

Obliczanie parcia i oporu gruntu według Eurokodu 7 (Postęp czy regres?)

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Dembicki – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Dr inż. Bogdan Rymsza – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

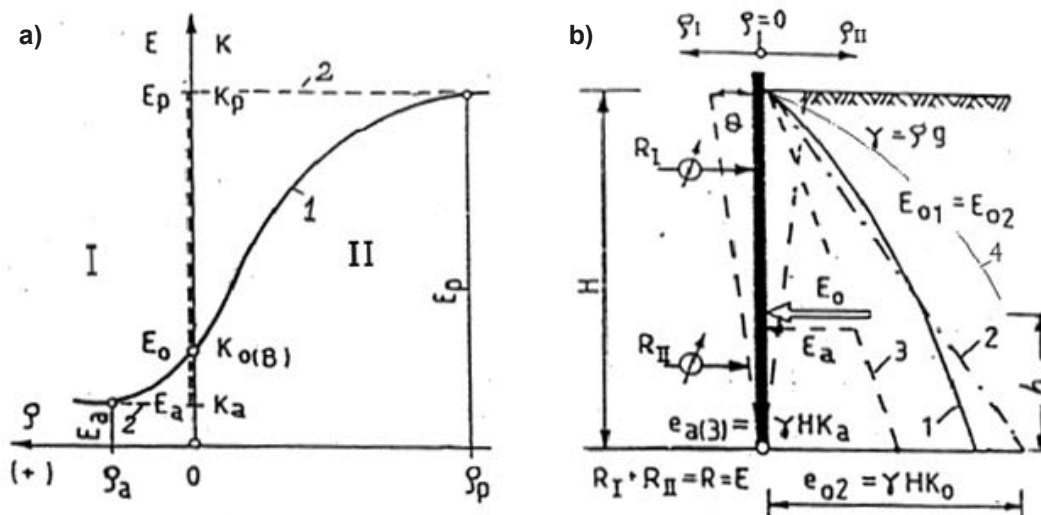
Z wielu instytucji, zwłaszcza biur projektowych, docierają pytania dotyczące obliczania parcia gruntu i wymiarowania konstrukcji oporowych według Eurokodu EC7-1 [8]. Niejasności budzą niektóre ustalenia ogólne Eurokodu (tamże, rozdz. 9 – dalej [8a]), a przede wszystkim wskazania szczegółowe podane w znowelizowanym załączniku C (C/AC:2009 – dalej [8b]). Większość pytań nawiązuje bezpośrednio lub pośrednio do ustaleń podanych w poprzedniej normie „Ściany oporowe – obliczenia statyczne i projektowanie” [7]. Autorzy niniejszego artykułu współredagowali normę [7]. Można zatem zakładać, że analiza wskazań eurokodowych [8a, b, c] budzących niejasności bądź zastrzeżenia, przedstawiona tu w nawiązaniu porównawczym do normy [7] i danych literaturowych zainteresuje uczestników XVII-ej Krajowej Konferencji MGilG.

Mając na uwadze większą komunikatywność artykułu analizę tę poprzedza się przypomnieniem niektórych pojęć i określeń oraz skrótowym naświetleniem współzależności parcia gruntu i przemieszczeń konstrukcji oporowej.

WPROWADZENIE TEMATYCZNE

Na podstawie klasycznej teorii Coulomba (1773 r.) lub Rankine’a (1857 r.) można określić jedynie ekstremalne wartości parcia gruntu:

- $E_{\min} = E_a$ – parcie czynne (najmniejszy napór gruntu na konstrukcję),
- $E_{\max} = E_p$ – parcie „bierne” (największy możliwy odpór gruntu).



Rys. 1. Współzależność parcia gruntu i przemieszczeń konstrukcji oporowej: a – zmienność parcia gruntu (1 – zależność rzeczywista, 2 – model sztywno-plastyczny); b – rozkład parcia gruntu i schemat ściany oporowej w badaniach przeprowadzonych przez K. Terzagiego [15] (1 – rozkład parcia spoczynkowego, 2 – liniowy rozkład porównawczy, 3 – rozkład jednostkowego parcia czynnego $e(\rho_1)$, 4 – rozkład jednostkowego oporu $e(\rho_2)$)

Pomijając zróżnicowania ilościowe wynikające z odmiennych założeń teorii Coulomba (graniczna równowaga sztywnych klinów odłamu) i teorii Rankine'a (graniczny stan naprężenia przy plastycznych poślizgach gruntu), zwraca się uwagę na jedno, niejako tożsamościowe założenie: sztywno-plastyczny model ośrodka gruntowego (rys. 1a, linia 2).

Rozwiązanie przedstawione przez Coulomba dotyczyło przypadku podstawowego: ściana oporowa muru pionowa i gładka ($\alpha = 0$, $\delta = 0$), naziom poziomy nieobciążony ($\beta = 0$, $q = 0$), grunt niespoisty ($\gamma > 0$, $\phi > 0$, $c = 0$). W rozpatrywanym przypadku otrzymuje się zależności:

$$E_a = 0,5\gamma H^2 K_{ac} \quad (1)$$

$$E_p = 0,5\gamma H^2 K_{pc} \quad (2)$$

gdzie (rys. 1b):

$\gamma = \rho g$ – ciężar objętościowy gruntu,

H – wysokość ściany,

ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu,

$K_{ac} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$ – współczynnik parcia czynnego,

$K_{pc} = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$ – współczynnik oporu gruntu.

W oznaczeniach współczynników parcia dodano indeks C wskazując, że odpowiadają one schematowi muru rozpatrywanemu przez Coulomba. W późniejszych latach na bazie wspomnianych tu teorii przedstawiane były różne rozwiązania uogólnione (Ponceleta, Bluma, Müllera-Breslaua i in.). Rozwiązania te omawiane są w literaturze, m.in. w pracach [3, 4]; uogólnione współczynniki parcia $K_{ap} = F_{ap}(\phi, \alpha, \beta)$ są również podane w pracach [1, 3, 5] i w normie [7]. Nowe uogólnione podejście do zagadnienia parcia i oporu gruntu oparte na teorii plastyczności obejmują rozwiązania stanu granicznego gruntu przedstawione przez A. Caquot'a i W. Sokołowskiego. Szczegółowe rozwiązania parcia i oporu gruntu odniesione do dowolnie nachylonej ściany muru oporowego i naziomu podał E. Dembicki [1, 3].

Na współzależność parcia gruntu i przemieszczeń konstrukcji oporowej w zakresie $E_a \leq E(\rho) \leq E_p$ (rys. 1a, linia 1) zwrócił

uwagę K. Terzaghi (1934-35), który przeprowadził też szerokie badania zmienności parcia w skali modelowej i półtechnicznej [15]. Badacz ten zdefiniował również parcie spoczynkowe jako stan naporu gruntu przy sztywnej i nieulegającej przemieszczeniom ścianie oporowej $E_0 = E(\rho = 0)$. Analizując układ i wartość sił pomiarowych R_p , R_{II} przyjął hipotezę, że rozkład jednostkowego parcia spoczynkowego $e_0(h)$ jest krzywoliniowy, któremu odpowiada współczynnik położenia wypadkowej $\eta_0 = h_0:H = 0,33 \div 0,42$ (rys. 1b, linia 1). Utrzymywał przy tym, że współczynnik η_0 jest tym większy, im większe jest zagęszczenie zasypki [15]. K. Terzaghi określił również przemieszczenia ρ_a warunkujące zmniejszenie parcia spoczynkowego do wartości minimalnego parcia czynnego wykazując, że zależą one od rodzaju i stanu gruntu oraz schematu ruchu ściany (w badaniach porównawczych różnicował $\rho = \Theta$ – obrót kątowy względem dolnej krawędzi i $\rho = \Delta$ – przesuw równoległy). Wartości ρ_p były oszacowane orientacyjnie, gdyż ze względu na ograniczenia techniczno-pomiarowe badanie mobilizowania oporu przerywano przy $E(\rho_{II}) \approx (3 \div 4) E_0$ [15].

K. Terzaghi oraz późniejsi badacze (R. B. Peck, H. Duddeck, A. Kézdi, Weissenbach i in.) przy krzywoliniowym rozkładzie parcia przyjmowali w analizie porównawczej zastępczy (wypadkowy) współczynnik parcia, gdzie rozpatrując przykładowo stan parcia spoczynkowego (rys. 1b, linie 1;2):

$$K_0 = \frac{E_0}{0,5 \cdot \gamma \cdot H^2} \quad (3)$$

Wielu autorów, nawiązując do warunków *in situ*, współczynnik parcia gruntu w spokoju określa stosunkiem efektywnych składowych naprężenia poziomych do pionowych

$$K_0 = \sigma'_h : \sigma'_v \quad (4)$$

gdzie kryterium definicyjne stanu parcia spoczynkowego stanowi warunek $\epsilon_h = 0$.

Wartość K_0 (4) może być oznaczona bezpośrednio: na podstawie badań polowych (sondowanie DMT, MPM/PMT, SBPT, CPTU) lub badań laboratoryjnych (pomiar wyężenia pró-

bek gruntu w specjalnych pierścieniach edometrycznych lub w zmodyfikowanych aparatach trójosiowego ściskania) [9]. Współczynnik ten często określa się metodą korelacyjną, gdzie zazwyczaj stosowany jest uproszczony wzór Jáky'ego, podany dla gruntów niespoistych, a z czasem uogólniony dla gruntów spoistych normalnie skonsolidowanych (NC) [3, 5, 10]

$$K_{0-NC} = 1 - \sin \phi' \quad (5)$$

gdzie:

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego.

W przypadku gruntów prekonsolidowanych (OC) najczęściej stosuje się wzór Schmidta [6, 13, 14]

$$K_{0-OC} = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (6)$$

gdzie:

$OCR = \sigma'_{vp} : \sigma'_{v0}$ – wskaźnik prekonsolidacji wyrażający stosunek efektywnych składowych pionowych naprężeń w fazie przeciążenia gruntu do występującego obecnie naprężenia pierwotnego.

W Eurokodzie EC7 [8a] współczynnik ten przy poziomej powierzchni terenu zaleca się wyznaczać z wzoru

$$K_{0-OC} = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR} \quad (7)$$

ANALIZA PORÓWNAWCZA WSKAZAŃ I USTALEŃ NORMOWYCH

W obu normach [7, 8] podkreśla się współzależność parcia gruntu E i przemieszczeń konstrukcji $\rho \equiv v$ zaznaczając, że interakcję tę należy uwzględniać przy sprawdzeniu stanów granicznych nośności (SGN), jak również stanu granicznej użyteczności (SGU). Stąd też przedmiotem dalszej analizy będą wskazania eurokodowe dotyczące zmienności parcia $E_a \leq E_I(v_I) \leq E_0$ (siły destabilizującej „I”) oraz rozwijania się oporu $E_0 \leq E_{II}(v_{II}) \leq E_p$ (siły stabilizującej „II”). W analizie wydziela się cztery zagadnienia cząstkowe, a mianowicie:

- zasady wyznaczania granicznych wartości parcia E_a i oporu gruntu E_p ;
- wskazania dotyczące przemieszczeń $\bar{\rho}_a = v_a / H$ i $\bar{\rho}_p = v_p / H$, warunkujących wystąpienie granicznych stanów parcia;
- zasady wyznaczania bazowych wartości parcia gruntu w spoczynku E_0 ;
- zależności interakcyjne określające wartości i rozkład pośredniego parcia gruntu E_I i pośredniego oporu E_{II} , gdzie oznaczenia I, II odpowiadają przemieszczeniom ρ_p, ρ_{II} (rys. 1).

Wskazania normowe dotyczące granicznych wartości parcia i oporu gruntu

W znowelizowanym załączniku C [8b] zaznaczono, że *graniczne wartości parcia na pionową ścianę, wywołane przez grunt o ciężarze objętościowym γ oraz równomierne obciążenie naziomu q , kąt oporu ścinania ϕ i kohezję* [spójność – przyp. aut.] *c należy wyznaczać z wzorów (C.1), (C.2):*

- *parcie graniczne*

$$\sigma_a(z) = K_a \left[\int \gamma dz + q - u \right] + u - c K_{ac} \quad (C.1) \equiv (8)$$

– *odpór graniczny*

$$\sigma_p(z) = K_p \left[\int \gamma dz + q - u \right] + u + c K_{pc} \quad (C.2) \equiv (9)$$

gdzie:

γ, ϕ, c, q – symbole objaśnione w tekście,

K_a – współczynnik poziomego parcia granicznego,

$K_{ac} = 2 \sqrt{K_p \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \leq 2,56 \sqrt{K_a}$ – współczynnik wpływu spójności,

K_p – współczynnik poziomego oporu granicznego,

$K_{pc} = 2 \sqrt{K_p \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \leq 2,56 \sqrt{K_p}$ – współczynnik wpływu spójności,

a – przyczepność (adhezja) pomiędzy gruntem i ścianą,

z – głębokość wzdłuż powierzchni ściany.

W opisie aplikacyjnym podano, że *dla gruntów z drenażem współczynniki K_a, K_p są funkcjami kąta oporu ścinania ϕ i kohezji* [spójności – przyp. aut.] *efektywnej $c = c'$, dalej wskazując, że można je przyjmować z załączonych nomogramów C1; 2.1 ÷ 4 (przykładowe nomogramy K_a (C.1.2) i K_p (C.2.4) podano na rys. 2 i rys. 3). Nie określając warunków obliczeniowych w załączniku C [8b] zaznaczono, że dla gruntu bez drenażu należy przyjmować $K_a = K_p = 1$ i $c = c_u$.*

Nadmienia się, że w poprzedniej edycji Eurokodu EC7-1 (załącznik C [8c]) dla tego samego schematu ściany oporowej były zalecane wzory obliczeniowe:

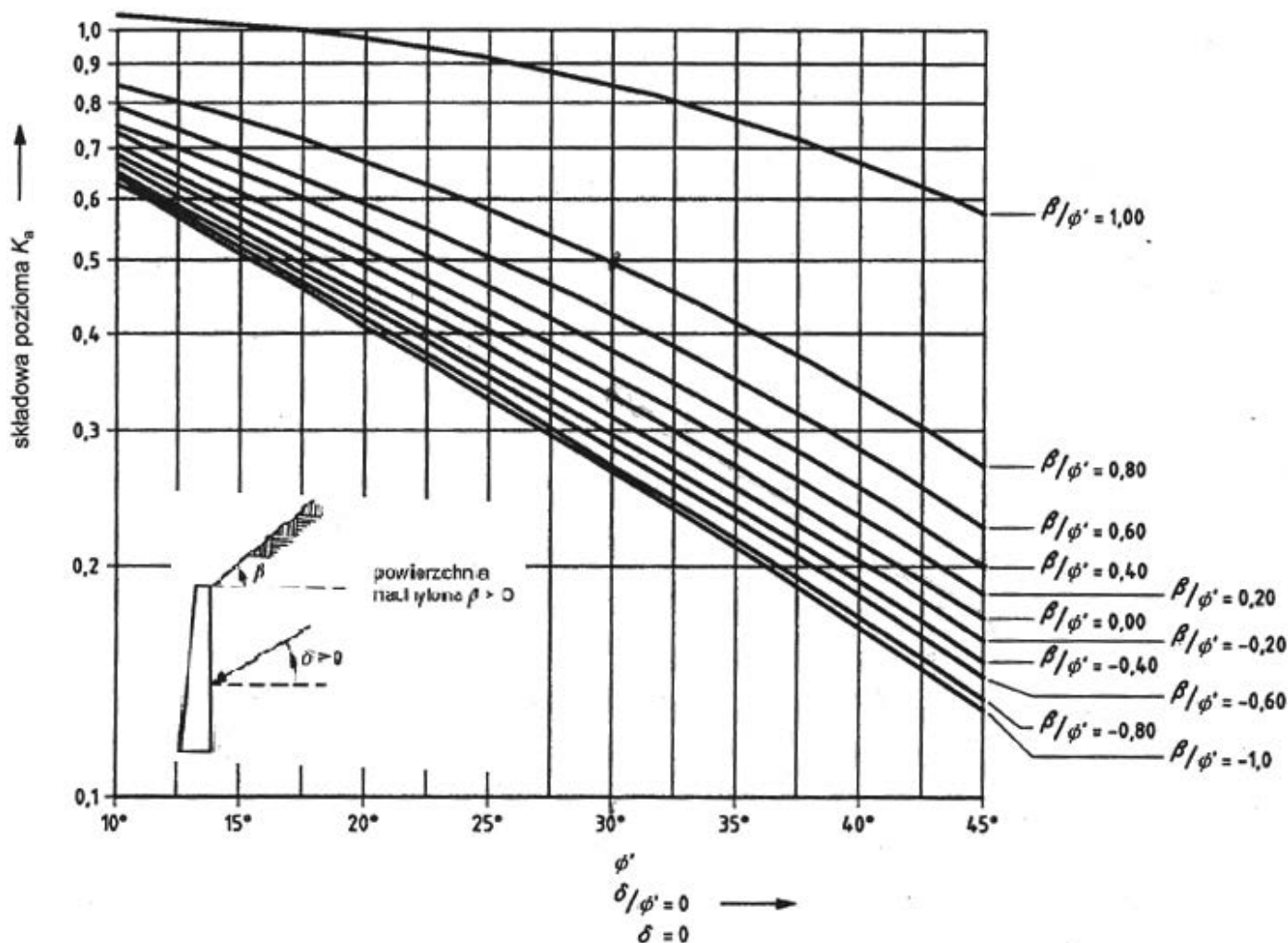
$$\sigma_a(z) = K_a (\gamma z + q) - 2c \sqrt{K_a} \quad (10)$$

$$\sigma_p(z) = K_p (\gamma z + q) + 2c \sqrt{K_p} \quad (11)$$

Wskazania eurokodowe (10), (11) nawiązywały zatem do ogólnie znanych wzorów literaturowych (por. [1, 4, 6, 16]). Wzory te, w zapisie $e_a = \sigma_a(z)$ i $e_p = \eta \sigma_p(z)$ przy współczynniku korelacyjnym $\eta \leq 1$, były również podane w normie [7].

Analizując znowelizowane wskazania eurokodowe (8), (9) można podnieść następujące uwagi i zastrzeżenia:

- a) W wykazie oznaczeń ani w opisie aplikacyjnym nie objaśniono parametru u . Przyjmując, że jest to ciśnienie wody w porach, pojawiają się tu istotne niejasności interpretacyjne:
 - Czy jest to ciśnienie wody działające na ścianę wynikające z warunków gruntowo-wodnych, czy też ciśnienie wody w porach wzbudzone na powierzchni poślizgu w granicznym stanie ścinania?
 - Przyjmując zaś, że w zamyśle twórców wzorów (8), (9) u określa ciśnienie wody wywołane obciążeniem q (co mogłaby sugerować przykładowa interpretacja wyrażen: $q - u = q' -$ efektywne obciążenie naziomu, $K_{a,p}(q - u) = \Delta \sigma'_{a,p} = \Delta e_{a,p}$ – przyrost efektywnego jednostkowego parcia bądź oporu gruntu) – powstaje pytanie, czy u ma wartość stałą dla całej warstwy gruntu, czy też jest to ciśnienie zmienne $u(z, \Delta \sigma, A, B \dots)$, wyznaczone przy uwzględnianiu stosunkowego przyrostu naprężeń $\Delta \sigma_v : \sigma_v = q : \gamma z$ i ogólnych zasad konsolidacji [4, 5]?
- b) Eurokodowe nomogramy współczynników K_a, K_p (przykładowe wykresy – rys. 2, rys. 3) wyznaczone przy założeniu powstawania w stanach granicznych trójkąt-



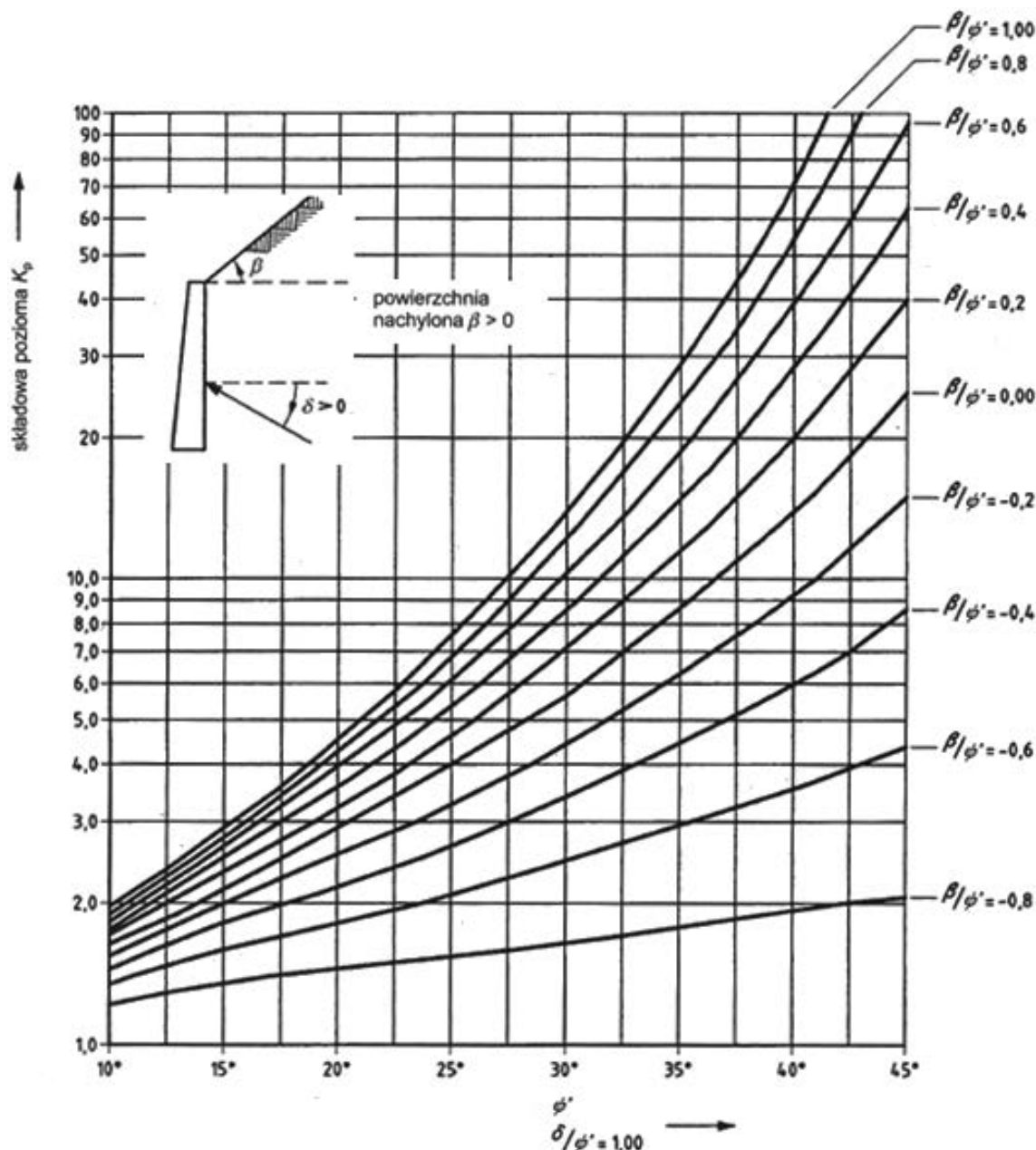
Rys. 2 (C.1.2). Współczynnik K_a efektywnego czynnego parcia gruntu (składowa pozioma) w przypadku nachylonej powierzchni naziomu ($\frac{\delta}{\phi'} = 0$ i $\delta = 0$) (według EC7-1, [8b])

nych klinów odłamu, a zatem przy przyjęciu płaskich powierzchni poślizgu. W przypadku parcia czynnego błąd wynikający z przyjęcia tego założenia jest stosunkowo niewielki i wynosi $\pm 5 \div 10\%$ – zależnie od rodzaju i stanu gruntu, szorstkości ściany charakteryzowanej kątem δ oraz schematu kinematycznego przemieszczenia konstrukcji $p(s, \Delta, \theta)$ [1, 3, 10, 16]. Natomiast wyznaczanie według wskazań eurokodowych granicznego oporu $E_p[K_p(\phi, \delta, \beta)]$ może być bardzo niebezpieczne, szczególnie przy dużych wartościach kątów ϕ i δ . Przy $\phi > 35^\circ$ i $\delta = \phi$ z nomogramu otrzymuje się wręcz nie-realne wartości współczynnika K_p (por. rys. 3), przy których obliczeniowy opór graniczny może być nawet 2 ÷ 3-krotnie większy od rzeczywistej (możliwej) siły odporowej (E_{p-rz}). Wyjaśniając relację $E_{p-rz} < E_p(K_p)$ zwraca się uwagę, że w rzeczywistości poślizg odłamu (wypieranie bryły odporowej) następuje po „łatwiejszej energetycznie” powierzchni krzywoliniowej. W obliczeniach projektowych należy przyjmować współczynniki Caquot-Kérisela ($K_{p-k} < K_p$), wyznaczone przy założeniu krzywoliniowej powierzchni wypierania [1, 3, 5] lub uwzględniać globalne współczynniki poprawkowe $\eta(\phi, \delta, \beta) = E_{p-rz} : E_p(K_p) = 0,3 \div 1$, podane w normie [7] i w pracach [1, 3].

- c) Uwzględniając, że przyjmowana w obliczeniach wartość kąta δ ma wpływ na wyznaczane parcie gruntu – szczególnie duży na odpór w gruncie niespoistym, przy $\delta > 0,5\phi$ niebezpiecznie go zawyżając – dziwi niefrasobliwość z jaką określono w Eurokodzie EC7-1 wskazania dotyczące obliczeniowej wartości $\delta_d = k \phi_{cv,d}$ ([8a] p. 9.5.1). Wskazania te zestawiono w tabl. 1, przyjmując dla uproszczenia $\phi_{cv} \approx \phi$ (utożsamiając kąty tarcia wewnętrznego w stanie krytycznym i granicznym). W celu porównania wskazań obliczeniowych w tabl.1 podano również ustalenia normowe [7].

Na celowość podania w „Załączniku Krajowym EC7-1” ostrzejszych ograniczeń dotyczących wartości δ przyjmowanych przy obliczaniu oporu, jak również wprowadzenia współczynników poprawkowych $\eta < 1$ urealnających siłę graniczną $\eta E_p(K_p) \approx E_{p-rz}$ zwracał uwagę drugi z autorów w opracowaniu [12], przedstawianym w ramach prac zespołu normalizacyjnego KT – 254.

- d) Wzory eurokodowe określają wartość i rozkład jednostkowego parcia granicznego: czynnego $\sigma_a(z) = e_a$ (8) i oporu $\sigma_p(z) = e_p$ (9). Wzorów na siły wypadkowe nie podano, co w przypadku parcia czynnego $E_a[\sigma_a(\gamma, q, u, c), H]$ gruntów spoistych jest wręcz niezro-



Rys. 3 (C.2.4). Współczynnik K_p oporu gruntu (składowa pozioma) w przypadku nachylonej powierzchni naziemu $\left(\frac{\delta}{\phi'} = 1\right)$ (według EC7-1, [8b])

zumiałe. Zwraca się bowiem uwagę, że przy $c > 0$ (gdzie dalej, w celu uproszczenia $q = 0, u = 0$) według wzoru (8) w górnej strefie ściany do głębokości $z < h_{gc} = cK_c : \gamma K_a$ występowałyby naprężenia ujemne $\sigma_a(\gamma, z, c) < 0$. Przy wyznaczaniu parcia gruntu E_a możliwe więc są trzy ujęcia obliczeniowe:

- Wyznaczenie siły wypadkowej z uwzględnieniem naprężenia $\sigma_a(z) < 0$ w strefie $z \leq h_{gc}$ i naprężenia $\sigma_a(z) > 0$ w strefie $h_{gc} < z \leq H$, gdzie wynikowe parcie czynne E_{a1} ;
- Przyjęcie w strefie h_{gc} naprężenia $\sigma_a = e_a = 0$, zakładając możliwość powstawania szczelin skurczowych i wyznaczenie parcia $E_{a2} > E_{a1}$ według naprężenia $\sigma_a > 0$ działającego w dolnej strefie ściany $h_d = H - h_{gc}$; takie podejście obliczeniowe wskazano w normie [7];

- Przyjęcie w górnej strefie ściany $0 < z \leq h_{gc}$ minimalnego parcia jednostkowego $e_a(z) = 0,2 \gamma z > 0$ stosownie do zalecenia Weissenbacha [16], a w dolnej naprężenia $\sigma_a(z) > 0$ według wzoru (8) i wyznaczenie parcia $E_{a3} > E_{a2}$.

Przy dużej spójności gruntu i stosunkowo niskiej ścianie oporowej $H \leq 3h_{gc}$ zróżnicowania wyznaczonego parcia czynnego mogą być znaczące ($E_{a3} : E_{a1} = 2 \div 3$). Powstaje zatem pytanie, jaki jest sens podawania w Eurokodzie EC7-1 drobiazgowych wymagań bądź ogólnikowych nakazów (na przykład [8a]: konieczności dokładnego określenia ciężaru objętościowego wody – p. 9.3.1.4, czy analizowania wpływu wyjątkowych zmian temperatury w czasie i przestrzeni na projektowaną konstrukcję oporową – p. 9.3.1.8), gdy jednocześnie pomija się istotne wskazania determinujące dokładność obliczeń projektowych.

Tabl. 1. Zalecane wartości kąta tarcia gruntu o ścianę δ

Rodzaj gruntu	Wskazanie normowe	Graniczne parcie E_a			Graniczny odpór E_p		
		Charakterystyka ściany			Charakterystyka ściany		
		stalowa (gładka)	betonowa (prefebrykowana)	betonowana w gruncie (szorstka)	stalowa (gładka)	betonowa (prefebrykowana)	betonowana w gruncie (szorstka)
Niespoisty	EC 7-1 [8a]	$\frac{2}{3}\phi$	$\frac{2}{3}\phi$	ϕ	$\frac{2}{3}\phi$	$\frac{2}{3}\phi$	ϕ
	PN 83/B-03010 [7]	0	$\frac{1}{2}\phi$	$\frac{2}{3}\phi$	0	$\frac{1}{3}\phi$	$\frac{1}{2}\phi$
Spoisty	EC 7-1 [8a]	0 ¹⁾	bd ²⁾	bd ²⁾	0 ¹⁾	bd ²⁾	bd ²⁾
	PN 83/B-03010 [7]	0	$\frac{1}{2}\phi$	$\frac{2}{3}\phi$	0	$\frac{1}{3}\phi$	$\frac{2}{3}\phi$
Uwagi i objaśnienia		1) Bezpośrednio po wbiciu (warunki bez odpływu – p. 9.5.1(8)); dalszych wskazań nie podano 2) Brak danych					

e) Wskazanie eurokodowe, aby „dla gruntów bez drenażu przyjmować $K_a = K_p = 1$ ” jest niezrozumiałe i budzi następujące zastrzeżenia:

- Sam fakt stwierdzenia w podłożu „warunków bezdrenażowych” (na przykład przy wykonywaniu ścian szczelinowych w twaroplastycznych glinach i ilach przy $\phi \approx 17^\circ \div 20^\circ$ i $c = 30 \div 50$ kPa) nie uzasadnia założenia, że jest to ośrodek spoisty beztarciowy (przyjęcie $K_a = K_p = 1$ jest równoważne z założeniem $\phi_u = 0$ – porównaj wzory (1), (2));
- Analizując z kolei zmiany stanu obciążenia i odkształcenia ściany w kolejnych fazach technologicznych i przy możliwości wzbudzenia ciśnienia wody w porach $u > 0$ (na przykład na skutek wykonania dolnych rozpór lub kotwi i roboczego obciążenia naziomu) – przy arbitralnym przyjęciu $K_a = K_p = 1$ otrzymuje się nierealne zróżnicowania obciążeń: 1,5 $\div$ 2-krotny wzrost parcia i 2 $\div$ 3-krotne zmniejszenie odporu.

Przyjęcie tego wskazania prowadziło by zatem do nieracjonalnego projektowania konstrukcji. Wskazanie to jest konsekwencją usunięcia wzorów (10), (11) [8c] i zastąpienia ich wzorami (8), (9) [8b] – a szerzej naświetlając – ograniczenia założeń interpretacyjnych dotyczących wyznaczania parametrów wytrzymałościowych gruntu. W dotychczasowej wieloletniej praktyce geotechnicznej opór gruntu na ścinanie był określany alternatywnie:

- $\tau_f = \sigma' \tan \phi' + c'$ – przy uwzględnianiu składowych efektywnych naprężenia $\sigma' = \sigma - u$ i parametrów ϕ' , c' ;
- $\tau_\phi = \sigma \tan \phi_u + c_u$ – według naprężenia całkowitego σ i parametrów ogólnych ϕ_u , c_u , gdzie zależnie od warunków ścinania i stopnia wzbudzenia ciśnienia wody w porach $0 \leq \phi_u \leq \phi'$.

Według obowiązującej „eurokodowej filozofii” uwzględnia się jedynie przypadki skrajne, wyznaczając parametry:

- ϕ' , c' – przy badaniach z pełnym drenażem ($u = 0$, $\sigma = \sigma'$),
- $\phi_u = 0$, $\tau_f = c_u$ – przy badaniach bez drenażu (przypadek „tarcia zerowego” $\sigma = u$).

Szersza analiza tego zagadnienia przekraczałaby ramy artykułu.

f) Niektóre zapisy eurokodowe są błędne lub niezrozumiałe i wymagają skorygowania, gdzie przykładowo:

- W punkcie C.1 (2) [8b] błędnie podano, że współczynniki K_a , K_p „są funkcjami kąta oporu ścinania ϕ' i spójności efektywnej c' ”; współczynniki te są funkcjami kątów ϕ , β , δ (porównaj rys. 2, rys. 3), w żadnym natomiast stopniu nie zależą od oporu spójności c (w normie [8a, b] niewłaściwie nazywanej *kohezją*).
- Wprowadzenie do wzorów (8), (9) rachunku całkowitego budzi zdziwienie, gdyż $\int \gamma dz = \gamma z$ (zbędna pseudonaukowość).
- Przy wzorach (8), (9) podano ograniczenia dotyczące przyczepności a w zapisie $K_{xc} = 2\sqrt{K_x(1+a/c)} \leq 2,56\sqrt{K_x}$, gdzie odpowiednio $K_x = K_a$, K_p ; rozwiązując tę nierówność otrzymuje się prostszy warunek $a/c \leq 0,64$, gdzie zastanawia precyzja przyjętych ograniczeń.
- Na eurokodowym nomogramie współczynników $K_a(\phi, \beta)$ przy ścinanie gładkiej ($\delta = 0$ – rys. 2) błędnie wskazano ukierunkowanie siły parcia gruntu $E_a(\delta > 0)$.

Wyznaczanie bazowych wartości parcia spoczynkowego gruntu E_0

W celu właściwego określenia zakresu zmienności parcia gruntu $E_a \leq E_t(\rho) \leq E_0$ i zakresu możliwego odporu $E_0 < E_u(\rho) \leq E_p$ niezbędna jest znajomość bazowych (wyjściowych) wartości parcia spoczynkowego $E(\rho = 0) = E_0$ (rys. 1).

Wskazania eurokodowe dotyczące parcia E_0 są bardzo ubogie i ograniczają się do zalecenia, aby przy gruntach prekonsolidowanych przyjmować współczynnik K_{0-OC} (7), warunkując spoczynkowy stan obciążenia przemieszczeniami konstrukcji $\rho = v < 5 \times 10^{-4} H$ [8a].

Jakkolwiek w Eurokodzie EC7-1 stan parcia spoczynkowego utożsamia się ze stanem naprężenia *in-situ*, to w p. 9.5.5 [8a] zaznacza się, że przy układaniu zasypki „*należy wziąć pod uwagę dodatkowe parcie wywołane przez zagęszczanie gruntu*”. Dalej nadmienia się, że „*dodatkowe parcie zależy od energii zagęszczania, miąższości warstw i schematu jazdy urządzenia zagęszczającego*” oraz, że „*należy stosować odpowiednie procedury zagęszczania, aby nie występowały niedopuszczalne przemieszczenia konstrukcji*”. Bliższych wskazań konkretyzujących te zalecenia, ani też wzorów obliczeniowych umożliwiających oszacowanie „*dodatkowego parcia gruntu*” nie podano.

W normie [7] przyjęto, że niezależnie od rodzaju i stanu gruntu rozkład jednostkowego parcia spoczynkowego jest liniowy $e_0 = \sigma_{h0} = (\gamma z + q) K_0$, a wielkością różnicującą wartość nacisku przekazywanego na ścianę jest współczynnik parcia K_0 uwzględniający nie tylko warunki gruntowe, ale i sposób wykonania konstrukcji oporowej. Wskazania obliczeniowe podano do dwóch przypadków:

- Konstrukcje wprowadzone w grunt naturalny – współczynnik $K_0 = K_{0r}$ gruntów rodzimych

$$K_{0r} = \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 (1 - \sin \phi) (1 + 0,5 \tan \beta) \quad (12)$$

gdzie:

ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu,

β – kąt nachylenia naziomu,

ξ_1 – współczynnik uwzględniający wpływ spójności ($c = 0, \xi_1 = 1$)

ξ_2 – współczynnik zależny od genezy gruntu,

ξ_3 – współczynnik reologiczny uwzględniający rodzaj i stan gruntu oraz fazę i okres pracy konstrukcji.

- Konstrukcje obsypywane – współczynnik $K_0 = K_{0z}$ gruntów zasypowych

$$K_{0z} = [0,5 - \xi_4 + (0,1 + 2\xi_4)(5I_s - 4,15)\xi_5] (1 + 0,5 \tan \beta) \quad (13)$$

gdzie:

I_s – wymagany wskaźnik zagęszczenia zasypki,

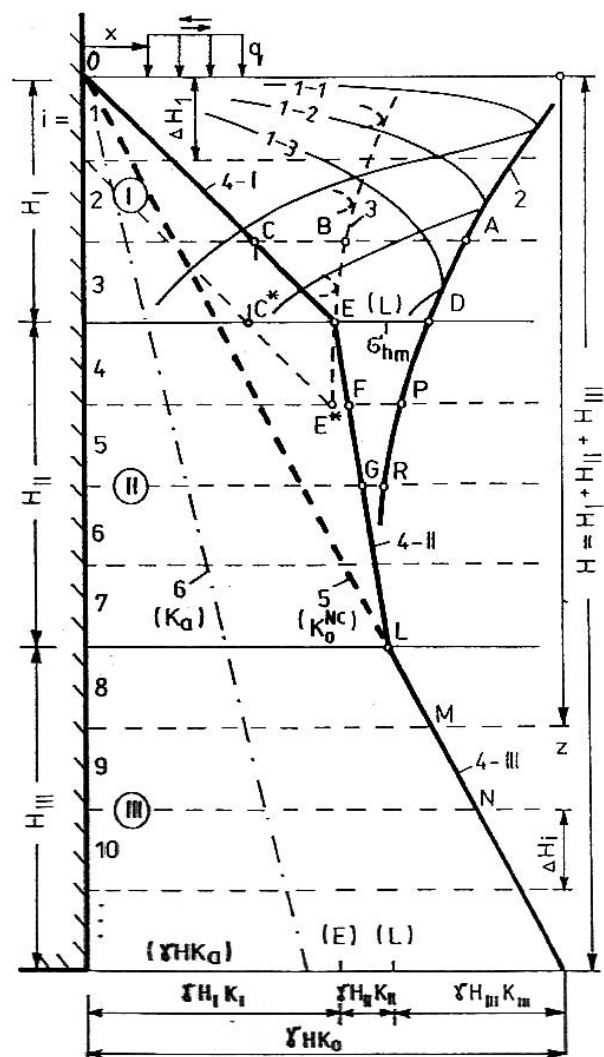
ξ_4 – współczynnik zależny od rodzaju gruntu zasypowego,

ξ_5 – współczynnik uwzględniający grubość warstw oraz technologię układania i zagęszczania zasypki.

Przedstawiając naświetlenie jakościowe zagadnienia, wymieniamy się jedynie uwarunkowania uwzględniane we wzorach (12), (13); wskazania ilościowe (wartości współczynników $\xi_1 \div \xi_5$) podane są w normie [7].

Przyjęcie liniowego rozkładu parcia spoczynkowego przy warstwowym zagęszczaniu zasypki jest uproszczeniem zagadnienia. W rzeczywistości bowiem rozkład ten jest krzywoliniowy (rys. 1b, linia 1), na co zwrócił uwagę K. Terzaghi, jakkolwiek nie wyjaśnił tego zjawiska.

Nieliniowość rozkładu parcia można uzasadnić teoretycznie, rozpatrując zmiany składowych naprężenia: pionowej $\sigma_{vi}(\gamma, q, x)$ i poziomej $\sigma_{hi} = e_i = \sigma_{vi} K_0$, jakie występują w poszczególnych warstwach $i = 1, 2 \dots n$ przy nadbudowie i zagęszczaniu nasypu za sztywną ścianą (rys. 4). Przyjmując w analizie, że grunt ma „pamięć naprężeniową” (model gruntu HSM



Rys. 4. Rozkład parcia gruntu na sztywną ścianę oporową przy warstwowym zagęszczaniu zasypki

[6, 13, 14]) i traktując naprężenia $\Delta\sigma(q)$ wzbudzone przy przejeździe obciążenia q jako prekonsolidację mechaniczną podłoża – w ogólnym przypadku wyznacza się trzy strefy parcia gruntu (rys. 4 – linie 4 – I; II; III). Odcinek „4 – III” będący przedłużeniem linii „5” określa rozkład parcia spoczynkowego gruntu normalnie skonsolidowanego NC ($K_{0-NC}(8)$, $OCR = 1$); w strefie H_{III} (na głębokości $z > H_I + H_{II}$) wpływ obciążenia zagęszczającego zanika, a stan naprężenia jest determinowany przez nacisk nadległych warstw. „Dodatkowe parcie” – nawiązując tu do eurokodowego określenia – występuje w górnej części ściany (w strefie $0 < z < H_I + H_{II}$); w interpretacji graficznej wyraża je pole ΔOEL .

Bliższą analizę tego zagadnienia przedstawiono w pracach [11, 13, 14], gdzie w pracy [13] podano również orientacyjne wskazania dotyczące zasięgu strefowego H_I , H_{II} przy różnych założeniach technologicznych. Tu natomiast poprzestaje się na ogólnym naświetleniu algorytmu obliczeniowego, aby zwrócić uwagę, że niektóre wskazania i nakazy eurokodowe (jak w tym przypadku, że „*należy wziąć pod uwagę dodatkowe parcie wywołane przez zagęszczanie zasypki*” [8a], p. 9.5.5.(1)P) są proste w sformułowaniu a trudne w realizacji.

Tabl. 2. Eurokodowe wartości względnych przemieszczeń ściany przy granicznych stanach parcia i odporu w gruntach niespoistych [8b]

Schemat przemieszczenia ściany	Przemieszczenia v_a/h [%] przy parciu czynnym E_a		Przemieszczenia v_p/h [%] wzbudzające odpór E_p	
	grunty luźne	grunty zagęszczone	grunty luźne	grunty zagęszczone
1	0,4 ÷ 0,5	0,1 ÷ 0,2	7 ÷ 25 (1,5 ÷ 4)	5 ÷ 10 (1,1 ÷ 2,0)
2	0,2	0,05 ÷ 0,10	5 ÷ 10 (0,9 ÷ 1,5)	3 ÷ 6 (0,5 ÷ 1,0)
3	0,8 ÷ 1,0	0,2 ÷ 0,5	6 ÷ 15 (1,0 ÷ 1,5)	5 ÷ 6 (0,5 ÷ 1,3)
4	0,4 ÷ 0,5	0,1 ÷ 0,2	–	–
Uwagi i objaśnienia	v_a – przemieszczenia „od gruntu” przy parciu $E_{min} = E_a$ h – wysokość ściany		v_p – przemieszczenia „do gruntu” przy odporze $E_{max} = E_p$ h – wysokość strefy odporowej (v/h) – wartości v/h wzbudzające odpór $E_{II} = 0,5 E_p$	

Przemieszczenia ściany warunkujące wystąpienie granicznych stanów parcia i odporu gruntu

Eurokodowe wartości względnych przemieszczeń ściany: $v_a/h = \bar{\rho}_a$ – warunkujące wystąpienie granicznego parcia czynnego E_a ; $v_p/h = \bar{\rho}_p$ – niezbędne do zmobilizowania granicznego

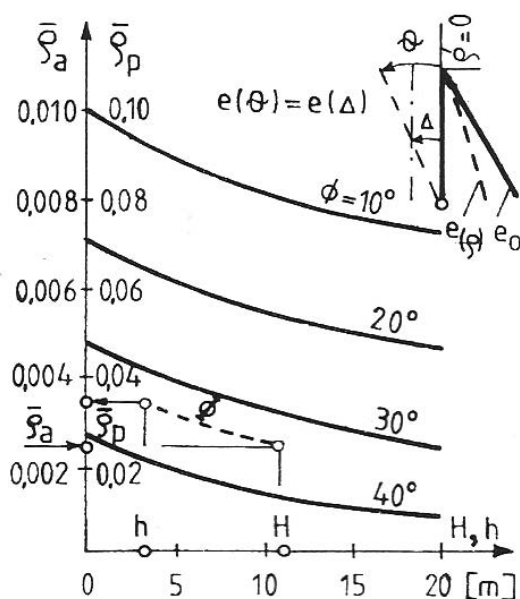
odporu E_p , określone dla gruntów niespoistych przy uwzględnieniu czterech schematów kinematycznych, podano w tabl. 2. O ile wskazania dotyczące powstawania parcia granicznego nie budzą zastrzeżeń (są zbieżne z danymi literaturowymi [1, 4, 10, 16]), to wartości v_p/h wydają się być zawyżone, szczególnie w odniesieniu do schematów przemieszczenia „1” i „2”.

Podstawowym zarzutem dotyczącym omawianych tu wskazań (tabl. 2) jest to, że określono je jedynie dla gruntów niespoistych. Jak zatem – projektując ściany szczelinowe lub ścianki szczelne – traktować grunty spoiste?

W normie [7] podano wskazania uogólnione, uzależniając wartości $\bar{\rho}_{a,p}(\phi, h)$ od kąta tarcia wewnętrznego gruntu ϕ (parametru charakteryzującego zróżnicowanie gruntów spoistych i niespoistych) oraz od wysokości ściany h w strefie parcia lub odporu (rys. 5). Nawiązując do badań porównawczych i wskazań literaturowych [3, 4, 16], w normie [7] przyjęto relację $\bar{\rho}_p = 10 \bar{\rho}_a$. Wartości $\bar{\rho}_{a,p}$ podano dla przemieszczeń kątowych ściany $\rho(\theta)$ zaznaczając, że przy przemieszczeniach równoległych ($\rho = \Delta$) należy przyjmować $\bar{\rho}_{a,p}(\Delta) = 0,5 \bar{\rho}_{a,p}(\theta)$.

Zależności interakcyjne dotyczące pośrednich wartości parcia i odporu gruntu

Przy sprawdzaniu stateczności konstrukcji (SGN) na ogół wyznacza się siły graniczne, korygując ich wartości przez współczynniki cząstkowe γ_F i γ_R , które według założeń normalizacyjnych mają zapewnić odpowiednie bezpieczeństwo budowli – a szerzej ujmując – właściwe ustalenia projektowe w aspekcie technicznym i ekonomicznym [2].



Rys. 5. Określanie przemieszczeń porównawczych $\bar{\rho}_a = \frac{\rho_a}{H}$ i $\bar{\rho}_p = \frac{\rho_p}{h}$ według normy [7]

wego oporu podając wskazania obliczeniowe odniesione do trzech schematów przemieszczenia ściany (tamże – zał. 1 p. 12; rys. Z. 1-15).

WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

1. Wskazania eurokodowe dotyczące obliczania granicznego oporu E_p należy uznać za bardzo niebezpieczne. Stosowanie wzorów wyprowadzonych przy założeniu płaskich powierzchni poślizgu (wypierania) przy bezkrytycznym przyjęciu w obliczeniach kąta szorstkości ściany $\delta_{\max} = \phi$ i dużej przyczepności (adhezji) $a_{\max} \approx 2/3 \cdot c$ może prowadzić do znacznego przeszacowania obliczeniowej siły utrzymującej (stabilizującej) $E_{p,d} = E_{p,k} / \gamma_R > E_{p-rz}$. Uwzględniając ponadto możliwość zaniżenia granicznej wartości parcia czynnego przy gruntach spoistych, a zatem niedoszacowanie siły destabilizującej $E_{a,d} = \gamma_F E_{a,k} \leq E_{a-rz}$ – przy wartościach współczynników $\gamma_R = 1,4$ i $\gamma_F = 1,35$; 1,50 obliczenia projektowe mogą prowadzić do błędnej oceny stateczności konstrukcji [2].
2. Przy obliczaniu granicznego oporu E_p , jak również oporu pośredniego $E_{II}(\rho_{dop})$, gdzie $\rho_{dop} \ll \rho_p = \nu_p$ – należy przyjmować współczynniki K_{p-k} wyznaczone przy założeniu krzywoliniowej powierzchni wypierania lub uwzględniać globalne współczynniki poprawkowe $\eta \approx E_{p-rz} / E_p(K_p) < 1$ podane w normie [7].
3. Wskazane eurokodowe są w wielu przypadkach niespójne lub fragmentaryczne, gdzie najistotniejsze mankamenty to:
 - brak objaśnienia parametru u wprowadzonego w znowelizowanych wzorach (8), (9) i jakichkolwiek wskazań aplikacyjnych;
 - brak wskazań dotyczących przemieszczeń ściany oporowej $\nu_a/h = \bar{\rho}_a$ i $\nu_p/h = \bar{\rho}_p$ w przypadku gruntów spoistych, a w konsekwencji możliwość oszacowania pośrednich wartości parcia i oporu gruntu jedynie przy gruntach niespoistych;
 - brak wskazań dotyczących rozkładu jednostkowego oporu jaki należy przyjmować przy poszczególnych schematach przemieszczenia ściany;
 - ogólnikowość wskazań dotyczących wartości i rozkładu parcia spoczynkowego w przypadku zagęszczanych gruntów zasypowych.
4. Większość uwag przedstawionych w artykule dotyczy wskazań w załączniku C [8b]. Zwraca się uwagę, że wskazania i dane w załącznikach eurokodowych mają charakter informacyjny. W przypadku niejasności lub zastrzeżeń można więc uwzględniać inne wskazania literaturowe, w tym również ustalenia i zalecenia podane w normie [7].

Wiele uwag oraz propozycje wskazań uzupełniających, jakie mogły być wprowadzone w „Załączniku Krajowym” [8c] przedstawiono w opracowaniu [12] (szkoda, że tylko niektóre zostały uwzględnione). W połowie roku 2015 przewiduje się rozpoczę-

cie prac związanych z nowelizacją Eurokodu EC7-1;2. Autorzy artykułu mają nadzieję, że przedstawione tu uwagi i analizy będą uwzględnione przy redagowaniu nowej edycji normy PN-EN [8]. A odpowiedź na pytanie postawione w tytule pozostawia się Czytelnikowi.

LITERATURA

1. Biernatowski K., Dembicki E., Dzierżawski K., Wolski W.: Fundamentowanie: t.1 Podłoże budowlane (t.1;2 – pod red. E. Dembickiego). Arkady, Warszawa 1987.
2. Brząkała W.: Bezpieczeństwo i niezawodność w geotechnice. Kalibracja częściowych współczynników bezpieczeństwa według Eurokodu EC7-1. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2013, 118-124.
3. Dembicki E.: Parcie, odpór i nośność gruntu. Arkady, Warszawa 1979.
4. Dembicki E., Tejchman A.: Wybrane zagadnienia fundamentowania budowli hydrotechnicznych. PWN, Warszawa 1981.
5. Kézdi Á.: Handbook of Soil Mechanics; vol.1. Soil Physics. Akadémiai Kiadó, Budapest 1974.
6. Mayne P.W., Kulhawy F.H.: K_0 – OCR Relationships in Soil. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE 6/1982, 851-871.
7. PN-83/B-03010. Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. PKNMiJ, 1983.
8. PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
 - 8a. Rozdział 9. Konstrukcje oporowe.
 - 8b. Załącznik C (AC:2009/AP1). Przykładowe sposoby wyznaczania wartości parcia gruntu.
 - 8c. Załącznik C (AC:2008). Przykładowe sposoby wyznaczania granicznych wartości parcia gruntu na ściany pionowe.
9. PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Badania.
10. Recommendations on Excavations. Ernst & Sohn, Berlin 2003.
11. Rymsha B.: Determination of loading and displacements of the back-filled retaining wall due to soil-structure interaction. Proc. XIV Int. Conference on SMFE, vol. II, Hamburg, 1997, 1245-1248.
12. Rymsha B.: Proponowane korekty: uściślenia normatywne w EN 1997-1:2004 w zakresie rozdz. 9 (konstrukcje oporowe) i zał.C. Maszynopis KT-254, Warszawa 2006.
13. Rymsha B.: Współczynnik parcia spoczynkowego gruntu przy warstwowym zagęszczeniu zasympki. Acta Scientiarum Polonorum – Architectura nr 12 (3)/2013, 85-97.
14. Seed R.B., Duncan J.M.: FE Analyses: Compaction-Induced Stresses and Deformations. Journal of the Geotechnical Engineering. ASCE 112-1/1986, 23-43.
15. Terzaghi K.: Large Retaining Wall Tests - Pressure of Dry Sand. Engineering News Record 112/1934, 136-140.
16. Weissenbach A.: Baugruben; Teil II. Berechnungsgrundlagen. Ernst & Sohn, Berlin-Düsseldorf 1975.