

PROIECTAREA LUCRĂRILOR DE SUSȚINERE A EXCAVAȚIILOR PRIN METODE SEMI-EMPIRICE

Cătălin CĂPRARU

Doctorand inginer, Universitatea Tehnică de Construcții București, e-mail:
cata.capraru@gmail.com

Anton CHIRICĂ

Profesor universitar doctor inginer, Universitatea Tehnică de Construcții
București, e-mail: achirica@utcb.ro

Abstract. The main objective for deep excavations is to ensure the overall stability of the retaining system and to limit the displacements of the neighbouring buildings and utilities. This can be achieved by designing a proper support system. The paper resumes the main issues arising in the design process of the retaining works and it describes several methods for estimating the apparent earth pressure diagrams which were proposed by different authors during the 20th century, for the semi-empirical design of retaining structure.

Key words: apparent earth pressure, retaining structures

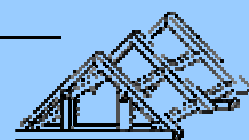
1. Introducere

Monitorizarea lucrărilor geotehnice și a modelelor la scară realizate în prima jumătate a secolului trecut au arătat că distribuția reală a presiunii pământului asupra pereților de susținere a excavațiilor diferă de cea teoretică (distribuție hidrostatică). S-au înregistrat, astfel, încărcări relativ mari în reazemele superioare ale pereților de sprijinire iar distribuția presiunii pământului pe adâncimea excavației nu a semnalat "nici o asemănare cu distribuția teoretică" (Terzaghi, 1936). În urma acestor serii de observații practice a fost dezvoltată noțiunea de „presiune aparentă a pământului” (Terzaghi și Peck, 1947). Noțiunea de „aparent” derivă din faptul că distribuția presiunii laterale a pământului nu a fost măsurată în mod direct dar, a fost determinată prin calcul,

pe baza măsurării încărcărilor preluate de șpraițuri și distribuirii acestora unei anumite suprafețe din masivul de pământ.

Diagramele înfășurătoare ale distribuției presiunii aparente a pământului au fost dezvoltate în anii 1960, pe baza datelor colectate la construcția proiectelor de excavații adânci în diferite locații din Anglia (Londra), Canada (Ontario și Toronto), Germania (Berlin și München), Japonia (Osaka și Tokyo), Mexic (Mexico City) și SUA (California, Chicago, Los Angeles și Washington).

Valorile înregistrate ale încărcărilor în șpraițurile de susținere și cele ale presiunii laterale a pământului asupra pereților de sprijinire flexibili prezintă o variabilitate foarte mare. Măsurătorile presiuni laterale a



pământul realizate în diferite categorii de terenuri, ale testelor pe modele și simulările pe calculator au condus la conștientizarea că presiunea laterală a pământului asupra pereților de sprijin prezintă concentrări în zona reazemelor acestora. Acest fenomen a fost denumit "boltă" fiind atribuit rigidității sprijinirilor peretelui de susținere, prin "atragerea" încărcărilor mai mari. Pentru a explica această variație a încărcărilor și pentru a permite optimizarea proiectării, încărcările de calcul și efectele acestora sunt adesea bazate pe distribuțiile teoretice ale presiunii pământului sau pe aplicarea factorilor empirici de reducere la diagrama presiunii aparente a pământului. După mai bine de 60 de ani de la introducerea diagramelor de distribuție a presiunii aparente a pământului, acestea sunt folosite cu precădere în practica de proiectare curentă, însă există o serie de aspecte legate de proiectarea lucrărilor de sprijinire care nu sunt rezolvate încă.

2. Sub aspectul practicii curente de proiectare a lucrărilor de susținere

2.1. Aspecte administrative

Utilizarea diagramelor presiunii aparente a pământului este preferată pentru simplitatea aplicării în practică și, în general, pentru rezultatele conservative referitoare la stabilitatea generală a lucrărilor de susținere. În contextul cerințelor contractuale și în cel al controlării deplasărilor induse de realizarea unor asemenea lucrări acest aspect devine problematic.

În ultima perioadă, proiectele de construcții subterane care implică realizarea unor ample lucrări de sprijinire, sunt de tipul „design and build”, contractele fiind atribuite pe baza criteriului celei mai mici oferte din punct de vedere economic. Prin comparație cu practica internațională de proiectare a

unor astfel de lucrări, aceasta conduce la o serie de conflicte fundamentale legate de proiectarea lucrărilor de susținere.

Beneficiarul lucrărilor trebuie să fie interesat și de efectele asupra construcțiilor învecinate, el solicitând totodată, și cel mai mic cost posibil.

Astfel că, proiectarea lucrărilor de sprijinire este lăsată la atitudinea Constructorului încurajând utilizarea materialelor disponibile în stoc. Pentru a obține oferta cea mai mică, constructorul încearcă să proiecteze sistemul de sprijinire cel mai puțin costisitor. În multe cazuri, sistemul cel mai economic nu este unul care va menține deplasările în limite acceptabile. Prin urmare, Beneficiarii emit cerințe care, se crede că, protejează cel mai bine interesul propriu, permițând în același timp o libertate foarte mare pentru Constructor.

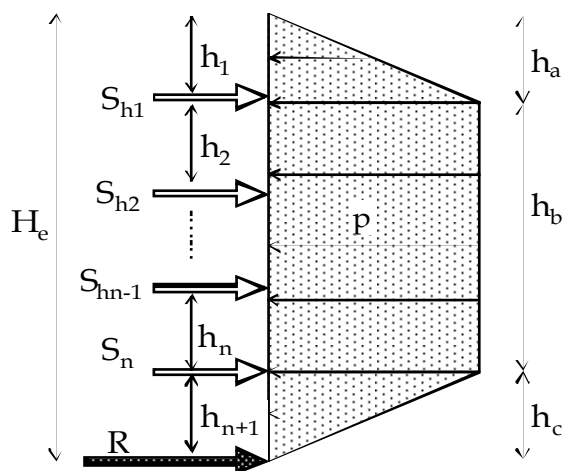
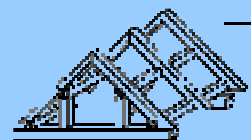


Fig. 1. Diagrama înfășurătoare a distribuției presiunii aparente a pământului

În practică internațională de proiectare, criteriile minime de performanță ale proiectului și execuției sunt stabilite pe baza specificațiilor tehnice emise de către Beneficiar. Acesta precizează încărcările minime de calcul, de obicei prin intermediul diagramelor înfășurătoare ale distribuției presiunii aparente a pământului (pe baza unor prescripții



tehnice în vigoare la nivel național și/sau internațional).

Restrângerea efectelor de influență asupra construcțiilor și rețelelor de instalațiilor adiacente se realizează prin impunerea unor deplasărilor limită. Constructorul își manifestă interesul de a reduce și mai mult costul de execuție a lucrărilor de sprijinire, de îndată ce oferta sa a fost acceptată. Astfel că valoarea „minimă” a presiunii pământului prevăzută de Beneficiar devine valoare „maximă” pentru Constructor și astfel, problemele tehnice se transformă în căi de conflict (Boone, 2005).

2.2. Aspecte referitoare la proiectare

Efectele și metodele pentru considerarea în calcul a unor presiuni orizontale mari nu sunt bine stabilite, deși unele diagrame de distribuție a presiunii aparente a pământului implică un oarecare efect acestora, de exemplu, pentru argilă plastic vârtoasă la tare (Peck 1969). În funcție de alegerea diagramei de presiune aparentă a pământului, încărcarea totală "aparentă" acționând asupra sistemului temporar de sprijinire a excavației poate fi mai mare decât încărcarea de calcul pentru structura permanentă. Opiniile cu privire la alegerea unei diagrame „potrivite” diferă foarte mult iar adoptarea unei astfel de diagrame a presiunii aparente a pământului în procesul de proiectare este de multe ori extrem de subiectivă.

Pentru pereții flexibili a fost propusă reducerea momentelor încovoietoare în cazul în care acestea sunt calculate pe baza presiunii active a pământului. Această ipoteză a fost demonstrată prin teste pe modele de către Rowe și Briggs, 1961. Alți autori sugerează ca încărcările exercitate de pământ asupra elementelor verticale ale pereților de sprijin susținuți

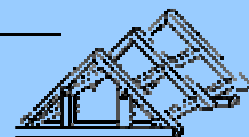
cu șpraițuri să fie reduse prin multiplicare cu un factor $2/3$ însă aplicabilitatea unei asemenea reduceri rămâne deschisă discuțiilor, deoarece există păreri contradictorii, în funcție de experiența locală dobândită.

Pereții „rigizi” de susținere, precum pereții mulați sunt proiectați folosind adesea presiunea pământului în stare de repaus mai degrabă decât diagramele de presiune aparentă a pământului. În acest fel apar discrepanțe privind forma distribuției presiunii pământului care depinde de structura de susținere iar limita tranziției dintre pereți „flexibili” și cei „rigizi” nu este bine stabilită.

Diagramele de distribuție a presiunii aparente a pământului se termină de obicei la baza excavației, caz în care principiile utilizate pentru a proiecta adâncimea de încastrare a peretelui sunt în primul rând empirice, Inginerul proiectant având la dispoziție mai multe instrumente pentru rezolvarea unor astfel de probleme: (a) calculul prin metoda echilibrului limită; prin care nu se poate conta pe o evaluare eficientă a interacțiunii teren-structură; (b) utilizarea modelului „grindă pe mediul elastic” pentru modelarea comportării pământului; (c) modelarea numerică care permite o evaluare bună a interacțiunii teren structură, dar poate conduce la rezultate eronate fiind puternic influențată de experiența utilizatorului privind utilizarea programelor de calcul, alegerea parametrilor geotehnici și a modelelor constitutive.

3. Metode de calcul pentru pereții flexibili de susținere

Din punct de vedere istoric, teoria plasticității a fost utilizată pentru calcularea distribuției presiunii laterale a pământului, care reprezintă problema cea mai importantă în



analiza lucrărilor de susținere. Conform acestei teorii, se presupune că o zonă de pământ atinge echilibrul plastic, astfel încât apare cedarea plastică. Aceasta zonă de pământ lunecă relativ în raport cu restul masivului de pământ, presupunându-se că pe suprafața de lunecare, rezistența pământului la forfecare a atins valoarea maximă. Se calculează apoi sarcina de cedare și se introduc factorii de siguranță pentru luarea în considerare a incertitudinilor și pentru limitarea deplasărilor, asigurându-se astfel că eforturile sunt departe de valorile lor maxime. Cu toate acestea, în codurile de proiectare și în practica curentă sunt adoptate diferite definiții și factori de siguranță, meninți să preîntâmpine incertitudinile.

3.1. Pereți de susținere autoportanți

Una dintre cele mai simple metode pentru asigurarea stabilității unui perete din palplanșe, a fost dezvoltată de Teng, 1962 și Tschebotarioff, 1973. Aceștia au propus determinarea lungimii de încastrare necesară atingerii echilibrului limită (adică factor de siguranță unitar) și multiplicarea ei cu un factor F_d . Valorile factorului F_d , se situează, de obicei, în intervalul 1.2÷2.0 (Clayton *et al.*, 1993).

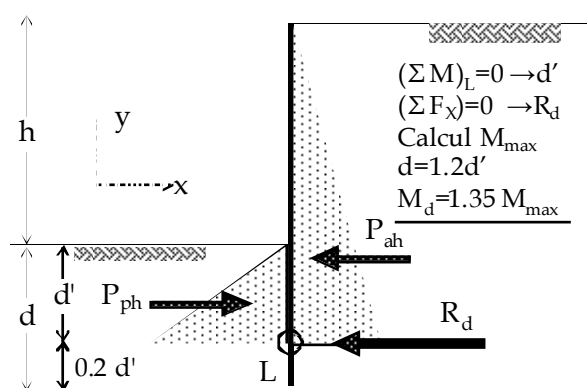


Fig. 2. Calculul pereților de susținere autoportanți prin metoda echilibrului limită

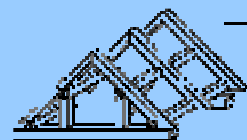
După cum se poate observa în Fig 2., presiunile în apropiere de baza peretelui sunt înlocuite cu rezultanta lor, R_d , aplicată în punctul L. Scrierea unei ecuații

de echilibru al momentelor în raport cu punctul L permite determinarea fișei d' , iar valoare rezultantei R_d se obține din ecuația de echilibru a forțelor orizontale. Distribuția momentelor încovoietoare între capătul peretelui și punctul L se poate deduce relativ ușor. Lungimea efectivă de încastrare d se consideră egală cu 20% mai mare decât fișa d' . Apoi este recomandată o verificare pentru a vedea dacă R_d este mai mică sau egală cu rezultanta presiunilor exercitate de pământ între d' și $1.2d'$.

3.2. Pereți de susținere sprijiniți cu spraișuri

Scopul metodelor semi-empirice de evaluare a presiunii nu este acela de a reproduce distribuția exactă a presiunii ci de a oferi o bază sigură pentru proiectare, care să conducă, prin calculul structural, la momente încovoietoare apropiate de cele care ar putea apărea în realitate. Astfel, pentru evaluarea presiunii aparente a pământului au fost propuse de-a lungul timpului, pe baza măsurătorilor proiectelor reale sau a testelor pe modele, diferite diagrame înfășurătoare. În Fig. 1 este prezentată o astfel de înfășurătoare a diagramei presiunii aparente a pământului (H_e - adâncimea excavației, S - forța axială în reazemul peretelui de susținere, R - forța de reacțiune dezvoltată sub baza excavației, p - valoarea maximă a diagramei de presiuni). În funcție de tipul pământului (coeziv sau necoziv), caracteristicile diagramei înfășurătoare de presiuni aparente descrisă în Fig. 1 diferă de la un caz la altul, ele fiind prezentate în Tabelul 1.

Cu toate acestea, în urma calculelor prin metode numerice conduse de Boone, 2003, a rezultat faptul că distribuția presiunii pământului depinde foarte mult de rigiditatea peretelui. Acesta este un factor important în evaluarea interacțiunii teren-structură în cazul lucrărilor de susținere a excavațiilor.



Tabelul 1. Caracteristici ale diagramei înfășurătoare a presiunii aparente a pământului pentru calculul sprijinirilor

Tip de pământ	h_a	h_b	h_c	p (valoarea maximă a presiunii)	Referință
necoeziv	0.0	H_e	0.0	$0.65K_a \gamma H_e$ cu $K_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$	Terzaghi și Peck (1947)
	$0.67H_1$	$H_e - h_a - h_b$	$0.67H_{n+1}$	$P_{ah} / (H_e - 1/3H_1 - 1/3H_{n+1})$	Sabatini <i>et. al.</i> (1999)
coeziv	$0.25H_e$	$0.50H_e$	$0.25H_e$	$(0.2 \div 0.4) \gamma H_e$	Terzaghi și Peck (1947)
	$(0.6 \div 0.8)H_e$	0.0	$(0.2 \div 0.4)H_e$	$0.5 \gamma H_e$	Tschebotarioff (1951)
	$0.20H_e$	$0.60H_e$	$0.20H_e$	$0.2 \gamma H_e$	Schnabel (1982)
	$0.25H_e$	$0.50H_e$	$0.25H_e$	$(0.2 \div 0.4) \gamma H$	Ulrich (1989)
	$0.20H_e$	$0.60H_e$	$0.20H_e$	$(0.2 \div 0.32) \gamma H$	Winter (1990)
	$0.67H_1$	$H_e - h_a - h_b$	$0.67H_{n+1}$	$(0.2 \div 0.4) \gamma H$	Sabatini <i>et. al.</i> (1999)

Pentru a ține seama de acest aspect, Boone, 2005 a propus o metodă de calcul a pereților de susținere flexibili prin folosirea rezultatelor modelării numerice. Metoda bazată pe calcule semi-empirice, este prezentată în Fig. 3, fiind descrisă în continuare.

În prima etapă este necesară trasarea diagramei de presiuni laterale, conform teoriei Rankine. Apoi se va propune o valoare a rigidității relative a structurii de susținere, $S_r = EI / (h^4 \gamma)$ unde: E-modulul de elasticitate al peretelui, I - momentul de inerție al peretelui (pe unitatea de lungime), h - distanța verticală medie între orizonturile de sprijiniri și γ - greutatea pământului.

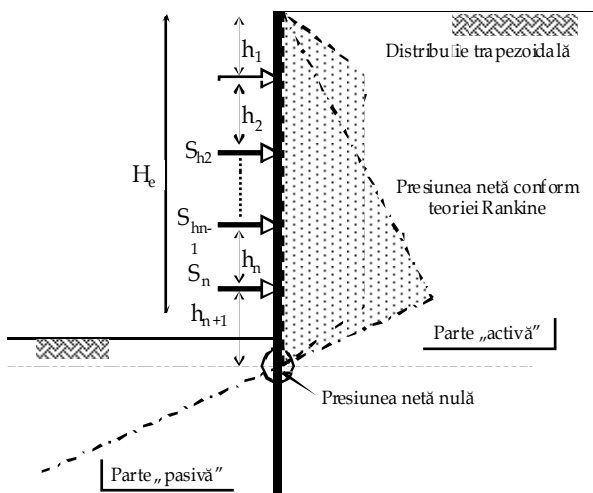


Fig. 3. Estimarea presiunii pământului asupra lucrărilor de susținere (Boone, 2005)

Este necesară apoi, stabilirea încărcării totale active și localizarea punctului de anulare a acesteia conform Fig. 3.

În urma trasării unei diagrame trapezoidale, alese pe baza experienței Inginerului proiectant, rezultă diagrama de presiuni pe peretele de susținere prin combinarea celor două diagrame trasate anterior.

Calculul eforturilor în peretele de susținere și în elementele sistemului de sprijinire se poate realiza relativ ușor prin rezolvarea sistemului static nedeterminat astfel rezultat.

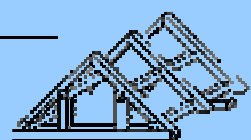
Această metodă sistematică de calcul oferă rezultate foarte apropiate de măsurătorile modelelor pe teste, putând fi considerată în proiectarea lucrărilor de susținere sprijinite cu șpraițuri.

4. Concluzii

Proiectarea lucrărilor de susținere a excavațiilor necesită o bogată experiență locală. Pentru estimarea prin calcul a eforturilor care se dezvoltă în elementele sistemului de sprijinire s-au realizat cercetări prin teste pe modele cât și pe lucrări aflate în exploatare.

Acestea au condus la diferite metode de evaluarea a presiunii aparente a pământurilor necesară pentru dimensionarea lucrărilor de susținere.

Acest aspect intervine în domeniul construcțiilor subterane la nivelul relațional dintre părțile participante (Beneficiar și Constructor) la procesul de realizare al



obiectivelor. În multe cazuri, din cauza aspectelor economice, problemele tehnice se transformă în conflicte.

Scopul cercetării în domeniul lucrărilor de susținere este de a regăsi metode de calcul care să reproducă într-un mod fidel comportamentul real al acestor tipuri de lucrări, lămurind totodată și problemele tehnice la nivelul practicii curente de proiectare.

Cu toate că, pentru estimarea stării de eforturi în lucrările de sprijinire sunt disponibile o serie de concepte și metode care conduc la rezultate apropiate de comportamentul real al acestora, există încă, necesitatea unor metode care să permită evaluarea comportamentului construcțiilor și rețelelor de instalații aflate în zona de influență a lucrărilor de susținere.

Metodele ținând seama de complexitatea și importanța factorilor implicați în comportamentul construcțiilor adiacente vor trebui calibrate prin teste pe modele și măsurători pe lucrări reale, putând determina astfel, parametrii necesari evaluării interacțiunii dintre construcțiile nou-proiectate și construcțiile existente.

BIBLIOGRAFIE

- Boone S. J. (2003), *Design of Deep Excavations in Urban Environments*, teză de doctorat, Universitatea din Toronto, Toronto.
- Boone S. J., Westland J. (2005), *Estimating displacements associated with deep excavations*, în: Kwast E. A., Bakker K. J., Broere W., Bezuijen A. (Editori), *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Proceeding of the 5th International Symposium* TC28, Taylor & Francis, Amsterdam, pag. 817-822.
- Clayton C. R. I., Milititsky J., Woods R. I. (1993), *Earth pressure and earth retaining structures*, Ediția a doua, Chapman & Hall, London.
- Peck R. B. (1969), *Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground: State of the Art Report*, în: *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering*, Mexic, pag. 225-290.
- Rowe P. W., Briggs A. (1961), *Measurements on Model Strutted Sheet Pile Excavations*, în: *5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Dunod, Paris, pag. 473-478.
- Sabatini P. J., Pass D. G., Bachus R. C. (1999), *Ground Anchors and Anchored Systems, FHWA Report No. FHWA-IF-99-015*, FHWA, Washington D. C.
- Schnabel H. J. (1982), *Tiebacks in Foundation Engineering and Construction*, McGraw-Hill Book Company Inc., New York.
- Terzaghi K. (1936), *A fundamental fallacy in earth pressure computations*. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers* **23(2)**: 71-88.
- Terzaghi K., Peck R. B. (1947), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, New York.
- Teng W. C. (1962), *Foundation design*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Tschebotarioff G. P. (1951), *Large Scale Earth Pressure Tests With Model Flexible Bulkheads, Final Report to Bureau Of Yards And Docks*, US Navy.
- Tschebotarioff G. P. (1973), *Foundations, retaining and earth structures*, McGraw-Hill, New York.
- Ulrich E. J. Jr. (1989), *Tieback Supported Cuts in Overconsolidated Soils*, *Journal of Geotechnical Engineering* **115(4)**:521-545.
- Winter D. G. (1990), *Pacific First Center Performance of the Tie-Back Shoring Wall* în Lambe P. C., Hansen L. A. (Editori) *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE, Ithaca, New York, pag. 764-777.

Primit: 10 aprilie 2012 • Acceptat în forma finală: 19 aprilie 2012

