

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВЗАЄМОДІЇ БІПІРАМІДАЛЬНИХ ПАЛЬ З ОСНОВОЮ

### Вступ

В процесі заглиблення призматичних палей між палею та верхніми шарами ґрунту утворюється отвір, що призводить до неповної реалізації несучої спроможності призматичних палей. Недовикористання опору верхніх шарів ґрунту в традиційних призматичних палях примусило звернутись до пошуку нових удосконалених видів конструкцій палей — пірамідальних та біпірамідальних. Залучення верхніх шарів ґрунту в роботу фундаменту особливо важливо для України, де доволі міцний верхній шар ґрунту, незначна глибина промерзання, наявність посадочних ґрунтів, низький рівень ґрунтових вод.

### Постановка задачі, визначальні співвідношення

Пірамідальні та біпірамідальні палі — досконаліша конструкція палі, що висить, так як умови контакту з ґрунтом за рахунок кінчності їх геометрії значно покращуються. Як відомо, зона ущільнення від забивання палей використовується під час осідання палі під навантаженням. Із польових досліджень зона деформації від осідання пірамідальних палей під час дії навантажень складає 30—40 % зони їх ущільнення, тоді як у призматичних палей ця величина сягає лише 20—30 %. Результати експериментальних досліджень [1, 2] показали, що конструкції такого виду є економічніші за наявні, оскільки опір біпірамідальних палей за умови рівних об'ємів заглибленої частини та рівних осадках в 2,3÷2,8 рази вище ніж у призматичних і в 1,7÷2,5 рази вище, ніж у пірамідальних. Це підтверджує аналіз коефіцієнтів (рис. 1), що характеризують здатність утворення зон ущільнення, запропонованих Л. І. Седовим, як визначальні в процесі обчислення кінцевого опору корабля. Обчислюючи опір палей, величини цих коефіцієнтів аналогічно визначались за формулами:

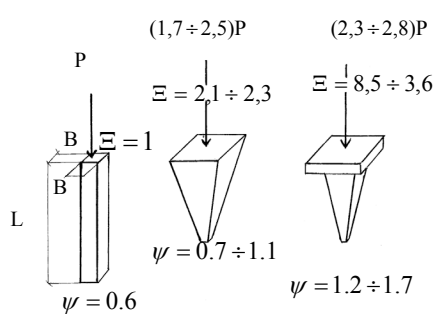


Рис. 1. Коефіцієнти Л. І. Седова

коефіцієнт «гостроти»  $\psi = B/\sqrt{V}$ ;

коефіцієнт «повноти»  $\xi = V/LB^2$  або  $\Xi = 1/\xi$ ,

де  $B$  — розмір поперечного перетину в голові палі;  $L$  — довжина заглибленої частини палі;  $V$  — об'єм заглибленої частини палі.

Наявність найбільшої зони ущільнення у біпірамідальних палей [2] в порівнянні з призматичними та пірамідальними дозволяє повніше використовувати несучу спроможність ґрунту верхніх шарів і дає можливість використовувати їх в слабких ґрунтах.

Із експериментальних досліджень А. І. Моргуна [2] відомо, що одна із переваг біпірамідальних палей — високий показник відносного опору одиниці об'єму заглибленої частини палі ( $P/V$ ), який в 4,1 рази більший ніж в призматичних палях в середніх ґрунтових умовах та в 4,9 рази більший в слабких водонасичених ґрунтах. Таким чином, біпірамідальні палі мають найменшу матеріаломісткість, з достатньою величиною загального опору.

З огляду на використання в практиці будівництва пірамідальних та біпірамідальних палей питання розрахункового визначення їх опору вертикальному навантаженню потребує подальшого розвитку.

Методи розрахунку палей та палевих фундаментів згідно чинних БНіП мають недостатню точність. Це пояснюється використанням відносно простих розрахункових моделей для системи «па-

ля—основа» та складністю механізму взаємодії палі з основами. Тому розроблення та застосування надійніших методів розрахунків залишається актуальною проблемою.

Завдяки розвитку сучасних ЕОМ з'явилась можливість використання числових методів, які дозволяють відстежувати поведінку паль та основ в процесі навантаження. При цьому з'являється можливість вивчити широке коло явищ, які характеризують спільну роботу палі та ґрунту, наприклад розподіл сил тертя ( $\tau$ ) по боковій поверхні та нормальних напружень ( $\sigma$ ) під вістрям палі і, як результат, величину загального опору палі з заданим осіданням. В статті за числовим методом граничних елементів з використанням розв'язків Міндліна для пружної півплощини проведено розрахунок опору біпірамідальних паль та визначено пружно-деформований стан по боковій поверхні палі (лінійна задача). Розв'язки Міндліна є ядрами розрахункового граничного інтегрального рівняння [3] і застосування їх до задач про опір палі вертикальному навантаженню полягає в тому, що точка прикладання  $P = 1$  і точка нагляду, в якій виникають вертикальні переміщення, знаходяться на боковій поверхні або на нижньому кінці палі. Розроблена математична модель потребує введення фізичних параметрів основи (модуля деформацій  $E$ , коефіцієнта поперечного розширення  $\nu$ ), а також параметрів, що описують геометрію та топологію біпірамідальної палі [2].

Враховуючи, що поздовжнє стискання паль довжиною до 12 м не значне, палю при розрахунку можна вважати абсолютно жорсткою. На можливість прийняття такої гіпотези вказують численні експерименти [1], а також теоретичні дослідження [4]. Розходження під час визначення напруженого стану по боковій поверхні ( $\tau$ ) та вістрі ( $\sigma$ ) для абсолютно жорсткої палі та палі, що має стиснений стовбур не перевищує 3 %, якщо  $L/d > 10$  [4].

У випадку абсолютно жорсткої палі вертикальні переміщення усіх точок на боковій поверхні та вістрі рівні переміщенню точок голови і граничні умови можна записувати  $u_{11} = u = \text{const}$ ;  $u_{12} = u_{21} = u_{22} = 0$ .

Для числової реалізації задачі розрахунку біпірамідальних паль за МГЕ здійснювались [3]: 1) дискретизація бокової поверхні біпірамідальної палі (граничні елементи поверхні елементарних циліндрів); 2) дискретизація площі нижнього кінця палі (граничні елементи елементарні кільця); 3) визначення коефіцієнтів глобальної матриці (інтегрування фундаментального розв'язку Міндліна для переміщення від дії зосередженої сили в середині пружної півплощини); 4) розв'язання системи алгебричних рівнянь (вільні члени цієї системи є величини заданих осадок) визначають сили тертя ( $\tau$ ) та нормальні напруження в площині нижнього кінця палі ( $\sigma$ ); 5) шляхом числового інтегрування за квадратурами Гаусса визначається загальна величина сили тертя і сили під вістрям.

Сума цих величин визначає загальну величину опору палі з заданою осадкою.

Геометричні розміри біпірамідальних паль показано на рис. 2. В таблиці дані порівняння результатів числового моделювання за МГЕ теоретичних та дослідних даних опору біпірамідальних паль.

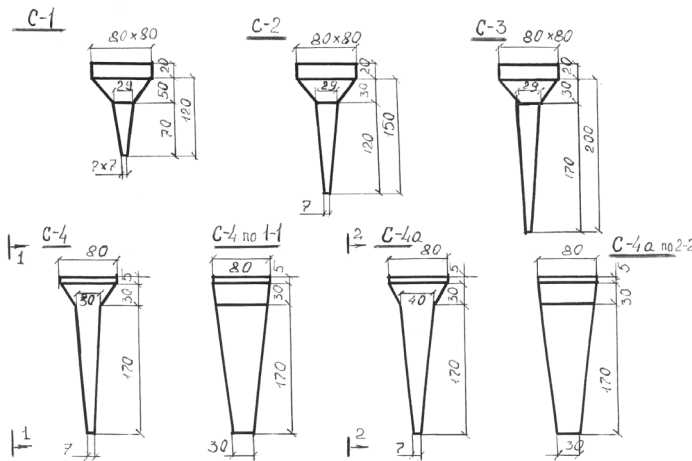


Рис. 2. Геометрія біпірамідальних паль

Марка палі	C— 1	C— 2	C— 3	C— 4	C— 4a
Рекспер, кН	264	328	394	411	409
Ртеорет., кН	265	306	368	387	396
$\nu$	1,63	1,56	1,51	1,2	1,13
Процент відхилення	0,3%	7,18%	7,06%	6,2%	3,3%

Результати числового моделювання підтверджують дані експериментів [1, 2], що практично все зовнішнє вертикальне навантаження біпірамідальної палі передається основі через бокову поверхню.

### Висновки

Порівняння теоретичних розрахунків за запропонованою моделлю з експериментальними даними [2] в межах лінійної залежності інтегрального графіка «навантаження — осідання»

дає розбіжність  $< 7,2 \%$ , що підтверджує спроможність МГЕ оцінювати опір біпірамідальних паль.

Результати експериментальних та теоретичних даних високої несучої здатності біпірамідальних паль, фізична можливість їх заглиблення до заданої відмітки (висока точність заглиблення) дають можливість характеризувати біпірамідальні палі як ефективні види пальових фундаментів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бартоломей А. А. Основы расчета ленточных свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам. — М.: Стройиздат, 1982. — 221 с.
2. Моргун А. М., Моргун А. С. Конструкції біпірамідальних паль та їх розрахунок за методом граничних елементів. — Вінниця: Універсум — Вінниця, 2001. — 127 с.
3. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках паль. — Вінниця: Універсум-Вінниця, 2000. — 130с.
4. Бенерджи П., Батерфилд Р. Методы граничных элементов в прикладных науках. — М: Мир, 1984. — 494 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Надійшла до редакції 7.10.03  
Рекомендована до опублікування 22.10.03

*Моргун Алла Серафимівна* — доцент кафедри промислового та цивільного будівництва; *Демчук Віталій Володимирович* — студент Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет.