

Beton architektoniczny warstwowy – projektowanie i wykonawstwo

LAYERED ARCHITECTURAL CONCRETE
– DESIGN AND MANUFACTURE

Streszczenie

Poszukiwania odpowiedniego wyrazu wizualnego dla danej konstrukcji rozpoczynają się już na etapie koncepcji architektonicznej. Wraz z postępem prac nad projektem zmienia się oczekiwanie odnośnie wyglądu powierzchni elewacji i elementów wewnętrznych. Wybór betonu architektonicznego jako tworzywa do realizacji projektu nie tylko pozwala na dowolne jego kształtowanie, przez różne deskowania czy obróbkę powierzchni, ale również wprowadza pewne ograniczenia, których należy być świadomym. Żonglowanie teksturami i kolorami powierzchni betonowej wydaje się wręcz nieograniczone, pod warunkiem, że wykonanie będzie realne przy wykorzystaniu danego rozwiązania konstrukcyjnego. Artykuł jest próbą przybliżenia warunków jakim powinna odpowiadać konstrukcja, żeby z powodzeniem stosować różnego typu betony architektoniczne warstwowe. Zostaną przedstawione doświadczenia m.in. z projektowania i wykonania ścian z betonu warstwowego Kopca Powstania Warszawskiego i Izby Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy.

Abstract

The search for the right visual expression for a structure begins at the architectural concept stage. As the project progresses, the expectations regarding the appearance of the facade surfaces and interior elements change. The choice of fair-faced concrete as the material of choice for a project not only allows free shaping, through different formwork or surface treatments, but also introduces certain limitations that must be borne in mind. The juggling of textures and colours of the concrete surface seems almost limitless, provided that the execution is feasible using a given design solution. This article is an attempt to provide an overview of the conditions to which a structure must conform in order to successfully

use various types of architectural layered concrete. Experiences from, among others, the design and execution of walls made of layered concrete of the Warsaw Uprising Mound and the Memorial Chamber at the Warsaw Insurgents' Cemetery will be presented.



Fot. 1. Beton architektoniczny warstwowy (zmiana składu i konsystencji)

1. Wstęp

Betony architektoniczne warstwowe wykonywane są od wielu lat, choć czasami powstają jako niezamierzony efekt błędów podczas wykonywania betonu architektonicznego. Zmiany składu np. w wyniku zmiany w/c sprawiają, że na powierzchni betonu pojawiają się widoczne poszczególne warstwy betonu. Podobną sytuację można obserwować, gdy jedna z wbudowywanych warstw jest w mniejszym stopniu zagęszczona. Oba te przypadki są błędami wykonawczymi i jako takie nie są akceptowalne. Inaczej jest gdy architekt celowo zamierza uwidocznienie uwarstwienia betonu, albo w celu upodobnienia betonu do naturalnych warstw ziemi, albo w celu podkreślenia warstwowej budowy elementu. Niezależnie od motywacji kierujących autorami projektów z betonem architektonicznym warstwowym należy być świadomym faktu, że tego typu konstrukcje wymagają spełnienia określonych założeń konstrukcyjnych i wykonawczych. Założenia te są uzależnione od przyjętej technologii.

Jako kryterium przyporządkowania do betonu architektonicznego warstwowego poszczególnych rodzajów powierzchni przyjęto widoczne uwarstwienie powstałe wskutek samej technologii wbudowywania bądź w skutek celowych zabiegów związanych ze zmianą składu lub parametrów betonu. I tak jako beton architektoniczny warstwowy przyjęto:

- beton ubijany będący rodzajem ziemi ubijanej (rammed earth - RE),
- beton z warstw powstałych w wyniku celowej zmiany składu lub parametrów mieszanki,
- beton drukowany.

2. Ziemia ubijana (rammed earth - RE)

Technologia ubijania ziemi znana jest od tysięcy lat, a konstrukcje wykonane przy użyciu tej technologii można podziwiać do dziś. Doskonałym przykładem jest Wielki Mur Chiński, którego liczne odcinki zostały wykonane w technologii ziemi ubijanej około 4000 lat temu [1]. Obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach powrót do tej technologii wiąże się zarówno z aspektem ekologicznym jak i estetycznym. W pierwszym przypadku istotny jest fakt, że przy wykonywaniu elementów z ziemi ubijanej stosuje się lokalne materiały, a konstrukcje takie charakteryzują się niskim zapotrzebowaniem na energię, oraz przy ich wykonywaniu powstaje mała ilość odpadów. Z drugiej strony wielu architektów przekonuje układ warstw odzwierciedlający naturalny układ warstw ziemi, a także surowy wygląd powierzchni.



Fot. 2. Aquatic Centre – przykład technologii RE [11]

Niezależnie od przyczyn wybrania ziemi ubijanej jako metody wznoszenia konstrukcji konieczne jest zapoznanie się z wybraną technologią.

Przy wyborze technologii ubijanej ziemi należy zwrócić uwagę na dwie podstawowe kwestie:

- skład materiałowy,
- technologie wbudowania.

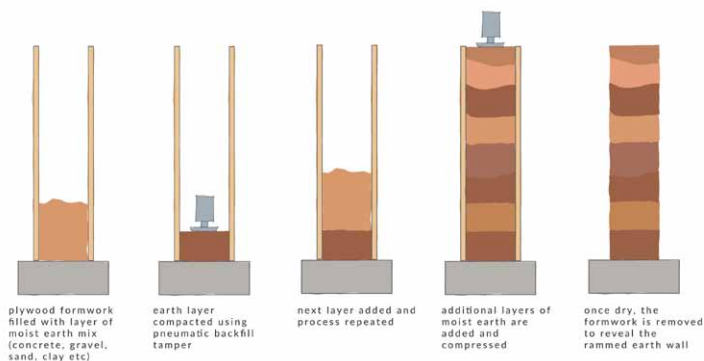
Surowcami używanymi do wykonania ziemi ubijanej są najczęściej: piasek, żwir (rzadziej grys), surowce ilaste (rzadziej inne materiały pylaste) i ewentualnie stabilizator.

Ze względu na skład technologia RE dzieli się na: ziemię ubijaną (rammed earth – RE), ziemię ubijaną stabilizowaną (stabilised rammed earth – SRE), ziemię ubijaną stabilizowaną cementem (cement stabilized rammed earth – CSRE).



Fot. 3. Technologia RE - NK'Mip Desert Cultural Centre DIALOG[12]

Technologia wbudowywania ziemi ubijanej polega na ubijaniu wilgotnej mieszanki w deskowaniu. Do wstępnie wymieszanych suchych materiałów dodawana jest woda, a następnie mokra mieszanka wrzucana jest do deskowania. Po zagęszczeniu warstwy ubijakami ręcznymi lub pneumatycznymi wbudowywana jest kolejna warstwa. Technologia ta pozwala na uzyskanie w miarę jednolitej barwy i tekstury przy zachowaniu dużej dokładności realizacji lub na celową zmianę kolorystyki i/lub tekstury w wyniku modyfikacji składu materiałowego i/lub wilgotności mieszanki.



Fot. 4. Proces wykonania RE [13]

Sposób wbudowywania ziemi ubijanej (konieczność użycia ubijaków) powoduje, że szczególną uwagę należy zwrócić zarówno na wymiary elementów, jak i na sposób zbrojenia. W literaturze brak jest jednoznacznego określenia minimalnej grubości ścian, a wartości wahają się między 0,2 m a 0,45 m. Podobna sytuacja jest w przypadku maksymalnej długości ścian, gdzie najczęściej wartość ta jest uzależniona od tego, czy ściana jest niepodparta lub podparta np. przez ściany dochodzące lub przypory. Długość ścian niepodpartych uzależniona jest od grubości ścian i tak na przykład w przypisie [3] podano jako maksymalna długość 15-krotność grubości, a w przypisie [4] 10-krotność grubości.

Szereg publikacji różni również podejście do zbrojenia ścian wykonanych z ziemi ubijanej. W większości przypadków pomija się zbrojenie poziome jako kłopotliwe do wbudowania przy wykorzystaniu tej technologii, a przy konieczności jego zastosowania np. w przypadku nadproży typowe pręty zbrojeniowe często zastępowane są przez konstrukcje stalowe.

3. Beton z warstw

Wykonywanie konstrukcji z betonu warstwowego jest technologią, która z jednej strony eliminuje niektóre kłopotliwe aspekty technologiczne ziemi ubijanej przy zachowaniu zbliżonego wyglądu powierzchni konstrukcji do „rammed earth”. W przypadku betonu z warstw możliwe jest zastosowanie dowolnej wytrzymałości z zastrzeżeniem, że im wyższa wytrzymałość tym wygląd bardziej odbiega od ziemi ubijanej pod względem tekstury.

W przypadku betonu z warstw rozróżnia się trzy podstawowe rozwiązania technologiczne, które pozwalają na uzyskanie widocznego układu warstw na powierzchni betonu:

1. wbudowywanie warstw różniących się składem i/lub konsystencją;
2. wbudowywanie warstw przy zastosowaniu innego materiału niż typowe deskowania jako formę;
3. celowe rozszczelnienie standardowego deskowania plus ewentualna dodatkowa obróbka powierzchni



Fot. 5. Centrum Nauki Leonarda da Vinci w Podzamczu Chęcińskim

Doskonałym przykładem pierwszego typu technologii betonu warstwowego jest budynek *Centrum Nauki Leonarda da Vinci w Podzamczu Chęcińskim* zaprojektowany przez eM4. Pracownia Architektury. Brataniec, gdzie układ warstw uzyskano w wyniku wbudowywania betonu o zróżnicowanej barwie.



Fot. 6. Centrum Nauki Leonarda da Vinci w Podzamczu Chęcińskim – fragment ściany

Przykładem drugiej technologii w pełni pokazującym jaki efekt osiąga się za jej pośrednictwem jest *Park Kopiec Powstania Warszawskiego* zaprojektowany przez pracownię Archigrest i topoScape.

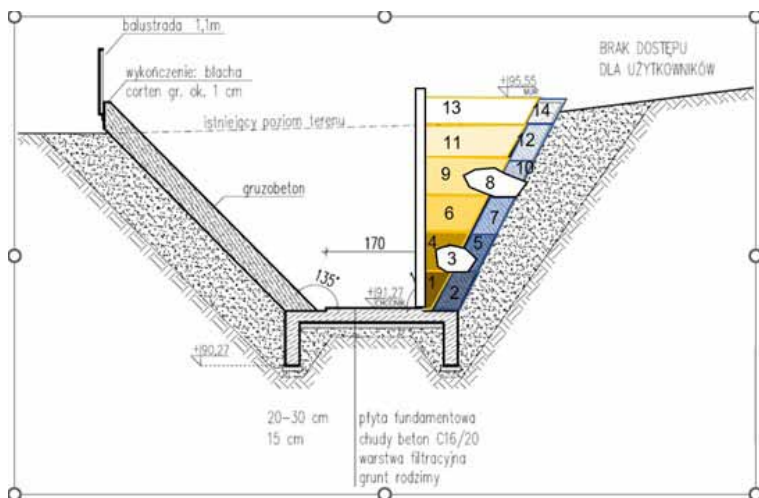
Natomiast przykładem ostatniego rozwiązania technologicznego może być *Izba Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy* zaprojektowana przez Bujnowski Architekti.

3.1. Park Kopiec Powstania Warszawskiego

Założeniem projektu było uzyskanie powierzchni ścian oporowych odzwierciedlających układ warstw ziemi w kopcu oraz użycie do wykonania ścian materiałów wydobytych z kopca w trakcie prowadzenia prac ziemnych. W celu uzyskania charakterystycznych warstw z wbudowanymi elementami wydobytego gruzu jako element deskowania użyto piasek, który częściowo wypełniał szalunek, nadając wbudowanemu betonowi nieregularną formę. Założono, że:

- jako zatapiane elementy gruzu użyte będą zarówno gruz betonowy jak i gruz ceglany wydobyty podczas profilowania skarp;
- elementy z gruzu powinny być zatopione w gruzobetonie w 2/3 swojej objętości;

- teksturę powierzchni należy uzyskać przez układanie betonu warstwami o grubości 10-15cm;
- ilość warstw uzależniona będzie od wysokości wykonywanego elementu;
- kolejność wykonania prac:
 - ustawienie deskowania (np. deskowanie rozporowe lub użycie zastrzałów),
 - wbudowanie piasku, gruzobetonu i elementów z gruzu (zgodnie z rysunkiem numer 7) w następującej kolejności:
 1. piasek warstwa 1,
 2. beton warstwa 1,
 3. gruz element 1,
 4. piasek warstwa 2,
 5. beton warstwa 2,
 6. piasek warstwa 3,
 7. beton warstwa 3,
 8. gruz element 2,
 9. piasek warstwa 4,
 10. beton warstwa 4,
 11. piasek warstwa 5,
 12. beton warstwa 5.
 - usunięcie deskowania,
 - usunięcie piasku,
 - wymycie pozostałości piasku wodą pod ciśnieniem.



Fot. 7. Schemat wbudowywania warstw w mur Kopca Powstania Warszawskiego.

Przed przystąpieniem do sporządzania specyfikacji wykonano elementy próbne w celu określenia właściwej konsystencji, a co za tym idzie wymaganego wyglądu powierzchni.

Ostatecznie w trakcie realizacji użyto obu technologii czyli betonu o konsystencji S1 ubijanego i betonu o konsystencji S2.



Fot. 8. Elementy próbne dla Kopca Powstania Warszawskiego (z lewej konsystencja S2, z prawej konsystencja S1).



Fot. 9. Fragment muru Kopca Powstania Warszawskiego przy konsystencji S2



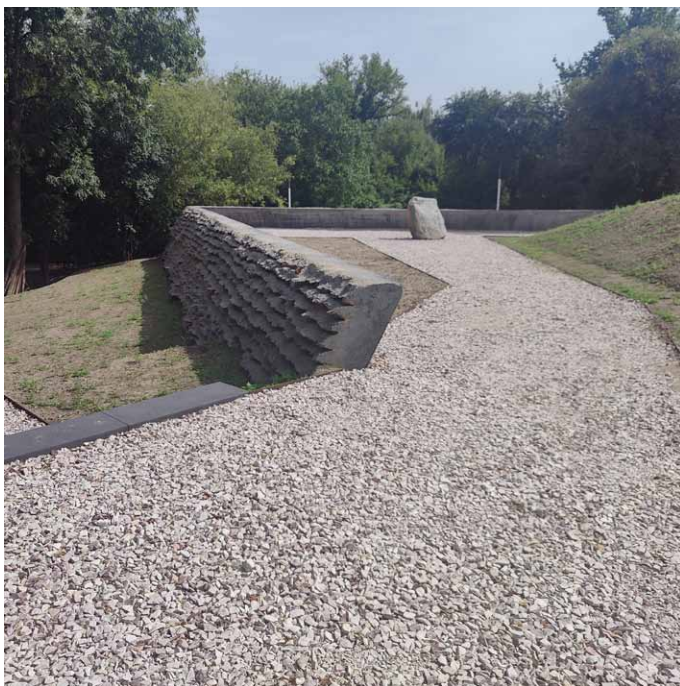
Fot. 10. Fragment muru Kopca Powstania Warszawskiego przy technologii S1



Fot. 11. Mur Kopca Powstania Warszawskiego w trakcie odświeżania



Fot. 12. Mur Kopca Powstania Warszawskiego z zatopionymi fragmentami gruzu



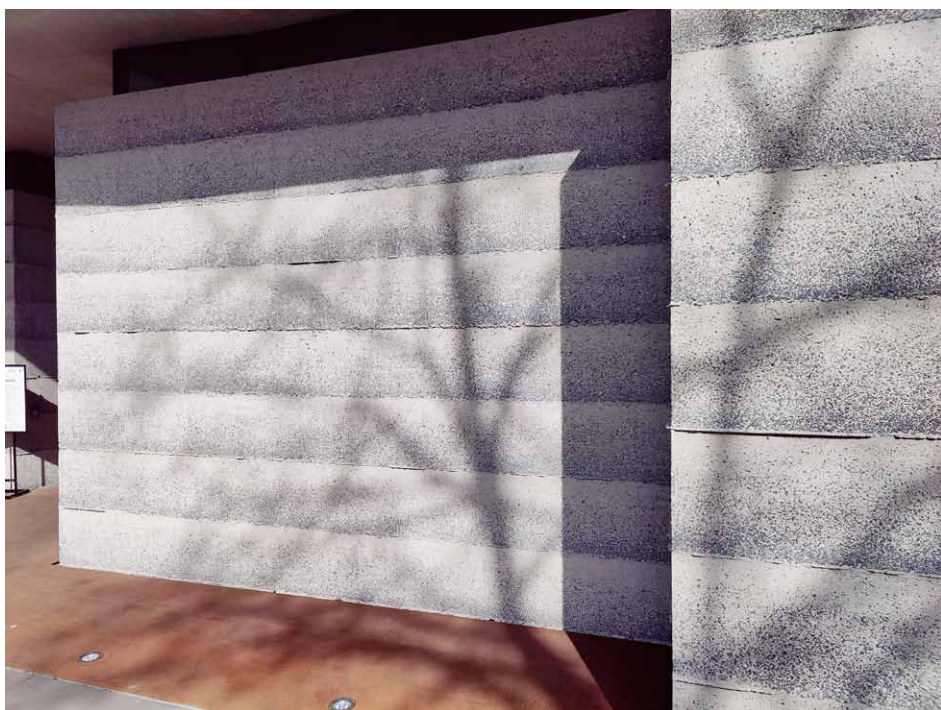
Fot. 13. Fragment muru Kopca Powstania Warszawskiego po zakończeniu prac ziemnych

3.2. Izba Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy

Projekt Izby Pamięci zakładał wykorzystanie kilku rodzajów betonu architektonicznego. Pawilon wejściowy został zaprojektowany z gładkiego betonu kategorii BA3, natomiast pawilon pamięci i mur z betonu warstwowego. Pierwotnie w projekcie zakładano zastosowanie typowej ziemi ubijanej, jednak ze względu na ograniczenie miejsca zdecydowano się na użycie betonu warstwowego. Jako wzorzec mający ukierunkować wykonawcę na efekt jaki powinien zostać osiągnięty, w specyfikacji betonu architektonicznego wskazano budynek autorstwa Peter'a Zumthora – Secular Retreat zlokalizowany w południowym Devon'ie. Po szeregu prób podjęto decyzję o zastosowaniu rozwiązania polegającego na rozszczelnieniu deskowania, co miało prowadzić do odcięcia poszczególnych warstw, a następnie piaskowaniu uwidaczniającemu kruszywo i podkreślającemu uwarstwienie betonu. Takie rozwiązanie dawało większą pewność, że na połączeniu warstw nie powstaną pustki przepuszczające wodę do zbrojenia, a tym samym zmniejszające trwałość konstrukcji.



Fot. 14. Secular Retreat – projekt autorstwa Petera Zumthora [5]



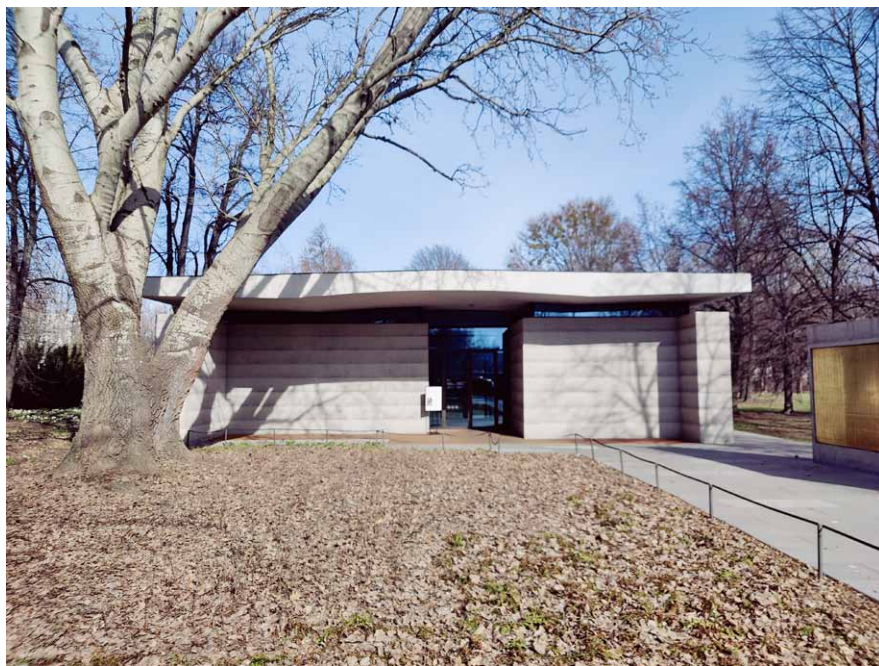
Fot. 15. Izba Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy



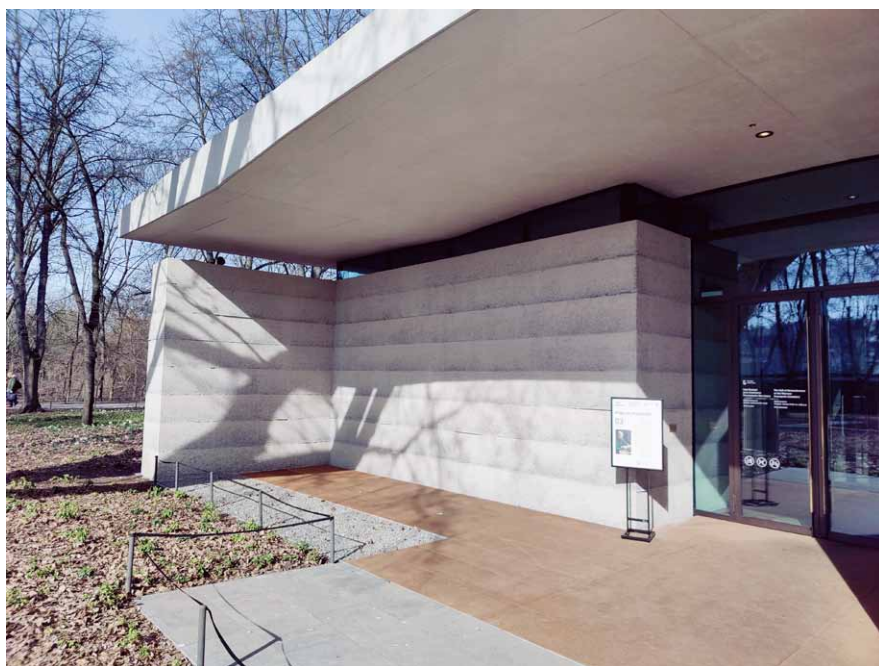
Fot. 16. Izba Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy – fragment narożnika



Fot. 17. Izba Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy – ściana boczna



Fot. 18. Izba Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy – widok ogólny wejścia



Fot. 19. Izba Pamięci przy Cmentarzu Powstańców Warszawy od strony wejścia.

4. Beton drukowany

Druk 3D pojawił się w budownictwie z nadzieją na całkowitą rewolucję w konstrukcji betonowej ze względu na liczne zalety takie, jak, eliminacja szalunków, zoptymalizowane wykorzystanie materiałów, większa swoboda projektowania, zmniejszone straty materiałowe, minimalizacja niezbędnej pracy lub personelu i optymalizacja kosztów. Obecnie możemy obserwować dynamiczny rozwój tej technologii pozwalający domniemywać, że za jakiś czas będzie miała liczący się udział w rynku konstrukcji betonowych [10]. Pomimo, że nadal trwają prace na nad rozwiązaniem szeregu problemów związanych z tą technologią, badania w dużej mierze skupiają się nad rozwiązaniem kłopotów związanych ze zbrojeniem elementów czy też krzywizn konstrukcji wynikających z technologii wbudowywania, to już w dzisiejszej rzeczywistości powstają całe budynki z betonu 3D. Doskonałym przykładem wykorzystania tej technologii są np. budynek Two-Story Detached House o powierzchni 160 metrów kwadratowych zaprojektowany przez biuro architektoniczne Mense-Korte będący pierwszym domem wykonanym w technologii druku betonu 3D w Niemczech, czy też House Zero o powierzchni 186 metrów kwadratowych w Austin zaprojektowany przez biuro architektoniczne Lake Flato.

Mimo, że technologia jest dopiero wdrażana to już teraz można stwierdzić, że będzie stanowiła istotny wkład w rozpowszechnianie betonów warstwowych.



Fot. 20. Two-Story detached House [13]



Fot. 21. House Zero w Austin [14].

5. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę szeroką gamę betonów architektonicznych warstwowych, do których zalicza się tak odmienne technologie poczynając od betonu ubijanego, przez beton z warstw, aż po betony drukowane, można stwierdzić, że ten rodzaj betonu architektonicznego będzie coraz częściej wykorzystywany w różnych konstrukcjach. Niezależnie od wybranej technologii należy pamiętać, że oprócz aspektu wizualnego niezbędne jest zapoznanie się ze specyfiką danego rozwiązania, z ograniczeniami wynikającymi z technologii, a także z jej wpływem na trwałość konstrukcji.

Literatura

- [1] Kaliszuk-Wietecha A., Narloch P. L., *Ziemia ubijana jako materiał budowlany w klimacie umiarkowanym*, Materiały Budowlane, nr 12/2013, s.40-41;
- [2] Narloch P. L., *Ziemia ubijana stabilizowana cementem jako konstrukcyjny materiał budowlany w klimacie umiarkowanym*, rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, 2017,
- [3] Australia Standards, P. Walker, *Australian Earth Building Handbook - HB 1959781849770958*, Standards Australia, Sydney, Australia (2002)
- [4] Nepal Bureau of Standards and Metrology NBC 204:1994, Guidelines for earthquake resistant building construction: earthen building Nepal Natl. Build. Code (2015), p. 73
- [5] <https://www.living-architecture.co.uk/the-houses/a-secular-retreat/overview/>;
- [6] Ciancio D., Robinson S., *Use of the Strut-and-Tie Model in the Analysis of Reinforced Cement-Stabilized Rammed Earth Lintels*, Journal of Materials in Civil Engineering, May 2011,

- [7] Lindsay R., *Structural steel elements within stabilised rammed earth walling*, "Modern Earth Buildings, Materials, Engineering, Constructions and Applications", Woodhead Publishing Series in Energy 2012, Pages 461-480;
- [8] Thompson D., Augarde Ch., Osorio J. P., *A review of current construction guidelines to inform the design of rammed earth houses in seismically active zones*, Journal of Building Engineering, Volume 54, 15 August 2022;
- [9] <https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>
- [9] Stożek S., *Technologia drukowania 3D z betonu dla budownictwa mieszkalnego*, Dni Betonu, Wisła 2021;
- [10] Ghafur H. A., *A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability*, Journal of Building Engineering, Volume 66, 1 May 2023;
- [11] <https://www.rammedearthconstructions.com.au/project/blackwater-aquatic-centre-central-queensland/>
- [12] <https://www.firstinarchitecture.co.uk/rammed-earth-construction/>
- [13] <https://www.canberratimes.com.au/story/7785621/3d-printers-set-to-disrupt-building-sector/>
- [14] <https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>