

# Analiza parametryczna wpływu właściwości materiału zasypowego na nośność sklepień ceglanych

Dr inż. Piotr Krajewski, dr inż. Łukasz Hojdis, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

Sklepienia murowe są elementami konstrukcyjnymi, które występują w budownictwie od tysięcy lat. Obecnie wykonywane są one sporadycznie, jednak znaczna ich liczba dotrwała do naszych czasów i jest ciągle użytkowana. Sklepienia wykorzystywane były w budynkach jako konstrukcje przekryć oraz stropów międzykondygnacyjnych, a w obiektach inżynierskich jako główne elementy nośne łukowych mostów murowych. Ze względu na geometrię sklepień do uzyskania płaskiej powierzchni użytkowej konieczne było wypełnienie pach i przykrycie grzbietu sklepienia materiałem zasypowym. W zależności od rodzaju obiektu na zasyпки stosowano materiały o zróżnicowanych właściwościach. Podczas prowadzenia prac remontowych związanych z dostosowaniem obiektów historycznych do współczesnych wymagań użytkowych może zaistnieć konieczność wymiany starego materiału zasypowego na nowy. Powstaje wtedy pytanie, jaki materiał wybrać, aby korzystnie wpłynąć na pracę konstrukcji.

Od lat 90. XX wieku prowadzone są badania doświadczalne oraz analizy obliczeniowe dotyczące wpływu obecności oraz właściwości zasyпки na nośność murowych mostów łukowych [1–6]. Autorzy tych badań wykazali, że obecność zasyпки oraz jej właściwości wpływają istotnie na pracę analizowanych konstrukcji. W przypadku sklepień w budynkach można znaleźć jedynie nieliczne publikacje dotyczące zagadnienia interakcji sklepienia z zasypką [7–13]. Stosując w ocenie sklepień w budynkach

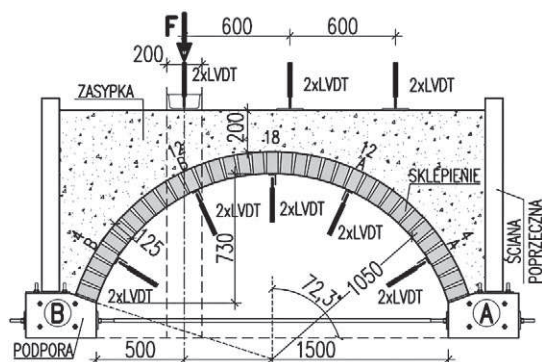
zalecenia bazujące na badaniach mostów łukowych, należy pamiętać o istniejących różnicach konstrukcyjno-materiałowych np. o występujących w budynkach ścianach nośnych w bezpośrednim sąsiedztwie zasypanych sklepień, o zwykle gorszej jakości materiałach stosowanych do wznoszenia budynków i wypełniania pach itp.

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i symulacji numerycznych prowadzonych na modelach sklepień walcowych z pachami wypełnionymi materiałem zasypowym. W badaniach laboratoryjnych do wykonania zasyпки stosowano keramzyt, tłuczeń granitowy lub piasek. W symulacjach numerycznych rozszerzono spektrum analizowanych przypadków, prowadząc analizę parametryczną dla dodatkowych jedenastu materiałów zasypowych o zróżnicowanej gęstości objętościowej lub kącie tarcia wewnętrznego. 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. Głównym celem analiz było zbadanie wpływu gęstości objętościowej oraz kąta tarcia wewnętrznego materiału zasypowego na nośność układu zasyпка-sklepienie.

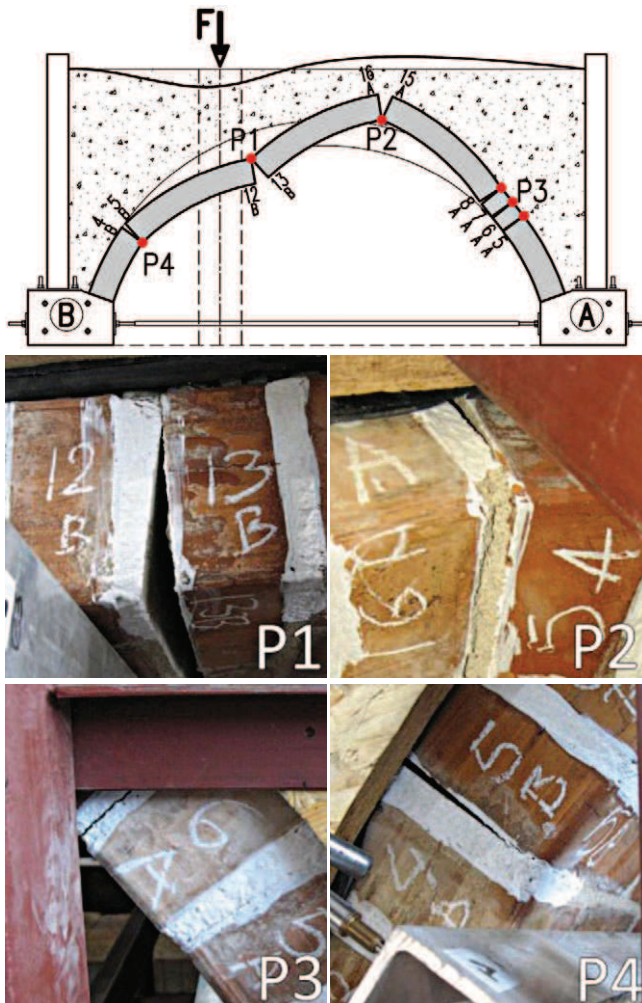
## 2. Badania laboratoryjne

### 2.1. Geometria, materiały

Badania doświadczalne prowadzono na 3 pasmach sklepień walcowych o szerokości 1040 mm (4 cegły),



**Rys. 1.** Geometria sklepienia, lokalizacja obciążenia (F) i czujników indukcyjnych (LVDT)



Rys. 2. Postać zniszczenia sklepienia SGM

rozpiętości w świetle podpór 2000 mm, promieniu wewnętrznym 1050 mm, strzałce 730 mm i grubości 125 mm (1/2 cegły) – rysunek 1. Łuki murowano z ceramicznej cegły pełnej na zaprawie wapiennej. Wytrzymałość na ścislenie cegły i zaprawy wynosiła odpowiednio 21,4 N/mm<sup>2</sup> i 1,1 N/mm<sup>2</sup>. Do zasypania sklepień zastosowano keramzyt (element SKM), tłuczeń granitowy (element SGM) lub piasek (element SPM). W celu zabezpieczenia materiału zasypowego przed wysypianiem

zastosowano żelbetowe ściany poprzeczne oraz ściany podłużne wykonane z płyt OSB lub pleksi usztywnione rusztem z profili stalowych (rys. 1). Wybrane właściwości materiałów zasypowych stosowanych w badaniach zestawiono na rysunku 3.

Obciążenie przykładano w 1/4 rozpiętości łuku do górnej powierzchni zasyпки na całej szerokości elementu badawczego. Podczas badań rejestrowano w sposób ciągły przykładane obciążenie, przemieszczenia radialne sklepienia oraz przemieszczenia pionowe górnej powierzchni materiału zasypowego (rys. 1).

Dokładny opis geometrii oraz zastosowanych technik pomiarowych został przedstawiony w pracach [9] [12].

## 2.2. Wyniki badań doświadczalnych

Wszystkie badane sklepienia zniszczyły się w wyniku przekształcenia konstrukcji w czteroprzegubowy mechanizm (rys. 2). W trakcie badań powstawały kolejne zarysowania, które wraz ze wzrostem obciążenia powiększały się tworząc przeguby mechanizmu. Uzyskane obciążenia niszczące zależały od rodzaju zastosowanego materiału zasypowego i wynosiły: 27.6 kN – SKM, 37.2 kN – SPM i 58.2 kN – SGM (rys. 3).

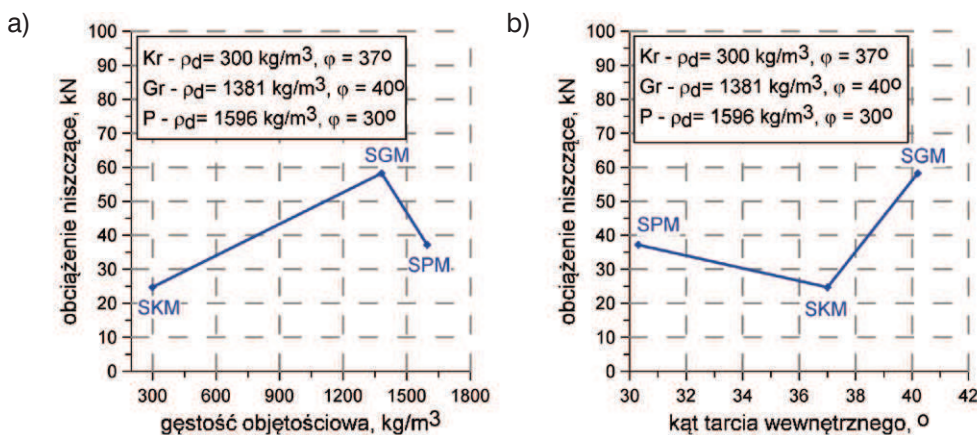
Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że właściwości zastosowanych zasypek wpływają istotnie na nośność układu zasyпка-sklepienie. Największą nośność uzyskano dla sklepienia zasypanego tłuczniem granitowych, tj. materiałem charakteryzującym się największym kątem tarcia wewnętrznego. Najmniejszą nośność uzyskał element z keramzytem, czyli materiałem o najniższej gęstości objętościowej, ale stosunkowo dużym kącie tarcia wewnętrznego.

Ze względu na zróżnicowane właściwości zastosowanych materiałów trudno jest jednoznacznie wskazać, która z podstawowych właściwości, tj. gęstość objętościowa, czy kąt tarcia wewnętrznego ma większy wpływ na nośność badanych elementów (rys. 3).

## 3. Symulacje numeryczne

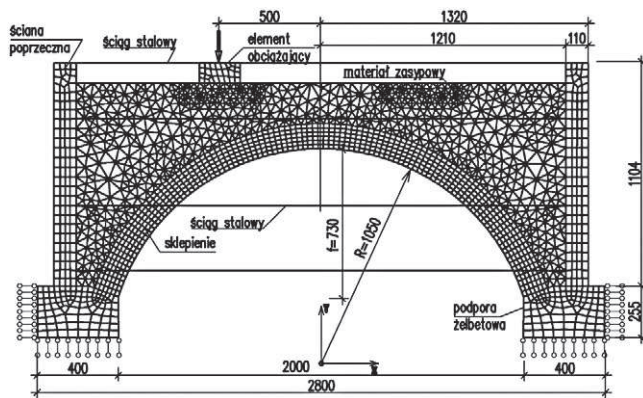
### 3.1. Opis modelu

Ze względu na niejednoznaczne wyniki uzyskane w laboratorium badania rozszerzono o dodatkowe analizy



Rys. 3. Wykresy zależności obciążenia niszczonego od: a) gęstości objętościowej materiału zasypowego, b) kąta tarcia wewnętrznego zasyпки. Podane kąty tarcia wewnętrznego badanych materiałów wyznaczano w stanie luźnym



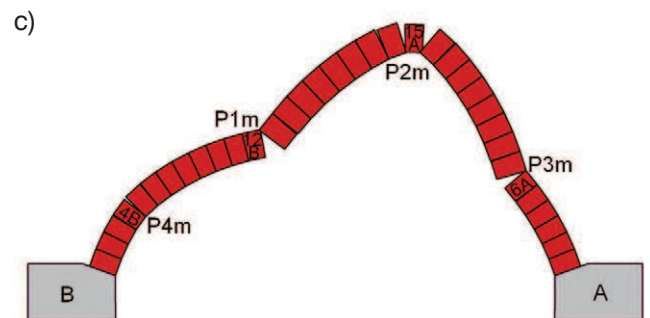
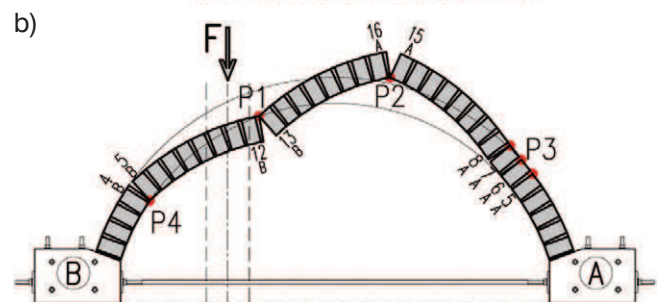
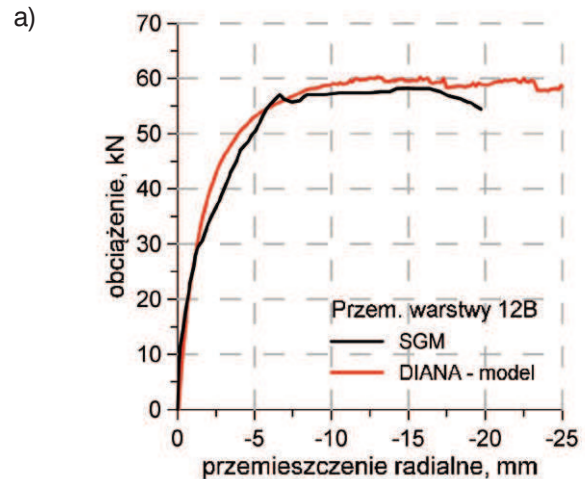


Rys. 4. Model skończenie elementowy przyjęty do analizy MES

z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Głównym celem prowadzonych obliczeń było wyjaśnienie, w jakim stopniu na osiągnięte obciążenia niszczące wpływa zmiana gęstości objętościowej lub kąta tarcia wewnętrznego materiału zasypowego.

Do symulacji numerycznych zastosowano program TNO DIANA umożliwiający prowadzenie analiz w zakresie nieliniowym. Całe zagadnienie zamodelowano w płaskim stanie odkształcenia. Przyjęty do analiz model skończenie elementowy uwzględniał główne elementy stanowiska badawczego, tj. sklepienie murowe wraz z podporem żelbetowymi i ścianami poprzecznymi oraz materiał zasypowy na grzbiecie łuku (rys. 4).

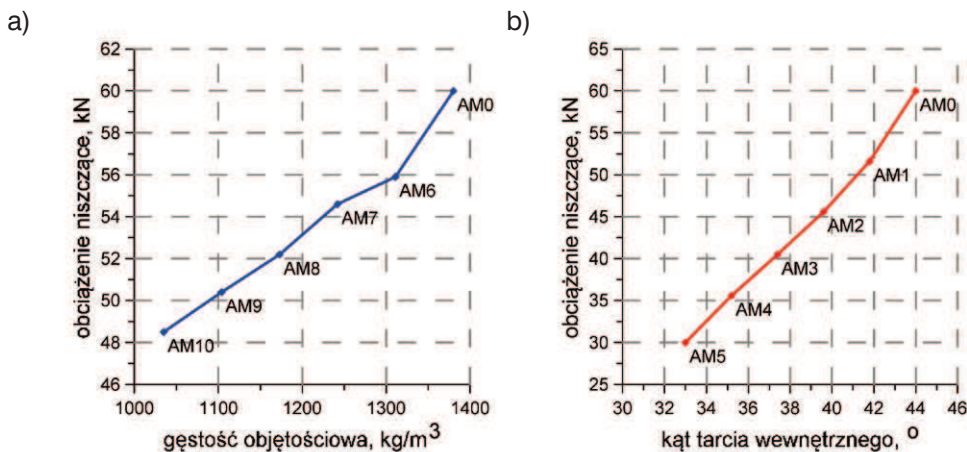
Do opisu muru przyjęto uproszczony mikromodel składający się z liniowo-sprężystych bloków (cegła) o module sprężystości  $11000 \text{ N/mm}^2$  i współczynnika Poissona  $0,2$  połączonych interfejsem o zerowej grubości uwzględniającym zachowanie się zaprawy oraz właściwości styku cegła-zaprawa [14]. Przyjęcie takiego modelu wymuszało powstawanie uszkodzeń w miejscach, w których zlokalizowane były spoiny, co pozwalało na odwzorowanie postaci zniszczenia obserwowanych w badaniach doświadczalnych sklepienia z zasypką. W obliczeniach dla interfejsu w murze założono: sztywność normalną równą  $22 \text{ N/mm}^3$ , sztywność styczną  $10 \text{ N/mm}^3$ , wytrzymałość na rozciąganie  $0,05 \text{ N/mm}^2$ , energię zniszczenia przy rozciąganiu  $0,006 \text{ N/mm}$ , tangens kąta tarcia wewnętrznego  $0,75$ , kąt dylatacji  $0^\circ$ , kohezję  $0,1 \text{ N/mm}^2$ , energię zniszczenia przy ścinaniu  $0,01 \text{ N/mm}$ , wytrzymałość muru na ściskanie  $5,5 \text{ N/mm}^2$ , energię zniszczenia przy ścisaniu  $1,36 \text{ N/mm}$ , względne przemieszczenie plastyczne  $0,4$ . Materiały zasypowe stosowane w badaniach sklepienia i analizach były gruntami niespoistymi (bez kohezji). W celu zamodelowania takiego materiału przyjęto izotropowy sprężysto-idealnie plastyczny model materiału z powierzchnią plastyczności Mohra-Coulomba. Gęstość objętościową oraz kąt tarcia wewnętrznego dla analizowanych zasypok zestawiono w tabeli 1. We wszystkich symulacjach przyjęto stały moduł sprężystości  $90 \text{ N/mm}^2$ , współczynnik Poissona  $0,2$ .



Rys. 5. Porównanie wyników symulacji MES z badaniami doświadczalnymi SGM: a) wykresy obciążenie-przemieszczenie radialne punktów pomiarowych na warstwie cegiel 12B, b) postać zniszczenia z badań, c) postać uzyskana w obliczeniach MES

Tabela 1. Właściwości materiałów zasypowych zastosowanych w analizach MES oraz odpowiadające im obciążenia niszczące

Materiał zasypowy	Kąt tarcia wewnętrznego [°]	Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Obciążenie niszczące [kN]
AM0	44	1381	60
AM1	42	1381	51.6
AM2	40	1381	45.6
AM3	37	1381	40.5
AM4	35	1381	35.6
AM5	33	1381	30
AM6	44	1311	55.9
AM7	44	1242	54.6
AM8	44	1173	52.2
AM9	44	1104	50.4
AM10	44	1035	48.5



**Rys. 6.**  
Wykresy zależności obciążenia niszczonego od:  
a) gęstości objętościowej materiału zasypowego,  
b) kąta tarcia wewnętrznej zasypki

Żelbetowe podpory oraz ściany poprzeczne zamodelowano jako liniowo-sprężyste przyjmując w obliczeniach moduł sprężystości 30000 N/mm<sup>2</sup> i współczynnik Poissona 0,2.

Istotnym zagadnieniem w przedstawionym modelu był sposób połączenia zasypki ze ścianami poprzecznymi, sklepieniem i elementem obciążającym. W tym celu zastosowano elementy interfejsowe o zerowej grubości oraz model tarcia Coulomba. Rozwiązanie takie umożliwia wzajemne przemieszczanie się łączonych fragmentów układu konstrukcyjnego oraz ich oddziaływanie na siebie zgodne z przyjętym dla interfejsu modelem fizycznym. W symulacjach przyjęto: sztywność styczną równą 0,04 N/mm<sup>3</sup>, sztywność normalną 4,0 N/mm<sup>3</sup>, współczynnik tarcia materiału zasypowego o sklepienie i żelbetowe ściany poprzeczne 0,8, tangens kąta dylatacji 0,001 oraz zerową wytrzymałość styku na rozciąganie.

### 3.2. Wyniki obliczeń MES

W celu sprawdzenia poprawności przyjętego modelu obliczeniowego odtworzono badanie doświadczalne elementu SGM – sklepienia z zasypką z tłuczni granitowego zakładając w modelu MES zmodyfikowane ze względu na prowadzenie obliczeń w płaskim stanie odkształcenia wartości kąta tarcia wewnętrznego [15] (materiał AM0 – tabela 1). Stwierdzono zadowalającą zgodność w zakresie nośności, odkształcalności oraz uzyskanych postaci zniszczenia (rys. 5).

Zweryfikowany powyżej model przyjęto do dalszych analiz parametrycznych mających na celu poznanie wpływu gęstości objętościowej oraz kąta tarcia wewnętrznego kruszywa na nośność układu zasypka-sklepienie. W obliczeniach założono 11 materiałów zasypowych o zróżnicowanych właściwościach (tabela 1). Przyjęto, że elementem porównawczym będzie sklepienie zasypane materiałem AM0. W materiałach AM1 do AM5 zmniejszono kąt tarcia wewnętrznego przy stałej gęstości natomiast w materiałach AM6 do AM10 modyfikowano gęstość przy stałym kącie tarcia wewnętrznego.

Analizowane sklepienia zniszczyły się wskutek przekształcenia w czteroprzegubowy mechanizm przy

zróżnicowanym obciążeniu niszcącym. Uzyskane obciążenia niszczące zależały od przyjętych wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz gęstości objętościowej materiałów zasypowych (tabela 1).

Zmniejszenie gęstości objętościowej lub kąta tarcia wewnętrznego powodowało redukcję obciążenia koniecznego do zniszczenia konstrukcji (rys. 6).

## 4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników badań doświadczalnych można stwierdzić, że właściwości zastosowanych materiałów zasypowych, takie jak gęstość objętościowa oraz kąt tarcia wewnętrznego wpływają na nośność układu zasypka-sklepienie. Przeprowadzenie symulacji numerycznych pozwoliło zaobserwować, w jakim stopniu zmiana gęstości objętościowej oraz kąta tarcia wewnętrznego wpływa na nośność sklepienia. W badaniach eksperymentalnych największą nośność uzyskano dla tłuczni granitowego, najmniejszą dla keramzytu. Stosowane w doświadczeniach materiały charakteryzowały się zróżnicowanymi właściwościami. Tłuczeń granitowy miał największy kąt tarcia wewnętrznego, piasek cechowała najwyższa gęstość objętościowa, a keramzyt miał najniższą gęstość. Na podstawie eksperymentu nie można było stwierdzić, która z wymienionych wcześniej właściwości materiału zasypowego wpływa w większym stopniu na uzyskane obciążenia niszczące.

Przeprowadzone symulacje numeryczne pozwalają stwierdzić, że nośność sklepienia w dużym stopniu zależy od zmiany kąta tarcia wewnętrznego materiału zasypowego, natomiast w mniejszym stopniu uzależniona jest od jego ciężaru objętościowego. Zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego zasypki o 25% (por. materiały AM0 i AM5) zredukowało nośność układu zasypka-sklepienie o połowę, podczas gdy 25% zmniejszenie gęstości objętościowej (por. materiały AM0 i AM10) spowodowało spadek nośności o 19%.

Należy zaznaczyć, że prezentowane badania dotyczyły stosunkowo ograniczonej liczby możliwych przypadków. Przedstawione wyniki oraz wnioski z badań i symulacji



numerycznych mogą stanowić wskazówkę dla inżynierów podczas analiz konstrukcji sklepionych z zasypką. Należy pamiętać, że znalezienie dwóch identycznych sklepień w istniejących obiektach jest mało prawdopodobne, a nawet niemożliwe. Każdą konstrukcją tego typu należy traktować jako jedyną w swoim rodzaju i prowadzić jak najszerze badania mające na celu poznanie właściwości zastosowanych materiałów oraz historii obiektu, a zwłaszcza historii dotychczasowych remontów, przebudów itp.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Royles R., Hendry A. W., Model tests on masonry arches. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part 2. Research and Theory., 91, 1991, s. 299–321
- [2] Fairfield C. A., Ponniah D., Model tests to determine the effect of fill on buried arches. "Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings", 104, 1994, s. 471–482
- [3] Prentice D. J., Ponniah D., Testing of multi-span model masonry arch bridges. Bridge: Assessment Management and Design, s. 169–174, 1994
- [4] Hughes T. G., Davies M. C. R., Taunton P. R., The influence of soil and masonry type on the strength of masonry arch bridges. Arch Bridges. History, analysis, assessment, maintenance and repair., s. 321–330, 1998
- [5] Gilbert M., Smith F. W., Wang J., Callaway P. A., Melbourne C., Small and large-scale experimental studies of soil-arch interaction in masonry bridges. 5th International Conference on Arch Bridges ARCH'07, s. 381–388, 2007

- [6] Callaway P., Gilbert M., Smith C.C., Influence of backfill on the capacity of masonry arch bridges, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Bridge Engineering, 165 (3), s. 147–157, 2012
- [7] Zając E., Analiza statyczna sklepień walcowych z uwzględnieniem ich współpracy z zasypką. Inżynieria i Budownictwo, 1:29–32, 1989
- [8] Janowski Z., Hojdys Ł., Krajewski P., Analiza statyczna wpływu zasyпки na pracę sklepienia walcowego. Czasopismo Techniczne, 13-B, s. 79–95, 2006
- [9] Krajewski P., Analiza wpływu materiału zasypowego na nośność sklepień murowych. Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, 2010
- [10] Krajewski P., Janowski Z., Wpływ rodzaju materiału zasypowego na pracę sklepień walcowych, „Czasopismo Techniczne”, 3-B, s. 187–204, 2011
- [11] Hojdys Ł., Kamiński T., Krajewski P., Experimental and numerical simulations of collapse of masonry arches. 7th International Conference on Arch Bridges (ARCH'13), Split-Trogir, Croatia, s. 739–746, 2013
- [12] Krajewski P., Hojdys Ł., Experimental studies on buried barrel vaults, International Journal of Architectural Heritage, DOI:10.1080/15583058.2013.860499 (w druku)
- [13] Hojdys Ł., Krajewski P., Buried vaults with different types of extrados finishes – experimental tests, 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC, 2014, Mexico
- [14] Lourenco P. B.: Computational Strategies for Masonry Structures. Praca doktorska, Delft University of Technology, 1996
- [15] Holtz R. D., Lee W. F., Internal stability analyses of geosynthetic reinforced retaining walls. Raport instytutowy, Department of Civil and Environmental Engineering University of Washington and Washington State Transportation Center (TRAC) University of Washington, 2002

# Materiały budowlane na bazie drewna – obecny stan wiedzy i możliwości stosowania

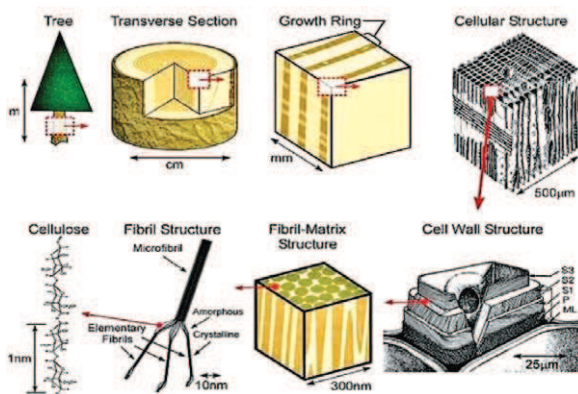
Dr inż. Dorota Kram, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

Drewno jako materiał budowlany znany jest człowiekowi, odkąd zaczął

budować własne schronienia. Na przełomie milionów lat nauczyliśmy się go stopniowo obrabiać, by następnie wraz z rozwojem

wiedzy zacząć wnikać w jego strukturę i uporządkowanie, wykorzystując coraz bardziej jego zalety i wyszukując mu coraz to nowsze obszary zastosowań. Z tego też względu drewno nie jest już dziś jedynie prostym w pozyskiwaniu materiałem budowlanym, ale stało się ono dla nas surowcem, materiałem wyjściowym do produkcji innych użytecznych człowiekowi wyrobów. W Polsce materiał ten mimo, że wraca do łask, swoje lata świetności chwilowo ma za sobą, natomiast świat nadal odkrywa go na nowo, dając mu coraz nowsze obszary zastosowań.



Rys. 1. Struktura celulozy – od pnia (kłody drewna) po cząsteczkę [5]

## 2. Struktura drewna – od ogółu do szczegółu

Mimo że większość z nas postrzega drewno w skali makro, przez pryzmat belki czy kłody, należy na nie dziś spojrzeć nieco odmiennie, dostrzegając jego walory również w skali mikro.

Pod względem technicznym drewno jest naturalnym materiałem kompozytowym o osnowie polimerowej. Ciągłe włókna polimerowe są tu jednoosiowo podłużnie