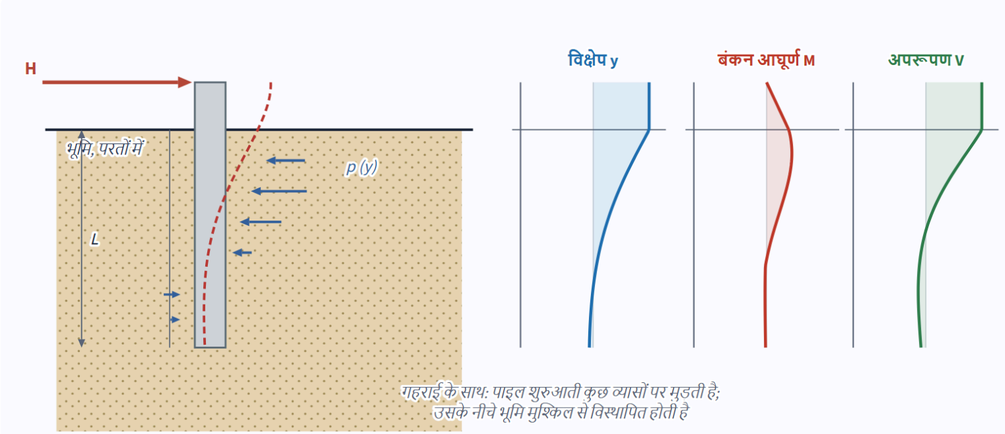
GeoTerva

भू-तकनीकी व्याख्यान स्लाइड · पाइल

पार्श्व भारित पाइल: p–y विधि

व्याख्यान: पार्श्व भार के अधीन पाइल का स्प्रिंगों पर बीम के रूप में हल, रेत और मृत्तिका के p–y वक्र, चक्रीय भार, अक्षीय भार और शीर्ष परिस्थितियाँ; प्रत्येक विषय पर हल किया गया उदाहरण।

- स्प्रिंगों पर बीम
- रेत और मृत्तिका के p–y वक्र
- चक्रीय भार
- शीर्ष परिस्थितियाँ
- हल किए गए उदाहरण



परिचय

इस व्याख्यान में हम क्या सीखेंगे?

- पार्श्व भारित पाइल को **स्प्रिंगों पर बीम** के रूप में निरूपित करना: समीकरण, चिह्न-परिपाटी, सिरे की शर्तें
- **प्रत्यास्थ हलों** (Matlock–Reese: रेत, n_h; Hetényi: मृत्तिका, k) की हाथ से गणना करना
- **रेत** के लिए API (Reese–Cox–Koop) और **मृत्तिका** के लिए Matlock p–y वक्रों को, स्थैतिक और चक्रीय, बिंदु-दर-बिंदु बनाना
- संख्यात्मक हल (परिमित अवयव, Newton) **क्या करता है** और परिणामों को कैसे पढ़ा जाए, यह जानना
- **अक्षीय भार** (P–δ), **शीर्ष स्थिति** और **मुक्त लंबाई** के प्रभाव की व्याख्या करना
- अनुमेय विस्थापन या आघूर्ण क्षमता के संगत **भार** ज्ञात करना

व्याख्यान प्रवाह

प्रत्येक विषय **तीन चरणों में** पढ़ाया जाता है:

1 · **सिद्धांत**: नियम क्या है, ऐसा क्यों है?

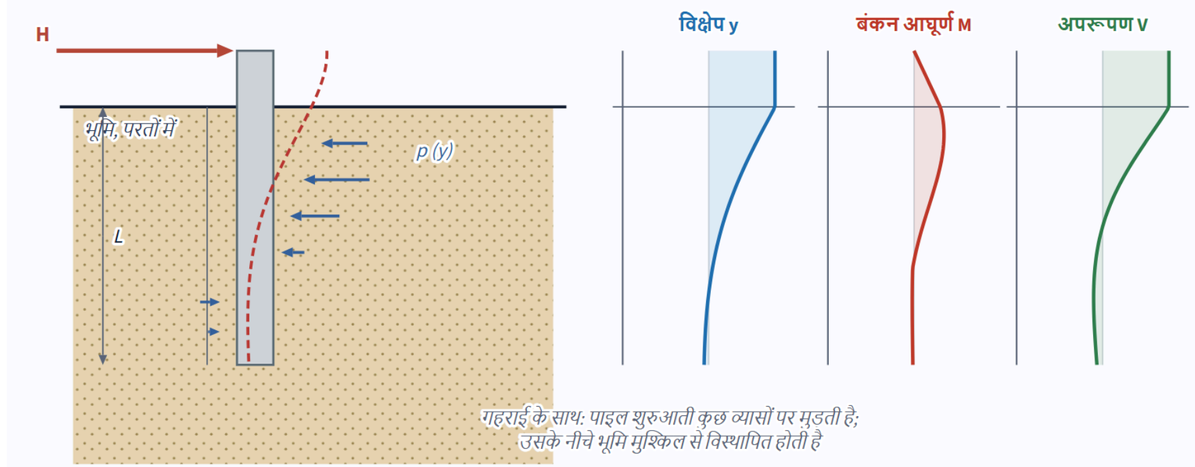
2 · **प्रश्न**: दिया गया है और ज्ञात करना है

3 · **हल**: चरण-दर-चरण, संख्याओं सहित

उदाहरण पाइल: 0.60 m व्यास की, 14 m लंबी कंक्रीट पाइल; रेत–मृत्तिका–रेत मृदा में, भूमि स्तर पर 120 kN पार्श्व भार। मॉड्यूल भी इसी मॉडल के साथ खुलता है।

भार मृदा तक केवल पार्श्व गति के माध्यम से पहुँचता है

सिद्धांत



पार्श्व भार वाली पाइल खड़ी हुई नींव की तरह विफल नहीं होती: भार मृदा में **केवल पाइल की पार्श्व गति से** स्थानांतरित होता है; मृदा प्रतिक्रिया गति के साथ बढ़ती है और मृदा के यील्ड करने पर बढ़ना बंद कर देती है। पाइल मृदा के पहले **कुछ व्यासों** में बीम की तरह झुकती है; अधिक गहराई पर मृदा लगभग नहीं हिलती।

चरम भार (Broms): छोटी पाइल में मृदा के और लंबी पाइल में काट के विफल होने का भार। यह क्षमता देता है, कार्य भार पर विस्थापन और आघूर्ण नहीं देता।

प्रत्यास्थ सबग्रेड प्रतिक्रिया गुणांक (Matlock–Reese, Davisson–Gill, Hetényi): मृदा प्रत्यास्थ स्प्रिंग के रूप में; संवृत हल।

p–y विधि (Matlock, Reese एवं अन्य): स्प्रिंग **अरैखिक** हैं; p, y के सापेक्ष दृढ़ रूप से आरंभ होता है, नरम पड़ता जाता है और मृदा के चरम प्रतिरोध पर समाप्त होता है। इसे संख्यात्मक रूप से हल किया जाता है; परतदार मृदा, कार्य भार से विफलता के निकट के भार तक।

समीकरण, चिह्न और सीमा शर्तें

सिद्धांत

पाइल एक बीम है, उसके अनुदिश मृदा स्प्रिंगों की एक पंक्ति है; प्रत्येक स्प्रिंग अपनी गहराई पर और अन्य से स्वतंत्र है (Winkler)। z सतह से नीचे की ओर है, y भार की दिशा में विस्थापन है:

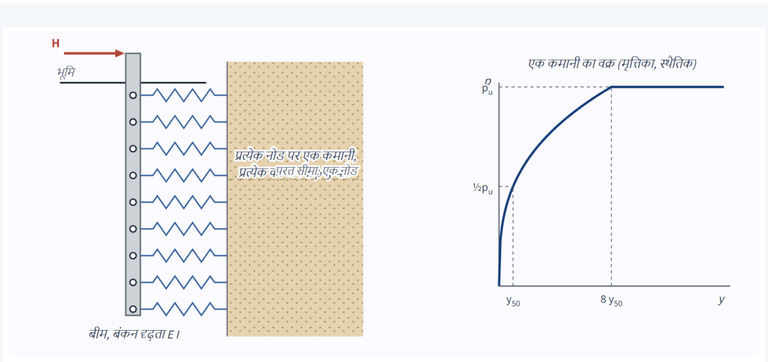
$$EI\,\frac{d^4y}{dz^4} + P\,\frac{d^2y}{dz^2} + p(y,z) = 0$$

$$\theta = \frac{dy}{dz} \qquad M = EI\frac{d^2y}{dz^2} \qquad V = EI\frac{d^3y}{dz^3} + P\theta \qquad \frac{dV}{dz} = -p$$

p धनात्मक होता है जब वह विस्थापन का प्रतिरोध करता है। स्प्रिंग कठोरता k के लिए p = k y; **k = k_h D** (kN/m², प्रति इकाई लंबाई और प्रति इकाई विस्थापन बल)।

मुक्त सिरा: M = 0, V = 0। **शीर्ष**: यदि मुक्त हो तो H और M_g दिए जाते हैं; यदि घूर्णन के विरुद्ध अवरुद्ध हो तो ढाल शून्य होती है और अवरोधक आघूर्ण हल का भाग होता है।

समीकरण को केवल मृदा के नियम p(y, z) की आवश्यकता है: प्रत्यास्थ स्थिति में स्थिर k·y, अरैखिक स्थिति में p–y वक्र।



रेत: $k = n_h z$

सिद्धांत

रेत में सबग्रेड प्रतिक्रिया गुणांक गहराई के समानुपाती लिया जाता है: **$k = n_h z$**। पाइल की एक ही **अभिलाक्षणिक लंबाई** होती है; भूमि सतह पर भार Q और आघूर्ण M_g के लिए विस्थापन और आघूर्ण:

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5}$$

$$y = A_y \frac{QT^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI} \qquad M = A_m QT + B_m M_g$$

A और B गुणांक Z = z/T पर निर्भर करते हैं (बगल में)। पाइल **लंबी** मानी जाती है: L/T बड़ा है, सिरा गति नहीं करता।

मॉड्यूल इन गुणांकों को अपने गणना इंजन से पुनः प्राप्त करता है: A_y = 2.4292।

गुणांक (लंबा पाइल)

Z	A_y	A_θ	A_m	B_y	B_θ	B_m
0	2,429	−1,619	0.000	1,619	−1,747	1,000
0.5	1,640	−1,500	0.458	0.871	−1,250	0.974
1	0.961	−1,194	0.725	0.364	−0.789	0.851
1.4	0.543	−0.891	0.770	0.112	−0.480	0.686
2	0.142	−0.462	0.627	−0.070	−0.153	0.404
3	−0.075	−0.039	0.224	−0.089	0.057	0.059

A_m सर्वाधिक Z ≈ 1.4 पर (0.77)।

प्रश्न

उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**HP 250 × 85, L = 25 m, E I = 25 461 kN·m²**
मृदा	**रेत, n_h = 12 000 kN/m³**
भार	**भूमि की सतह पर Q; M_g = 0, मुक्त शीर्ष**
गुणांक	$A_y = 2.4292$ **(शीर्ष),** $A_m = 0.772$ **(अधिकतम)**

ज्ञात करना है

ऐसा भार Q और **अधिकतम आघूर्ण** ज्ञात कीजिए कि पाइल शीर्ष का विस्थापन **8 mm** हो। क्या पाइल लंबी है?

हल

हल

1 अभिलाक्षणिक लंबाई और पाइल की लंबाई

$$T = \left(\frac{25\,461}{12\,000}\right)^{1/5} = \mathbf{1.1624}\ \text{m} \qquad \frac{L}{T} = \frac{25}{1.1624} = 21.5 \Rightarrow \text{लंबी पाइल}$$

2 भार: $y = A_y\, Q\, T^3 / E\, I \Rightarrow Q = y\, E\, I / (A_y\, T^3)$

$$Q = \frac{0.008(25\,461)}{2.4292\,(1.1624)^3} = \mathbf{53.4}\ \text{kN}$$

3 अधिकतम आघूर्ण: $M = A_m\, T\, Q$

$$M_{max} = 0.772\,(1.1624)(53.4) = \mathbf{47.9}\ \text{kN·m}$$

इस भार पर मॉड्यूल शीर्ष विस्थापन **8.00 mm** और अधिकतम आघूर्ण **47.9 kN·m** देता है: हाथ से की गई गणना के समान।

हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

मृत्तिका: k स्थिर (Hetényi)

सिद्धांत

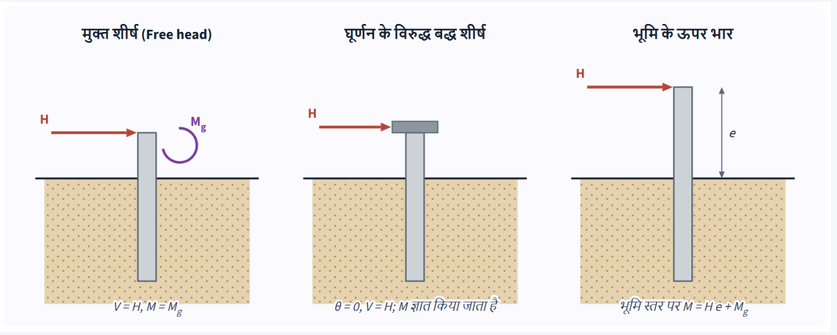
मृत्तिका में सबग्रेड प्रतिक्रिया गुणांक गहराई के साथ **स्थिर** लिया जाता है। k पाइल की प्रति इकाई लंबाई मृदा कठोरता है; **β = (k / 4EI)$^{1/4}$**। लंबी पाइल के लिए भूमि सतह पर भार H के अंतर्गत Hetényi के संवृत-रूप हल:

मुक्त सिरा: $y_0 = \dfrac{2H\beta}{k}$ $\qquad M_{max} = 0.3224\,\dfrac{H}{\beta}$ $\quad (z = \frac{\pi}{4\beta})$

बद्ध सिरा: $y_0 = \dfrac{H}{4EI\beta^3}$ $\qquad M_{head} = -\dfrac{H}{2\beta}$

घूर्णन के विरुद्ध शीर्ष पर अवरुद्ध पाइल मुक्त-शीर्ष पाइल की तुलना में **आधा** विस्थापित होता है; परंतु शीर्ष पर अवरोधक आघूर्ण मुक्त पाइल के अधिकतम आघूर्ण से **अधिक** होता है।

वास्तविक कैप व्यवहार इन दोनों चरम स्थितियों के बीच होता है; वह इनके कितना निकट है, यह कैप और अधिसंरचना की दृढ़ता पर निर्भर करता है।



प्रश्न

उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**D = 0.60 m, E I = 190,852 kN·m² (उदाहरण पाइल)**
मृदा	**मृत्तिका, k_h = 15,000 kN/m³ ⇒ k = k_h D = 9,000 kN/m²**
भार	**H = 120 kN, भूमि सतह पर**
पाइल	**लंबा**

ज्ञात करना है

मुक्त और **बद्ध** शीर्ष के लिए शीर्ष विस्थापन और आघूर्ण Hetényi के संवृत-रूप हलों से ज्ञात कीजिए।

हल (1/2)

हल

1 β

$$\beta = \left(\frac{k}{4EI}\right)^{1/4} = \left(\frac{9{,}000}{4(190{,}852)}\right)^{1/4} = \mathbf{0.3295}\ \text{m}^{-1}$$

2 मुक्त शीर्ष

$$y_0 = \frac{2H\beta}{k} = \frac{2(120)(0.3295)}{9{,}000} = \mathbf{8.79}\ \text{mm}$$

$$M_{max} = 0.3224\frac{H}{\beta} = 0.3224\frac{120}{0.3295} = \mathbf{117.4}\ \text{kN·m} \quad (z = \tfrac{\pi}{4\beta} = 2.38\ \text{m})$$

हल (2/2)

हल

3 बद्ध सिरा

$$y_0 = \frac{H}{4EI\beta^3} = \frac{120}{4(190{,}852)(0.3295)^3} = \mathbf{4.39}\ \text{mm}$$

$$M_{head} = -\frac{H}{2\beta} = -\frac{120}{2(0.3295)} = -\mathbf{182.1}\ \text{kN·m}$$

शीर्ष को आबद्ध करने से विस्थापन **आधा** रह जाता है (8.79 → 4.39 mm), किंतु शीर्ष आघूर्ण (182.1 kN·m) मुक्त पाइल के अधिकतम आघूर्ण (117.4 kN·m) का **1.55 गुना** है। मॉड्यूल का प्रत्यास्थ विकल्प यही संख्याएँ देता है: मुक्त 8.79 mm और 117.4 kN·m, आबद्ध 4.39 mm और 182.1 kN·m।

API RP 2A: Reese, Cox और Koop

सिद्धांत

सतह के निकट की मृदा पाइल के सामने एक **वेज** के रूप में धकेली जाती है; अधिक गहराई पर मृदा पाइल के **चारों ओर क्षैतिज रूप से बहती है**। z गहराई पर चरम प्रतिरोध (σ′: उस गहराई पर प्रभावी प्रतिबल) इन दोनों में से छोटा होता है:

$$p_{us} = (C_1 z + C_2 D)\,\sigma' \qquad p_{ud} = C_3 D\,\sigma'$$

$$p = A\,p_u \tanh\left(\frac{k\,z\,y}{A\,p_u}\right) \qquad A = \max\left(0.9;\ 3 - 0.8\tfrac{z}{D}\right)\ \text{(स्थैतिक)},\ \ A = 0.9\ \text{(चक्रीय)}$$

C₁, C₂, C₃ केवल **φ′** पर निर्भर करते हैं; k, आरंभिक मापांक, φ′ और जल के अनुसार लिया जाता है (बगल में)।

छोटे y पर वक्र **k z y** सरल रेखा है (प्रत्यास्थ हल का n_h = k मामला); बड़े y पर यह **A p_u** पर समाप्त होता है। A सतह पर 3.0 है और 2.6D गहराई पर 0.9: सतह के निकट स्थैतिक प्रतिरोध अधिक है, चक्रीय भारण में यह अधिकता नहीं रहती।

φ′ के साथ बदलने वाले गुणांक

φ′	C_1	C_2	C_3	k (जल के ऊपर)	k (जल के नीचे)
28°	1.60	2.41	22.5	5.4	5.4
30°	1.91	2.67	28.7	10.5	7.9
32°	2.28	2.95	36.8	20.7	11.9
34°	2.72	3.25	47.3	32.7	17.6
36°	3.24	3.59	61.2	46.3	24.8
38°	3.87	3.97	79.6	61.7	33.6
40°	4.62	4.38	104.1	78.9	44.0

k: MN/m³. 32° के लिए C₁ = 2.28; C₂ = 2.95; C₃ = 36.8।

प्रश्न

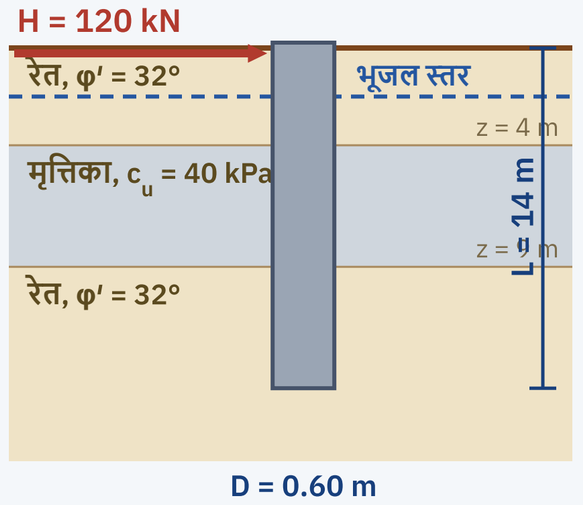
उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
गहराई	**z = 2.0 m (रेत 1, भूजल स्तर); k = 20.7 MN/m³ (जल स्तर के ऊपर)**
गुणांक	$K_0 = 0.4,\ K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi'/2)$

ज्ञात करना है

σ′, C_1, C_2, C_3, $\mathbf{p_u}$, A और y = 5 mm तथा 10 mm के लिए **p** के मान ज्ञात कीजिए।



हल (1/2)

हल

1 प्रभावी प्रतिबल और कोण (भूजल स्तर = 2 m: सतह से z = 2 तक नम)

$$\sigma' = 18(2) = \mathbf{36.0}\ \text{kPa} \qquad \alpha = \frac{\varphi'}{2} = 16^\circ,\ \beta = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} = 61^\circ,\ K_a = \tan^2 29^\circ = 0.3073$$

2 गुणांक ($\varphi' = 32^\circ$)

$$C_1 = \frac{K_0 \tan\varphi' \sin\beta}{\tan(\beta-\varphi')\cos\alpha} + \frac{\tan^2\beta\tan\alpha}{\tan(\beta-\varphi')} + K_0\tan\beta(\tan\varphi'\sin\beta - \tan\alpha) = \mathbf{2.281}$$

$$C_2 = \frac{\tan\beta}{\tan(\beta-\varphi')} - K_a = \mathbf{2.947}$$

$$C_3 = K_a(\tan^8\beta - 1) + K_0\tan\varphi'\tan^4\beta = \mathbf{36.81}$$

हल (2/2)

हल

3 चरम प्रतिरोध: वेज और परिधि के चारों ओर प्रवाह में से जो छोटा हो

$$p_{us} = (2.281(2) + 2.947(0.6))(36.0) = 227.9 \text{ kN/m}$$

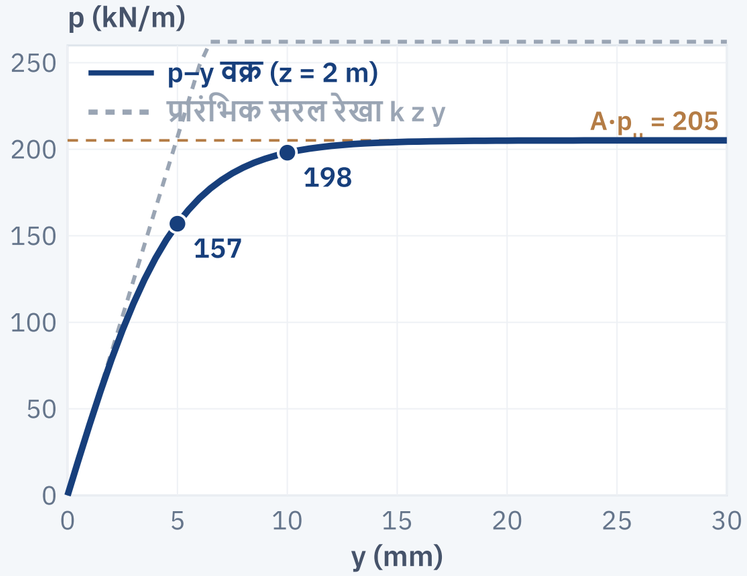
$$p_{ud} = 36.81(0.6)(36.0) = 795 \text{ kN/m} \Rightarrow p_u = \mathbf{227.9} \text{ kN/m}$$

4 A और वक्र: A = max(0.9; 3 − 0.8 z/D) = max(0.9; 0.33) = 0.9; k z y / (A p_u)

$$y = 5 \text{ mm}: \quad p = 0.9(227.9)\tanh\frac{20\,700(2)(0.005)}{0.9(227.9)}$$

$$= \mathbf{157.0} \text{ kN/m}$$

$$y = 10 \text{ mm}: \quad p = \mathbf{198.0} \text{ kN/m}$$



वक्र A, p_u = 205 kN/m की ओर अग्रसर होता है; 10 mm पर यह उसके 97% तक पहुँच जाता है। इस गहराई पर स्थैतिक और चक्रीय वक्र **एक समान** हैं (दोनों में A = 0.9)।

हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

प्रश्न

उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
गहराई	**z = 0.6 m (1D), σ′ = 18(0.6) = 10.8 kPa; k = 20.7 MN/m³**
रेत 1	**C_1 = 2.281, C_2 = 2.947, C_3 = 36.81 (उदाहरण 3)**

ज्ञात करना है

y = 10 mm के लिए स्थैतिक और चक्रीय **p–y** मान ज्ञात कीजिए।

हल

हल

1 चरम प्रतिरोध और A

$$p_{us} = (2.281(0.6) + 2.947(0.6))(10.8) = 33.9 \text{ kN/m}$$

$$p_{ud} = 36.81(0.6)(10.8) = 238.6 \text{ kN/m} \Rightarrow p_u = \mathbf{33.9} \text{ kN/m}$$

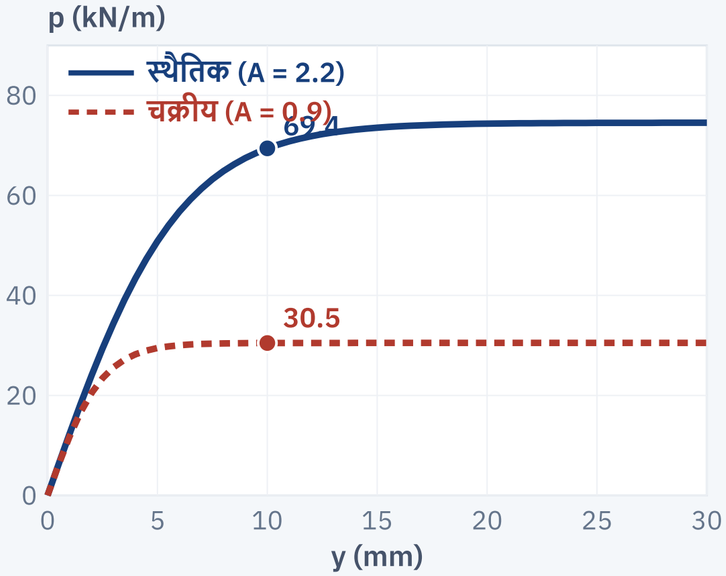
$$A_{static} = \max(0.9;\ 3 - 0.8(1)) = 2.2 \qquad A_{cyclic} = 0.9$$

2 y = 10 mm: k z y = 20 700(0.6)(0.010) = 124.2

$$p_{static} = 2.2(33.9)\tanh\frac{124.2}{2.2(33.9)} = \mathbf{69.4} \text{ kN/m}$$

$$p_{cyclic} = 0.9(33.9)\tanh\frac{124.2}{0.9(33.9)} = \mathbf{30.5} \text{ kN/m}$$

सतह के निकट रेत में चक्रीय भार प्रतिरोध को **56%** घटा देता है (69.4 → 30.5 kN/m): यह A गुणक खो देता है। इसीलिए चक्रीय भार में शीर्ष विस्थापन बढ़ जाता है।



हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

Matlock: मुलायम मृत्तिका, स्थैतिक और चक्रीय

सिद्धांत

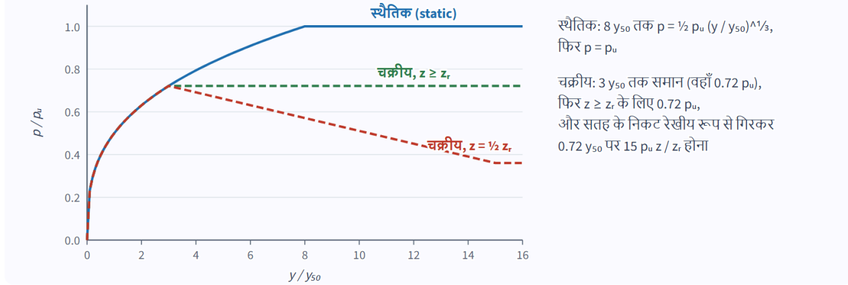
मृत्तिका में मॉड्यूल API RP 2A द्वारा दिए गए रूप में **Matlock** (1970) का मृदु मृत्तिका वक्र लेता है। चरम प्रतिरोध फिर भी निकट-सतह (वेज) और गहरे (प्रवाह) मानों में से छोटा होता है:

$$p_u = \min\left[\left(3 + \frac{\sigma'}{c_u} + J\frac{z}{D}\right) c_u D;\ 9 c_u D\right]$$

$$p = \tfrac{1}{2} p_u \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{1/3} \quad (y \le 8y_{50}) \qquad p = p_u \ (y > 8y_{50}) \qquad y_{50} = 2.5\,\varepsilon_{50} D$$

ε₅₀ और J, c_u के अनुसार: 48 kPa से नीचे मृदु (0.020; 0.5), 48–96 मध्यम (0.010; 0.25), 96 से ऊपर कठोर (0.005; 0.25)।

चक्रीय: $3y_{50}$ के बाद वक्र 0.72 p_u पर रहता है ($z \ge z_R$); उथली गहराई पर $15y_{50}$ पर 0.72 p_u z/z_R तक **रैखिक रूप से घटता है**। $z_R = \max[6D / ((\sigma'/z)(D/c_u) + J); 2.5D]$।



स्थैतिक: 8 y_{50} तक $p = ½\ p_u\ (y / y_{50})^{1/3}$, फिर $p = p_u$

चक्रीय: 3 y_{50} तक समान (वहाँ 0.72 p_u), फिर $z \ge z_r$ के लिए 0.72 p_u, और सतह के निकट रेखीय रूप से गिरकर 0.72 y_{50} पर 15 $p_u\ z / z_r$ होना

प्रश्न

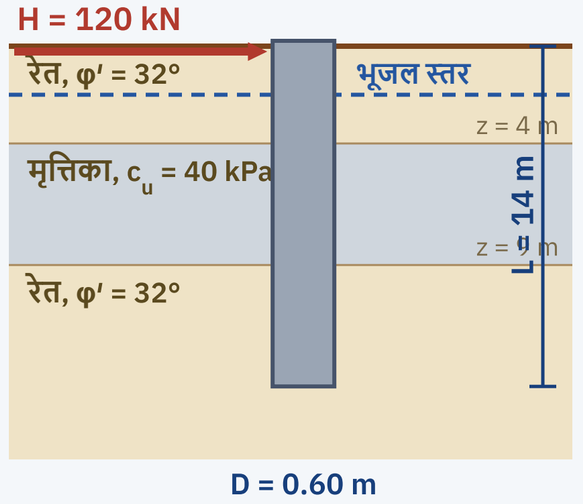
उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
गहराई	**z = 6.5 m (मृत्तिका, 4–9 m); ε_{50} = 0.020, J = 0.5**
परत	**c_u = 40 kPa**

ज्ञात करना है

y = 15 mm और 150 mm के लिए σ′, **p_u**, y_{50} और **स्थैतिक** p–y मान ज्ञात कीजिए; **चक्रीय** वक्र का z_R और प्लेटो मान ज्ञात कीजिए।



हल (1/2)

हल

1 σ′: रेत 0–2 m नम (γ = 18), रेत 2–4 m और मृत्तिका 4–6.5 m निमज्जित (γ_{sat} = 19)

$$\sigma' = 18(2) + (19 - 9.81)(2) + (19 - 9.81)(2.5) = \mathbf{77.4}\ \text{kPa}$$

2 चरम प्रतिरोध और y_{50}

$$p_u = \min\left[\left(3 + \frac{77.4}{40} + 0.5\frac{6.5}{0.6}\right)(40)(0.6);\ 9(40)(0.6)\right]$$

$$= \min[248.4;\ 216.0] = \mathbf{216.0}\ \text{kN/m}$$

$$y_{50} = 2.5(0.020)(0.6) = \mathbf{30.0}\ \text{mm}$$

हल (2/2)

हल

3 स्थैतिक वक्र: $p = ½\ p_u\ (y/y_{50})^{1/3}$

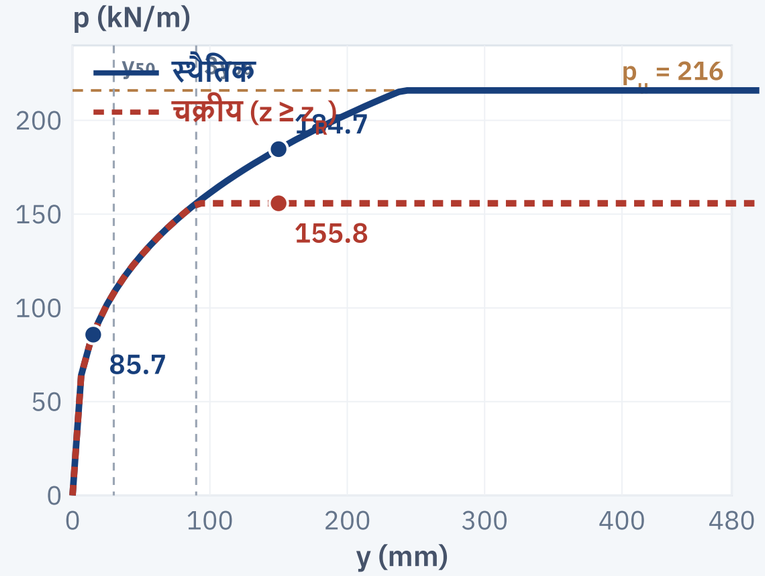
$$y = 15\ \text{mm}\ (0.5y_{50}):\ \ p = 0.5(216.0)(0.5)^{1/3} = \mathbf{85.7}\ \text{kN/m}$$

$$y = 150\ \text{mm}\ (5y_{50}):\ \ p = 0.5(216.0)(5)^{1/3} = \mathbf{184.7}\ \text{kN/m}$$

4 चक्रीय वक्र: $z_R = \max[6(0.6)/((\sigma'/z)(D/c_u) + J);\ 2.5D] = \max[5.31;\ 1.5] = 5.31$ m; $z = 6.5 > z_R$

$$p_{perimeter}(y \geq 3y_{50}) = 0.72\,p_u = 0.7211(216.0) = \mathbf{155.8}\ \text{kN/m}$$

y = 150 mm पर स्थैतिक प्रतिरोध 184.7, चक्रीय 155.8 kN/m: चक्रीय भार इस मृत्तिका में प्रतिरोध को **16%** घटाता है; $3y_{50}$ तक (90 mm) दोनों वक्र समान हैं।



हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

प्रत्येक वक्र अपनी गहराई की मृदा के साथ

सिद्धांत

σ′ ऊपर की परतों के इकाई भारों का योग है (जल स्तर के ऊपर γ, नीचे $\gamma_{sat} - \gamma_w$); यह परत का **औसत नहीं है**, परत के भीतर गहराई के साथ बढ़ता है।

गहराई z पर स्थित परत से φ′ और k (रेत) या c_u, ε_{50} और J (मृत्तिका) मिलते हैं। रेत का प्रारंभिक मापांक k परत की स्थिति के जल के सापेक्ष लिया जाता है; जल से कटने वाली परत में यह परत की मध्य-गहराई के अनुसार भरा जाता है और हाथ से बदला जा सकता है।

तत्व **किसी परत सीमा को पार नहीं करते**: प्रत्येक सीमा पर एक नोड होता है; मृदा की कठोरता किसी तत्व के भीतर नहीं, तत्वों के बीच अचानक बदलती है।

गणना पृष्ठ प्रत्येक परत के लिए वक्र की संख्याएँ परत के मध्य में चरण-दर-चरण देता है: σ′, गुणांक, p_u, A या y_{50} — हाथ से पुनः उत्पन्न की जा सकती हैं (इस प्रस्तुति के उदाहरण 3 और 5 की तरह)।

परतें पाइल के सिरे तक फैली होनी चाहिए; सिरे के नीचे की मृदा परिभाषित नहीं है और सिरा मुक्त है। कठोर रेत के ऊपर कोमल मृत्तिका आरेखों में सीमा पर एक **मोड़** के रूप में दिखाई देती है।

परिमित तत्व और Newton

सिद्धांत

समीकरण परिमित अवयवों से हल किया जाता है: पाइल को **घन बीम अवयवों** में विभाजित किया जाता है, प्रत्येक नोड पर y और ढलान θ। मृदा प्रतिक्रिया प्रत्येक अवयव में **चार Gauss बिंदुओं पर** वक्र से ली जाती है और समाकलित की जाती है। K u + f(u) = F अरैखिक समीकरण Newton विधि से हल किया जाता है:

$$(K + K_s(u_i))\,\Delta u = F - K u_i - f(u_i) \qquad K_s = \int N^T \frac{dp}{dy} N \, dz$$

dp/dy सेकैंट कठोरता के **बीसवें हिस्से** से नीचे नहीं जाता: वक्र के समतल या गिरते हिस्सों में भी मैट्रिक्स धनात्मक रहता है। चरण घटाने वाली रेखा-खोज है और असफल होने पर अवमंदित सेकैंट चरण है।

तत्व की लंबाई D/6 (3–15 cm); परिणाम दिखाए गए चरणों तक जाल पर **निर्भर नहीं करता** (तत्व 0.4 → 0.025 m: शीर्ष विस्थापन 6.228 → 6.228 mm)।

भार मृदा की वहन क्षमता से अधिक हो तो **संतुलन नहीं होता**; मॉड्यूल यह बता देता है और कोई संख्या नहीं देता। यदि मृदा भूमि सतह के नीचे **पाँच पाइल चौड़ाई** से अधिक विस्थापित हो जाए तब भी हल स्वीकार नहीं किया जाता।

चक्रीय मृत्तिका वक्र या अक्षीय भार पर अनुक्रिया एकल बढ़ता हुआ वक्र नहीं है; वह **चरम भार** तक चढ़ता है। मॉड्यूल भार तक शून्य से चरणों में पहुँचता है।

प्रत्येक अध्ययन में दो जाँच लिखी जाती हैं: Σ p Δz = H और सिरे पर आघूर्ण = 0 (स्थैतिकी)।

P–δ प्रभाव और बकलिंग

सिद्धांत

अक्षीय भार P पाइल की **विक्षेपित आकृति** के अनुदिश कार्य करता है: यह समीकरण में (P d²y/dz² पद) और प्रत्येक अवयव की ज्यामितीय दृढ़ता में सम्मिलित होता है; यह संपीडन के अंतर्गत बीम की पार्श्व दृढ़ता को घटाता है तथा विस्थापन और आघूर्ण को बढ़ाता है। मॉड्यूल P को पूरी लंबाई में स्थिर और शीर्ष तथा सिरे पर समान लेता है (वास्तव में शाफ्ट का पार्श्व घर्षण भार को मृदा में स्थानांतरित करता है; इसे स्थिर लेना सुरक्षित पक्ष की ओर है)।

$$P_{cr} = \sqrt{k\,EI} \qquad \text{(मुक्त सिरा, } k \text{ स्थिरांक, लंबा पाइल)}$$

यह अनंत बीम के 2√(kEI) मान का **आधा** है: मुक्त सिरा घूम सकता है। बद्ध शीर्ष अधिक भार पर बकल होता है।

जैसे-जैसे P बकलिंग भार के निकट पहुँचता है, भार–विस्थापन असीमित रूप से बढ़ता है; मॉड्यूल **“अक्षीय भार बकलिंग भार से अधिक है”** दर्शाता है।

अक्षीय भार और आघूर्ण के संयुक्त प्रभाव में पाइल काट की सामर्थ्य संरचनात्मक डिज़ाइन की जाँच है।

उदाहरण पाइल

E I = 190,852 kN·m² और प्रत्यास्थ मृत्तिका में k = 9,000 kN/m² के लिए:

$$P_{cr} = \sqrt{9{,}000\,(190{,}852)} = 41{,}445 \text{ kN}$$

प्रश्न

उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
भार	**H = 120 kN; अक्षीय भार P = 800 kN (स्थिर)**
बकलिंग	**k = k_h D = 9,000 kN/m² (प्रत्यास्थ मृत्तिका), मुक्त शीर्ष**
मॉड्यूल	**P = 0: शीर्ष 6.23 mm, M_{max} 151.8 kN·m**

ज्ञात करना है

क्या P = 800 kN बकलन भार के **निकट** है? P–δ प्रभाव कितना है?

हल

हल

1 बकलिंग भार (मुक्त शीर्ष, k स्थिरांक)

$$P_{cr} = \sqrt{kEI} = \sqrt{9{,}000(190{,}852)} = \mathbf{41{,}445}\ \text{kN} \qquad \frac{P}{P_{cr}} = \frac{800}{41{,}445} = \mathbf{0.019}$$

2 मॉड्यूल में P = 800 kN के साथ (P–δ सहित)

$$y_{head}:\ 6.23 \rightarrow 6.32\ \text{mm}\ \ (+2\%) \qquad M_{max}:\ 151.8 \rightarrow 154.5\ \text{kN·m}\ \ (+2\%)$$

800 kN, बकलन भार का केवल **2%** है: अक्षीय भार पाइल को बकलन के निकट नहीं ला रहा; P–δ प्रभाव विस्थापन को 2% और आघूर्ण को 2% बढ़ाता है। इस पाइल में पार्श्व विश्लेषण में अक्षीय भार गौण है, परंतु उपेक्षणीय नहीं।

हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

मुक्त, बद्ध और मृदा पर अधिभार

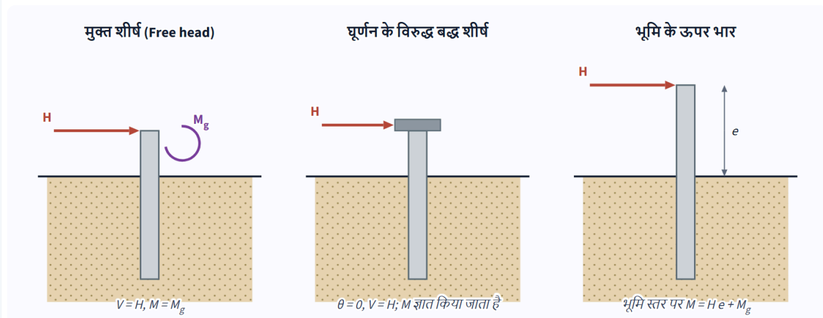
सिद्धांत

मुक्त शीर्ष: भार बिंदु पर V = H और M = M_g।

बद्ध शीर्ष: ढाल (झुकाव) शून्य होती है, शीर्ष पार्श्व दिशा में गति करता है। लंबी, एकसमान, प्रत्यास्थ मृदा में यह मुक्त शीर्ष की तुलना में **आधा** विस्थापित होता है; धारक आघूर्ण M = −H/(2β) मुक्त पाइल के अधिकतम आघूर्ण से अधिक होता है। वास्तविक पाइल कैप इन दोनों स्थितियों के बीच होता है।

मुक्त लंबाई e: भूमि के ऊपर की पाइल कैंटिलीवर की भाँति बंकित होती है। अपरूपण बल भूमि तक H है और आघूर्ण भूमि सतह पर **$M(0) = M_g + H\,e$** तक पहुँचता है; वहाँ मृदा प्रभावी हो जाती है।

शीर्ष विस्थापन = भूमि सतह पर विस्थापन + सतह पर घूर्णन × e + मुक्त लंबाई का कैंटिलीवर विस्थापन (H e^3 / 3EI)। वही भार, मुक्त लंबाई के साथ, शीर्ष विस्थापन को भूमि सतह के विस्थापन से **कहीं अधिक** कर देता है; अधिकतम आघूर्ण प्रायः मृदा में या उसके कुछ नीचे होता है।



प्रश्न

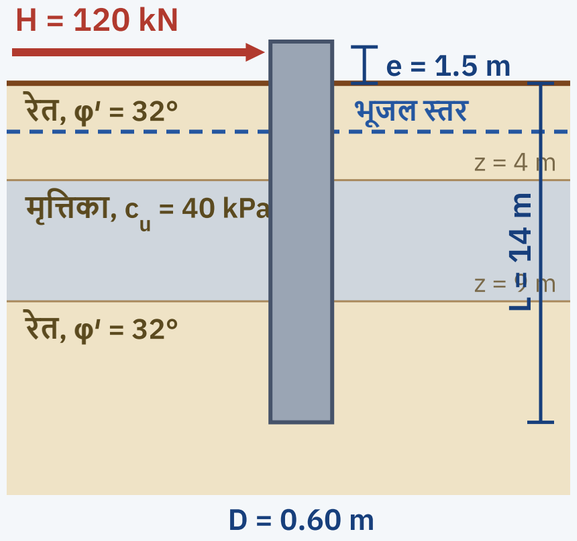
उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
मुक्त लंबाई	**भार भूमि की सतह से e = 1.5 m ऊपर; H = 120 kN, मुक्त शीर्ष**
मापांक (भूमि तल पर)	**y_{ground} = 11.12 mm, ढाल = 0.321° (भार की ओर)**

ज्ञात करना है

भूमि सतह पर **आघूर्ण** और **शीर्ष विस्थापन** ज्ञात कीजिए; परिणाम की तुलना मॉड्यूल के 20.23 mm से कीजिए।



हल

हल

1 भूमि सतह पर आघूर्ण (मुक्त लंबाई में अपरूपण H, $M_g = 0$)

$$M(0) = M_g + H\,e = 0 + 120(1.5) = \mathbf{180}\ \text{kN·m}$$

2 मुक्त लंबाई का कैंटिलीवर विस्थापन

$$\frac{H\,e^3}{3EI} = \frac{120(1.5)^3}{3(190{,}852)} = 0.71\ \text{mm}$$

3 शीर्ष विस्थापन = $y_{soil} + |\theta|\,e + H\,e^3/3EI$

$$y_{head} = 11.12 + 5.605(1.5) + 0.71 = \mathbf{20.23}\ \text{mm}$$

हस्त-गणना से **20.23 mm**, मॉड्यूल में 20.23 mm: दोनों समान हैं। जब भार भूमि स्तर पर था, तब शीर्ष 6.23 mm विस्थापित हुआ था; 1.5 m मुक्त लंबाई इसे **3.2 गुना** कर देती है। अधिकतम आघूर्ण 306 kN·m है, जो भूमि सतह से 1.68 m नीचे है (भूमि सतह पर 180 kN·m से अधिक)।

हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

कौन-सी संख्या क्या बताती है?

सिद्धांत

शीर्ष विस्थापन y और घूर्णन (ढाल dy/dz; भार की दिशा में झुकी पाइल में ऋणात्मक)। यदि मुक्त लंबाई हो तो भूमि सतह का मान भी दिया जाता है।

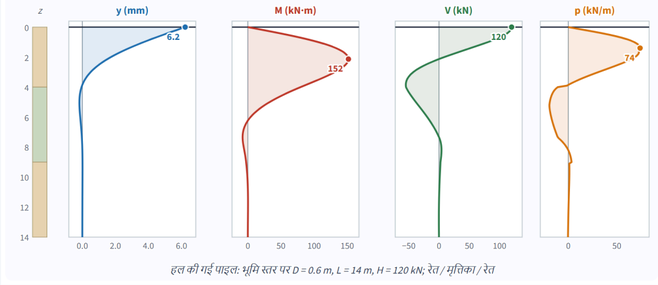
अधिकतम बंकन आघूर्ण और उसकी गहराई। बद्ध शीर्ष की स्थिति में शीर्ष आघूर्ण भी सूचीबद्ध किया जाता है; वह सदैव सबसे बड़ा नहीं होता।

शून्य विस्थापन की गहराई: वह स्थान जहाँ पाइल अपने ही अक्ष को काटती है; इसके ऊपर पाइल मृदा की ओर और नीचे मृदा से दूर गति करती है।

अपरूपण बल और मृदा प्रतिक्रिया; प्रतिक्रिया और p–y वक्र का अंतिम बिंदु साथ-साथ आरेखित किए जाते हैं: इससे दिखता है कि मृदा अपनी सीमा के कितने निकट है।

सिरा: पर्याप्त लंबे पाइल के सिरे पर विस्थापन नहीं होता। यदि सिरा भूमि सतह के विस्थापन के दसवें भाग से और 2 mm से अधिक गति करता है तो पाइल इस भार के लिए **छोटा** है: वह दृढ़ पिंड की तरह घूमता है, लंबाई परिणाम को निर्धारित करती है।

p–y दृश्य गतिशील भाग में पाँच गहराइयों पर वक्र आलेखित करता है और प्रत्येक पर **पहुँचा हुआ बिंदु** अंकित करता है: वक्र के सीधे प्रारंभिक भाग पर स्थित बिंदु प्रत्यास्थ है, उसके सिरे के निकट का बिंदु सीमा पर है।



हल की गई पाइल: भूमि स्तर पर D = 0.6 m, L = 14 m, H = 120 kN; रेत / मृत्तिका / रेत

प्रश्न

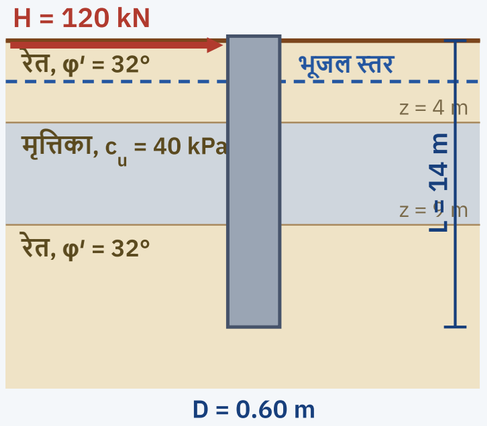
उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
मॉड्यूल परिणाम	**शीर्ष y = 6.23 mm, ढाल 0.150°; M_{max} = 151.8 kN·m (z = 2.13 m); शून्य विस्थापन z = 3.85 m पर; सिरा 0.0019 mm**
अधिकतम मृदा प्रतिक्रिया	**p = 74.0 kN/m, z = 1.40 m; A = max(0.9; 3 − 0.8(1.4)/0.6), p_u = 125.0 kN/m**

ज्ञात करना है

क्या इस भार के लिए पाइल **लंबी** है? 1.40 m गहराई पर मृदा अपनी सीमा के **कितने प्रतिशत** पर कार्य कर रही है? स्थैतिक जाँचों की व्याख्या कीजिए।



हल (1/2)

हल

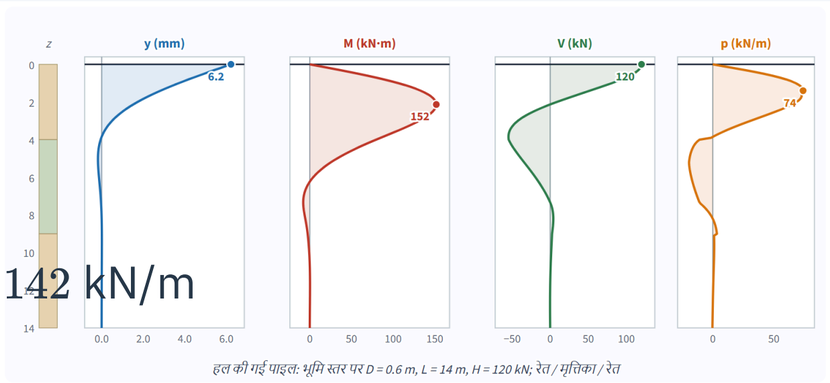
1 सिरे की शर्त: सिरे की गति की तुलना भूमि सतह पर विस्थापन के दसवें भाग और 2 mm से की जाती है

$$y_{tip} = 0.0019 \text{ mm} \ll 0.1(6.23) = 0.62 \text{ mm} \Rightarrow \text{लंबी पाइल}$$

2 1.40 m पर मृदा अपनी सीमा के कितने भाग पर है?

$$A = \max\left(0.9;\ 3 - \frac{0.8(1.4)}{0.6}\right) = 1.133\ ; \quad A\,p_u = 1.133(125.0) = 142 \text{ kN/m}$$

$$\frac{p}{Ap_u} = \frac{74.0}{142} = \mathbf{0.52}$$



हल की गई पाइल: भूमि स्तर पर D = 0.6 m, L = 14 m, H = 120 kN; रेत / मृत्तिका / रेत

हल (2/2)

हल

3 स्थैतिक जाँचें

$$\sum p\,\Delta z = 120.000\ \text{kN} = H \qquad M_{tip}\ (\text{स्थैतिक से}) = 0.000\ \text{kN·m} \qquad 7\ \text{पुनरावृत्ति}$$

पाइल **लंबी** है; मृदा 1.40 m पर अपनी सीमा के **52%** पर कार्य कर रही है (वक्र के अंत पर नहीं)। दोनों जाँचें भी संतुष्ट हैं: ये पुनरावृत्ति और लेखा-जोखा की जाँचें हैं, **मॉडल की सटीकता की नहीं**।

हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

अनुमेय मान के संगत भार

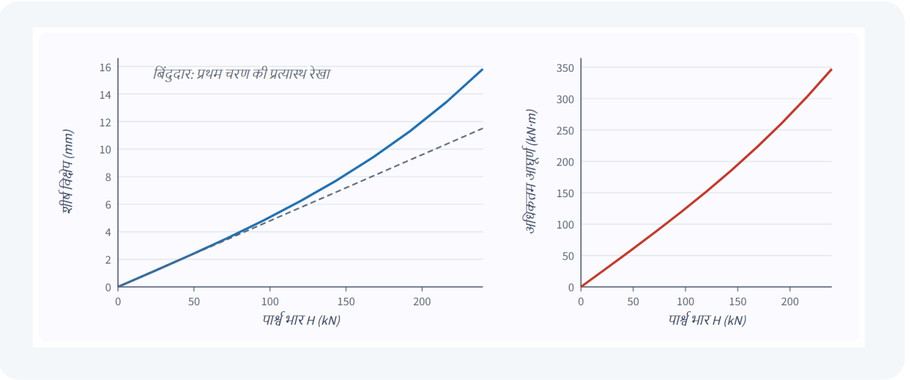
सिद्धांत

चूँकि मृदा अरैखिक है, विस्थापन भार के समानुपाती नहीं होता; **अनुमेय विस्थापन पर भार** को कार्यशील भार के परिणाम से पढ़ा नहीं जा सकता। मॉड्यूल भार और आघूर्ण को आरंभ से समानुपातिक रूप से बढ़ाता है (H और M_g पर एक गुणक λ, अक्षीय भार स्थिर), प्रत्येक चरण में समीकरण को पुनः हल करता है और वह λ ज्ञात करता है जिस पर शीर्ष विस्थापन अनुमेय मान तक (अथवा अधिकतम आघूर्ण काट की क्षमता तक) पहुँचता है: H_y अथवा H_M।

यदि मृदा अनुमेय मान वहन नहीं कर पाती (उस तक पहुँचने से पहले संतुलन नहीं मिलता) तो मॉड्यूल **“पहुँचा नहीं जा सका”** बताता है और वक्र अंतिम हल किए गए भार पर समाप्त हो जाता है। चक्रीय मृत्तिका या अक्षीय भार में वक्र मुड़ जाता है: यह **मृदा का सीमा भार** है।

यह पाइल की क्षमता नहीं है: मॉड्यूल में पाइल प्रत्यास्थ है; बंकन में यील्ड होने वाली पाइल मृदा से पहले विफल हो सकती है। दर्ज की गई आघूर्ण क्षमता इसी की जाँच है।

मॉड्यूल सुरक्षा गुणांक नहीं देता और उसे किसी संहिता से नहीं लेता: अनुमेय विस्थापन और आघूर्ण क्षमता का निर्धारण इंजीनियर की ज़िम्मेदारी है।



प्रश्न

उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
अरैखिक हल	**H = 30, 60, …, 270 kN के लिए शीर्ष विस्थापन: 1.44 · 2.93 · 4.51 · 6.23 · 8.15 · 10.33 · 12.86 · 15.82 · 19.29 mm**
अनुमेय	**y_{all} = 10 mm; आघूर्ण क्षमता M_{cap} = 200 kN·m**

ज्ञात करना है

y_{all} = 10 mm पर भार H_y, M_{cap} के संगत H_M; यदि रैखिक अनुपात प्रयुक्त किया जाता तो त्रुटि कितनी होती?

हल

हल

1 रैखिक अनुपात (कार्यशील भार पर 6.23 mm से) और यथार्थ हल

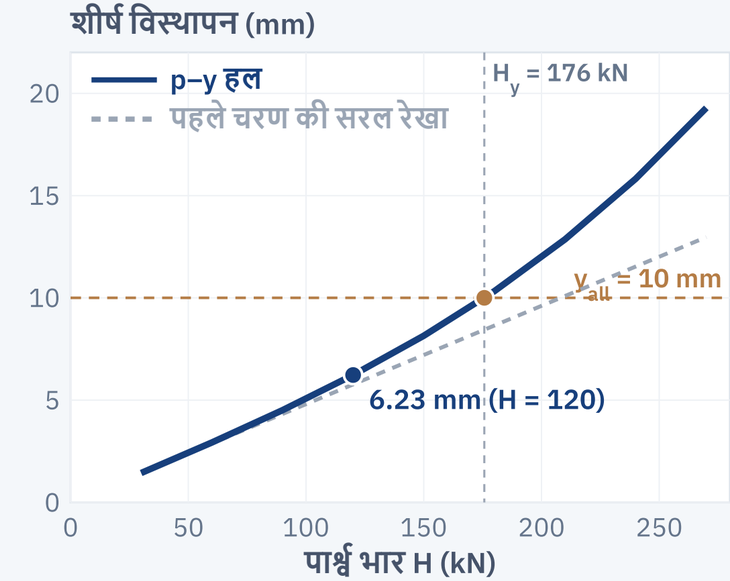
$$H_{y,linear} = 120\,\frac{10}{6.23} = 192.7 \text{ kN}$$

$$H_y = \mathbf{175.7} \text{ kN } (\lambda = 1.464)$$

2 आघूर्ण क्षमता के संगत भार

$$H_M = \mathbf{153.6} \text{ kN } \ (\lambda = 1.280;\ y_{head} = 8.39 \text{ mm})$$

रैखिक अनुपात भार को **10% अधिक** देता (193 ≠ 176 kN): मृदा के नरम होने के साथ विस्थापन भार से तेज़ी से बढ़ता है। **निर्णायक** राशि आघूर्ण है: H_M = 154 kN, उस भार पर शीर्ष केवल 8.4 mm है; अनुमेय विस्थापन वाले भार (H_y = 176 kN) पर आघूर्ण 234 kN·m होता।



हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

प्रश्न

उदाहरण

दिया गया है

पाइल	**बोर की गई पाइल, वृत्ताकार काट, D = 0.60 m, L = 14 m, कंक्रीट: E I = 190 852 kN·m²**
मृदा	**रेत 0–4 m (φ′ = 32°) · मृत्तिका 4–9 m (c_u = 40 kPa) · रेत 9–17 m (φ′ = 32°)**
इकाई भार, जल	**γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³; भूजल 2.0 m पर**
तुलना के लिए	**शीर्ष स्थिति · मुक्त लंबाई · चक्रीय भार · अक्षीय भार (800 kN) · दरारयुक्त काट (E I × 0.6) · प्रत्यास्थ मृदा (n_h = 8 MN/m³, k_h = 15 MN/m³)**

ज्ञात करना है

प्रत्येक स्थिति में शीर्ष विस्थापन और अधिकतम आघूर्ण की तुलना कार्य भार के सापेक्ष कीजिए।

हल

हल

स्थिति	y_{head} (mm)	M_{max} (kN·m)	y / y₀	M / M₀
इनपुट के अनुसार: मुक्त, स्थैतिक, भूमि स्तर पर	6.23	152	1.00	1.00
शीर्ष पर घूर्णन से अवरुद्ध (M_{top})	2.24	-175	0.36	1.15
भार भूमि से 1.5 m ऊपर है	20.23	306	3.25	2.01
चक्रीय भारण (API)	7.28	172	1.17	1.13
अक्षीय भार P = 800 kN	6.32	155	1.02	1.02
दरारयुक्त काट, E I × 0.6	7.93	140	1.27	0.92
प्रत्यास्थ मृदा (n_h, k_h)	10.49	173	1.68	1.14

पाइल शीर्ष की स्थिति विस्थापन को 0.36 गुना तक घटाती है और आघूर्ण को बढ़ाती है; **मुक्त लंबाई** का प्रभाव सबसे अधिक है (विस्थापन ×3.2, आघूर्ण ×2.0)। **चक्रीय भार** विस्थापन को 17% और **दरारयुक्त काट** 27% बढ़ाती है, परंतु आघूर्ण को घटाती है (पाइल अधिक लचीली हो जाती है)। प्रत्यास्थ मृदा एक अलग मृदा है: यह p–y वक्रों की जाँच नहीं है।

हल की जाँच GeoTerva में करें ↗

संख्याओं के पीछे की मान्यताएं

सिद्धांत

एकल पाइल: बिना पड़ोसी के अकेली खड़ी पाइल, उसके p–y वक्रों के साथ। पार्श्व भार वाला समूह उसी पाइल भार पर एकल पाइल से अधिक विस्थापित होता है; समूह (पंक्तियों के p-गुणकों सहित) पाइल समूह मॉड्यूल का विषय है।

पाइल: पूरी लंबाई में एकल काट, रैखिक प्रत्यास्थ; E I नियत। दरारयुक्त कंक्रीट काट को E I गुणक द्वारा, तथा उस आघूर्ण M_{cap} द्वारा निरूपित किया जाता है जिस पर काट यील्ड करती है।

मृदा: स्वतंत्र स्प्रिंग, उनके बीच अपरूपण नहीं; वक्र विशिष्ट मृदाओं पर किए गए परीक्षणों से हैं: रेत φ' पर, मृत्तिका c_u और ε_{50} पर आधारित है। यह रेत और नरम–मध्यम मृत्तिका का वर्णन करता है; कठोर मृत्तिका, अपक्षयित चट्टान, सीमेंटित मृदा और द्रवीकृत होने योग्य रेत का वर्णन उनके अपने वक्रों से किया जाता है।

भारण: स्थैतिक या API न्यूनीकरण के साथ चक्रीय; पहले लगाया जाता है। **अक्षीय भार** पूरी लंबाई में स्थिर रहता है।

संख्यात्मक हल: परिमित अवयव और अरैखिक पुनरावृत्ति, दिए गए समीकरण के लिए दर्शाए गए अंकों तक यथार्थ हैं; सन्निकटन समीकरण में है (मृदा को स्प्रिंगों से निरूपित किया जाता है)। यह दो स्वतंत्र प्रोग्रामों (परिमित अंतर, दूसरी भाषा में) से 14 पाइलों में 0.01% के भीतर मेल खाता है।

p–y विधि व्यवहार में पार्श्व भारित पाइल के डिज़ाइन का आधार है; संख्याओं की तुलना परियोजना के अनुमेय मानों से और, यदि उपलब्ध हो, **भार परीक्षण** से की जानी चाहिए।

सारांश

याद रखने योग्य बिंदु

पाइल **अरैखिक स्प्रिंगों पर रखी बीम** है: $EI\,y'''' + P\,y'' + p(y, z) = 0$; मृदा नियम p–y वक्र है

प्रत्यास्थ: रेत $n_h z \rightarrow T = (EI/n_h)^{1/5}$; मृत्तिका $k \rightarrow \beta = (k/4EI)^{1/4}$, $y_0 = 2H\beta/k$, $M_{max} = 0.3224\,H/\beta$

रेत: $p = A\,p_u \tanh(kzy/Ap_u)$, $p_u = \min[(C_1 z + C_2 D)\sigma'; C_3 D\sigma']$ · **मृत्तिका**: $p = \tfrac{1}{2} p_u (y/y_{50})^{1/3}$, $p_u = \min[(3 + \sigma'/c_u + Jz/D)c_u D; 9c_u D]$

चक्रीय भार सतह के निकट प्रतिरोध को घटाता है: रेत में $A = 0.9$, मृत्तिका में $3y_{50}$ से आगे $0.72p_u$

शीर्ष की स्थिति, **मुक्त लंबाई**, **अक्षीय भार** और **दरारयुक्त काट** परिणाम को स्पष्ट रूप से बदल देते हैं; इनमें सबसे अधिक मुक्त लंबाई

विस्थापन भार के समानुपाती नहीं है: **अनुमेय मान पर भार** पुनः हल करके ज्ञात किया जाता है (H_y, H_M)

संदर्भ

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston.

Matlock, H. and Reese, L.C. (1960). Generalized solutions for laterally loaded piles. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 86(SM5), 63–91.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

Hetényi, M. (1946). Beams on Elastic Foundation. University of Michigan Press, Ann Arbor.

Reese, L.C., Isenhower, W.M. and Wang, S.-T. (2006). Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations. John Wiley & Sons, Hoboken.

Broms, B.B. (1965). Design of laterally loaded piles. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 91(SM3), 79–99.

Reese, L.C. and Welch, R.C. (1975). Lateral loading of deep foundations in stiff clay. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(GT7), 633–649.

Davisson, M.T. and Gill, H.L. (1963). Laterally loaded piles in a layered soil system. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 89(SM3), 63–94.

टिप्पणी

इस प्रस्तुति के चित्र GeoTerva के सिद्धांत पृष्ठ से लिए गए हैं; सभी संख्यात्मक उदाहरण मॉड्यूल के अपने गणना इंजन से तैयार किए गए हैं, मॉड्यूल वही मान देता है।

GeoTerva

ऑनलाइन भू-तकनीकी गणनाएँ

सिद्धांत से अनुप्रयोग तक

इस प्रस्तुति के उदाहरण पाइल की गणना GeoTerva में चरण दर चरण करें: संख्याएँ वही हैं।

मॉड्यूल खोलें →

सिद्धांत पृष्ठ →

फ़ोन पर खोलें

नमूना मॉड्यूल के लिए पंजीकरण आवश्यक नहीं है।