

# Zastosowanie analizy statystycznej i wymiarowej do prognozy odprężenia iłó

Dr inż. Marzena Lendo-Siwicka<sup>1</sup>, dr inż. Bartosz Szeląg<sup>2</sup>, dr inż. Piotr Siwicki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SGGW w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

<sup>2</sup>Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki

W wielu rejonach Polski występują ily zaliczane powszechnie do gruntów ekspansywnych. Zdolność nienasyconych wodą iłó do zmian objętości zarówno pęcznienia, jak i odprężenia jest przyczyną wielu awarii obiektów budowlanych [5]. Zjawisko pęcznienia jest definiowane jako proces polegający na wzroście objętości gruntu na skutek zwiększenia jego wilgotności i działania różnych roztworów chemicznych, głównie na pęczniące minerały ilaste [4]. Odprężenie gruntu, które bardzo często mylnie utożsamia się ze zjawiskiem pęcznienia to proces polegający na wzroście objętości gruntu (zwiększanie wartości wskaźnika porowatości  $e$ ) na skutek zmniejszenia obciążenia zewnętrznego (zdjęcia nadkładu gruntu) przy zachowanej stałej wilgotności i jest związany z ciśnieniem powietrza  $u_a$ . Odprężenie gruntu jest zjawiskiem fizycznym, które potwierdza teorię, że grunt jest ośrodkiem sprężysto-plastycznym. Odprężenie może powodować zmianę równowagi wilgotnościowej w profilu gruntowym, ale nie jest ono wynikiem zmiany stanu równowagi. Odciążenie gruntu wywołuje odprężenie podłoża (gruntu), przemieszczenie ku górze. Zmniejsza się wartość naprężenia całkowitego i efektywnego w szkieletie gruntowym, która powoduje zmniejszenie sił wewnętrznych działających pomiędzy cząstkami gruntu. Cząsteczki wody i powietrza rozprężają się, powodując zwiększenie objętości gruntu (odprężenie).

Zmiany objętości iłó spowodowane ich pęcznieniem i/lub odprężeniem są wyrażane powszechnie przez zmiany wskaźnika porowatości  $\Delta e$  [1]. Określenie zmian wskaźnika porowatości w gruntach nienasyconych wodą jest bardziej złożone niż w gruntach w pełni nasyconych ze względu na stan naprężenia, który zależy od składowej pionowej naprężenia ( $\sigma_v - u_a$ ) i ciśnienia ssania ( $u_a - u_w$ ). Wartość całkowitego odprężenia podłoża w warunkach jednoosiowych jest sumą odprężenia pojedynczej warstwy gruntu  $\Delta h_p$ , która zależy od zmian wskaźnika porowatości  $\Delta e$  (1).

$$\Delta e = c_\sigma \log \frac{(\sigma - u_a)_k}{(\sigma - u_a)_p} + c_s \log \frac{(u_a - u_w)_k}{(u_a - u_w)_p} \quad (1)$$

gdzie:

$c_\sigma$  – wskaźnik odprężenia zależny od naprężenia efektywnego w gruntach nienasyconych,

$c_s$  – wskaźnik odprężenia zależny od ciśnienia ssania.

Procedura przeprowadzania tego rodzaju obliczeń jest czasochłonna, a trudność polega na określeniu w badaniach edometrycznych parametrów niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń wzorem (1). Wobec tego ustalenie prostych równań empirycznych opisujących wyżej wymienione zjawiska pozwoli w łatwy i prosty sposób oszacować przybliżone wartości odprężenia gruntu. W artykule skupiono się jedynie na rozpoznaniu modelu matematycznego opisującego zjawisko odprężenia.

## PROCEDURA BADAWCZA

Próbki iłó do badań laboratoryjnych pobrano z podłoża stacji Metra Warszawskiego „Marymont” (stacja A19) podczas wykonywania głębokiego wykopu. Próbki ılı o nienaruszonej strukturze – kostki o wymiarach  $0,3 \times 0,3 \times 0,3$  m – pobrano spod projektowanej płyty dennej stacji na głębokości około 10 m. Badania laboratoryjne podstawowych właściwości iłó obejmowały określenie składu mineralnego, uziarnienia, wilgotności naturalnej, granic Atterberga, całkowitej powierzchni właściwej ( $279,08 \text{ m}^2/\text{g}$ ), retencji gruntowo-wodnej, ciśnienia pęcznienia ( $100 \div 285 \text{ kPa}$ ) i wytrzymałości na ścinanie ( $\phi' = 18 \div 200$ ,  $c' = 14 \div 15 \text{ kPa}$ ). Dla badanych iłó obliczono średnią wartość aktywności koloidalnej wynoszącą 0,91, co oznacza, że badane próbki iłó według Grabowskiej Olszewskiej [4] wykazują potencjalnie wysoką ekspansywność. Właściwości badanych iłó zestawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Podstawowe właściwości badanych iłó

| Parametr                      | Jednostka        | Wartość       | Parametr          | Jednostka | Wartość     |
|-------------------------------|------------------|---------------|-------------------|-----------|-------------|
| Podstawowe parametry fizyczne |                  |               | Zawartość frakcji |           |             |
| Wilgotność $w$                | %                | 22,6 ÷ 34,22  | piaskowa          | %         | 0,00 ÷ 10,0 |
| Gęstość objętościowa $\rho_d$ | t/m <sup>3</sup> | 1,43 ÷ 1,83   | pyłowa            | %         | 8,0 ÷ 62,0  |
| Porowatość $n$                | %                | 33,0 ÷ 47,0   | iłowa             | %         | 38,0 ÷ 88,5 |
| Granica płynności $w_l$       | %                | 74,2 ÷ 92,30  | Skład mineralny   |           |             |
| Wskaźnik plastyczności $I_p$  | %                | 46,05 ÷ 53,63 | beidelit          | %         | 44,1 ÷ 46,4 |
| Granica plastyczności $w_p$   | %                | 23,45 ÷ 44,29 | illit             | %         | 0 ÷ 4,6     |
| Aktywność koloidalna $A$      | –                | 0,69 ÷ 1,41   | kaolinit          | %         | 9,4 ÷ 11,2  |
|                               |                  |               | getyt             | %         | 0,7 ÷ 4,2   |
|                               |                  |               | syderyt           | %         | 0,0 ÷ 0,3   |

Tabl. 2. Zestawienie parametrów odkształceniowych odprężenia badanych próbek

| Oznaczenie | Odprężenie   |             |         |                 | $t_{p1}$ | $t_{p2}$ |
|------------|--------------|-------------|---------|-----------------|----------|----------|
|            | $\Delta e_o$ | $\bar{M}_o$ | $c_o$   | $\varepsilon_o$ |          |          |
|            | [-]          | [MPa]       | [-]     | [%]             | [h]      | [h]      |
| 1          | 0,0067       | 53,31       | 0,0056  | 0,36            | 0,25     | 11       |
| 2          | 0,0044       | 70,09       | 0,0036  | 0,22            | 0,01     | 0,7      |
| 3          | 0,0050       | 68,17       | 0,004   | 0,28            | 0,015    | 8,7      |
| 4          | 0,0087       | 41,72       | 0,0073  | 0,4             | 3        | 9        |
| 5          | 0,0039       | 68,97       | 0,00343 | 0,28            | 0,002    | 15       |
| 6          | 0,0108       | 31,23       | 0,0090  | 0,61            | 0,003    | 9,5      |
| 7          | 0,0110       | 29,18       | 0,0093  | 0,62            | 0,004    | 15       |
| 8          | 0,0068       | 52,67       | 0,0057  | 0,36            | 0,0018   | 0,03     |
| 9          | 0,0067       | 53,37       | 0,0055  | 0,33            | 0,085    | 9        |
| 10         | 0,0015       | 92,85       | 0,0016  | 0,19            | 0,0009   | 0,12     |
| 11         | 0,0057       | 51,76       | 0,0047  | 0,34            | 0,00055  | 8        |
| 12         | 0,0005       | 70,29       | 0,00041 | 0,31            | –        | 0,0007   |
| 13         | 0,0030       | 47,54       | 0,0014  | 0,24            | –        | 0,013    |

Badania właściwości odkształceniowych przeprowadzono w edometrach standardowych. Próbkę gruntu o średnicy 50 mm i wysokości 20 mm umieszczono w pierścieniach edometrycznych zabezpieczonych lateksową osłoną przed zmianami wilgotności. Próbkę gruntu obciążono do wartości naprężenia 200 kPa. Badania, w których zmiany wilgotności początkowej i końcowej były powyżej 1%, nie były wykorzystane w analizie. Po ustabilizowaniu się zmian wysokości badanych próbek iłów odciążono je do wartości naprężenia 12,5 kPa (minimalne obciążenie w edometrze), modelując odprężenie gruntu. Przykładową krzywą odprężenia przedstawiono na rys. 1. Wyniki badań uzyskanych z przeprowadzonych eksperymentów wykorzystano do wyznaczenia wielkości charakteryzujących odprężenie iłów,

mianowicie: edometrycznego modułu odprężenia  $\bar{M}_o$ , wskaźnika odprężenia  $c_o$ , odkształcenia odprężenia  $\varepsilon_o$  oraz zmian wskaźnika porowatości  $\Delta e_o$  podczas odprężenia gruntu i zestawiono tabl. 2.

Wyznaczono także charakterystyczny przebieg odprężenia w funkcji czasu, na podstawie którego wprowadzono dodatkowy podział krzywej zmian objętości początkowych (rys. 1) na dwie fazy: zmiany objętości wstępne, których koniec wyznacza czas  $t_{p1}$  i pierwotne, których koniec wyznacza czas  $t_{p2}$  [6].

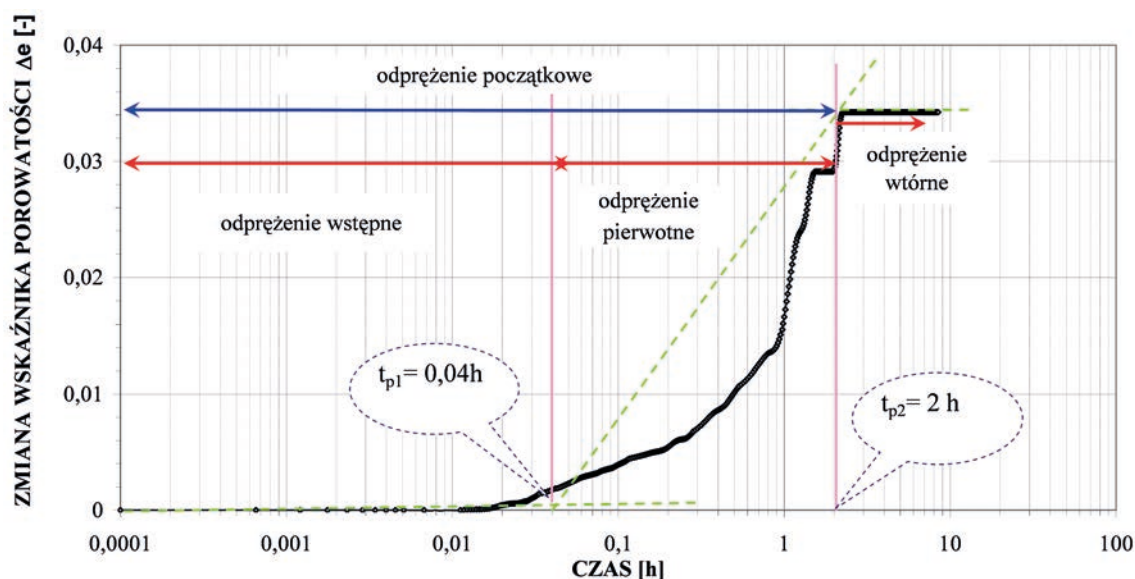
## WYBÓR CZYNNIKÓW FUNKCJI

### Wprowadzenie

W analizie założono, że zmiany objętości iłów spowodowane odprężeniem zależą od: naprężenia początkowego, przyrostu naprężenia, zawartości frakcji ilastej, wilgotności początkowej iłów, gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, czasu początkowego zmian objętości  $\Delta e = f(\sigma_o, \Delta\sigma, f_i, w, \rho_d, t_{p2})$ . W celu wyodrębnienia czynników funkcji, wykorzystując program STATGRAPHICS, w pierwszej kolejności badano znaczenie pojedynczych parametrów gruntowych na wskaźnik porowatości. W kolejnym etapie badano znaczenie kombinacji parametrów gruntowych (czynników funkcji) najbardziej wpływających na zmiany wskaźnika porowatości. Do oceny dopasowania wartości zmian wskaźników porowatości iłów otrzymanych z badań i obliczonych na podstawie zaproponowanych zależności wykorzystano współczynnik determinacji krzywoliniowej  $R^2$ , obliczony dla funkcji liniowej, a ze względu na nieliniowość proponowanych zależności zastosowano także błąd średniokwadratowy MSE:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta e_{si} - \Delta \hat{e}_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (\Delta e_{si} - \Delta \bar{e}_s)^2} \quad (2)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta e_{si} - \Delta \hat{e}_{si})^2}{n} \quad (3)$$



Rys. 1. Krzywa odprężenia w czasie

Im większa wartość współczynnika determinacji  $R^2$ , tym lepiej jest dopasowana zależność pomiędzy zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi. Im mniejszy błąd  $MSE$ , tym lepiej jest dopasowany model.

Na podstawie tak przygotowanych danych określono czynnik najbardziej wpływający na kształtowanie zmian wartości wskaźnika porowatości  $\Delta e$ . Otrzymane wyniki obliczeń programem STATGRAPHICS zestawiono w tabl. 3.

Największą wartość współczynnika determinacji krzywoliniowej  $R^2$  otrzymano, przyjmując wszystkie zmienne niezależne, jakie wprowadzono do programu. Biorąc jednak pod uwagę niewielkie zmiany wartości współczynnika determinacji krzywoliniowej  $R^2$ : czterech, pięciu i sześciu zmiennych niezależnych, do równania przyjęto trzy zmienne niezależne. Błąd średniokwadratowy  $MSE$  także w niewielkim stopniu zmniejsza się po przekroczeniu liczby trzech zmiennych niezależnych. Do zweryfikowanego równania postaci funkcji przyjęto następujące zmienne niezależne: zmiana składowej pionowej naprężenia  $\Delta\sigma$ , czas odprężenia  $t_{pII}$  i gęstość objętościowa szkieletu gruntowego  $\rho_d$ .

## Wybór funkcji z wykorzystaniem analizy statystycznej

Wykorzystując program STATGRAPHICS, przeprowadzono wybór funkcji. Badaną zależność wprowadzono do programu STATGRAPHICS (różne postacie funkcji), który przy użyciu funkcji „regresja nieliniowa” poszukiwał wartości parametrów tej zależności ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ ) metodą najmniejszych kwadratów oraz określał dla każdej funkcji wartość współczynnika determinacji  $R^2$  i błędu średniokwadratowego  $MSE$ . Na podstawie największej wartości  $R^2$  i najmniejszej wartości  $MSE$  analizowanych postaci funkcji wybrano postacie funkcji wraz z optymalnymi wartościami współczynników i miarami błędów. Zweryfikowany model postaci funkcji opisano wzorem (4), którego  $R^2 = 0,75$ .

$$\Delta e = 7 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta\sigma^{0,53} \cdot t_{p2}^{0,09} \rho_d^{-2,13} \quad (4)$$

**Tabl. 3. Zestawienie wyników analizy statystycznej programem STATGRAPHICS określające wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych na zmienną zależną  $\Delta e$  [A –  $f_p$ , B –  $w$ , C –  $\rho_d$ , D –  $\Delta\sigma$ , E –  $t_{p2}$ , F –  $\sigma_0$ ]**

| MSE          | $R^2$ | ZMIENNE | MSE           | $R^2$ | ZMIENNE | MSE          | $R^2$ | ZMIENNE |
|--------------|-------|---------|---------------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| 1 - zmienna  |       |         | 2 - zmiennie  |       |         | 3 - zmiennie |       |         |
|              |       |         |               | 13,33 | AB      |              | 29,36 | ABC     |
|              |       |         |               | 15,16 | AC      |              | 55,28 | ABD     |
|              | 6,66  | A       |               | 53,15 | AD      | 0,00000532   | 38,96 | ABE     |
|              | 6,66  | B       |               | 36,49 | AE      |              | 20    | ABF     |
|              | 13,63 | C       |               | 13,83 | AF      |              | 53,8  | ACD     |
| 0,00000380   | 52,93 | D       |               | 22,87 | BC      |              | 51,09 | ACE     |
|              | 35,49 | E       |               | 54,49 | BD      |              | 22,56 | ACF     |
|              | 13,07 | F       |               | 36,91 | BE      |              | 58,66 | ADE     |
| 4 - zmiennie |       |         |               | 13,74 | BF      |              | 53,41 | ADF     |
| 0,00000388   | 59,25 | ABCD    |               | 53,55 | CD      |              | 38,49 | AEF     |
|              | 67,73 | ABCE    |               | 49,74 | CE      |              | 57,22 | BCD     |
| 0,00000634   | 33,41 | ABCF    |               | 21,48 | CF      |              | 61,66 | BCE     |
|              | 61,11 | ABDE    | 0,00000377    | 58,35 | DE      |              | 28,39 | BCF     |
|              | 55,64 | ABDF    |               | 53,19 | DF      |              | 60,09 | BDE     |
|              | 40,71 | ABEF    |               | 37,65 | EF      |              | 54,82 | BDF     |
|              | 61,45 | ACDE    | 5 - zmiennych |       |         |              | 38,93 | BEF     |
|              | 54,12 | ACDF    | 0,00000338    | 71,95 | ABCDE   | 0,0000033    | 67,09 | CDE     |
|              | 51,24 | ACEF    |               | 59,8  | ABCDF   |              | 53,83 | CDF     |
|              | 59,25 | ADEF    |               | 69    | ABCEF   |              | 49,97 | CEF     |
| 0,00000340   | 68,61 | BCDE    |               | 61,87 | ABDEF   | 0,0000035    | 58,92 | DEF     |
|              | 57,67 | BCDF    |               | 62,2  | ACDEF   | 6 zmiennych  |       |         |
|              | 61,72 | BCEF    |               | 69,01 | BCDEF   | 0,00000338   | 72,63 | ABCDEF  |
|              | 60,78 | BDEF    |               |       |         |              |       |         |
|              | 61,64 | CDEF    |               |       |         |              |       |         |

## Wybór funkcji z wykorzystaniem analizy wymiarowej

Podstawą analizy wymiarowej jest teoria podobieństwa fizycznego – działu nauki zajmującej się wyznaczaniem kryteriów podobieństwa fizycznego, zwanych również iloczynami bezwymiarowymi. Najbardziej rozpowszechnioną metodą wyznaczania wyrażenia bezwymiarowych na podstawie danego zbioru zmiennych wielkości fizycznych jest „metoda wykładników”, czyli postępowanie algebraiczne [7]. Analiza wymiarowa umożliwia ograniczenie liczby parametrów na podstawie

znanej, określonej liczby zmiennych za pomocą połączenia ich w mniejsze grupy wielkości bezwymiarowych.

Zależność zmiany wskaźnika porowatości  $\Delta e$  zapisaną w postaci przydatnej do analizy wymiarowej z wykorzystaniem teorii Rayleigha można przedstawić w następującej postaci:

$$\Delta e = \alpha \cdot \Delta \sigma^a \cdot t_{p2}^b \cdot \rho_d^c \quad (5)$$

Kolejnym krokiem podczas przeprowadzenia analizy było wyrażenie w kategoriach wielkości podstawowych: masy  $M$ , długości  $L$  i czasu  $T$  wartości zmiennych niezależnych i zmiennej zależnej. Kroki postępowania przedstawiono w tabl. 4.

Tabl. 4. Kolejne kroki postępowania podczas określania wzoru za pomocą analizy wymiarowej

| Kolejne kroki postępowania                                                                                                                                                                                                                                                                                            |           |       |        |              | Nr wzoru     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|--------|--------------|--------------|----|
| $\Delta e = [-] = \left[ M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 \right]$                                                                                                                                                                                                                                                             |           |       |        |              | 6            |    |
| $\Delta \sigma = [\text{Pa}] = \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2} \right] = \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right] = \left[ M^1 \cdot L^{-1} \cdot T^{-2} \right]$                                                  |           |       |        |              | 7            |    |
| $t_{p2} = [\text{s}] = \left[ M^0 \cdot L^0 \cdot T^1 \right]$                                                                                                                                                                                                                                                        |           |       |        |              | 8            |    |
| $\rho_d = \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \left[ M^1 \cdot L^{-3} \cdot T^0 \right]$                                                                                                                                                                                                                    |           |       |        |              | 9            |    |
| Podstawiając do równania (5) równania (6), (7), (8), (9) otrzymujemy:                                                                                                                                                                                                                                                 |           |       |        |              |              |    |
| $\left[ M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 \right] = \alpha \cdot \left[ M^1 \cdot L^{-1} \cdot T^{-2} \right]^a \cdot \left[ M^0 \cdot L^0 \cdot T^1 \right]^b \cdot \left[ M^1 \cdot L^{-3} \cdot T^0 \right]^c$                                                                                                               |           |       |        |              | 10           |    |
| Z przyrównania wykładników otrzymujemy:                                                                                                                                                                                                                                                                               |           |       |        |              |              |    |
| $\begin{array}{l l} M & 0 = a + c \\ L & 0 = -a - 3c \\ T & 0 = -2a + b \end{array}$                                                                                                                                                                                                                                  |           |       |        |              | 11           |    |
| Rozwiązanie układu jest następujące:                                                                                                                                                                                                                                                                                  |           |       |        |              |              |    |
| $\begin{cases} a + c = 0 \\ -a - 3c = 0 \\ -2a + b = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = -c \\ a = -3c \\ b = 2a \end{cases} \vee \begin{cases} a = -c \\ b = -2c \end{cases} \vee \begin{cases} a = -3c \\ b = -6c \end{cases}$ $\Rightarrow \begin{cases} c = -a \\ c = \frac{1}{3}a \\ b = 2a \end{cases}$ |           |       |        |              | 12           |    |
| Wstawiając obliczone wartości do równania (5) otrzymujemy wzory (13), (14), (15), (16), (17);<br>następnie do otrzymanych z analizy wymiarowej wzorów zapisanych ogólnymi równaniami<br>za pomocą równania regresji nieliniowej określono wartości parametrów tych zależności, wykorzystując program STATGRAPHICS     |           |       |        |              |              |    |
| Postać funkcji                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Parametry |       |        | Miary        |              |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $\alpha$  | $a$   | $c$    | $R^2$<br>[%] | $MSE$<br>[%] |    |
| $\Delta e = \alpha \cdot \Delta \sigma^{-3c} \cdot t_{p2}^{-6c} \cdot \rho_d^c$                                                                                                                                                                                                                                       | 0,0033    | –     | -0,021 | 57,4         | 0,00032      | 13 |
| $\Delta e = \alpha \cdot \Delta \sigma^{-c} \cdot t_{p2}^{-2c} \cdot \rho_d^c$                                                                                                                                                                                                                                        | 0,0034    |       | -0,064 | 57,9         | 0,00031      | 14 |
| $\Delta e = \alpha \cdot \Delta \sigma^a \cdot t_{p2}^{2a} \cdot \rho_d^c$                                                                                                                                                                                                                                            | 0,0097    | 0,061 | -2,53  | 71,2         | 0,00023      | 15 |
| $\Delta e = \alpha \cdot \Delta \sigma^a \cdot t_{p2}^{2a} \cdot \rho_d^{-a}$                                                                                                                                                                                                                                         | 0,0034    | 0,064 |        | 57,9         | 0,00031      | 16 |
| $\Delta e = \alpha \cdot \Delta \sigma^a \cdot t_{p2}^{2a} \cdot \rho_d^{1/3a}$                                                                                                                                                                                                                                       | 0,24      | 0,063 |        | 66,4         | 0,00025      | 17 |

Tabl. 5. Zestawienie funkcji i miar dopasowania badanych ilów

| Rodzaj analizy | Postać funkcji                                                                                       | Numer wzoru | R <sup>2</sup> [%] | MSE [%]  |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|----------|
| A.S.           | $\Delta e = 0,0007 \cdot \Delta \sigma^{0,53} \cdot t_{p2}^{0,09} \cdot \rho_d^{-2,13}$              | 4           | 75                 | 0,000003 |
| A.W.           | $\Delta e = 0,0033 \cdot \Delta \sigma^{-3(-0,021)} \cdot t_{p2}^{-6(-0,021)} \cdot \rho_d^{-0,021}$ | 18          | 57,4               | 0,00032  |
|                | $\Delta e = 0,034 \cdot \Delta \sigma^{0,064} \cdot t_{p2}^{2(0,064)} \cdot \rho_d^{-0,064}$         | 19          | 57,9               | 0,00031  |
|                | $\Delta e = 0,097 \cdot \Delta \sigma^{0,061} \cdot t_{p2}^{2-0,061} \cdot \rho_d^{-2,53}$           | 20          | 71,2               | 0,00023  |
|                | $\Delta e = 0,034 \cdot \Delta \sigma^{0,064} \cdot t_{p2}^{2-0,064} \cdot \rho_d^{-0,064}$          | 21          | 57,9               | 0,00031  |
|                | $\Delta e = 0,24 \cdot \Delta \sigma^{0,63} \cdot t_{p2}^{2-0,63} \cdot \rho_d^{-1/3-0,63}$          | 22          | 66,4               | 0,00025  |

### Porównanie wyników analizy statystycznej i wymiarowej

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyodrębniono wzory, którymi najdokładniej określa się zmiany objętości ilów wyrażone przez przyrost wskaźnika porowatości  $\Delta e$ . W tabl. 5 zestawiono wszystkie postacie funkcji otrzymane z analizy statystycznej (AS) i analizy wymiarowej (AW) wraz z miarami dopasowania. Kolorem zielonym w tabl. 5 zaznaczono funkcję, która najlepiej opisuje zmiany objętości ilów wywołane odprężeniem.

### Weryfikacja proponowanych zależności matematycznych

Weryfikację zaproponowanego wzoru do określenia zmian objętości ilów wywołanych odprężeniem przeprowadzono przez porównanie obliczonego za pomocą wzoru (4) przyrostu wskaźnika porowatości ilów i rzeczywistych przemieszczeń. Jako model weryfikacyjny przyjęto schemat i warunki stacji metra A19 „Marymont”. Wyniki badań przemieszczeń w otwartym wykopie prowadzone dwa tygodnie od momentu odkopania ilów opublikowano w pracy doktorskiej Godlewskiego [2]. Na podstawie dokumentacji geologicznej i informacji podanych przez Godlewskiego [3] można stwierdzić, że woda nie miała dostępu do wykopu podczas jego realizacji. W związku z powyższym można było przeprowadzić weryfikację wzoru opisującego odprężenie, otrzymanego z AS. W pierwszym etapie obliczeń określono zmiany składowej pionowej naprężenia, które wyniosły 200 kPa. Czas, w którym wykop był otwarty wynosił 2 tygodnie ( $t_{p2} = 336$  h). W kolejnym etapie obliczono początkowy wskaźnik porowatości oraz zmiany wskaźnika porowatości na podstawie wzoru (4). Następnie obliczono całkowite wypiętrzenie dna wykopu [6]. Obliczona wartość przemieszczenia według wzoru proponowanego przez autorów wynosi 69 mm, natomiast wartość przemieszczeń (wypiętrzenia dna) na podstawie badań terenowych na poligonie stacja metro „Marymont” wynosi 63 mm.

### WNIOSKI

Do najważniejszych wniosków wynikających z otrzymanej analizy wyników należy zaliczyć następujące stwierdzenia:

- 1) Zastosowanie analizy statystycznej lub wymiarowej pozwala w prostszy sposób obliczyć przewidywane odprężenie gruntu w gruntach nienasyconych.
  - 2) Badania laboratoryjne ilów pozwoliły na opracowanie zależności funkcyjnej całkowitych zmian objętości ilów wywołanych odprężeniem gruntów nieekspansyjnych lub ilów ekspansyjnych, które nie były poddane działaniu wody:
- $$\Delta e = 0,0007 \cdot \Delta \sigma^{0,53} \cdot t_{p2}^{0,09} \cdot \rho_d^{-2,13}$$
- 3) Proponowany model empiryczny obliczenia zmian wskaźnika porowatości wywołanego odprężeniem gruntu pozwala prognozować odprężanie dna wykopu wykonywanego w ilach i odkształcenia masywu ilów w podłożu innych budowli inżynierskich.
  - 4) Różnica w przemieszczeniach obliczonych za pomocą wzorów statystycznych i obserwacji w terenie wynosi około 8%. Uzyskana wartość z punktu widzenia geotechniki nie jest istotna.
  - 5) Weryfikacja proponowanego modelu matematycznego określenia zmian odprężenia ilów powinna być przeprowadzona w szerszym zakresie na większej liczbie przypadków rzeczywistych obiektów inżynierskich.

### LITERATURA

1. Fredlund D. G., Rahardjo H.: Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley and Sons Inc., New York 1993.
2. Godlewski T.: Iły formacji poznańskiej jako podłoże konstrukcji budowlanych. Rozprawa doktorska, ITB, Warszawa 2008.
3. Godlewski T.: Poznań formation clays as a construction subsoil on the example of A19 „Marymont” underground station in Warsaw (Poland). 19<sup>th</sup> European Young Geotechnical Engineers' Conference. Győr, Hungary, 2008.
4. Grabowska-Olszewska B.: Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1998.
5. Kumor M. K.: Wybrane problemy geotechniczne gruntów ekspansyjnych. XX Ogólnopolska Konferencja – warsztat pracy projektanta konstrukcji, Wisła – Ustroń, 2006, 233-260.
6. Lendo-Siwicka M.: Pęcznienie i odprężenie nienasyconych ilów w podłożu budowli. Praca doktorska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, 2010.
7. Matras Z.: Transport hydrauliczny reologicznie złożonych cieczy nie-newtonowskich w przewodach. Wydawnictwo PK, Kraków 2001.