

RYSZARD DACHOWSKI<sup>1</sup>  
SYLWIA KAPAŁA<sup>2</sup>  
AGNIESZKA KOWAL-ZAWADZAK<sup>3</sup>  
MARCIN ZAWADZAK<sup>4</sup>

Kielce University of Technology

<sup>1</sup> e-mail: tobrd@tu.kielce.pl

<sup>2</sup> e-mail: s.kapala@tu.kielce.pl

<sup>3</sup> e-mail: a.zawadzak@o2.pl

<sup>4</sup> e-mail: m.zawadzak@o2.pl

## APPLICATION OF BENTONITE SUSPENSION FOR DIAPHRAGM WALL UNDER 'INFILL' CONDITIONS

### Abstract

*In highly urbanized agglomerations investors are forced to develop areas located among densely concentrated elements of the on-ground and underground urban infrastructure. When an 'infill' is constructed, the diaphragm wall technology is frequently implemented, in which the excavation of the slurry trench filled with a bentonite suspension is a significant stage. The article discusses the standard-specified requirements for the bentonite suspension used in the construction of the diaphragm wall. It also summarizes the methodology of the laboratory investigation of bentonite-slurry-filled trenches, performed in the conditions of the 'infill' construction. The studies covered the clogging of soil, specific gravity and viscosity of the bentonite slurry and the effect of external load on the stability of the trench.*

**Keywords:** diaphragm wall, bentonite suspension, in the conditions of the 'infill'

### 1. Introduction

The development of cities often forces engineers to realize investment projects in limited spaces of cramped urban environment. Other significant reasons for constructing structures in the close vicinity of already existing buildings, often historical ones, include the price of land, the limited area of a plot and the land development conditions. Modern construction techniques enable engineers to build increasingly higher and deeper founded buildings in a densely built-up environment. In the building practice there are several methods of trench shoring, which allow such a type of construction to be erected. One of them is the use of the diaphragm wall technology, which is widely used in the infill construction. However, the implementation of the diaphragm wall is a specialized geotechnical work requiring advanced knowledge and extensive experience, which are particularly important when performing the excavation of a slurry trench filled with a bentonite suspension.

The advantage of using diaphragm walls in the close proximity of existing buildings is that

their construction is not very troublesome for the surroundings. The use of heavy equipment while excavating the trench does not cause the ground shocks and the noise level is low. Providing the proper stability of the wall decreases to a minimum the displacement of the soil, which also facilitates the possibility of conducting works in the immediate neighbourhood of the existing buildings [2].

### 2. Bentonite suspension

The stability of the trench side is provided by a liquid stabilizing the trench, usually a clay suspension (called a bentonite slurry), whose main ingredient is montmorillonite. Montmorillonites are aluminosilicates formed from the three-layer packets. Bentonite is a material formed by weathering in situ of volcanic ash and dust (mainly Cretaceous and Tertiary ones) deposited on the bottom of the sea in an alkaline environment [5].

Bentonites used in the construction of diaphragm walls are of the swelling type, including natural or activated calcium or sodium bentonites.

Bentonite slurry used for stabilizing the trench during the excavation should meet a number of requirements. The requirements set by the standard [4] are presented in Table 1.

Table 1. Properties of bentonite suspensions [4]

Properties	Suspension		
	fresh	reusable	before concreting
Density g/ml	< 1.10	< 1.25	< 1.15
Marsh viscosity in s	from 32 to 50	from 32 to 60	from 32 to 52
The filtrate volume in ml	< 30	< 50	b.p.
The pH	from 7 to 11	from 7 to 12	b.p.
Sand content in %	b.p.	b.p.	< 4
The filter cake in mm	< 3	< 6	b.p.
b.p.: undefined			

It is required by the standard [4] that bentonite slurry has sufficient structural strength of the gel, thus keeping the grains of sand in suspension and reducing the penetration of the slurry into the ground.

While selecting a bentonite slurry for stabilizing the excavation, one should pay attention to such properties as the easy displacement by the concrete mix and the chemical resistance to the matrix interaction. It is also important to provide an adequate density so that the slurry is pumpable. The suspension should also come off the gripper easily and be resistant to the chemical interaction with groundwater.

The composition of bentonite suspension shall be defined by a laboratory for each investment project. In designing the recipe the following factors should be taken into account: the ground and water environment, the design requirements and the backfill loads.

### 3. Laboratory tests of the bentonite-slurry-filled trench in the infill conditions

#### 3.1. Research Methodology

The aim of the study was to determine the optimum percentage of bentonite in the slurry used for the stabilization of the trenches in the infill conditions. The studies covered clogging of soil, specific gravity and viscosity of the bentonite slurry and the effect of external load on the stability of the trench.

The study concept was based on the models of the diaphragm wall and the foundation of a neighboring building in the 1:40 scale. Loamy sand with a density of 1.6 g/cm<sup>3</sup> was used as a cohesive medium.

An experimental model box measuring 54.0 x 22.0 x 12.0 cm filled a ground medium was made in order to perform laboratory tests. The box model consists of a 2-cm-thick wooden base. The 2-cm-thick rear and side walls are also made of wood, whereas a front

wall is made of organic glass with a thickness of 0.8 cm. The front wall is fixed to the other walls with screws at the base, and reinforced with a wooden lath with a cross section of 2.0 x 2.0 cm.

On the front wall was applied a graduated scale in order to read the vertical displacement of the cohesive medium. The scale has the form of horizontal lines spaced every 2 cm starting from the bottom edge of the wall.

The cohesive medium was placed in 2-cm-thick layers and compacted by hand to about 1.6 g/cm<sup>3</sup>. After the four layers were placed in the manner described above, the layer of black dyed sand was spread on top, which enabled the reading of the vertical displacements of the ground subjected to the load. These steps were repeated when each subsequent sand layer was placed and compacted until the box was filled up.

Plywood plank with the dimensions of 1.8 x 12.0 x 15.0 cm was used as a model for the foundation of an adjacent building. The tests were conducted using three types of bentonite suspension with the percentage of 12%, 22% and 32%, respectively. The percentage of bentonite was determined taking into account the recommendations of reference sources defining the specific gravity of the bentonite suspension as 40 to 350 kg/m<sup>3</sup>. In addition, the suspension was prepared 24 hours prior to testing in order to properly hydrate the bentonite particles.

When the box model and the bentonite suspension were prepared, a groove with a width of 2 cm and a depth of 14 cm, filled with a bentonite slurry during driving, was made in the cohesive medium.

#### 3.2. Laboratory tests

The laboratory tests consisted of nine measurements. In the experiment three kinds of slurry containing different bentonite percentage and three foundation model positions with respect to the vertical edge surface of the diaphragm wall model served as the variables.

In all nine measurements uniform loads of 30 kg were assumed, corresponding to 100 kN/m of the strip footing. The load was transmitted to the ground by the foundation model, which was applied at distances of 0.25 cm, 0.75 cm and 1.25 cm, respectively. The application of the load was performed using the electronic press located in the laboratory of the Chair of Material Strength at the Kielce University of Technology.

The values of the vertical displacement of the soil under the foundation model were read after each preparation of the cohesive medium, the application of the foundation model (and its load) at an appropriate

distance and making a groove filled with different types of bentonite suspension.

### 3.3. The acceptance of the criteria for the analysis

Given the number of factors to be taken into account when performing the experiment, and the need to estimate the impact of each of these factors on the magnitude of vertical displacements in the ground, it was decided to conduct a factor analysis using the mathematical planning of the experiment method [3].

The factor analysis is a set of methods and statistical procedures bringing down a large number of the examined variables to a much smaller number of mutually independent (uncorrelated) factors. The distinguished factors are subject to different content-wise interpretations while retaining a large part of the information contained in the primary variables [2].

The following independent factors were adopted:

- the percentage of bentonite in the slurry –  $X_1$  (B),
- the distance between the vertical surface of the diaphragm wall and the outer edge of the adjacent building foundation –  $X_2$  (D).

The selection of the main level and of the factor variability range was based on *the a priori* information analysis and on a preliminary analysis of the literature.

When analyzing the obtained results, the acceptable foundation settlement in the infill conditions were taken into account. According to the standard these values are respectively: 20 mm for buildings in poor condition (with cracked external walls) and 30 mm for buildings in a good state.

### 3.4. Determining the optimum percentage of bentonite in the slurry

The levels and the independent factor variability ranges, which are presented in Table 2, were used to determine the optimum percentage of bentonite in the slurry.

Table 2. Levels and ranges of independent factors' variability

Level	Independent factors	
	$X_1$ (B) [%]	$X_2$ (D) [cm]
Variability range	10	20
Lower	12	10
Zero	22	30
Upper	32	50

An orthogonal fractional compositional plan of the type  $3^{**}(2-0)$  (with  $k = 2$ ), i.e. full factorial experiment was adopted for the formulation of tests. Three parallel experiments were adopted for each set of factors. These experiments were performed taking into account the randomization in time. This made it possible to eliminate the influence of systematic errors

caused by external conditions. An array of random numbers was used in this case [1]. Methodology for planning the experiment and the results of the experiments are shown in Table 3.

Table 3. Experiment schedule matrix with independent factors' levels and research results

Experiment No	Independent factors				Results
	Conventional scale		Natural scale		Soil displacement d [mm]
	$X_1$	$X_2$	$X_1$ (B) [%]	$X_2$ (D) [cm]	
1	-1	-1	12	10	39
2	-1	0	12	30	27
3	-1	1	12	50	18
4	0	-1	22	10	19
5	0	0	22	30	11
6	0	1	22	50	5
7	1	-1	32	10	7
8	1	0	32	30	3
9	1	1	32	50	0

The displacements  $d$  were adopted as the initial data. The transformation of the experimental data permitted the development of a mathematical model of the described system condition according to the assessed optimization parameter, i.e. the displacement of land within the limits of the selected factor space.

The following regression equation was applied to describe the movements of the ground:

$$d = A_0 + A_1(B) + A_2(B)^2 + A_3(D) + A_4(D)^2 \quad (1)$$

Regression coefficients is shown in Table 4.

Table 4. Regression coefficients for the adopted model with the examined vertical displacement for the loamy sand soil

Examined initial coefficient	The regression coefficient for the adopted model of the tested soil displacement					The correlation coefficient
	A0	A1	A2	A3	A4	
Soil displacement d [mm]	70.24	-2.99	0.04	-0.5	0.0025	0.9789

Basing on the analysis of the regression equation (1) it can be concluded that the negative displacement values of the factors  $X_1$  and  $X_2$  indicate the increased soil displacement accompanied by a reduced percentage content of bentonite and a reduced distance from the foundation. In contrast, the regression coefficient indicates to what extent the ground displacement alternates if the factor changes by one variability interval. Thus, it can be concluded that when  $X_1$  factor (B) changes by one variability interval (i.e. 10%), the displacement  $d$  is changed by 2.99 mm, and when

X<sub>2</sub> factor (D) changes by one interval (20 mm), the displacement increases by 0.5 mm.

The obtained results provided the basis for the determination of soil displacement curves depending on the percentage content of bentonite and the distance of a neighboring building, which are shown in Figure 1.

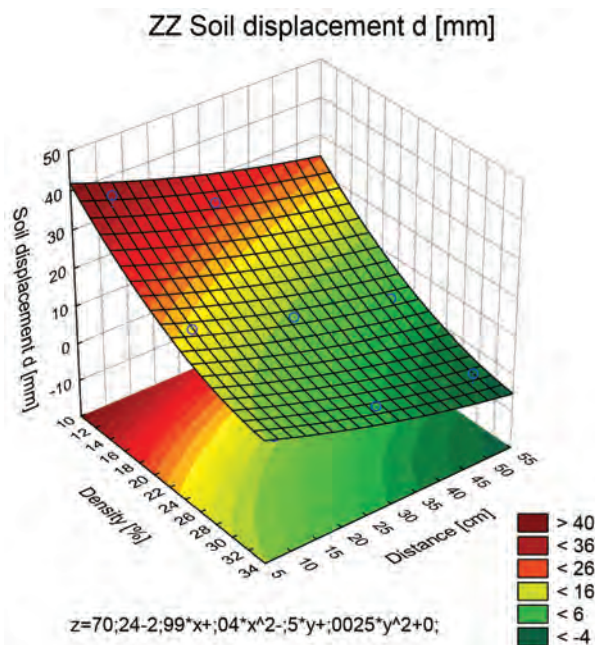


Fig. 1. The bentonite percentage in the slurry

The values of the distance between the vertical surface of the diaphragm wall and the outer edge of the adjacent building foundation were placed on the ordinate axis, whereas the values of the bentonite percentage content in the slurry were placed on the abscissa.

The values of the factors in certain points (basing on the experimental information) were selected from Figure 1 and presented in Table 5.

Table 5. Examined factors values in selected points with examined criterion and corresponding objective function

Criterion	Coordinates of the selected points		Objective function value
	Bentonite content (B) [%]	Distance (D) [cm]	
Assumed displacement (20 mm, 30 mm)	13.0	50	20
	13.5	45	
	14.3	40	
	15.0	35	
	16.5	30	
	6.0	50	30
	6.5	45	
	7.3	40	
	8.0	35	
	9.8	30	

The above data are presented in the graph form in Figure 2 to facilitate the analysis.

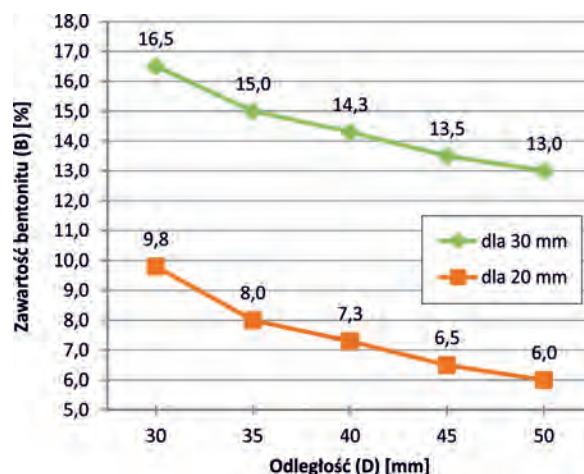


Fig. 2. A plot of the percentage of bentonite in the slurry versus the distance from the foundation edge of an adjacent building

#### 4. Conclusions

The analysis of the research leads to the conclusion that the extend of the vertical soil displacements decreases with the increasing distance between the diaphragm wall surface and the outer edge surface of the neighboring building foundation. The reduction of vertical movements is also affected by the percentage of bentonite in the slurry. The above studies revealed that the largest value, i.e. 39 mm can be observed at a distance of 10 cm and with 12% of the bentonite content in the slurry. With the increase in the percentage of bentonite in the suspension, the extend of the vertical ground displacement decreases. Thus, for a 32% content of bentonite in the slurry and with the distance of 50 cm between the diaphragm wall surface and the outer edge of the foundation, the vertical displacement of the ground is equal to zero.

On the basis of the obtained test results it can also be seen that with a distance of 10 cm between the diaphragm wall surface and the foundation outer edge and with the percentage content of 12% of bentonite, the vertical displacements is equal to 39 mm. In contrast, with the same distance, but a higher percentage of the bentonite content i.e. 32%, the value is reduced to 7 mm. With the bentonite percentage content of 12%, and with the distance of 50 cm between the diaphragm wall surface and the outer edge surface, the vertical displacement is equal to 18 mm. It can therefore be concluded that it is the percentage of bentonite in the slurry that has the greatest impact on the extend of the vertical soil displacement.



## References

- [1] Adler J.I., Markowa J.W.: *Planowanie eksperymentu pri poiske optimalnych uslowij*, Moskawa. Nauka, 1996
- [2] Grzegorzewicz K.: *Projektowanie i wykonywanie ścian szczelinowych*, *Geoinżynieria, Drogi, Mosty, Tunele*, Nr 3/2005, s. 43 – 51.
- [3] Ostasiewicz W.: *Statystyczne metody analizy danych*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu, Wrocław 1998.
- [4] PN-EN 1538: 2000 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych: Ściany szczelinowe.
- [5] Wyszomirski P., Lewicka E.: *Bentonity jako uniwersalny surowiec wielu dziedzin przemysłu*, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Wysoka jakość kaolinów i piasków szklarskich gwarancją rozwoju przemysłu” (Leśna k. Lubania Śl. 1–3.06.2005 r.).

Ryszard Dachowski  
Sylwia Kapala  
Agnieszka Kowal-Zawadzak  
Marcin Zawadzak

# Zastosowanie zawiesiny bentonitowej przy realizacji ścian szczelinowej w warunkach „plombowych”

## 1. Wprowadzenie

Postęp urbanistyczny miast zmusza często inżynierów do realizacji inwestycji w zatłoczonych i ograniczonych przestrzeniach infrastruktury miejskiej. Dodatkowymi czynnikami powodującymi wymuszenie budowy w ścisłym sąsiedztwie już istniejących budynków, często zabytkowych, są m.in. ceny gruntów, ograniczona powierzchnia działki oraz warunki zagospodarowania terenu. Nowoczesne techniki budowlane pozwalają inżynierom na budowę w gęstej zabudowie coraz wyższych i głębiej posadowionych budowli. W budownictwie stosuje się wiele metod obudowy wykopów umożliwiających taką budowę. Jedną z nich jest zastosowanie technologii ściany szczelinowej, która cieszy się dużym powodzeniem przy realizacjach w warunkach „plombowych”. Jednak realizacja ściany szczelinowej to specjalistyczne roboty geotechniczne wymagające zawansowanej wiedzy i dużego doświadczenia, które szczególnie istotne są przy wykonywaniu etapu głębinienia szczeliny w osłonie zawiesiny bentonitowej.

Zaletą wykorzystania ścian szczelinowych w bliskim sąsiedztwie istniejących budynków jest również mała uciążliwość dla otoczenia budowy. Pomimo stosowania ciężkiego sprzętu przy drążeniu szczeliny poziom hałasu jest niewielki, a wstrząsy nie występują. Zapewnienie odpowiedniej stateczności ściany

zmniesza do minimum przemieszczenia gruntu, co dodatkowo wpływa na możliwość prowadzenia prac w sąsiedztwie istniejących budynków [2].

## 2. Zawiesina bentonitowa

Stateczność ściany szczeliny zapewnia ciecz stabilizująca wykop, którą najczęściej jest zawiesina łożwa (zwana bentonitową). Głównym składnikiem zawiesiny jest montmorillonit. Montmorillonity to glinokrzemiany zbudowane z trójwarstwowych pakietów. Bentonit jest materiałem powstałym w wyniku wietrzenia *in situ* popiołów i pyłów wulkanicznych (głównie kredowych i trzeciorzędowych) osadzonych na dnie mórz w środowisku alkalicznym [5].

Bentonitami wykorzystywanymi przy wykonywaniu ścian szczelinowych są bentonity pęczniące, do których zalicza się: bentonit wapniowy lub sodowy naturalny albo aktywowany.

Zawiesiną bentonitową wykorzystywaną do stabilizacji wykopu podczas głębinienia szczeliny powinno stawiać się szereg wymagań. Wymagania normowe [4] zostały podane w tabeli 1.

Wymagane jest zgodnie z normami [4], by zawiesina bentonitowa miała wystarczającą wytrzymałość strukturalną żelu, co pozwoli na utrzymanie ziaren piasku w zawieszaniu i zmniejszenie przenikania zawiesiny w grunt.

Przy doborze zawiesiny bentonitowej wykorzystywanej do stabilizacji wykopu powinno zwrócić się uwagę na takie właściwości, jak łatwość wypierania zawiesiny przez mieszankę betonową oraz odporność na chemiczne oddziaływanie świeżej mieszanki betonowej. Istotne jest również zapewnienie odpowiedniej gęstości pozwalającej na pompowalność zawiesiny. Zawiesina także powinna łatwo spływać z urządzenia głębiącego oraz być odporna na chemiczne oddziaływanie wód gruntowych.

Skład zawiesiny bentonitowej określa się laboratoryjnie każdorazowo dla danej inwestycji. Projektując jej recepturę należy zwrócić uwagę na takie czynniki, jak: warunki wodno-gruntowe, wymagania konstrukcyjne oraz obciążenia występujące na naziomiu.

### **3. Badania laboratoryjne szczeliny wypełnionej zawiesiną bentonitową w warunkach plombowych**

#### **3.1. Metodologia badań**

Celem badań laboratoryjnych było ustalenie optymalnej procentowej zawartości bentonitu stosowanego w zawieszynie bentonitowej wykorzystywanej do stabilizacji szczelin wykonywanych w warunkach „plombowych”. W badaniach uwzględniono kolmatację gruntu, ciężar właściwy i lepkość zawiesiny bentonitowej oraz wpływ obciążenia zewnętrznego na stateczność szczeliny.

Koncepcja badań została oparta na modelach ściany szczelinowej i fundamentu sąsiedniego budynku w skali 1:40. Jako ośrodek spoisty został zastosowany piasek gliniasty o gęstości  $1,6 \text{ g/cm}^3$ .

Do przeprowadzenia badań laboratoryjnych został wykonany doświadczalny model skrzyni o wymiarach  $54,0 \times 22,0 \times 12,0 \text{ cm}$  wypełniony ośrodkiem gruntowym. Model skrzyni został wykonany z drewnianej podstawy o grubości  $2,0 \text{ cm}$ , ścian bocznych i tylnej również wykonanych z drewna o grubości  $2,0 \text{ cm}$ , oraz ściany przedniej (frontowej) wykonanej ze szkła organicznego o grubości  $0,8 \text{ cm}$ . Ściana frontowa została przytwierdzona do pozostałych ścian za pomocą wkrętów oraz usztywniona u podstawy za pomocą drewnianej listewki o przekroju  $2,0 \times 2,0 \text{ cm}$ . Na frontowej ścianie została naniesiona podziałka w celu odczytania pionowych przemieszczeń ośrodka spoistego. Podziałka została naniesiona w postaci poziomych linii rozmieszczonych co  $2 \text{ cm}$ , zaczynając od dolnej krawędzi ściany.

Ośrodek spoisty do wypełnienia skrzyni był rozkładany warstwami o grubości  $2 \text{ cm}$  i zagęszczany w sposób ręczny do ok.  $1,6 \text{ g/cm}^3$ . Po wykonaniu czterech warstw w sposób opisany powyżej, zosta-

ła rozłożona warstwa piasku barwionego na czarno, która umożliwiła późniejsze odczytanie powstałych pionowych przemieszczeń gruntu pod wpływem obciążenia. Czynności te były powtarzane analogicznie po usypaniu i zagęszczeniu każdej kolejnej warstwy piasku aż do wypełnienia skrzyni.

Jako model fundamentu sąsiedniego budynku została wykorzystana sklejka o wymiarach  $1,2 \times 1,8 \times 12,0 \text{ cm}$ .

Badania zostały przeprowadzone przy zastosowaniu trzech rodzajów zawiesiny bentonitowej o zawartości procentowej bentonitu wynoszącej odpowiednio: 12%, 22%, 32%. Procentowy udział bentonitu został ustalony z uwzględnieniem zaleceń z literatury fachowej określających, iż ciężar właściwy zawiesiny bentonitowej powinien wynosić od  $40$  do  $350 \text{ kg/m}^3$ . Ponadto zawiesina została przygotowana na  $24$  godziny przed wykonaniem badań w celu prawidłowego uwodnienia cząstek bentonitu.

Po wykonaniu modelu skrzyni i przygotowaniu zawiesiny bentonitowej, w ośrodku spoistym została wykonana szczelina o szerokości  $2 \text{ cm}$  i głębokości  $14 \text{ cm}$ , która podczas drążenia była wypełniana zawiesiną bentonitową.

#### **3.2. Wykonanie badań laboratoryjnych**

Badania laboratoryjne polegały na wykonaniu dziewięciu pomiarów. Zmiennymi w doświadczeniu były trzy rodzaje zawiesiny bentonitowej o różnej zawartości procentowej bentonitu oraz trzy odległości położenia modelu fundamentu od pionowej powierzchni krawędzi modelu ściany szczelinowej.

We wszystkich dziewięciu pomiarach zadano jednakowe obciążenie siłą wielkości  $30 \text{ kg}$ , co odpowiada w rzeczywistości  $100 \text{ kN/mb}$  ławy fundamentowej. Obciążenie to było przekazywane na grunt przez model fundamentu, który był przyłożony w odległościach wynoszących:  $0,25 \text{ cm}$ ;  $0,75 \text{ cm}$ ;  $1,25 \text{ cm}$ . Do zadania wyżej wymienionego obciążenia została wykorzystana prasa elektroniczna znajdująca się w laboratorium Katedry Wytrzymałości Materiałów Politechniki Świętokrzyskiej.

Wartości pionowego przemieszczenia gruntu pod modelem fundamentu zostały odczytane po każdorazowym ponownym przygotowaniu ośrodka spoistego, przyłożeniu w odpowiedniej odległości modelu fundamentu (wraz z jego obciążeniem) oraz wykonaniu szczeliny wypełnionej różnymi rodzajami zawiesiny bentonitowej.

#### **3.3. Przyjęcie kryteriów do analizy**

Mając na uwadze ilość czynników potrzebnych przy przeprowadzeniu doświadczenia oraz koniecz-

ność prognozowania wpływu każdego z tych czynników na wielkość przemieszczeń pionowych w gruncie zdecydowano się na analizę czynnikową przy wykorzystaniu metody matematycznego planowania eksperymentu [3].

Analiza czynnikowa to zespół metod i procedur statystycznych pozwalających na sprowadzenie dużej liczby badanych zmiennych do znacznie mniejszej liczby wzajemnie niezależnych (nieskorelowanych) czynników. Wyodrębnione czynniki mają inną interpretację merytoryczną, jednocześnie zachowując znaczną część informacji zawartych, w zmiennych pierwotnych [3].

Jako czynniki niezależne przyjęto:

- procentową zawartość bentonitu w zawieszynie –  $X_1$  (B),
- odległość pionowej powierzchni ściany szczelinowej od krawędzi zewnętrznej fundamentu sąsiedniego budynku –  $X_2$  (D).

Wybór głównego poziomu oraz przedziałów zmienności czynników został dobrany na podstawie analizy informacji *a priori* i analizy wstępnej literaturowej.

Przy analizie uzyskanych wyników zostały uwzględnione dopuszczalne osiadania fundamentów w warunkach plombowych. Według normy osiadania te wynoszą odpowiednio: dla budynków w złym stanie (z zarysowanymi ścianami zewnętrznymi) – 20 mm oraz dla budynków w dobrym stanie – 30 mm.

### 3.4. Określenie optymalnej procentowej zawartości bentonitu w zawieszynie

Do określenia optymalnej procentowej zawartości bentonitu w zawieszynie użyto poziomów i przedziałów zmienności czynników niezależnych, które zostały przedstawione w tabeli 2.

Dla sformułowania doświadczeń został przyjęty kompozycyjny ortogonalny frakcyjny plan typu 3\*\* (2-0) (przy  $k = 2$ ), tj. pełny czynnikowy eksperyment. Do każdego zestawu czynników zostały przyjęte po trzy równoległe doświadczenia. Doświadczenia te przeprowadzono z uwzględnieniem losowości w czasie. Pozwoliło to na wyeliminowanie wpływu błędów systematycznych wywołanych przez warunki zewnętrzne. Wykorzystano w tym przypadku tablicę liczb losowych [1].

Metodykę planowania eksperymentu oraz wyniki przeprowadzonych doświadczeń przedstawiono w tabeli 3. Jako dane wyjściowe zostały przyjęte przemieszczenia  $d$ . Przekształcenie danych eksperymentalnych pozwoliło zbudować matematyczny model opisywanego stanu systemu według ocenionego

parametru optymalizacji, tj. przemieszczenia gruntu w granicach wybranej przestrzeni czynnikowej.

Do opisu przemieszczeń gruntu zastosowano równanie regresji (1).

Współczynniki regresji przedstawiono w tabeli 4.

Na podstawie analizy równania regresji (1) można stwierdzić, iż znak minusowy przemieszczenia przy czynnikach  $X_1$  i  $X_2$  świadczy o zwiększeniu przemieszczenia gruntu przy równoczesnym zmniejszeniu procentowej zawartości bentonitu oraz zmniejszeniu odległości od fundamentu. Natomiast wielkość współczynnika regresji świadczy o tym, o ile zmieni się przemieszczenie gruntu, jeżeli czynnik zmieni się o jeden przedział zmienności. Tak więc można stwierdzić, że przy zmianie czynnika  $X_1$  (B) o jeden interwał zmienności (czyli 10%) przemieszczenie  $d$  zmieni się o 2,99 mm, natomiast przy zmianie czynnika  $X_2$  (D) o jeden przedział (20 mm) przemieszczenie zwiększy się o wartość 0,5 mm.

Na podstawie otrzymanych wyników zostały określone krzywe przemieszczeń gruntu w zależności od procentowej zawartości bentonitu i odległości sąsiadującego budynku, które zostały przedstawione na rysunku 1.

Na osi rzędnych wykresu (rys. 1) zostały umieszczone wartości odległości pionowej powierzchni ściany szczelinowej od powierzchni zewnętrznej fundamentu sąsiedniego budynku. Natomiast na osi odciętych zostały umieszczone procentowe zawartości bentonitu w zawieszynie.

Z rysunku 1 zostały dobrane (na podstawie informacji doświadczalnych) wielkości badanych czynników w wybranych punktach i przedstawione w tabeli 5.

Dane odczytane z wykresu w celu łatwiejszej analizy zostały przedstawione w formie wykresu umieszczonego na rysunku 2.

## 4. Wnioski

Analiza przeprowadzonych badań pozwala stwierdzić, iż wielkość pionowych przemieszczeń gruntu zmniejsza się, przy zwiększeniu odległości powierzchni ściany szczelinowej od powierzchni krawędzi zewnętrznej fundamentu sąsiedniego obiektu. Na zmniejszenie pionowych przemieszczeń wpływ ma również procentowa zawartość bentonitu w zawieszynie. Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono, że największą wartość czyli, 39 mm, można zaobserwować przy odległości wynoszącej 10 cm i 12% zawartości bentonitu w zawieszynie. Wraz ze wzrostem procentowej zawartości bentonitu w zawieszynie zmniejsza się wielkość przemieszczeń

pnionych gruntu. I tak, dla 32% zawartości bentonitu w zawieszynie i odległości powierzchni ściany szczelinowej od zewnętrznej krawędzi fundamentu równej 50 cm pionowe przemieszczenia gruntu równe są zeru.

Na podstawie otrzymanych wyników badań można zaobserwować również, że przy odległości powierzchni ściany szczelinowej od zewnętrznej krawędzi fundamentu wynoszącej 10 cm, wielkość pionowych przemieszczeń przy procentowej zawartości bentonitu wynoszącej 12% wynosi 39 mm. Natomiast przy tej samej odległości, lecz większej procentowej zawartości bentonitu wynoszącej 32%, wielkość ta zmniejsza się do 7 mm. W przypadku procentowej zawartości bentonitu wynoszącej 12%, a odległości powierzchni ściany szczelinowej od powierzchni krawędzi zewnętrznej wynoszącej 50 cm przemieszczenia pionowe wynoszą 18 mm. Można zatem stwierdzić, iż na zwiększenie pionowych przemieszczeń gruntu największy wpływ ma procentowa zawartość bentonitu w zawieszynie bentonitowej.