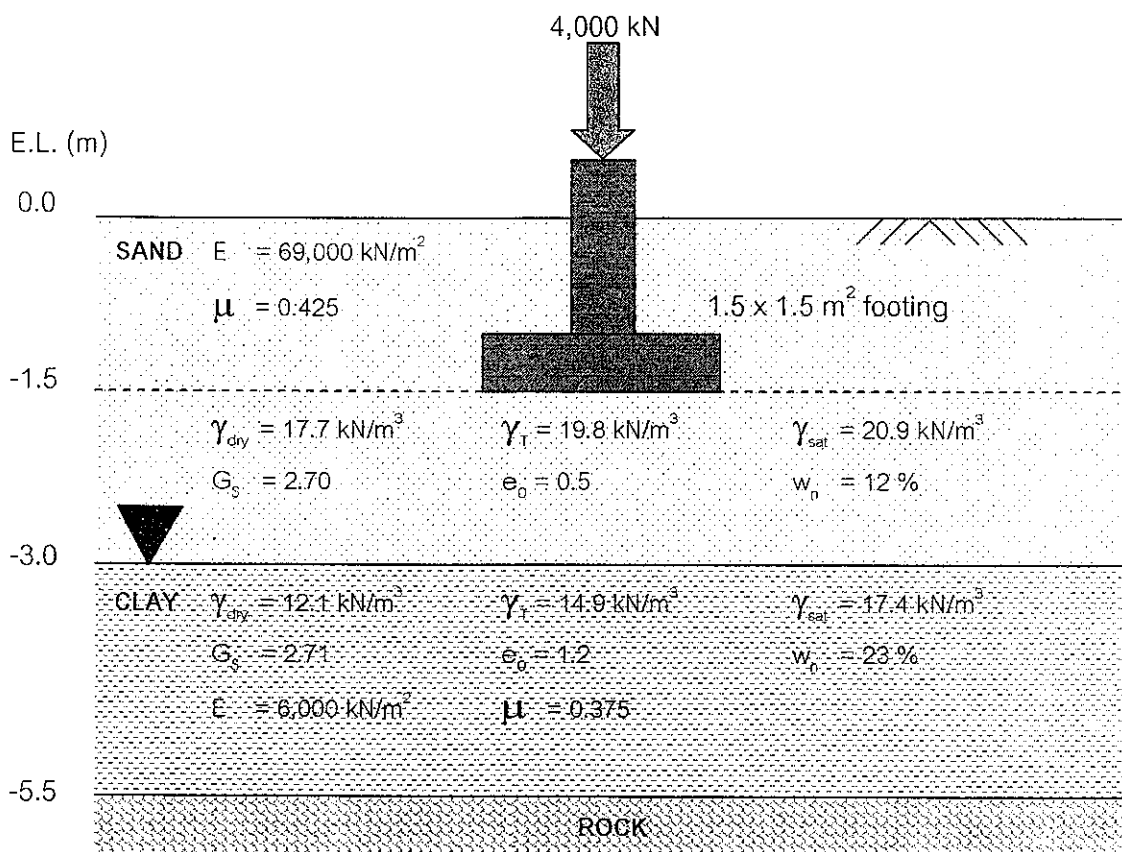
จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= q(I_4) \\ &= (4.44 \text{ T/m}^2)(0.037) \\ &= 0.17 \text{ T/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่า Δp_z ที่จุดล่างสุดของชั้น clay ได้ center line ของฐานรากเท่ากับ 0.17 T/m^2

7.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ในการทำงานจริง

1. โครงการการบ้านพิษณุโลกเมืองใหม่ ซึ่งเป็นโครงการบ้านจัดสรรในจังหวัดพิษณุโลก วิศวกรผู้ออกแบบ ได้ออกแบบฐานรากค้ำของบ้านเดี่ยวในโครงการเป็นฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งรับแรงได้ 4,000 kN จากการสำรวจชั้นดินบริเวณ โครงการพบว่า



รูปที่ 7.4.1 ฐานรากค้ำของบ้านเดี่ยวในโครงการบ้านพิษณุโลกเมืองใหม่

เพื่อออกแบบความสูงของชั้นล่างซึ่งถูกกำหนดโดย consolidation settlement (S_c) ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบกรณาคำนวณค่า Δp ที่ใต้ center ของฐานราก จุดล่างสุดของชั้นดินเหนียว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบต่อไป

วิธีทำ ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 4.0$ m จากใต้ center ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแรงจากฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ rectangularly loaded area

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น rectangularly loaded area ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.9

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 4.0$ m จากใต้ center ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ Δp_z ของ rectangularly loaded area คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.9 เพื่อหาค่า I_4

จาก	$\Delta p_z = q(I_4)$		
x	=	0	m
z	=	4.0	m
B	=	1.5	m
L	=	1.5	m

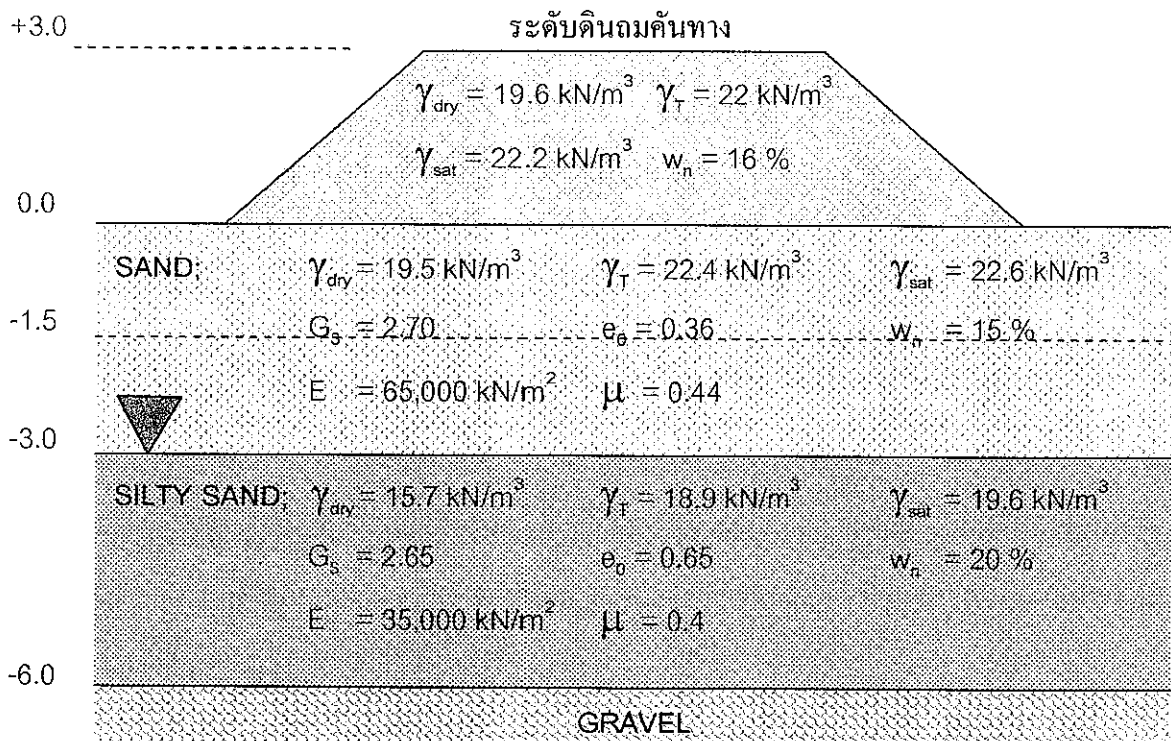
จากตารางเมื่อ $m_1 = \frac{L}{B} = 1$, $n_1 = \frac{z}{B/2} = 5.3$ จะได้ $I_4 = 0.066$
จะได้

$$\begin{aligned}\Delta p_z &= q(I_4) \\ &= (1778 \text{ kN/m}^2)(0.066) \\ &= 118 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

ดังนั้น ค่า Δp_z ที่จุดล่างสุดของชั้น clay ใต้ center ของฐานรากเท่ากับ 118 kN/m^2

2. โครงการขยายทางหลวงหมายเลข 12 จาก พิษณุโลก – หล่มสัก เพื่อขยายเส้นทางเป็นถนน 4 ช่องทางจราจร ระยะทาง 200 กิโลเมตร ซึ่งต้องถมดินสูงจากระดับดินเดิม 3 m ตลอดเส้นทาง ผลจากการสำรวจชั้นดินพบว่า

E.L. (m)



รูปที่ 7.4.2 ชั้นดินที่ได้จากการสำรวจ

เนื่องจากการขยายเส้นทางจราจร บางพื้นที่ถนนที่ขยายจะเข้าไปติดกับบ้านเรือนของประชาชน ประชาชนบริเวณนั้นจึงมีข้อสงสัยว่า การถมดินเพื่อขยายถนนครั้งนี้จะมีผลกระทบต่อฐานรากของบ้านเรือนของพวกเขาหรือไม่ ซึ่งจากการสำรวจของวิศวกรพบว่า ฐานรากของบ้านเรือนประชาชนที่มีความเสี่ยงมากที่สุด อยู่ที่ระดับความลึก 1.5 m จากระดับผิวดิน อยู่ห่างจาก center line ของถนน 15 m ในฐานะวิศวกรที่ปรึกษาโครงการ กรุณาตอบข้อสงสัยดังกล่าวของประชาชน

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 1.5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ -3 m, 21 m และ 27 m จาก center line ของดินถมคันทาง

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นการถมดินเป็นหน้าตัดดินถมคันทางแบบเดี่ยวยาวตลอดทั้งสนาม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็น 2 แบบ คือ linearly increasing load, และ strip load

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น linearly increasing load ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.4 และเพราะเป็น strip load คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.3

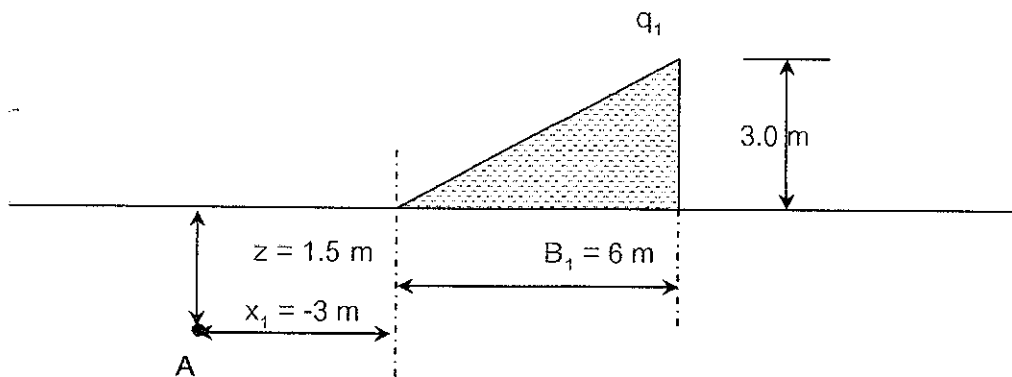
ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 1.5$ m จากผิวดิน ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ -3 m, 21 m และ 27 m จาก center line ของดินถมคันทาง

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

เนื่องจาก Δp_z เกิดจากรูปปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) 2 แบบ คือ linearly increasing load, และ strip load ดังนั้น

$$\Delta p_z = \Delta p_{z \text{ strip load}} + \Delta p_{z \text{ linearly increasing load 1}} + \Delta p_{z \text{ linearly increasing load 2}}$$

สำหรับ Δp_z ของ linearly increasing load 1 คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.4



รูปที่ 7.4.3 linearly increasing load

$$x_1 = -3 \text{ m}$$

$$z_1 = 1.5 \text{ m}$$

$$B_1 = 6 \text{ m}$$

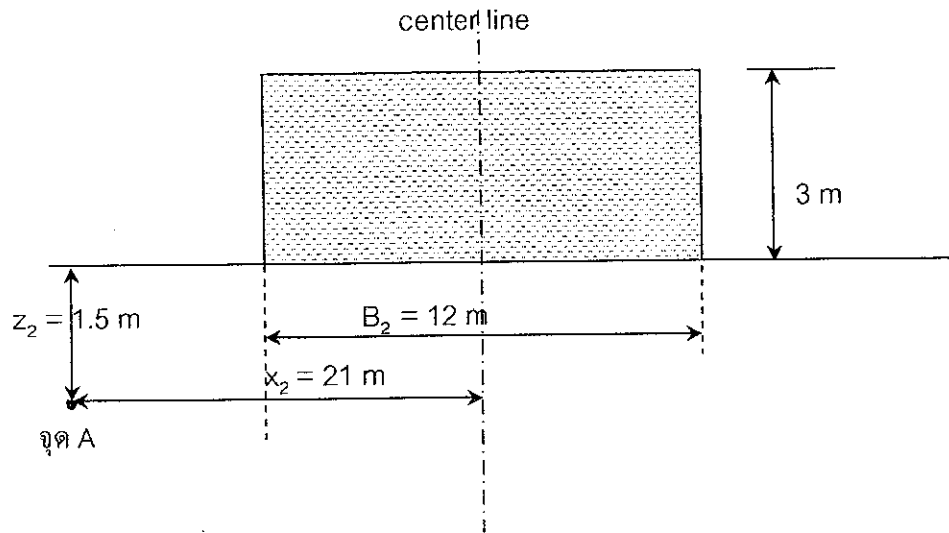
$$q_1 = (22 \text{ kN/m}^3) (3 \text{ m}) = 66 \text{ kN/m}^2$$

จากตารางเมื่อ $\frac{2z_1}{B_1} = 0.5$, $\frac{2x_1}{B_1} = -1$ จะได้ $\frac{\Delta p_{z1}}{q_1} = 0.0041$

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_{z1} &= q_1 (0.0041) \\ &= (66 \text{ kN/m}^2) (0.0041) \\ &= 0.3 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

สำหรับ Δp_z ของ strip load คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.3



รูปที่ 7.4.4 strip load

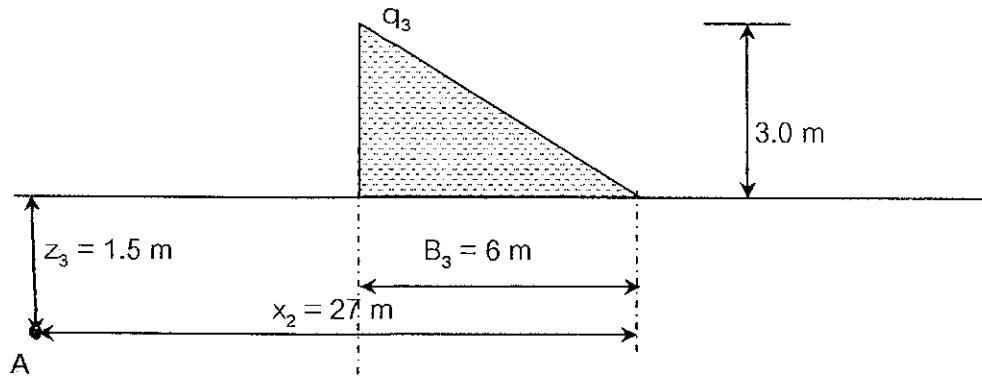
$$\begin{aligned} x_2 &= 21 \text{ m} \\ z_2 &= 1.5 \text{ m} \\ B_2 &= 12 \text{ m} \\ q_2 &= 66 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

จากตาราง เมื่อ $\frac{2z_2}{B_2} = 0.25$, $\frac{2x_2}{B_2} = 3.5$ จะได้ $\frac{\Delta p_{z2}}{q_2} = 0$

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta p_{z2} &= q_2 (0) \\ &= (66 \text{ kN/m}^2) (0) \\ &= 0 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

สำหรับ Δp_z ของ linearly increasing load 2 คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.4



รูปที่ 7.4.5 linearly increasing load

$$\begin{aligned}
 x_3 &= 27 \text{ m} \\
 z_3 &= 1.5 \text{ m} \\
 B_3 &= 6 \text{ m} \\
 q_3 &= (22 \text{ kN/m}^3) (3 \text{ m}) = 66 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

จากตารางเมื่อ $\frac{2z_3}{B_3} = 0.5$, $\frac{2x_3}{B_3} = 9$ จะได้ $\frac{\Delta p_{z3}}{q_3} = 0$

จะได้

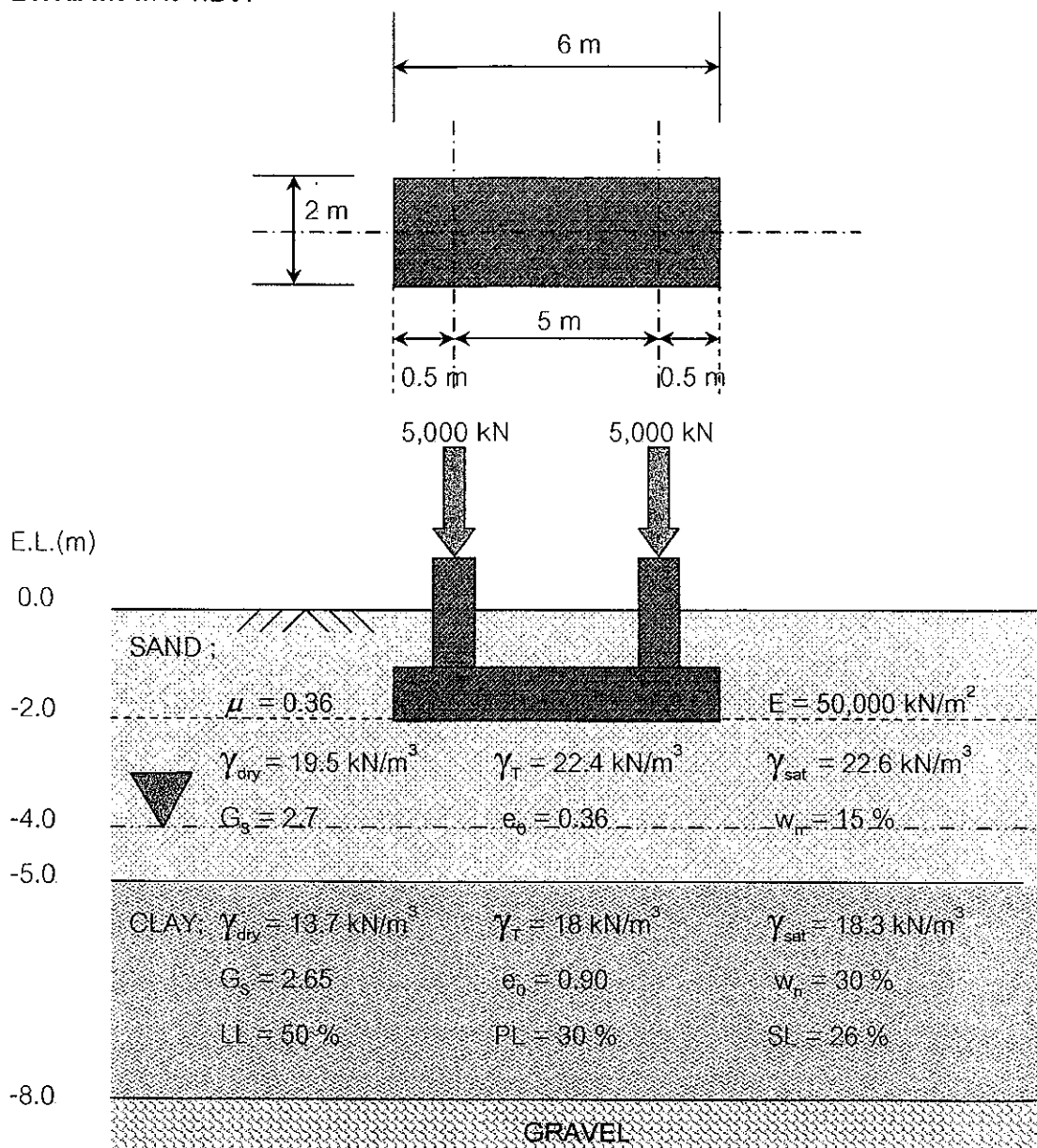
$$\begin{aligned}
 \Delta p_{z3} &= q_3 (0) \\
 &= (66 \text{ kN/m}^2) (0) \\
 &= 0 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned}
 \Delta p_z &= \Delta p_{z \text{ strip load}} + \Delta p_{z \text{ linearly increasing load 1}} + \Delta p_{z \text{ linearly increasing load 2}} \\
 &= 0.3 \text{ kN/m}^2 + 0 + 0 \\
 &= 0.3 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่า Δp_z ของฐานรากของบ้านเรือนประชาชนที่มีความเสี่ยงมากที่สุด อยู่ที่ระดับความลึก 1.5 m จากระดับผิวดิน อยู่ห่างจาก center line ของถนน 15 m จะเกิดแรงกระทำซึ่งเป็นผลมาจากดินถม ประมาณ 0.3 kN/m^2

3. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 3 ชั้นครึ่ง 20 ห้อง 3 เฟส วิศวกรได้ออกแบบฐานรากเป็นแบบ combined footing ขนาด $2 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ที่ระดับความลึก 2 m จากผิวดิน ผลจากการสำรวจชั้นดินบริเวณโครงการ พบว่า



รูปที่ 7.4.6 ฐานราก, ชั้นดินบริเวณ โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 3 ชั้นครึ่ง 20 ห้อง 3 เฟส

ในฐานะวิศวกรกรณาคำนวณค่า Δp_z ที่กึ่งกลางชั้น clay ใต้ center ของฐานรากเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณหา consolidation settlement (S_c) ของฐานรากตลอดอายุการใช้งาน 50 ปี

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหาค่า induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 4.0$ m จากใต้ center line ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center line ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแรงจากฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ rectangularly loaded area

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น rectangularly loaded area ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.9

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 2.0$ m จากใต้ center ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center line ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ Δp_z ของ rectangularly loaded area คำนวณโดยใช้ตารางที่ 7.1.9 เพื่อหาค่า I_4

จาก $\Delta p_z = q(I_4)$

$$x = 0 \quad \text{m}$$

$$z = 2.0 \quad \text{m}$$

$$B = 2.0 \quad \text{m}$$

$$L = 6.0 \quad \text{m}$$

$$q = \frac{10,000 \text{ kN}}{(2 \text{ m})(6 \text{ m})}$$

$$= 834 \text{ kN/m}^2$$

จากตารางเมื่อ $m_1 = \frac{L}{B} = 3$, $n_1 = \frac{z}{B/2} = 2$ จะได้ $I_4 = 0.525$

จะได้

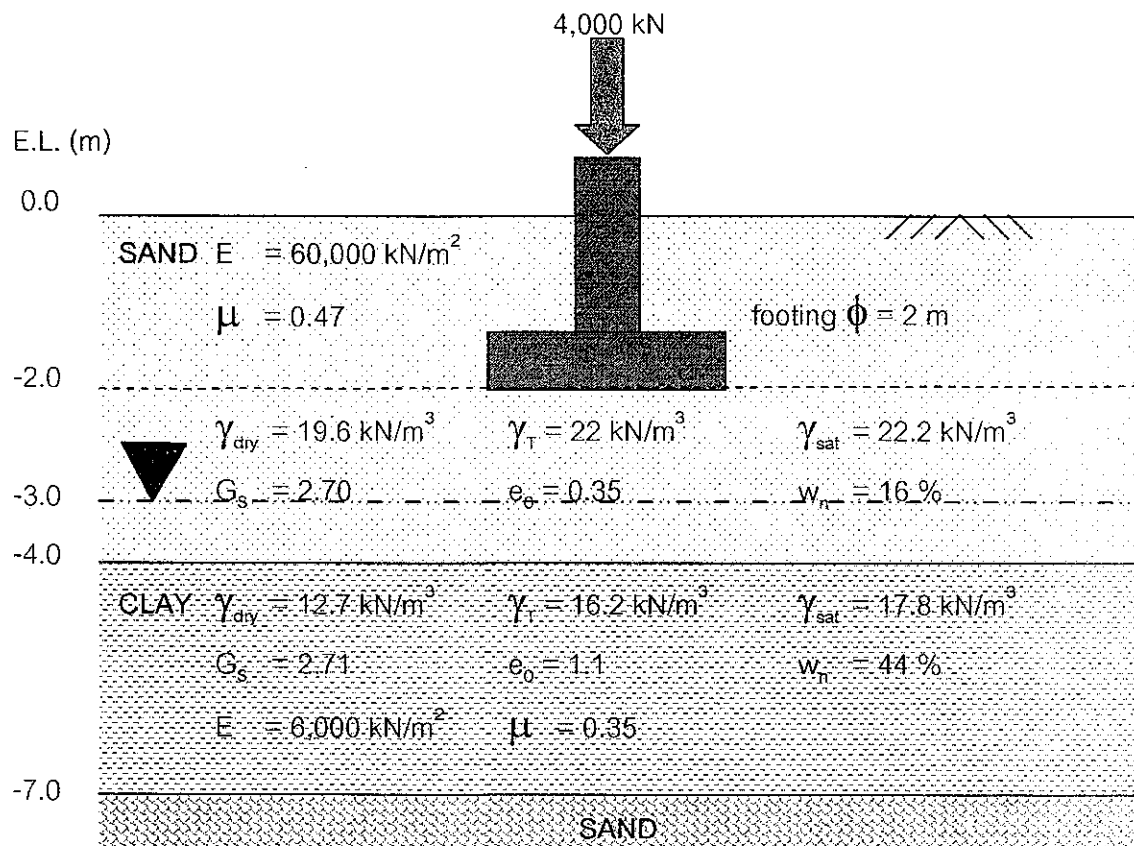
$$\Delta p_z = q(I_4)$$

$$= (834 \text{ kN/m}^2)(0.525)$$

$$= 438 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้น ค่า Δp_z ที่จุดกึ่งกลางของชั้น clay ได้ center ของฐานรากเท่ากับ 438 kN/m^2

4. โครงการก่อสร้างกลุ่มอาคารพลังงานแสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยนเรศวร ได้ออกแบบฐานราก
 ดันเป็นฐานรากวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 m ที่ระยะลึก 2 m ผลจากการสำรวจชั้นดิน บริเวณ
 โครงการก่อสร้างพบว่า



รูปที่ 7.4.7 ชั้นดินบริเวณ โครงการก่อสร้างกลุ่มอาคารพลังงานแสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยนเรศวร

ในฐานะวิศวกรผู้ออกแบบฐานราก กรุณาคำนวณค่า Δp_z ที่ center ของฐานราก ที่ระยะ
 กึ่งกลางของชั้น clay

วิธีทำ

ก่อนที่จะสามารถ plot the variation of vertical stress increase จะต้องคำนวณหา
 induced vertical stress (Δp_z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดยใช้ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- พิจารณาเลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load)
- พิจารณาใช้สมการ คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) ให้สอดคล้องกับรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) ที่เลือกไว้
- พิจารณาเพื่อเลือกกำหนดตำแหน่ง ที่สนใจจะคำนวณหา induced vertical stress (Δp_z)
- คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

สำหรับ variation of vertical stress increase ณ ระดับความลึก $z = 5$ m จากใต้ center ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 1 เพราะลักษณะของแรงกระทำภายนอก (applied external load) เป็นแรงจากฐานรากวงกลม ดังนั้น เลือกรูปร่างของแรงกระทำ (shape of loading) เป็นแบบ uniformly loaded circular area

ขั้นตอนหลักที่ 2 เพราะเป็น uniformly loaded circular area ดังนั้น คำนวณหา induced vertical stress (Δp_z) โดยหาค่า Δp_z

$$\Delta p_z = q \left\{ 1 - \frac{1}{\left[(R/z)^2 + 1 \right]^{3/2}} \right\}$$

หรือหาค่า Δp_z จากตารางที่ 7.1.5

ขั้นตอนหลักที่ 3 คำนวณหา Δp_z สำหรับตำแหน่งที่กำหนดให้คือ ณ ระดับความลึก $z = 5$ m จากใต้ center ของฐานราก ที่ระยะห่าง (x) เท่ากับ 0 m จาก center ของฐานราก

ขั้นตอนหลักที่ 4 คำนวณหาค่าของ Δp_z ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้

จาก

$$x = 0 \text{ m}$$

$$R = 2.0 \text{ m}$$

$$z = 5.0 \text{ m}$$

$$q = \frac{4,000 \text{ kN}}{(\pi/4)(2 \text{ m})^2}$$

$$= 1273 \text{ kN/m}^2$$

จากตารางเมื่อ $\frac{z}{R} = 5$ จะได้ $\frac{\Delta p_z}{q} = 0.0571$

$$\Delta p_z = q (0.0571)$$

$$= (1273 \text{ kN/m}^2)(0.0571)$$

$$= 73 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้น ค่า Δp_z ที่จุดกึ่งกลางของชั้น clay ใต้ center ของฐานรากเท่ากับ 73 kN/m^2