

PIOTR KRAJEWSKI*, ZBIGNIEW JANOWSKI**

WPŁYW RODZAJU MATERIAŁU ZASYPOWEGO
NA PRACĘ SKLEPIEŃ WALCOWYCHTHE INFLUENCE OF BACKFILL TYPE
ON THE BEHAVIOUR OF BARREL VAULT

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych prowadzonych na trzech sklepieniach walcowych z zasypką. Sklepienia o grub. 125 mm, rozpiętości 2000 mm i strzałce 730 mm wykonano z cegły pełnej na zaprawie wapiennej. Jako pierwszy badano element z zasypką z keramzytu. W drugim sklepieniu zastosowano tłuczeń granitowy, a w trzecim piasek. W badaniach przyjęto miąższość zasypki ponad kluczem sklepienia równą 200 mm. Obciążenie przykładano w $\frac{1}{4}$ rozpiętości sklepienia. Głównym celem badań było doświadczalne określenie obciąż. niszczonego oraz obserwacja zachowania się elementów z zasypką wykonaną z różnych materiałów. W badaniach wykazano istnienie wpływu rodzaju zastosowanego materiału zasypkowego na nośność i mechanizm zniszczenia sklepień z zasypką.

Słowa kluczowe: luk, sklepienie, zasypka, interakcja zasypka-sklepienie, konstrukcje mury

Abstract

This paper presents the results of experimental tests on barrel vaults with fill material. Three vaults were built of clay brick and lime mortar. Thickness, internal span and rise of the vaults were 125 mm, 2000 mm and 730 mm respectively. The vault with fill of light expanded clay aggregate was tested first. The second vault was backfilled with crushed granite. In the third test sand was used as a fill material. The fill depth at the crown was 200 mm. The load was applied at a quarter span. The aims of the tests were to determine load-carrying capacity and examine the general behaviour of barrel vaults with different types of backfill material. The results have pointed out the influence of fill type on the ultimate strength and collapse mechanism.

Keywords: arch, vault, backfill, soil-arch interaction, masonry

* Dr inż. – Politechnika Krakowska

** Dr hab. inż. – Politechnika Krakowska

1. Wstęp

Materiał zasypowy w konstrukcjach sklepionych stosuje się w celu uzyskania płaskiej powierzchni podłogi w budynkach oraz odpowiedniego profilu drogi lub linii kolejowej w mурowych mostach łukowych. W kamienicach mieszczańskich na zasypki stosowano najczęściej materiał odpadowy charakteryzujący się zróżnicowanymi właściwościami fizycznymi i mechanicznymi. W przypadku budowli inżynierskich wypełnienie stanowią zwykle żwir, tłuczeń lub glina.

Prace rewitalizacyjne prowadzone w obiektach poprzedzane są zwykle badaniami architektoniczno-konstrukcyjnymi oraz inwentaryzacją istniejących uszkodzeń [1]. W celu przeprowadzenia kompleksowej oceny stanu technicznego konstrukcji oraz poprawnego rozpoznania istniejących rozwiązań konstrukcyjnych należy usunąć materiał zasypowy. Odślonięcie grzbietu i pach sklepień umożliwia stwierdzenie czy pod zasypką nie występują dodatkowe uszkodzenia lub niewidoczne od spodu elementy konstrukcyjne np. żebra [2]. Po wykonaniu koniecznych prac renowacyjnych przestrzeń nad sklepieniem zwykle wypełnia się ponownie materiałem zasypowym. Użyty w tym celu materiał powinien charakteryzować się właściwościami, które pozytywnie wpłyną na pracę konstrukcji.

W analizach sklepień przyjmowano najczęściej jedynie pionowe obciążenia wynikające z ciężaru własnego materiału zasypowego. Podejście takie stosowali m.in. autorzy prac [3, 4], którzy w swoich obliczeniach pomijali oddziaływania poziome i styczne zasypki. Uwzględnianie jedynie obciążeń pionowych powodowało niedoszacowanie nośności konstrukcji. Ze względu na zwiększające się obciążenia użytkowe zaistniała konieczność określenia rezerw nośności w istniejących konstrukcjach sklepionych. Pod koniec lat 80. i w latach 90. XX wieku prowadzono prace badawcze dotyczące nośności mурowych mostów łukowych oraz wpływu poszczególnych elementów mostu na jego nośność. Szczególnie intensywnie badania zrealizowano w Wielkiej Brytanii oraz w USA. Prowadzono testy na istniejących obiektach mostowych [5, 6, 7] oraz na modelach nawet w skali naturalnej [8, 9, 10, 11, 12]. Badania doświadczalne przeprowadzone na istniejących mostach umożliwiły obserwację postaci zniszczenia konstrukcji, kalibrację modeli obliczeniowych oraz sprawdzenie poprawności metod stosowanych do oceny nośności. Prace laboratoryjne dały możliwość analizy wpływu interakcji poszczególnych części konstrukcji mostu oraz zmian geometrii, właściwości mechanicznych i fizycznych stosowanych materiałów na nośność badanych obiektów. Cytowane badania doświadczalne wykazały istotny wpływ obecności materiału zasypowego na pracę mурowych mostów łukowych.

Bazując na wynikach badań w analizie nośności mostów łukowych, oprócz obciążenia ciężarem własnym zaczęto również uwzględniać rozkład obciążenia przez zasypkę, parcie poziome gruntu w zależności od przemieszczeń sklepienia (parcie i odpór gruntu zasypowego), występowanie naprężeń stycznych między zasypką a grzbietem sklepienia, przesklepienie gruntu nad odkształconą konstrukcją mурową. Takie podejście pozwoliło zbliżyć się do nośności uzyskiwanych w badaniach doświadczalnych. Cytowane badania dotyczyły głównie mурowych mostów łukowych. W literaturze brak jest wyników badań dotyczących współpracy zasypka-sklepienie w odniesieniu do sklepień w budynkach. Konstrukcje mostowe wykonywane były z elementów mурowych kamiennych, ceramicznych lub betonowych na zaprawach cementowo-wapiennych. Natomiast do

wykonywania sklepień w budynkach mieszkalnych używano zwykle cegły pełnej układanej na zaprawie wapiennej. Jako zasypkę sklepień w budynkach zabytkowych stosowano gruz, polepę, a w razie wymiany zasyпки podczas remontu lub przebudowy: keramzyt, piasek itp. W budynkach w bezpośrednim sąsiedztwie sklepień występują ściany nośne, nieobecne w konstrukcjach mostowych, które ograniczają przemieszczenia zasyпки i wpływają na nośność układu zasyпка-sklepienie [8].

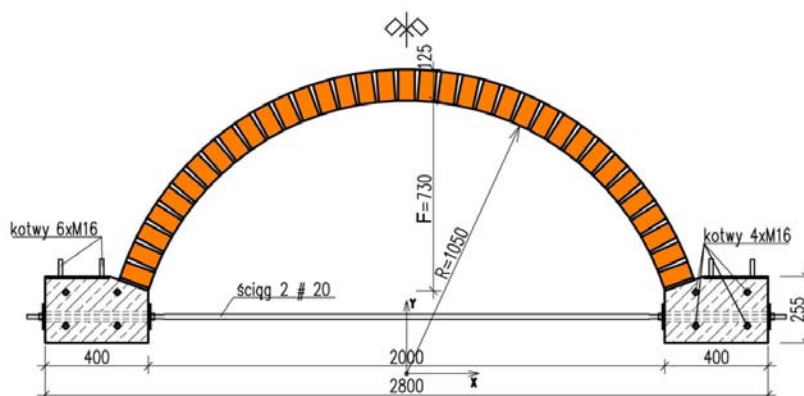
W pracy przedstawiono wyniki badań sklepień walcowych z pachami wypełnionymi różnymi materiałami zasypowymi. Jako zasypkę zastosowano keramzyt, granit i piasek. Celem przeprowadzonych doświadczeń było jakościowe poznanie pracy elementów z zasypką wykonaną z różnego rodzaju materiałów, określenie obciążenia niszczącego oraz postaci zniszczenia dla poszczególnych elementów badawczych. Analizowano również wpływ właściwości zastosowanych materiałów zasypowych takich jak gęstość objętościowa oraz kąt tarcia wewnętrznego na nośność układu zasyпка-sklepienie. Ze względu na niewielką odległość grzbietu sklepienia od ścian poprzecznych ograniczających przemieszczenia zasyпки, zastosowane materiały oraz brak oddziaływań dynamicznych przyjęty model badawczy odpowiada sklepieniu walcowemu w budynku. Prezentowane badania stanowią część większego programu badawczego obejmującego badania serii 13 sklepień w tym 11 z zasypką oraz 2 bez zasyпки. Głównym celem tego programu było zbadanie wpływu rodzaju zastosowanego materiału zasypowego oraz sposobu wykończenia grzbietu sklepienia na nośność układu zasyпка-sklepienie [13].

2. Charakterystyka elementów próbnych

Badania eksperymentalne przeprowadzono na 3 elementach próbnych o jednakowej geometrii. Pasma sklepień walcowych o szerokości 1040 mm (4 cegły), rozpiętości w świetle podpór wynoszącej 2000 mm, promieniu wewnętrznym 1050 mm, strzałce 730 mm i grubości 125 mm (1/2 cegły) oparto na podporach żelbetowych połączonych dwoma ściągami stalowymi z prętów o średnicy 20 mm. Ściągi zabezpieczyły sklepienia przed przemieszczeniami poziomymi podpór, które mogłyby wystąpić w czasie wykonywania lub badania elementu. Geometrię sklepienia przedstawiono na rys. 1.

Wymiary badanych elementów konstrukcyjnych stanowiły kompromis między następującymi kryteriami:

- uzyskanie sklepień o wymiarach zbliżonych do wymiarów konstrukcji występujących w obiektach rzeczywistych;
- możliwość wykonania i przechowywania jednocześnie przynajmniej trzech łuków;
- ograniczenie wysokości elementu z zasypką.



Rys. 1. Geometria elementów badawczych

Fig. 1. Geometry of tested vaults

Sklepienia murowano na krążynach pełnych opartych na kątownikach przykręconych do żelbetowych podpór łuku.

Łuki wykonano z cegły ceramicznej pełnej o wytrzymałości średniej na ściskanie $24,4 \text{ N/mm}^2$ układanej na zaprawie wapiennej, przeznaczonej do napraw zabytkowych obiektów murowych. Badania wytrzymałościowe zapraw i elementów murowych opisano w pracach [13, 14].

Do zasypywania pach sklepień stosowano keramzyt, granit lub piasek. Przyjęto stałą miąższość warstwy zasypki nad kluczem sklepienia wynoszącą 200 mm. Właściwości użytych w badaniach materiałów zasypowych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Właściwości materiałów zasypowych

Rodzaj kruszywa	Wymiar ziarna	Gęstość nasypowa $[\text{kg/m}^3]$	Kąt tarcia wewnętrzznego $[\circ]$
Keramzyt	10/20	300	37
Granit	8/16	1381	40
Piasek	0.125/1	1596	30

3. Stanowisko badawcze

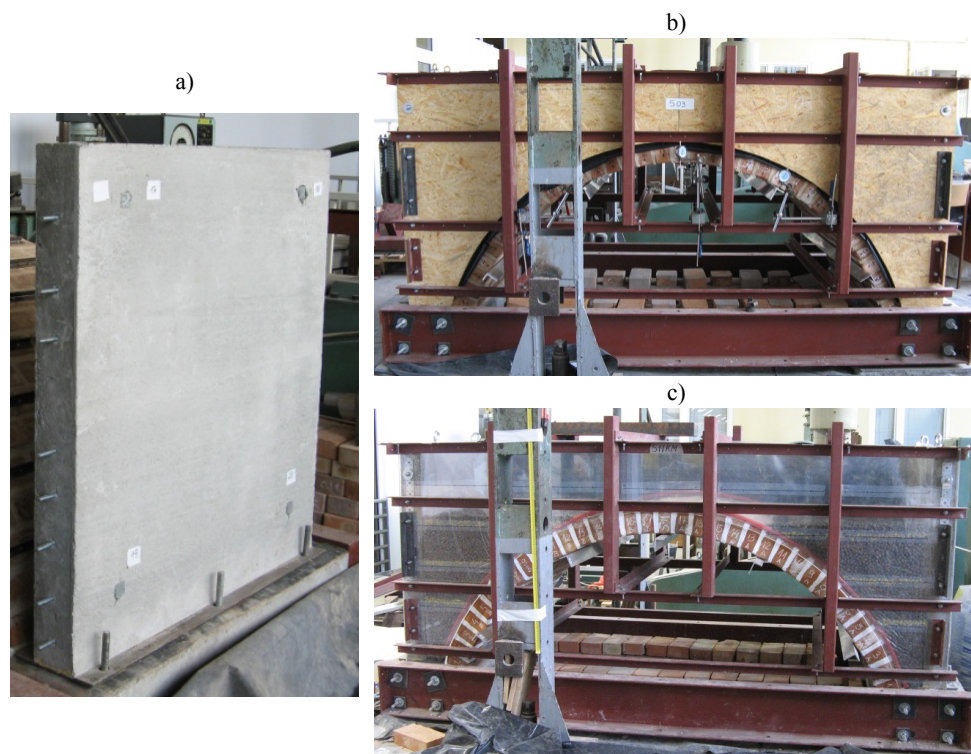
Badane sklepienia obciążano za pomocą siłownika hydraulicznego o zakresie do 100 kN podwieszono do rygla ramy stanowiska badawczego. Sterowanie obciążeniem w zastosowanym siłowniku odbywa się wyłącznie siłowo. Aktualne obciążenie mierzone było za pomocą czujników siły, układanych bezpośrednio pod siłownikiem. Obciążenie podczas badania zwiększano w sposób ciągły, aż do zniszczenia elementu. Badane

elementy ustawiano na stanowisku w taki sposób, żeby siłownik znajdował się w 1/4 rozpiętości łuku. Taki schemat obciążenia pozwala wyznaczyć najmniejszą nośność badanego elementu [3].

Przed badaniem spoiny wsporne na powierzchniach bocznych łuków białowano w celu ułatwienia obserwacji rys oraz opisywano numery poszczególnych warstw cegieł. Sklepienie składało się z 35 warstw cegieł numerowanych od 1 do 18 zaczynając od każdej podpory.

Do ustawionego pod ramą z siłownikiem hydraulicznym sklepienia montowano ściany poprzeczne i czołowe tworzące wokół badanego elementu skrzynię, do której wsypywano zasypkę.

Ściany poprzeczne wykonano jako żelbetowe (rys. 2a). W dolnych powierzchniach ścian zabetonowano blachy stalowe służące do zamocowania ścian poprzecznych na podporach sklepienia. W bocznych powierzchniach ścian zamontowano kotwy stalowe w rozstawach odpowiadających rozstawowi otworów w ścianach czołowych. Kotwy służyły do połączenia ścian poprzecznych i czołowych.

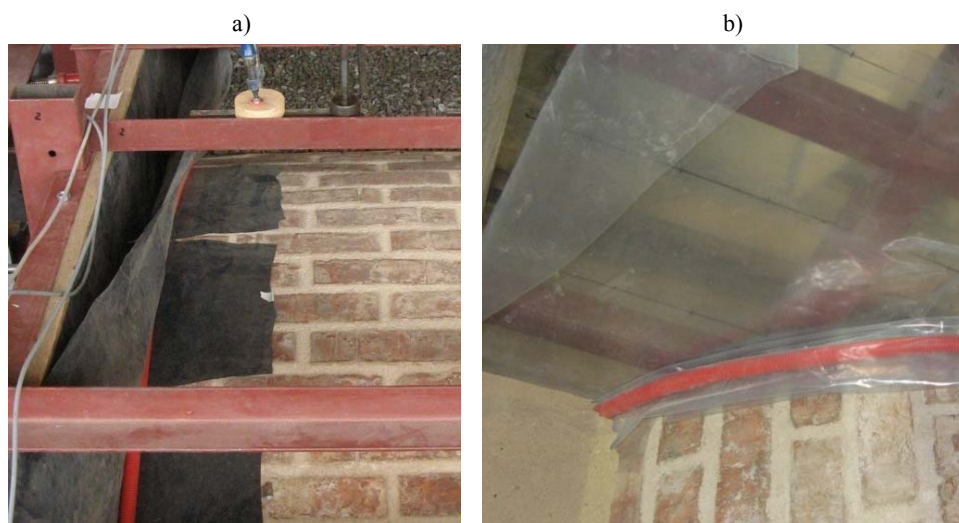


Rys. 2. Ściany stanowiska badawczego:
a) ściana poprzeczna, b) ściana czołowa z płyt OSB, c) ściana czołowa z plexi

Fig. 2. Walls of the test box:
a) end wall, b) OSB side wall, c) Plexiglas side wall

Ściany czołowe wykonano z płyt OSB lub plexi usztywnionych rusztem z kształtowników stalowych (rys. 2b i 2c). Od strony wewnętrznej na powierzchni płyt OSB układano dwie warstwy folii budowlanej w celu zminimalizowania tarcia na styku ściana czołowa-zasyпка (rys. 3a). Między ścianami czołowymi a sklepieniem pozostawiono szczelinę szerokości około 10 mm. Szczelina miała zapewnić swobodne przemieszczanie się łuku względem ścian. W celu zabezpieczenia przed wysypywaniem się zasyпки przez szczelinę wykonano uszczelkę z rurki osłonowej (rys. 3b).

Zасыпывание sklepien odbywało się warstwami grubości ok. 200 mm. Każdą warstwę zagęszczano. W przypadku sklepien ze ścianką czołową z plexi, na wysokości linii odniesienia narysowanych na ścianie układano warstwę materiału zasypowego zabarwionego na inny kolor. Kolorowe kruszywo miało ułatwić obserwację przemieszczeń gruntu podczas procesu obciążania badanego elementu. Po uzyskaniu założonej miąższości materiału zasypowego powierzchnię górną zagęszczano i wyrównywano. Następnie pod siłownikiem hydraulicznym układano ceownik, który miał za zadanie rozłożenie obciążenia na całą szerokość sklepienia. Na ceowniku, na blachach stalowych grub. 25 mm, w 1/4 i 3/4 szerokości sklepienia układano łożyska, na których spoczywała belka stalowa przekazująca obciążenie z siłownika hydraulicznego. Między siłownikiem hydraulicznym, a belką stalową umieszczano czujnik siły. Sposób przyłożenia obciążenia pokazano na rys. 4.



Rys. 3. Ściany czołowe – szczegóły:

- a) układ warstw folii budowlanej na ścianie z OSB,
- b) sposób uszczelnienia szczeliny między sklepieniem, a ścianą czołową dla ściany z plexi i OSB

Fig. 3. Side walls details:

- a) arrangement of polyethylene film layers on OSB side wall,
- b) sealing method for a gap between the arch and OSB or Plexiglas side walls

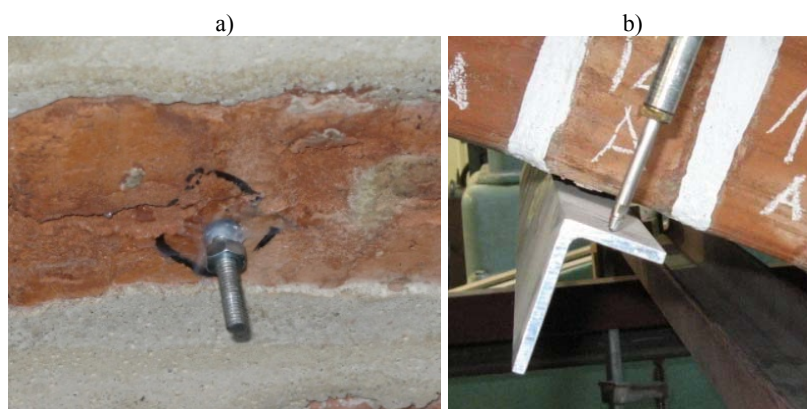


Rys. 4. Sposób przykładania obciążenia do sklepienia z zasypką

Fig. 4. Loading beam arrangement for vaults with backfill

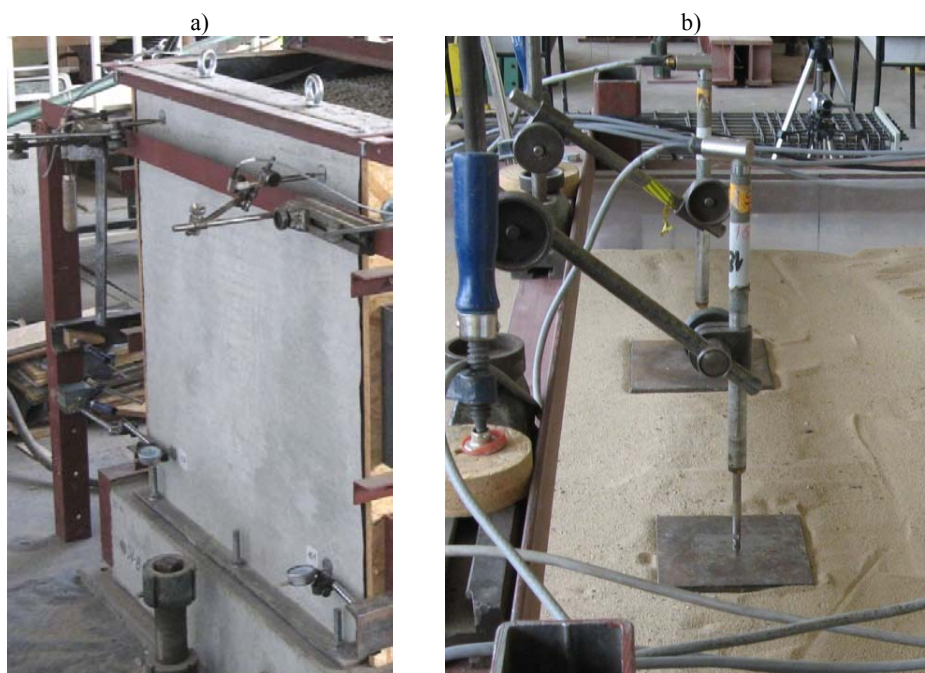
Podczas badań sklepień z zasypką mierzono obciążenie przekazywane z siłownika oraz przemieszczenia: radialne sklepienia, pionowe zasyпки oraz poziome ścian poprzecznych. Obciążenie mierzono tensometrycznymi czujnikami siły. Natomiast do pomiaru przemieszczeń zastosowano indukcyjne przetworniki drogi o zakresach pomiarowych od 20,0 do 100,0 mm. Dodatkowo stosowano zegarowe czujniki przemieszczeń o zakresie pomiaru 10,00 mm.

Ze względu na występowanie zasyпки nie było możliwości pomiaru przemieszczeń sklepienia na jego górnej powierzchni. Przemieszczenia mierzono na dolnej powierzchni elementu dziesięcioma czujnikami indukcyjnymi przykładanymi do kątowników aluminiowych mocowanych do podniebienia łuku za pomocą wklejanych prętów gwintowanych (rys. 5). Punkty przyłożenia czujników przemieszczeń znajdowały się poza obrysem sklepienia. Rozwiązanie takie zabezpieczało czujniki przed uszkodzeniem w przypadku gwałtownego zniszczenia badanego elementu. Mierzono przemieszczenia warstw cegieł 4A, 4B, 12A, 12B i 18, stosując po dwa czujniki w każdej z wymienionych warstw. Czujnik przemieszczeń mocowano w statywach na dodatkowej ramie stalowej wykonanej z profili stalowych. Przemieszczenia ścian poprzecznych rejestrowano czujnikami indukcyjnymi oraz zegarowymi. Czujniki przykładane były w czterech punktach: dwa na dole i dwa na górze ściany (rys. 6a). Przemieszczenia powierzchni zasyпки monitorowano stosując indukcyjne czujniki przemieszczeń przykładane do szlifowanych blach stalowych zagłębianych w gruncie (rys. 6b) oraz do ceownika rozkładającego obciążenie na szerokość sklepienia. Na powierzchni zasyпки przewidziano w sumie sześć punktów pomiarowych.



Rys. 5. Sposób pomiaru przemieszczeń na sklepieniu:
 a) pręt gwintowany wklejony do mocowania kątowników aluminiowych,
 b) widok kątownika aluminiowego do pomiaru przemieszczeń

Fig. 5. Vaults displacements measurement method:
 a) screwed steel bar used to fastening aluminum angles,
 b) view of aluminum angles used to displacements measurement

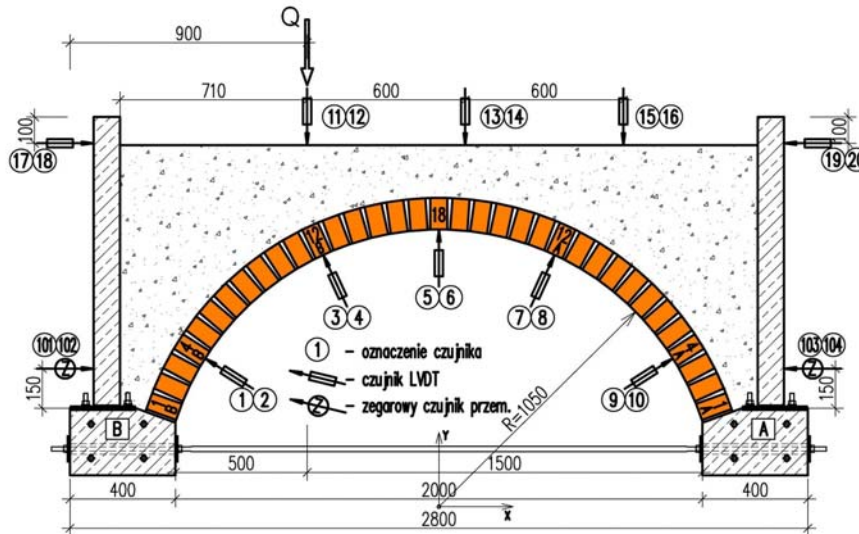


Rys. 6. Sposób przykładania czujników przemieszczeń:
 a) do ściany poprzecznej, b) do zasyпки

Fig. 6. Displacement transducers arrangement for:
 a) end wall, b) backfill surface

Szkic rozmieszczenia czujników dla poszczególnych sklepień z zasypką pokazano na rys. 7.

Indukcyjne czujniki służące do pomiaru przemieszczeń powierzchni zasypki montowano w odległości 360 mm od ścian czołowych. W kierunku podłużnym czujniki na zasypce umieszczano w odległościach pokazanych na rys. 7.



Rys. 7. Szkic rozmieszczenia czujników dla badanych sklepień

Fig. 7. Displacement transducers arrangement for tested vaults

4. Wyniki badań

4.1. Sklepienie z zasypką z keramzytu

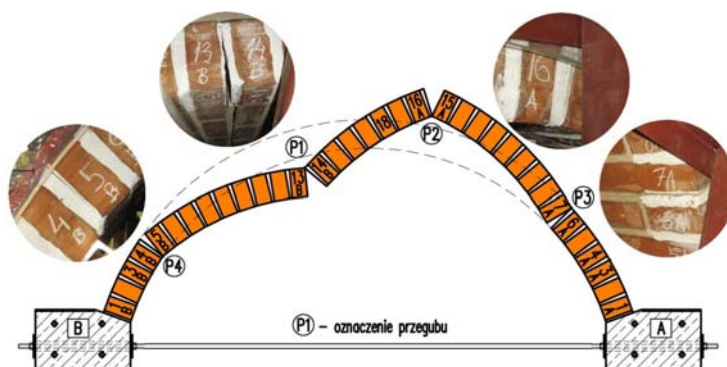
Do zasypania pierwszego sklepienia zastosowano keramzyt o uziarnieniu 10/20 mm. Głównym celem badania było określenie obciążenia niszczącego i postaci zniszczenia. Element z zasypką i zamontowanymi czujnikami przedstawiono na rys. 8.

Obciążenie zwiększano w sposób ciągły. Pierwsze uszkodzenie odnotowano przy obciążeniu równym 7,7 kN. Rysa przebiegała między warstwami 13B i 14B. Przy obciążeniach z przedziału od 10,0 do 17,0 kN powstawały rysy na grzbiecie sklepienia między warstwami 12A do 17A. Kolejne uszkodzenia utworzyły się na podniebieniu w spoinach między warstwami 3A do 7A przy obciążeniu z przedziału 19,0 – 23,0 kN. W ostatniej fazie obciążenia odnotowano rysy na grzbiecie elementu w rejonie warstw 3B–5B. Przy obciążeniu równym 24,69 kN badany element uległ zniszczeniu w wyniku powstania czteroprzegubowego mechanizmu. Przeguby powstały na grzbiecie sklepienia w spoinach 6A/7A (P3) i 13B/14B (P1) oraz na podniebieniu między warstwami 4B i 5B (P4), 15A i 16A (P2). Postać zniszczenia sklepienia przedstawiono na rys. 9.



Rys. 8. Widok elementu z zasypką z keramzytu przed badaniem

Fig. 8. General view of the vault with light expanded clay aggregate fill before the test



Rys. 9. Postać zniszczenia sklepienia z zasypką z keramzytu

Fig. 9. Failure mode of the vault with light expanded clay aggregate fill

W tabeli 2 zestawiono średnie przemieszczenia zarejestrowane w chwili wystąpienia obciążenia niszczącego. Przemieszczenia obliczono jako średnią arytmetyczną z odczytów dla poszczególnych par punktów pomiarowych usytuowanych na tej samej warstwie cegieł po przeciwnych stronach sklepienia.

Tabela 2

Przemieszczenia średnie w momencie wystąpienia obciążenia niszczącego

punkt pomiarowy	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16
przemieszczenie średnie, mm	-0,74	-6,75	7,33	10,16	0,54	-9,22	11,87	11,68

4.2. Sklepienie z zasypką z granitu

Drugie sklepienie zasypane zostało tłuczniem granitowym o uziarnieniu 8/16 mm. Widok elementu przygotowanego do badania przedstawiono na rys. 10.

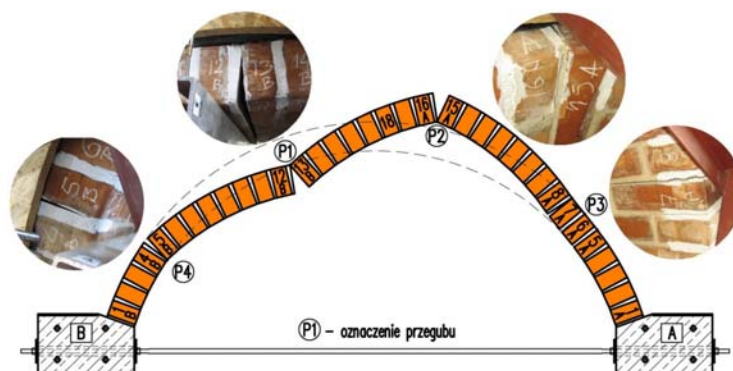
Podczas obciążania elementu pierwsza rysa pojawiła się na podniebieniu sklepienia między warstwami cegieł 12B i 13B. Przy obciążeniach z przedziału od 21,0 do 30,0 kN powstawały rysy na grzbiecie elementu w obszarze między warstwami 15A i 17A. Kolejne uszkodzenia pojawiły się na podniebieniu sklepienia w spoinie 4A/5A przy obciążeniu równym 45,0 kN. W ostatniej fazie obciążenia odnotowano rysy na grzbiecie elementu między cegłami 5B i 6B (49,0 kN). Badany element uległ zniszczeniu w wyniku powstania czteroprzegubowego mechanizmu przy obciążeniu równym 58,23 kN. Przeguby P1 do P4 uformowały się na grzbiecie sklepienia w spoinach 7A/8A, 6A/7A (P3) i 12B/13B (P1) oraz na podniebieniu między cegłami 4B i 5B (P4), 15A i 16A (P2). Oprócz pęknięć i zarysowań w końcowej fazie badania nastąpiło odłupanie fragmentów cegieł w warstwach 15A i 16A (rys. 12b). Na rysunku 11 przedstawiono szkic postaci zniszczenia sklepienia. Natomiast widok zniszczonego elementu po badaniu przedstawiono na rys. 12a.

W tabeli 3 przedstawiono średnie przemieszczenia zarejestrowane w chwili wystąpienia obciążenia niszczącego dla poszczególnych par punktów pomiarowych. Przemieszczenia obliczono jako średnią arytmetyczną z odczytów dla poszczególnych par punktów pomiarowych usytuowanych na tej samej warstwie cegieł po przeciwnych stronach sklepienia.



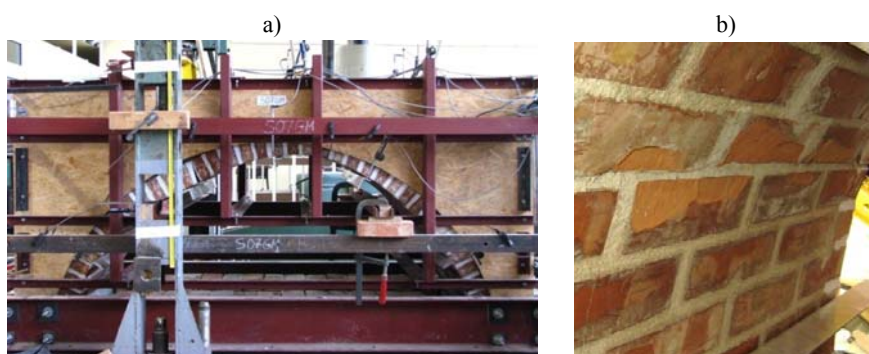
Rys. 10. Widok sklepienia z zasypką z granitu przygotowanego do badania

Fig. 10. General view of the vault with crushed granite fill before the test



Rys. 11. Postać zniszczenia sklepienia z zasypką z granitu

Fig. 11. Failure mode of the vault with crushed granite fill



Rys. 12. Sklepienie z zasypką z granitu po badaniu:

a) widok zniszczonego elementu, b) odłupane fragmenty cegieł na podniebieniu w warstwach cegieł 15A i 16A

Fig. 12. The vault with crushed granite fill after test:

a) the view of the vault after failure, b) local brick failure on the intrados of the vault at 15A and 16A brick courses

Tabela 3

Przemieszczenia średnie w momencie wystąpienia obciążenia niszczącego

punkt pomiarowy	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16
przemieszczenie średnie, mm	-2,54	-14,95	11,17	16,83	1,54	-	18,28	15,63

4.3. Sklepienie z zasypką z piasku

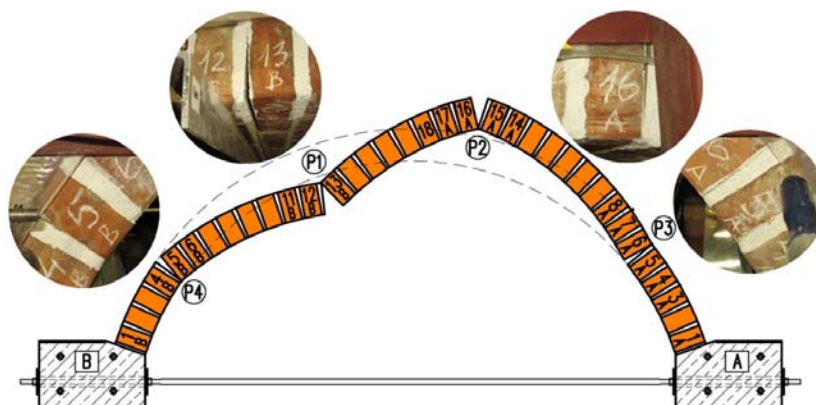
Zasypkę trzeciego sklepienia wykonano z piasku o wymiarze ziarna 0,125/1,0 mm. Sklepienie przygotowane do badania przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13. Sklepienia z zasypką z piasku przed badaniem

Fig. 13. The vault with sand fill before the test

Obciążenie elementu zwiększano w sposób ciągły. Pierwsze uszkodzenie powstało przy obciążeniu równym 21,6 kN między warstwami cegieł 12B i 13B. Kolejne uszkodzenia powstały na grzbiecie sklepienia w spoinach między warstwami 14A do 16A przy obciążeniach z przedziału od 24,0 do 30,0 kN. Po zwiększeniu obciążenia do 34,0 kN zauważono rysy na podniebieniu elementu między warstwami 3A i 4A. Kolejne pęknięcie powstało na grzbiecie sklepienia między cegłami 4B i 5B przy obciążeniu równym 35,0 kN. Sklepienie uległo zniszczeniu w wyniku powstania czteroprzegubowego mechanizmu przy obciążeniu 37,2 kN. W momencie zniszczenia odnotowano dodatkowe uszkodzenia występujące między warstwami 5A i 6A, 7A i 8A – podniebienie oraz 5B i 6B – grzbiet. Przeguby uformowały się na grzbiecie sklepienia w spoinach 5A/6A (P3) i 12B/13B (P1) oraz na podniebieniu między warstwami 4B i 5B (P4), 15A i 16A (P2). Postać zniszczenia sklepienia przedstawiono na rys. 14, natomiast na rys.15 pokazano zdeformowaną podczas badania powierzchnię materiału zasypowego.



Rys. 14. Postać zniszczenia sklepienia z zasypką z piasku

Fig. 14. Failure mode of the vault with sand fill



Rys. 15. Widok zdeformowanej powierzchni zasypki: a) widok powierzchni górnej, b) widok z boku

Fig. 15. The view of displaced backfill surface: a) top view, b) side view

W tabeli 4 przedstawiono średnie przemieszczenia, zarejestrowane w chwili wystąpienia obciążenia niszczonego, dla poszczególnych par punktów pomiarowych.

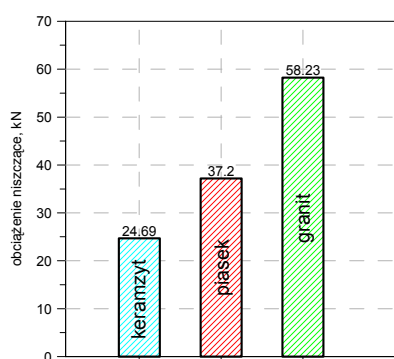
Tabela 4

Przemieszczenia średnie w momencie wystąpienia obciążenia niszczonego

punkt pomiarowy	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16
przemieszczenie średnie, mm	-0.43	-6.56	4.14	6.92	0.67	-21.74	11.30	6.31

4.4. Porównanie uzyskanych wyników dla badanych elementów

Przebadano trzy sklepienia z różnymi materiałami zasypowymi. Jako materiał zasypowy zastosowano keramzyt, granit i piasek. Największą nośność uzyskano podczas badania sklepienia z zasypką z tłuczni granitowego – 58.23 kN, a najmniejszą dla elementu zasypanego keramzytem - 24,69 kN. Użycie piasku jako materiału zasypowego pozwoliło osiągnąć nośność równą 37,2 kN. Przyrost nośności przy zastosowaniu granitu w stosunku do keramzytu wynosił 136%, a w stosunku do piasku 56%. Natomiast nośność sklepienia z zasypką z piasku w stosunku do elementu z zasypką z keramzytu wzrosła o 51%. Otrzymane nośności w zależności od rodzaju zasypki pokazano na rys.16.



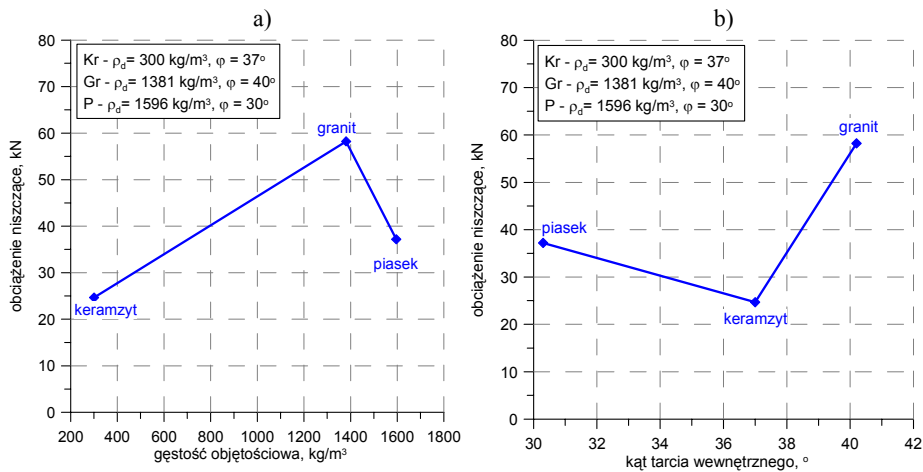
Rys. 16. Porównanie nośności sklepień z zasypką keramzytową, granitową i piaskową

Fig. 16. Comparison of collapse loads for vaults with backfill of light expanded clay aggregate, crushed granite or sand

Stosowane w badaniach materiały zasypowe charakteryzowały się zróżnicowanymi właściwościami. Granit posiadał największy kąt tarcia wewnętrzznego, piasek cechowała największa gęstość objętościowa i najmniejszy kąt tarcia wewnętrzznego. Natomiast keramzyt charakteryzował się najmniejszą gęstością. Na rysunku 17a można zauważyć, że dla materiałów o zbliżonych kątach tarcia wewnętrzznego (granit i keramzyt) większą nośność uzyskano dla cięższej zasypki. Porównując natomiast obciążenia niszczące otrzymane dla materiałów o zbliżonych gęstościach (granit, piasek) można zauważyć, że większą nośność uzyskał element zasypany kruszywem charakteryzującym się większym kątem tarcia wewnętrzznego - granit (rys. 17b).

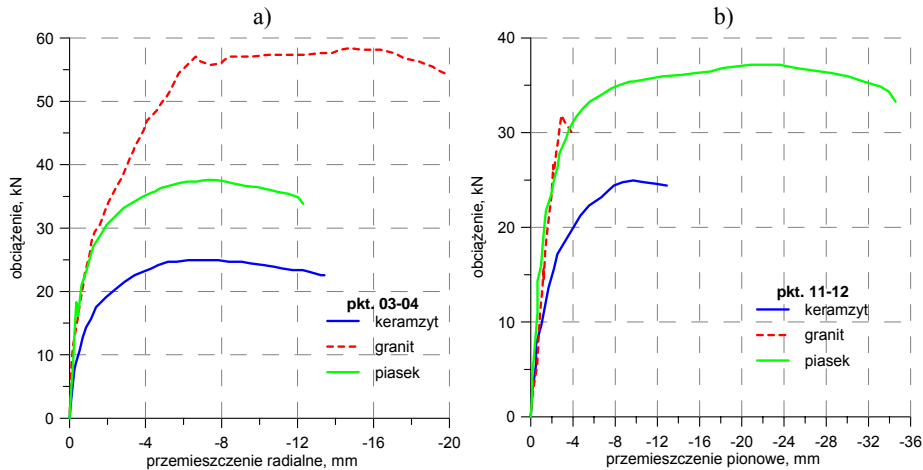
Uzyskane postacie zniszczenia poszczególnych elementów były podobne. Podczas obciążania powstały cztery punkty obrotu P1, P2, P3 i P4 (por. rys. 9, 11, 14). Przegub P1 w sklepieniach z zasypką z granitu i z zasypką z piasku utworzył się w spoinach 12B/13B, natomiast w elemencie z zasypką keramzytową między cegłami 13B i 14B. Przeguby P2 i P4 we wszystkich sklepieniach występowały w tych samych spoinach tj. 15A/16A - P2 i 4B/5B - P4. Lokalizacja przegubu P3 uzależniona była od rodzaju zastosowanego materiału zasypowego. Najbliżej podpory „A” przegub P3 powstał w sklepieniu z zasypką piaskową – spoina 5A/6A, natomiast najdalej od podpory „A” w elemencie zasypanym granitem tj. w spoinach 6A/7A i 7A/8A. W łuku z zasypką z keramzytu przegub P3 ukształtował się między warstwami cegieł 6A i 7A.

Dla badanych sklepień największe średnie przemieszczenia radialne łuku odpowiadające obciążeniu niszczącemu, występujące w miejscu przyłożenia obciążenia (pkt. 3 - 4), zarejestrowano dla elementu z granitem: -14,95 mm. Najmniejszą wartość przemieszczeń otrzymano dla zasypki z piasku – 6,56 mm. Natomiast w sklepieniu z keramzytem uzyskano przemieszczenie równe -6,75 mm (rys. 18a).



Rys. 17. Wykresy zależności obciążenia niszczonego od:
a) gęstości objętościowej materiału zasypowego, b) kąta tarcia wewnętrznego zasypki

Fig. 17. Collapse load versus:
a) backfill material density, b) backfill material internal friction angle



Rys. 18. Wykresy obciążenie-przemieszczenie średnie dla badanych sklepień:
a) przemieszczenia radialne punktów 3-4, b) przemieszczenia pionowe punktów 11-12

Fig. 18. Load vs mean displacement curves for tested vaults:
a) radial displacements of 3-4 measuring points, b) vertical displacements of 11-12 measuring points

Największe przemieszczenia pionowe powierzchni zasypki w miejscu przyłożenia obciążenia zarejestrowano dla elementu z zasypką z piasku: $-21,74$ mm. Dla sklepienia, w którym jako materiał zasypowy zastosowano granit pomiary przemieszczeń w punktach 11 i 12 prowadzone były tylko w początkowej fazie. Ze względu na konieczność korygowania ułożenia elementów obciążających nie wykonywano dalszych odczytów. W przypadku łuku zasypanego keramzytem średnie przemieszczenie z punktów 11 i 12 wynosiło: $-9,22$ mm (rys. 18b).

5. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników badań można stwierdzić, że rodzaj materiału zasypowego zastosowanego do wypełnienia pacy sklepienia ma istotny wpływ na pracę i nośność układu zasypka-sklepienie. Istotnymi właściwościami w przypadku zasypki jest ciężar objętościowy oraz kąt tarcia wewnętrznego. Stwierdzenie na podstawie przedstawionych wyników, który z tych parametrów w większym stopniu wpływa na uzyskiwane obciążenie niszczące nie jest możliwe. Konieczne są w tym celu dodatkowe badania doświadczalne lub symulacje numeryczne. Natomiast można zauważyć, że zwiększenie gęstości objętościowej lub kąta tarcia wewnętrznego powoduje zwiększenie nośności układu zasypka-sklepienie.

Największe przemieszczenia radialne punktów pomiarowych 3–4 (w miejscu przyłożenia obciążenia) odnotowano dla sklepienia z zasypką z tłuczni granitowego. Natomiast w przypadku elementu zasypanego piaskiem przemieszczenia w tych punktach pomiarowych były około dwukrotnie mniejsze. Analizując przemieszczenia sklepień można zauważyć, że ich wartości zwiększały się wraz ze wzrostem wartości kątów tarcia wewnętrznego materiału zasypowego.

Wszystkie badane elementy zniszczyły się w wyniku powstania czteroprzegubowego mechanizmu. Rodzaj zastosowanego materiału zasypowego wpływał na położenie przegubów mechanizmu. Największe różnice w lokalizacji pęknięć zaobserwowano dla przegubu P3, który formował się w pobliżu podpory „A”. Najbliżej podpory „A” pęknięcie P3 znajdowało się w przypadku elementu zasypanego piaskiem tj. materiałem o najmniejszym kącie tarcia wewnętrznego, natomiast najdalej od tej podpory przegub utworzył się dla zasypki z granitu – materiału o największym kącie tarcia wewnętrznego.

Podczas badań doświadczalnych, w trakcie usuwania zasypki z uszkodzonego sklepienia obserwowano niestabilność konstrukcji i wrażliwość na niewielkie obciążenia. W przypadku konieczności usunięcia zasypki ze sklepień w modernizowanych budynkach należy zachować szczególną ostrożność, ze względu na niewidoczne uszkodzenia, które mogły powstać na grzbiecie sklepienia. Usunięcie zasypki zmienia w znacznym stopniu rozkład naprężeń w sklepieniu, co może spowodować powstanie dodatkowych uszkodzeń lub niestateczność uszkodzonego sklepienia. Zaleca się zabezpieczenie odsłanianego sklepienia na czas wykonywania robót np. przez podstepowanie.

Ze względu na istotny wpływ rodzaju zastosowanego materiału zasypowego dobór nowej zasypki powinny poprzedzać analizy obliczeniowe sprawdzające wpływ właściwości proponowanego materiału na pracę modernizowanej konstrukcji. Przy wstępnym wyborze odpowiedniego materiału pomocne mogą okazać się wytyczne zamieszczone w normie Eurokod 7 [15]. Zalecenia te dotyczą właściwości zasypki oraz

sposobu jej układania i zagęszczania. Z wytycznych zamieszczonych we wspomnianej normie wynika między innymi, że do wykonywania zasypek w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi należy stosować materiały nietoksyczne zapewniające właściwe warunki higieniczne. Ułożony materiał należy właściwie zagęścić, tak aby charakteryzował się małą odkształcalnością (brak osiadania lub pęcznienia) wymaganą ze względu na ograniczenie przemieszczeń konstrukcji podłogi ułożonej na gruncie zasypowym. Przyjęte metody zagęszczania nie mogą powodować uszkodzeń sklepienia oraz pozostałych elementów konstrukcji nośnej w obiekcie budowlanym. Dodatkowo zasypka znajdująca się pod konstrukcją podłogi powinna zapewniać odpowiednią izolacyjność termiczną i akustyczną.

Literatura

- [1] J a n o w s k i Z., *Diagnostyka, naprawy i rekonstrukcje obiektów murowych*, XX Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, 2001, s. 205-234.
- [2] J a n o w s k i Z., H o j d y s Ł., K r a j e w s k i P., *Analiza oraz naprawa i rekonstrukcja sklepień w obiektach historycznych*, XXIII Konf. N-T Awarie Budowlane, 2007, s. 251-260.
- [3] H e y m a n J., *The masonry arch*. Ellis Horwood Limited, 1982.
- [4] C l e m e n t e P., O c c h i u z z i A., R a i t h e l A., *Limit behaviour of stone arch bridges* Journal of Structural Engineering, 1995, Vol. 121, s. 1045-1050.
- [5] B o o t h b y T. E., D a l a l V. A., *Service load response of masonry arch bridges*, Journal of Structural Engineering, 1998, Vol. 124, s. 17-23.
- [6] P a g e J., *Masonry arch bridges*. HMSO, 1993
- [7] P o n n i a h D., P r e n t i c e D. J., *Long term monitoring of fill pressures in a new brickwork arch bridge*, Construction and Building Materials, 1999, Vol. 13, s. 159-167.
- [8] F a i r f i e l d C. A., P o n n i a h D., *Model tests to determine the effect of fill on buried arches*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings, 1994, Vol. 104, s. 471-482.
- [9] G i l b e r t M., S m i t h F. W., W a n g J., C a l l a w a y P. A., M e l b o u r n e C., *Small and large-scale experimental studies of soil-arch interaction in masonry bridges*, 5th International Conference on Arch Bridges ARCH'07, 2007, s. 381-388.
- [10] H u g h e s T. G., D a v i e s M. C. R., T a u n t o n P. R., *The influence of soil and masonry type on the strength of masonry arch bridges*, Arch Bridges. History, analysis, assessment, maintenance and repair, 1998, s. 321-330.
- [11] P o n n i a h D., P r e n t i c e D. J., *Load-carrying capacity of masonry arch bridges estimated from multi-span model tests*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings, 1998, Vol. 128, s. 81-90.
- [12] R o y l e s R., H e n d r y A. W., *Model tests on masonry arches*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part 2. Research and Theory., 1991, Vol. 91, s. 299-321.
- [13] K r a j e w s k i P., *Analiza wpływu materiału zasypowego na nośność sklepień murowych*, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, 2010.
- [14] H o j d y s Ł., *Wpływ wzmocnienia materiałami kompozytowymi sklepień murowych na ich nośność*, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, 2010.
- [15] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne - Cz. 1: Zasady ogólne.