

SŁAWOMIR KARAŚ¹⁾MACIEJ KOWAL²⁾

THE MYCENAEAN BRIDGES – TECHNICAL EVALUATION TRIAL

PRÓBA OCENY TECHNICZNEJ ANTYCZNYCH MOSTÓW MYKEŃSKICH

STRESZCZENIE. Przeprowadzono inwentaryzację dwóch mostów mykeńskich w okolicach Arkadiko na Peloponezie. Mosty te, uznawane za jedno z najstarszych spośród istniejących na świecie, są dziedzictwem kulturowym ludzkości. W pracy zamieszczono rezultaty najprostszej analizy statycznej, która wskazała na słabe miejsca w istniejącej konstrukcji. Stanowią one rezultat zmiany schematu statycznego z początkowego wspornikowego na dość przypadkowy, choć konieczny w sensie mechanicznym schemat wspornikowo-łukowy elementu nośnego.

SŁOWA KLUCZOWE: dziedzictwo techniczne, głazy cyklopowe, mosty mykeńskie, statyka.

ABSTRACT. Under this project two Mycenaean bridges, both located near the village of Arkadiko in Peloponnese (Greece), were examined through a field survey. These bridges, believed to be one of the oldest preserved bridges in the world, are part of the cultural heritage of humanity. This paper presents the results of a basic static analysis with identification of the weak points of the structure, which are the consequence of its transformation from the original corbelling system to a mixed corbelling and arch system. It seems to be accidental but indispensable according to principles of engineering mechanics.

KEYWORDS: boulders of Cyclopean masonry, engineering statics, Mycenaean bridges, technical heritage.

DOI: 10.7409/rabdim.015.019

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Dróg i Mostów; s.karas@pollub.pl ✉

²⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Dróg i Mostów; m.kowal@pollub.pl

1. PRZEDMIOT I CEL BADAŃ

Mosty zabytkowe są dziś postrzegane jako dziedzictwo kultury technicznej. W czasach ich budowy stanowiły symbole postępu cywilizacyjnego [1-4]. Mosty te wpisują się w ogólną koncepcję zrównoważonego rozwoju, której elementem jest także zrównoważone budownictwo.

Za most naturalny uznawany jest przypadkowy układ głazów wielkowymiarowych tworzących przejście nad ciekim wodnym [5]. Na Rys. 1 przedstawiono elementarną koncepcję wykorzystania w budowach antycznych łuku dwutarczowego trójprzegubowego z charakterystycznym w tym przypadku rozpojem i reakcją poziomą. W sensie cywilizacyjnym daleko bardziej rozwinięte od mostów naturalnych są mosty mykeńskie oraz mury cyklopowe, które są także zbudowane z wielkich, nieobrobionych, dopasowanych do siebie kamieni. Do ich budowy były wykorzystywane, w sposób celowy i przemyślany, występujące w sąsiedztwie naturalne głazy kamienne. Odnosząc się do współczesnych kategorii mechaniki można wnioskować, że starożytni budownicy dobrze znali zagadnienia stanów równowagi statycznej w układach wspornikowych.

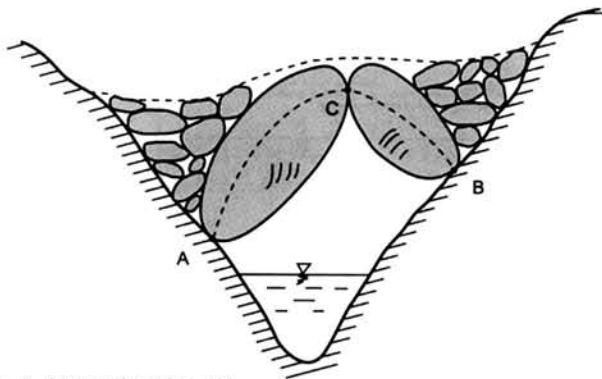


Fig. 1. Natural bridge [5]

Rys. 1. Most naturalny [5]

Celem niniejszej pracy jest rozpoznanie konstrukcyjne antycznych mostów mykeńskich poprzez przybliżoną analizę statyczną. Jednak z powodu ich zabytkowego charakteru pełna ocena pod tym kątem nie jest dzisiaj możliwa. Analiza dotyczy dwóch mostów w okolicach Arkadiko na Peloponezie, uznawanych za jedne z najstarszych spośród istniejących na świecie.

2. OPIS USTROJU MOSTÓW

Mostami mykeńskimi nazywa się mosty wybudowane w okresie kultury mykeńskiej, która jest datowana na czas środkowego okresu brązu, jednak granice czasowe tego

1. SUBJECT AND AIM OF RESEARCH

Historical bridges are considered part of the technical heritage of humanity. At the time of construction they constituted the symbols of civilizational progress [1-4]. The analysed Mycenaean bridges are in line with the principles of sustainable development and sustainable construction in particular.

An accidental arrangement of massive boulders serving as a means of crossing a stream is considered as a natural bridge [5]. Fig. 1 presents an outline of two-plate, three-hinged arch system – a concept followed in ancient structures, with characteristic horizontal reaction known as thrust. Mycenaean bridges and Cyclopean masonry, made by fitting together huge, unworked boulders, represent a significant civilizational development when set against the above-described natural bridges. They were made out of locally found boulders, carefully selected and arranged to make up the structure. According to the categories of modern engineering the ancient builders had a good understanding of the problems of static equilibrium in corbelling systems.

The purpose of this research is to investigate the structural aspects of chosen Mycenaean bridges through approximate static analysis. A full scope analysis was precluded by the heritage value of these structures. The analysis concerns two bridges situated near the village of Arkadiko in Peloponnese, Greece, believed to be probably the oldest preserved bridges in the world.

2. DESCRIPTION OF THE BRIDGE STRUCTURAL SYSTEM

Mycenaean bridges are the ones built during the Mycenaean period in Middle Bronze Age. The time limits of this period are not definite. For the bridges under analysis reference should be made to the Minoan culture centred in Crete (Knossos) which flourished from about 3000 B.C. Its collapse is marked by the volcanic eruption in the Thira island (currently Santorini), which took place in the 15th century B.C. Then followed the domination of the culture centred in Mycenae in Peloponnese, which collapsed about 1000 B.C.

Both the analysed bridges are closely associated with the Bronze Age culture. A more appropriate dating method would be based on the reference to the time when unworked or partly worked natural boulders were used to erect structures of that kind. The point in time when relatively smaller cut stones were started to be used for both

okresu są płynne. W zakresie dotyczącym analizowanych mostów należy go wiązać z Kretą (grec. *Knossos*), poczynając od 3000 r. p.n.e. Kres kultury kretańskiej, zwanej też minojską, wyznacza wybuch wulkanu na wyspie Thira (obecnie Santorini), który miał miejsce w XV w. p.n.e. Następnie panowała w tym rejonie władza ośrodka administracyjnego z Myken na Peloponezie, zakończona wraz z jego upadkiem około 1000 r. p.n.e.

Obydwie poddane ocenie technicznej konstrukcje mostowe są ściśle związane z kulturą okresu brązu. Jednak właściwszą formą ustalenia datowania byłoby określenie czasu ich budowy z wykorzystaniem nieobrobionych lub częściowo obrobionych głazów naturalnych. Kolejnym okresem odniesienia może być czas, gdy do budowy zarówno murowych konstrukcji, jak i mostów zaczęto stosować relatywnie drobniejsze ciosane kamienie. Niestety autorom nie udało się natrafić na tak sformułowaną chronologię podczas przeglądu literatury z zakresu architektury i archeologii. Różnica między technologiami budowania obiektów, stosowanymi w czasach mykeńskich, jest widoczna na Rys. 2 i 3. Na rysunkach pokazano dwa różne obiekty zlokalizowane na obszarze antycznego miasta Tyryns, przy czym jednym z nich jest grobowiec mykeński oddalony od miasta o około 1,5 km.

Do budowy mostów i murów mykeńskich stosowano wyłącznie rodzimy budulec, tj. lityfikowany węglan wapnia w postaci marmurów lub ich konglomeratów w formie głazów albo bloków o dużych wymiarach, odpornych na działanie trzęsień ziemi, erozję oraz celowe użytkowanie. Według dziesięciostopniowej skali twardości Mohsa marmur, w zależności od składu mineralogicznego, posiada twardość 3 lub 4, odpowiadającą takim minerałom wzorcowym jak kalcyt czy fluoryt. Podstawowe cechy fizyczne i mechaniczne marmuru to: gęstość objętościowa 2-2,7 Mg/m³, wytrzymałość na ściskanie 80-150 MPa oraz nasiąkliwość 0,4-0,5%.

Przy wznoszeniu budowli z głazów naturalnych i ociosanych kamieni (Rys. 2 i 3) nie stosowano spoiwa. Były to zatem konstrukcje składające się z niezależnie ułożonych elementów, uporządkowanych zarówno geometrycznie, jak i mechanicznie. Dziś sądzi się, że mechanika w tamtych czasach nie istniała i jest to ocena bardzo prawdopodobna. Nie zmienia to jednak faktu, że niektórzy konstruktorzy posiadali odpowiednią wiedzę i wyobrażenie o pracy wewnętrznych naprężeń w konstrukcji, a zatem o podwalinach idei mechaniki budowli.

walls and bridges could serve as another reference in such dating. Unfortunately, the authors failed to find such chronology in the review of relevant literature in the fields of architecture and archaeology. The photos in Fig. 2 and Fig. 3 present different technologies used by Mycenaean builders. The two structures are located in the vicinity of the ancient town of Tiryns, one of which is a Mycenaean chamber tomb located about 1.5 km away.

The material used in construction of Mycenaean bridges and masonry was lithified calcium carbonate sourced locally as marble or conglomerate marble massive blocks, or boulders, featuring high resistant to earthquakes, erosion and normal wear during use. On the ten-point Mohs scale this material ranges in the hardness from 3-4, depending on the mineral composition which makes it comparable to such reference minerals as calcite and fluorite. Marble has bulk density of 2-2.7 Mg/m³, compressive strength of 80-150 MPa and water absorption of 0.4-0.5%.

Natural boulders and cut stones (Fig. 2 and Fig. 3) were laid without binder. Thus the resulting structure was an arrangement of loosely laid elements planned in terms of shape and principles of engineering mechanics. However, is commonly believed that this branch of science did not exist at that time and it is a well-supported opinion. Even though, some builders could have sufficient knowledge and understanding of stresses generated in structures being the fundamentals of this scientific field.

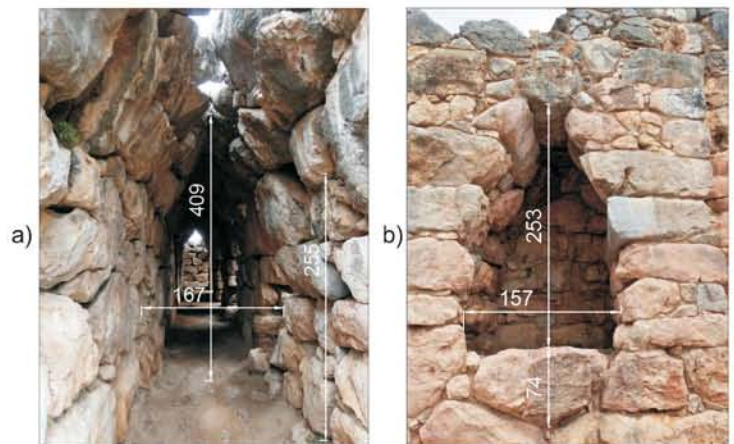


Fig. 2. Dry stone masonry in Tiryns fortress: a) arched gallery with corbelled vault and coping stones arranged similarly to a natural bridge, b) niche in the outside surface of the rampart made of selected or partly worked corbel stones; dimensions in cm

Rys. 2. Bezspoinowy układ głazów w obrębie twierdzy Tyryns: a) galeria arkadowa ze stropem wspornikowym i zwieńczającym układem głazów jak w moście naturalnym, b) nisza w murze zewnętrznym złożona z dobranych lub częściowo obrobionych bloków wspornikowych; wymiary w cm

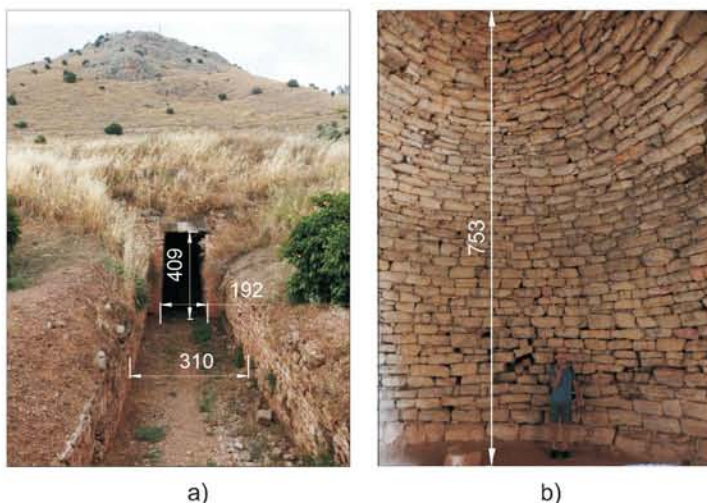


Fig. 3. Example of construction with small blocks in the underground burial chamber near Tiryns: a) entrance, b) interior; dimensions in cm
 Rys. 3. Przykład zastosowania technologii z wykorzystaniem bloków drobnowymiarowych w podziemnym grobowcu zlokalizowanym w pobliżu Tiryns: a) wejście, b) wnętrze; wymiary w cm

Na Rys. 2a pokazano galerię usytuowaną w zewnętrznej części muru twierdzy. Lewą jej ścianę stanowi masywny mur, podczas gdy ściana prawa jest relatywnie cienka. Potwierdza to proporcja grubości pionowego muru do jego wysokości równa $0,6/2,5$ (wyrażone w [m]). W galerii zaprojektowano okna w odstępach około 2 m, natomiast rzędy głazów zwieńczających ułożono jako wspornikowe. Z uwagi na to, że zworniki nie występują, można mówić o konstrukcji zbliżonej do naturalnego mostu (Rys. 1). Natomiast na Rys. 2b pokazano niszę w kształcie okna znajdującą się w murze twierdzy, która wymiarami i konstrukcją zbliża się do form stosowanych w przypadku mostów mykeńskich. Układ głazów jest dopasowany i tworzy schemat wspornikowy, dodatkowo w kluczu usytuowany jest zwornik. Jego zastosowanie jest charakterystyczne dla mostów ściśle łukowych i prowadzi do występowania dominacji siły normalnej w łuku oraz intuicyjnego wykorzystania rdzenia przekroju. W tym przypadku zwornik stanowi element pomocniczy ustroju wspornikowego. Jest to zatem przykład statycznego schematu mieszanego konstrukcji, który można traktować jako etap ewolucji prowadzący do ustrojów łukowych.

Rys. 3 przedstawia konstrukcję mykeńską, jednak znacznie różniącą się od wcześniej wspomnianych mostów oraz murów twierdzy Tiryns. W przypadku tej budowli wykorzystano jako materiał elementy drobnowymiarowe przy jednoczesnym perfekcyjnym zastosowaniu reżimu geometrii konstrukcji. Wbudowywanie elementów drobnowymiarowych wymagało jednak użycia rusztowania wsporczo-

Fig. 2a shows a gallery (walkway) built into the fortress ramparts. The gallery is enclosed by a massive wall on the left and a relatively thin wall on the right side. It is evidenced by the ratio of $0.6/2.5$ where the first value is the thickness and the second is the height of the vertical wall (both values in metres). The gallery has window openings spaced by about 2 m, topped by a rows of corbelled stone layers. With no keystones in place the design resembles the natural bridge arrangement (Fig. 1). The second picture in Fig. 2b shows a wall niche corresponding in shape to the windows and – in terms of dimensions and design – to the systems found in Mycenaean bridges. The boulders are fitted together making up a corbelled pattern closed with a keystone at the top. It is a system typically found in arch bridges with normal force dominating in the arch and intuitively used cross-section core. Keystones are added to such corbelling systems to give some extra stability. Therefore, it can be considered as a mixed static system, and at the same time an evolutionary step on the way to arch systems.

Fig. 3 shows another Mycenaean structure, completely different from the above-mentioned bridges and Tiryns ramparts. Here masonry units were used as the building material and they were laid strictly according to the geometrical requirements of the design. Different from the corbelling systems, a scaffold was in this case an indispensable element of the construction process.

In both cases shown in Fig. 2 and Fig. 3 using the adequate construction techniques was of the utmost importance. Construction with scaffolding which needs to be erected throughout the process differs from a construction of self-supporting arch or dome, both in quantitative and qualitative terms. It took over two thousand years before this problem was solved by application of calculations and engineering expertise in case of dome of Cattedrale di Santa Maria del Fiore in Florence. The finally chosen designer was Filippo Brunelleschi. He carried out the works in the period from 1420 to 1436. According to modern engineering principles the Brunelleschi's construction is considered an achievement comparable to the accomplishment of Archimedes and Gauss. The inventive method of construction allowed him to build the dome without using any scaffolding in the process. His concept was deep-rooted in philosophy and mathematics, and founded on the conclusions from his studies on isoperimetric theorem Cusa - De Docta Ignorantia [6]. Both the philosophical concept of Renaissance and the ingenious sense of geometry were brought down to pure engineering. The two fundamental features of the resulting technique were:

co nie było konieczne w przypadku ustrojów wspornikowych.

Jeśli chodzi o oba obiekty przedstawione na Rys. 2 i 3 pierwszorzędne znaczenie miała technologia wznoszenia konstrukcji. Istnieje jakościowa i ilościowa różnica między koniecznością stosowania w kolejnych fazach budowy rusztowań a technologią wznoszenia łuku czy kopuły jako konstrukcji samonośnej. Upłynęło ponad dwa tysiące lat zanim to zadanie zostało matematycznie i technicznie rozwiązane. Chodzi tu o casus kopuły Cattedrale di Santa Maria del Fiore we Florencji. W ramach konkursu wyłoniono jej architekta, którym został Filippo Brunelleschi. Powierzone mu prace budowlane prowadził w latach 1420-1436. Z perspektywy czasu Brunelleschiego porównuje się do Archimedesesa oraz Gaussa pod względem maestrii wykonania konstrukcji. Zastosował on metodę budowy kopuły bez korzystania z rusztowań wspierających. Jego koncepcja miała głęboki sens filozoficzny i matematyczny, a jej podstawą były wnioski ze studiów nad regułą izoperymetryczną Cusa - De Docta Ignorantia [6]. Zarówno koncepcja filozoficzna renesansu, jak i genialne wyczucie geometrii zostały sprowadzone w tym przypadku do czystej inżynierii. Kluczowe znaczenie miało:

- zastosowanie kąтового układu cegieł (układ w jodełkę),
- wprowadzenie ceglanych łuków poziomych, które w miejscach ich styków pomiędzy wypełnieniami tworzyły żebra samonośne.

Tajemnicę swego genialnego pomysłu Brunelleschi zabrał jednak do grobu. Dopiero w XX wieku podjęto próbę odtworzenia technologii wznoszenia kopuły [7]. Rozwój teorii belek przyczynił się do ponownej ich dominacji w budownictwie. Jednak tylko raz udało się zbudować analogiczną kopułę. Mosty mykeńskie są rzeczą jasną zdecydowanie prostszymi konstrukcjami, a do ich analizy wystarczy zastosować zwykły układ równań równowagi, sformułowany w zadaniu płaskim. Jednakże kwestia wykorzystania ówczesnej technologii jest równie złożona, jak w przypadku kopuły Brunelleschiego. Celem tego artykułu jest w związku z tym próba wskazania możliwych technik budowy mostów mykeńskich.

3. LOKALIZACJA MOSTÓW MYKEŃSKICH

W literaturze technicznej istnieje pojęcie dróg mykeńskich. W roku 1997 została wydana monografia [8], w której pierwszy rozdział napisany przez A. Jansena zatytułowano

- herringbone brick pattern,
- bricks arranged in flat arches creating self-supporting ribs at the joints between them.

The Brunelleschi's invention was, however, carried to the grave with its inventor. As a result his technique was not reproduced until the 20th century [7]. With the development of the beam theory beams regained their lost position as the primary solution in construction. However, only one dome replicating the original was built. In terms of engineering the Mycenaean bridges are obviously much simpler structures, which can be analysed with a standard set of equations derived for planar problem. On the other hand, there remains a question of how they were built with the techniques available at that time and finding the answer is as difficult as it was in the case of Brunelleschi's dome. Therefore, the objective of this article is to identify possible techniques used by the builders of Mycenaean bridges.

3. GEOGRAPHICAL LOCATION OF MYCENAEAN BRIDGES

The term Mycenaean roads can be found in the literature. In 1997 a monograph was published [8] with the first chapter entitled "Bronze Age Highways at Mycenae" written by A. Jansen. Fig. 4 presents the map included in that chapter after some additional graphical processing (the scale in [km]).

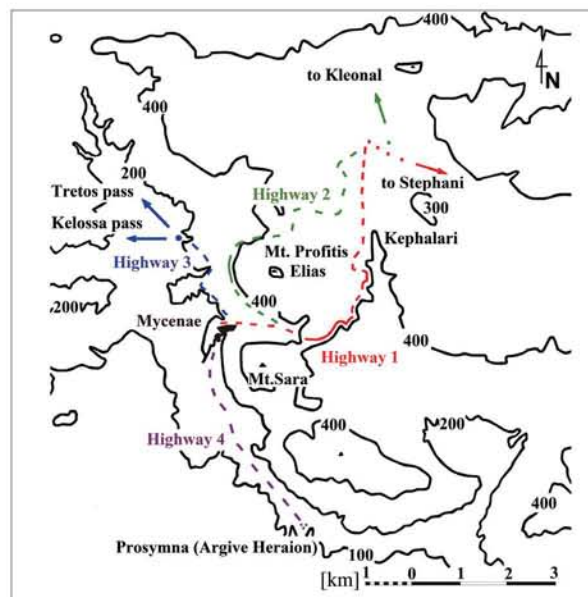


Fig. 4. Sketch of Mycenaean roads based on [8]
Rys. 4. Szkic dróg mykeńskich wykonany na podstawie [8]

„Autostrady okresu brązu wokół Myken”. Zamieszczoną tam mapę dróg mykeńskich, po dodatkowym opracowaniu graficznym, przedstawiono na Rys. 4 (skalę podano w kilometrach).

Dokonany obecnie rekonesans terenu in situ wokół Myken nie doprowadził jednak do odnalezienia pokazanych na rysunku dróg. Konieczne okazało się zatem odpowiednie przygotowanie archeologiczne w celu wyodrębnienia śladów dawnych szlaków. Dodatkowo, szkic na Rys. 4 obejmuje jedynie mały fragment obszaru będącego pod wpływem oddziaływania kultury mykeńskiej na Peloponezie. W przytoczonej monografii [8] wskazano także miejsca występowania pozostałości po antycznych drogowych obiektach inżynierskich, tj. murach oporowych oraz mostach. Wspomniana monografia jest pracą naukową z dziedziny archeologii [8], zawierającą liczne szczegółowe opisy badań fragmentów antycznych konstrukcji inżynierskich występujących na drogach wokół Myken.

Gdy porównuje się mapy rozpoznanych archeologicznie ośrodków kultury mykeńskiej odpowiadających znacznym skupiskom ludności z tamtych czasów [9], otrzymany obraz wydaje się dużo bardziej czytelny. Na Rys. 5 przedstawiono mapę drogi Tyryns-Epidauros (współcześnie oznaczonej jako nr 70) z zaznaczoną lokalizacją dwóch mostów mykeńskich w pobliżu miejscowości Arkadiko, będących przedmiotem oceny technicznej w niniejszym artykule. Mosty te, choć stanowią przykład technicznego dziedzictwa kulturowego, są w dalszym ciągu słabo rozpoznane. Co ciekawe, pomimo upływu wieków znajdują się w relatywnie dobrym stanie i nadal pozostają w użyciu.

Na drogowskazach tras turystycznych mosty mykeńskie są oznaczone literami A oraz B. Ich współrzędne geograficzne wynoszą w przypadku mostu A: $37^{\circ}35'37,10''N$; $22^{\circ}56'15,21''E$, natomiast w przypadku mostu B: $37^{\circ}35'27,27''N$; $22^{\circ}55'36,30''E$. Podaje się ich szczegółową lokalizację, gdyż zainteresowanie tymi obiektami wśród mostowców jest duże, a odnalezienie ich bez precyzyjnych wskazówek nie jest łatwe. Droga mykeńska to często górską ścieżką, biegnącą wśród dzikiej roślinności oraz gajów oliwnych. Usytuowany na jej trasie most mykeński A jest całkiem dobrze znany. Jego liczne zdjęcia są publikowane w artykułach technicznych i w Internecie [10-12]. Rys. 6 przedstawia most A od strony napływu oraz odpływu. O ile od strony odpływu konstrukcja jest dostępna w całej swej okazałości, to od strony napływu koryto rzeki zostało zasypane, co znacznie utrudnia rozpoznanie układu bloków tworzących most. Jego dno jest suche, jednak woda przemieszcza się pod ziemią (tj. pod skałami).

However, these roads could not be found during the recent in situ survey in the vicinity of Mycenae. Therefore, some archaeological preparatory works are necessary to find the traces of these ancient routes. Moreover, Fig. 4 shows only a small portion of the whole area under the influence of the Mycenaean culture in Peloponnese. The monograph [8] defines also the locations of the associated road infrastructure, including retaining walls and bridges. As an archaeological report, the monograph [8] contains many detailed descriptions of examined remains of ancient road structures found in the vicinity of Mycenae.

A much clearer picture can be obtained by superimposing the archeologically examined sites on the map showing the main Mycenaean settlements [9]. The locations of the two Mycenaean bridges analysed in this research are shown on the map of the road between Tiryns and Epidauros (No. 70 according to current designation system), presented in Fig. 5 below. While being part of technical heritage, these bridges have been poorly investigated as yet. After so many centuries that have passed since they were built these structures are in a relatively good condition and, moreover, they are still in use.

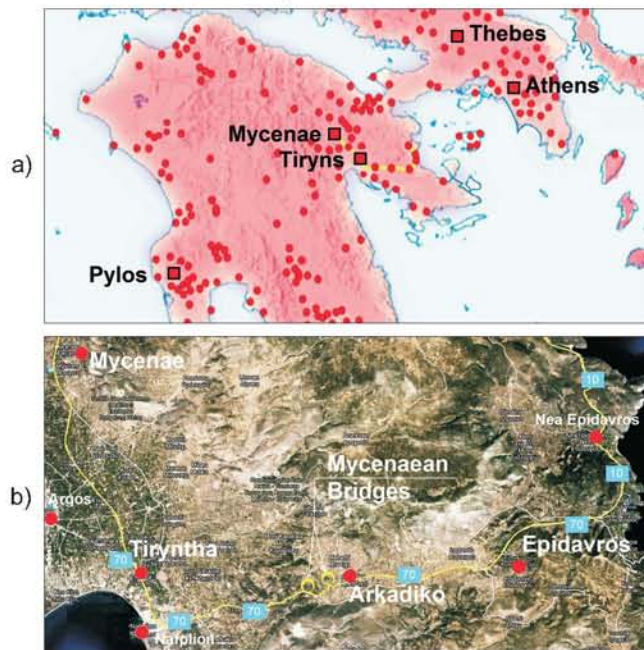


Fig. 5. Map of the road between Mycenae and Epidauros: a) surveyed sites of Mycenaean culture [9], b) locations of the analysed Mycenaean bridges near Arkadiko by the road No. 70 (marked yellow)

Rys. 5. Mapa drogi Mykeny - Epidauros: a) ośrodki kultury mykeńskiej (stanowiska archeologiczne) [9], b) lokalizacja mostów mykeńskich w pobliżu miejscowości Arkadiko przy drodze nr 70 (oznaczonej kolorem żółtym)

W odległości około 50 od mostu mykeńskiego, w kierunku dołu ciek, znajduje się współczesny most żelbetowy. Na uwagę zasługuje fakt, że koryto rzeki nie uległo zmianie przez tysiące lat.

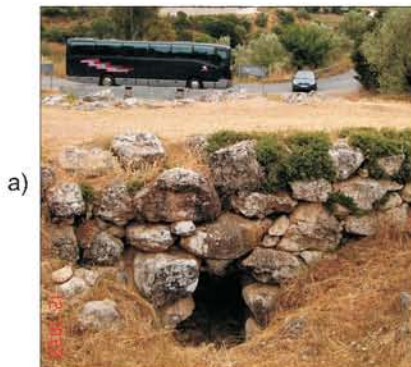


Fig. 6. Mycenaean bridge A: a) viewed from the upstream side, b) viewed from the downstream side
Rys. 6. Widok mostu mykeńskiego A: a) od strony napływu, b) od strony odpływu

Most mykeński B jest położony około 2-3 km na południowy zachód od mostu A, przy czym miarę wyrażoną w kilometrach należy traktować umownie i szacunkowo ze względu na powszechnie występujący tutaj teren górzysty. Autorom artykułu zlokalizowanie mostu zajęło, wliczając błądzenie, około 1,5 godziny. Dojście do niego od strony drogi nr 70 jest łatwe i trwa 15 minut, jednak przy drodze nie ma żadnego znaku nakierowującego na ten most. W przypadku mostu B ciek wodny jest powierzchniowy (Rys. 7).

Most mykeński B od strony odpływu jest konstrukcyjnie bliźniaczy do mostu A. Natomiast od strony napływu, poprzez zastosowanie podłużnych bloków kamiennych, wyraźnie widać jego strukturę wspornikową. Jest ona podobna do tej stosowanej przykładowo w antycznych grobowcach (Rys. 8). Rys. 8 przedstawia sekwencję zdjęć, ilustrującą rozwój technologii budowlanej począwszy od murów cyklopowych do regularnych elementów obrobionych.

On the guideposts by tourist trails these two bridges are designated respectively with letters A and B. The geographical coordinates are $37^{\circ}35'37.10''N$; $22^{\circ}56'15.21''E$ for bridge A and $37^{\circ}35'27.27''N$; $22^{\circ}55'36.30''E$ for bridge B. The reason for giving such precise locations is a high level of interest in them among bridge engineers and the problems with finding the bridges without such detailed directions. The Mycenaean road in question often turns into a mountain path, winding through natural vegetation and olive groves. Bridge A, located on its route, is relatively well known. Its numerous pictures can be found in various research reports and in the Internet [10-12]. Fig. 6 shows bridge A viewed from the upstream and downstream sides. While it is fully exposed to view with the downstream side, upstream of the bridge the bed has been filled with stones, making proper examination of the boulder pattern much more difficult. The riverbed is dry as water found its way under the surface (that is under rocks to be precise). Some 50 m downstream of bridge A there is a contemporary bridge having a reinforced concrete structure. It is worthwhile noting that the riverbed has not changed for thousands years.

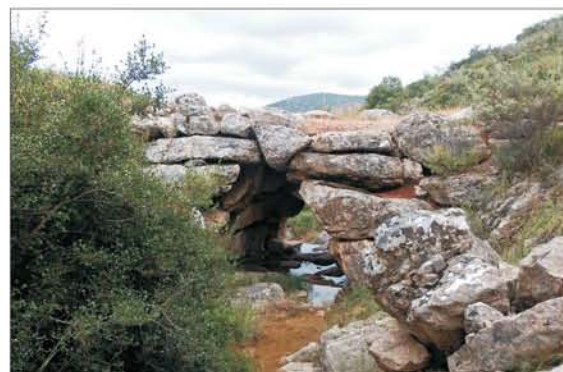


Fig. 7. Mycenaean bridge B: a) viewed from the upstream side, b) viewed from the downstream side
Rys. 7. Widok mostu mykeńskiego B: a) od strony napływu, b) od strony odpływu

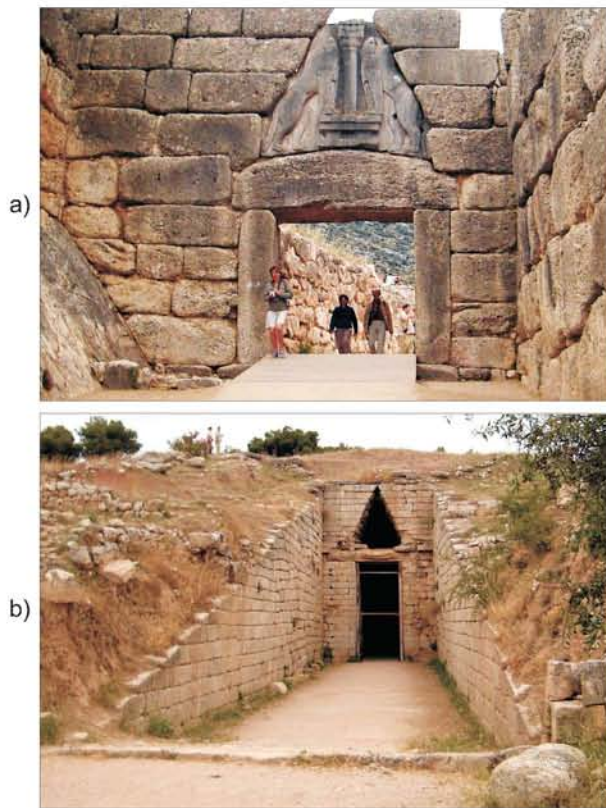


Fig. 8. Structures designed to relieve weight on the lintel in Mycenae: a) Lion Gate, b) Tomb of Clytemnestra
Rys. 8. Konstrukcje odciążające typu inwersja nadproża w Mykenach: a) Lwia Brama, b) Grób Klitajmestry

Z informacji uzyskanych z wywiadu środowiskowego wiadomo, że wzdłuż wytyczonej drogi mykeńskiej znajdują się łącznie trzy mosty antyczne. W [12] zamieszczono zdawkową informację o pięciu takich mostach, przy czym dwa spośród nich są zlokalizowane poza rozpoznawanym obszarem. Mając na uwadze powyższe rozbieżności konieczne jest dalsze rozpoznanie dróg i mostów mykeńskich, a obecny etap można uznać jedynie za wstępny. Kontynuacja badań jednych z najstarszych udokumentowanych mostów jest w związku z tym uzasadniona i stanowi element koncepcji zrównoważonego rozwoju.

Trwałość obiektów mykeńskich jest bezdyskusyjna. Mosty te plasują się na niskim, jeśli nie najniższym poziomie pod względem wykorzystania nośności zastosowanych materiałów. Oznacza to, że obciążenia mostów w czasie ich użytkowania były niewielkie w porównaniu do ciężarów gładów użytych do ich budowy.

The Mycenaean bridge B is located 2-3 km to the south-east of the bridge A, with the reservation that in such wavy terrain the distance must be regarded as approximate. It took the authors about 1.5 hours to get to the bridge, this including the time lost on meandering. Located 15 minute walk away from road No. 70, the bridge can be reached quite easily, were it not due to lack of any signposting by the road. By contrast with bridge A, here water flows under the bridge on the surface (Fig. 7).

On the downstream sides bridges A and B are twin structures. However, when viewed from the upstream side, the bridge B results to be made of longitudinal blocks arranged in an easily identified corbelled structure. It resembles that of ancient burial chambers (Fig. 8). The photographs in Fig. 8 show the development of construction technology from Cyclopean masonry to the use of regular stone masonry units.

Based on the information the authors gathered locally, there are in total three ancient bridges located along the identified route of the Mycenaean road. In total, there are five bridges mentioned in [12], two of which are located beyond the limits of this research. These discrepancies need further investigation of the Mycenaean roads and bridges, so the present research can be considered as a preliminary stage of such investigation. This supports further examination of the ones of the oldest bridges on record which falls within the framework of the concept of sustainability.

The superior durability of the Mycenaean structures is beyond question. The Mycenaean bridges feature a very low if not the lowest mobilisation of the strength of materials used for their construction, meaning low level of service loads in relation to the weight of boulders used in their construction.

4. RESULTS OF ON-SITE SURVEY

4.1. MYCENAEAN BRIDGE A

In the survey of the analysed bridges their structural components were measured with a measure tape and with a hand-held laser meter. The measurements were taken on easily accessible elements in order to determine the maximum boulder size. A closer look into the apparently similar bridges A and B reveals differences between them, including static systems and their existing condition. The bottoms of both bridges are made of flat laid stones. The longitudinal gradient is small, namely 2%. Due to the flat bottoms there is a considerable offset at the downstream

4. WYNIKI INWENTARYZACJI

4.1. MOST MYKEŃSKI A

Przeprowadzono inwentaryzację obiektów polegającą na pomiarach elementów za pomocą taśmy mierniczej i miernika laserowego. Dotyczyły one wymiarów łatwo dostępnych elementów, zwłaszcza maksymalnych gabarytów głazów. Pomiarzy wykazały, że mosty A oraz B, mimo że wydają się być podobne do siebie, przy dokładniejszej obserwacji ujawniają odmienność schematów statycznych oraz obecnego stanu technicznego. W obu przypadkach dno mostu jest ułożone z głazów na płask. Spadek podłużny jest niewielki i wynosi w przybliżeniu 2%. Płaskie dno powoduje, że od strony odpływu występuje wyraźny uskok (od 0,5 m do 1,5 m). W przypadku mostu A próg ten zbudowano z kamieni o dominującym wymiarze około 0,5 m. Jeśli chodzi o most B, uskok progu ma wymiar odpowiadający gabarytom głazów użytych w konstrukcji. Bardzo interesującym rozwiązaniem, stosowanym powszechnie w późniejszych okresach [13], jest zastosowanie płyty-fundamentu, inaczej niż ma to miejsce na schemacie z Rys. 1. Poziome światło mostu B jest bardzo małe. Most opisują w przybliżeniu następujące proporcje (wyrażone w [m]): szerokość jego światła b do wysokości h : $b/h=1,5/2,0$ oraz szerokość światła b do szerokości mostu B : $b/B=1,5/5,0$.

W dzisiejszych kategoriach mosty mykeńskie mogą być utożsamiane z przepustami. Długość badanych mostów jest zbliżona i wynosi odpowiednio: w przypadku mostu A: 11,5 m oraz mostu B: 14,5 m. Należy jednak podkreślić, że wyznaczenie końców skrzydeł jest trudne i decyzje w tym względzie mogą być arbitralne. Szerokość mostów była o wiele łatwiejsza do ustalenia i wyrażono ją poprzez proporcję szerokości całkowitej B [m] do szerokości użytkowej B_0 [m]; proporcja ta w przypadku mostu A wynosi $B/B_0=5,7/2,7$ oraz w przypadku mostu B jest to $B/B_0=5,1/2,7$.

Na ścianach otworu przepływowego brak jest śladów wód wysokich, natomiast zauważyć można inną fakturę marmurów w porównaniu do głazów ścian bocznych. Powierzchnie głazów zewnętrznych są naturalne, identyczne jak w przypadku głazów występujących naokoło. Głazy o barwie szarozłocistej, stanowiące wnętrza otworów przepływowych, mają szorstką fakturę na skutek wyflukiwania przez wodę.

Ciekawym rozwiązaniem jest zastosowanie płyty na dnie cieku, co nie było konieczne przy naturalnie występującym twardym, kamienistym podłożu. Podczas zewnętrznej obserwacji nie sposób było określić jednak jej zakresu. Wydaje

side (0.5-1.5 m difference of level). In bridge A this offset is curbed with stones, generally about 0.5 m in size. In bridge B the offset height corresponds to the size of boulders making up the structure. A very interesting feature, commonly used in later constructions [13], is the slab foundation – different from the system shown in Fig. 1. Bridge B has a very small horizontal clearance. The design of the analysed bridges can be described with the following ratios (all values in [m]): horizontal clearance to rise, which in the case of bridge B is $b/h=1.5/2.0$ and horizontal clearance to width ratio of $b/B=1.5/5.0$.

According to present day classification, the Mycenaean bridges can be categorized as culverts. The two bridges are similar in length, i.e. bridge A is 11.5 m long and bridge B is 14.5 m long. It should be noted that with indistinct wing walls limits these measurements must be somewhat arbitrary. Conversely, the width parameters can be determined quite easily and expressed by the ratio between overall width and service width of $B/B_0=5.7/2.7$ for bridge A and $B/B_0=5.1/2.7$ for bridge B.

Examination of internal wall surfaces showed no traces of high water. What was found was a different texture of marble surfaces as compared to side walls. The surfaces of boulders on external surfaces are the same as the surfaces of stones found in the vicinity. The internal golden-grey stones have a rough surface texture, attributed to the scouring effect of water.

An interesting feature is the slab placed on the bed, which does not seem necessary on the natural hard base. The limits of this slab could not be determined during the external examination. It is probable that the whole structure is supported on a foundation made of boulders. It is worth noting that the Mycenaean bridges are in perfect condition with no need of repair or maintenance through centuries of use. Currently, maintenance is limited to cutting grass and shrubbery in their vicinity.

The structure of bridge A is fully exposed to view only from the downstream side, while on the other side just the portion surrounding the inlet opening can be seen (Fig. 9). This is so because the bed is blocked upstream of the bridge on 1-2 m distance by stones which descended from above. As a result the wing walls are now hidden from view. The water still runs under the surface. Near bridge A there is a contemporary reinforced-concrete culvert built on the stream in its lower course.

Bridge A is an irregular arch structure, as it can be seen in Fig. 6 and Fig. 9. The springing lines are clearly visible. Both on the upstream and downstream side the arches are

Można zaobserwować nieregularny układ głazów tworzących konstrukcję mostową oraz uporządkowany łuk ustroju nośnego, zbudowany z największych głazów. Na Rys. 9 podano ustalone w wyniku pomiarów podstawowe wymiary widocznych głazów mostu.

4.2. MOST MYKEŃSKI B

W sensie konstrukcyjnym most mykeński B jest obiektem bardziej interesującym. Pomimo widocznych od strony napływu wezłowi, wtopionych w skarpy koryta rzeki, może być bez wątpienia sklasyfikowany jako wspornikowy (Rys. 10). Proporcja bocznych wymiarów płaskich sztywnych płyt-tarcz (wysokości [m] do długości [m]) wynosi $0,5/2=1/4$. Dodatkowo tarcze te na przestrzeni lat nie uległy przelamaniom. Można domniemywać, że jest to ich konfiguracja początkowa. Poziome światło mostu mierzone przy dnie jest relatywnie większe i wynosi około 2,5 m. Kształt otworu wlotowego jest bardzo zbliżony do trójkąta. Konstrukcja mostu od strony napływu odpowiada kształtowi charakterystycznemu w przypadku bram pokazanych na Rys. 8. Jedyna różnica polega na zastosowaniu w moście zwornika o długości około 1,5 m i profilu w kształcie trójkąta, wpasowanego dolnym wierzchołkiem pomiędzy wsporniki tarczowe.

Na wlocie poziom dna jest równy poziomowi cieku. Natomiast na wylocie, za sprawą opisywanego wcześniej fundamentu mostu, utworzył się pionowy uskok o wysokości około 1,5 m (Rys. 10). Naturalnym podłożem są w tym przypadku głazy o gabarytach odpowiadających największym głazom występującym w moście. Przy jego budowie korzystano zatem wyłącznie z materiałów występujących w bezpośrednim sąsiedztwie.

keystone about 1.5 m long with its bottom vertex fitted in between the corbelled plates.

At the inlet the bottom level corresponds in level to the stream bed. This is quite different on the other side where the presence of the above-described foundation slab created at about 1.5 m offset between these surfaces (Fig. 10). Here the natural base is made of boulders as big as the biggest of those incorporated in the structure. This allows the authors to conclude that all the construction materials were sourced locally.

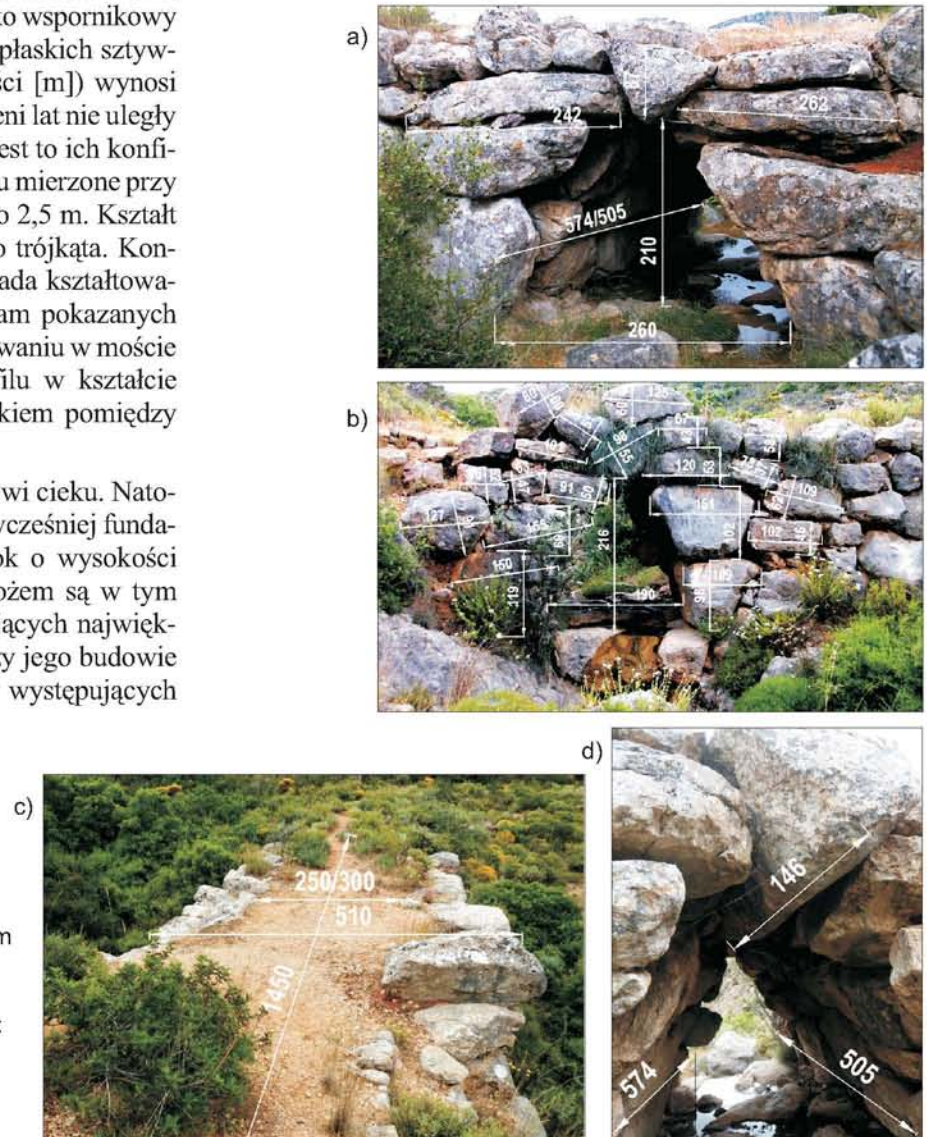


Fig. 10. Mycenaean bridge B: a) view from the upstream side, b) view from the downstream side, c) road surface, d) bridge opening; dimensions in cm

Rys. 10. Inwentaryzacja mostu mykeńskiego B: a) widok od strony napływu, b) widok od strony odpływu, c) nawierzchnia drogi, d) otwór przepływowy; wymiary w cm

Na Rys. 10 można dostrzec deformację mostu w postaci wysuniętego na długość około 50 cm pojedynczego bloku. Bezpośrednią przyczyną tego uszkodzenia były najprawdopodobniej, często występujące na tym terenie, wstrząsy

Fig. 10 shows deformation of the original structure consisting in displacement of a single block by about 50 cm. Seismic shocks which occur quite frequently in this area are the most probable cause of this damage [14].

sejsmiczne [14]. Jednakże, jak wykazano w analizie statycznej, przyczyna mogła być także związana z niedoskonałością konstrukcji łukowej ustroju nośnego. Jest to zatem przykład kształtowania się aktualnej konfiguracji konstrukcji na skutek wzajemnego dostosowywania się układu elementów kamiennych. Wymiary mostu mykeńskiego B określono tylko w niepełnym zakresie ze względu na ograniczenia czasowe. Na Rys. 10 zamieszczono wartości wszystkich pomierzonych dystansów. Dodatkowo na Rys. 10c pokazano aktualny stan odcinka drogi mykeńskiej położonej w sąsiedztwie mostu.

5. STATYKA MOSTÓW MYKEŃSKICH

W pracy [15] można znaleźć przegląd metod związanych z analizą wytrzymałościową łuków w konstrukcjach murywanych. Zaproponowana tam metodyka badań dotyczy struktur kontynuacyjnych (ciągłych), a jedynie lokalnie występujące anomalie (od ciągłości) są traktowane jako stany awaryjne, które można w różny sposób opisać mechanicznie. W przypadku mostów mykeńskich nie jest możliwe tak współczesne podejście, gdyż tworzywo mostów antycznych jest w istocie luźną strukturą, występującą w chwilowym, statecznym stanie równowagi. Przez wieki dostosowywała się ona do kolejnych aktualnych konfiguracji. Autorzy mając to na uwadze zdecydowali o zastosowaniu możliwie najprostszej analizy statycznej, która uwzględni jednak kryterium dostateczne jej jakości poprzez spełnienie równań równowagi sformułowane w zadaniu płaskim.

W ujęciu mechanicznym zadanie to dotyczy analizy stanu istniejącej równowagi, ale w niektórych miejscach także hipotetycznej, pierwotnej konfiguracji konstrukcji przez zastosowanie metody wyznaczania reakcji w punktach uznanych przez autorów za miejsca podparcia głazów tworzących umowne łuki. Przy wyznaczaniu stanów równowagi pominięto wzajemne zakleszczenie głazów, oczywiście siły tarcia i spójności wytworzone w efekcie dostosowywania się konstrukcji w trakcie istnienia mostów. Pominięto też efekty powstałe na skutek wzajemnego oddziaływania głazów, co jest trudne do zdefiniowania ze względu na niemożność określenia tarcia pomiędzy powierzchniami umownie pionowymi i poziomymi.

Zastosowano dwie metody analizy. Pierwsza odnosi się do aktualnej konfiguracji i polega na zbieraniu obciążeń idąc od góry konstrukcji ku dołowi. W tym przypadku wyznaczone reakcje w umownie przyjętych podporach belek prowadzą do obrazu jednorodności/niejednorodności wyteżeń w różnych punktach konstrukcji. Miarą stabilności jest proporcja wartości reakcji mniejszej do większej, a stan graniczny jest

However, as it was demonstrated in the static analysis, the imperfect arch design can also be to blame. Thus it is an example of the stonework structure's evolution caused by mechanical interaction of its components. Due to time constraints the measurements of Mycenaean bridge B were limited in scope. Their results are presented in Fig. 10. Fig. 10c shows the current condition of the Mycenaean road section carried by the bridge.

5. STATIC ANALYSIS OF MYCENAEAN BRIDGES

A review of methods applied to analyse the strength parameters of arch in masonry structures can be found in [15]. However, the methods proposed there concern continuous structures in which local discontinuities are considered failures which can be described mechanically in different ways. Such contemporary approach would not be useful in case of Mycenaean bridges which are, as a matter of fact, loose structures in a temporal static state of equilibrium. Through the centuries the structure evolved in response to subsequent configurations. Taking this into account the authors decided to use the simplest available method of static analysis which, however, includes the criterion of equilibrium equations pertaining to a planar problem.

Although in engineering mechanics this issue would generally concern the existing state of equilibrium, at some points it could also relate to the original configuration of the structure by determining reactions at the points considered by the authors to be the springing points of the arbitrarily defined arches. In the equilibrium state determination the interlocking of stones, the obvious friction and cohesion, which developed in the process of self-adaptation of the bridge during its existence, were ignored. Moreover, the effects of interaction between boulders were also omitted as being difficult to define with indeterminate friction between the surfaces arbitrarily classified as vertical and horizontal.

Two methods were applied in the analysis. The first of them was used in relation to the existing configuration and consisted in integration of loads from the top to the bottom of the structure. In this case the determined reactions at arbitrarily defined supports of beams lead to obtaining a picture of uniformity/non-uniformity of utilisation of strength at different points of the structure. The measure of stability is the ratio between smaller and greater reactions, and the limit state is indicated by obtaining the value of zero or a very small positive value

związany z pojawieniem się zera lub małej wartości dodatniej, która może być wyrażona również w procentach. Metoda ta została zastosowana w odniesieniu do mostu A.

Druga metoda jest w sensie mechanicznym odwrotna do pierwszej. Analizowane są reakcje w umownie przyjętych podporach, w hipotetycznej sekwencji układania głazów podczas budowy mostu. W tym przypadku nieodzowne było założenie o początkowym istnieniu płyt-tarcz w miejscach, w których obecnie występuje fragmentacja. Metodę drugą zastosowano w odniesieniu do mostu B.

6. ANALIZA UMOWNYCH REAKCJI W KONFIGURACJI POCZĄTKOWEJ I AKTUALNEJ

Jeśli poniżej jest mowa o ciężarze, to nie w ścisłym fizycznym jego rozumieniu w polu grawitacyjnym. W rzeczywistości w analizie uwzględniono powierzchnie pól głazów widoczne od dostępnych stron. Polu $A = 1\text{ m}^2$ powierzchni odpowiada siła jednostkowa, np. $F = 1\text{ N}$. Jest to zatem odpowiednik pola grawitacyjnego o przyspieszeniu 1 m/s^2 przy powierzchniowej gęstości masowej 1 kg/m^2 . W konsekwencji podane w Tabl. 1 i 2 wartości reakcji wyrażone są miarami pól powierzchni bocznych głazów. W celu zachowania przejrzystości prowadzonej analizy przy wartościach reakcji nie podano miana siły, co w żaden sposób nie wpływa negatywnie na jakościowy i ilościowy aspekt przeprowadzonego oszacowania.

Na Rys. 11 przedstawiono widoczny od strony odpływu czytelny obraz łuku jako elementu konstrukcji mostów A i B. Dysponując podstawowymi wymiarami, wyznaczono w obydwu przypadkach środki masy głazów (linia czerwona przerywana), łuk paraboliczny związany z lewą podporą o parametrach L i f , opisany równaniem $y = 4f \cdot x \cdot (L-x)/L^2$, oraz jego obwiednie (pola zaznaczone na żółto).

Jak pokazano na Rys. 11, środki masy głazów tworzących teoretyczny łuk są usytuowane w obwiedni paraboli podstawowej. Przedstawiony układ głazów nie jest korzystny pod względem pracy wewnętrznej elementów łuku. Oznacza to, że boki elementów nie są prostopadłe do linii paraboli, co w konsekwencji sprawia, że siła osiowa nie jest dominującą siłą wewnętrzną, a nawet jeśli nią jest – występuje istotny udział sił poprzecznych w powierzchniach styków. Pomimo wielu upraszczających założeń analizy oraz wad mechanicznych opisywanego łuku, można stwierdzić, że ustrojem nośnym jest w tym przypadku łuk będący przeklepieniem powstałym w sposób naturalny.

expressed as amount or percent value. This method was used for bridge A.

The second method is inverse in the mechanical terms to the first one. It analyses reactions in arbitrarily defined supports according to a hypothetically assumed sequence of stonework erection. It involved an assumption of original existence of plate-slabs in places where fragmentation has occurred later on. This second method was used in bridge B analysis.

6. ANALYSIS OF ARBITRARY REACTIONS IN BOTH CONFIGURATIONS: INITIAL AND CURRENT

Whenever a reference is made to weight in the following part of the description, it is not to be understood strictly physically as the force acting on mass due to gravity. Actually, the analysis is based on the areas of the exposed surfaces of boulders. To the unit surface area of $A = 1\text{ m}^2$ is assigned a unit force, for example $F = 1\text{ N}$. It corresponds to the gravitational field of 1 m/s^2 with areal density of 1 kg/m^2 . Consequentially, the reaction values given in Table 1 and 2 are expressed by the values representing the areas of boulder side surfaces. For the sake of clarity, the values of reactions are given without units, which in no way influence the qualitative and quantitative value of such estimation.

Fig. 11 shows the arch conspicuous at the downstream side, part of the superstructure of bridge A and bridge B. Having all the basic dimensions the authors were able to determine the centres of gravity of all boulders (broken red line), the parabolic arch associated with the left-hand support of geometrical parameters L and f , described with equation $y = 4f \cdot x \cdot (L-x)/L^2$, as well as its envelopes (area highlighted in yellow).

As it can be seen in Fig. 11, the centres of gravity of boulders through which runs the theoretical arc are located within the base of parabolic envelope. Such arrangement of boulders is not favourable regarding internal forces generated in the elements of the arch, which means that their sides are not perpendicular to the parabola. As a result, axial force is not the dominating one in most cases and if it is, there is a significant role of lateral forces acting in interfaces. In spite of several simplifying assumptions and mechanical engineering flaws of the described arch, the structure still classifies as natural vaulted arch.



Fig. 11. Hypothetical parabolic arch and its envelope in the arbitrarily defined system visible from the downstream side: a) bridge A, b) bridge B; dimensions in cm

Rys. 11. Hipotetyczny łuk paraboliczny i jego obwiednia w umownym ustroju nośnym widocznym od strony odpływu: a) most A, b) most B; wymiary w cm

Na Rys. 12-13 pokazano model obliczeniowy zastosowany w przypadku obydwu mostów A i B do wyznaczenia stanu równowagi w łukach. Analizę sprowadzono do poszukiwania reakcji pionowych w belkach modelujących głązy w miejscach umownych podpór, które odpowiadają punktom granicznym gładów rzeczywistych. Do wyznaczenia sił i miejsc ich przyłożeń wykorzystano wspomaganie graficznym oprogramowaniem komputerowym.

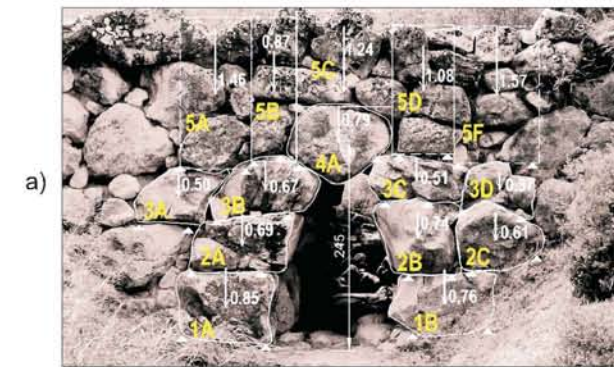
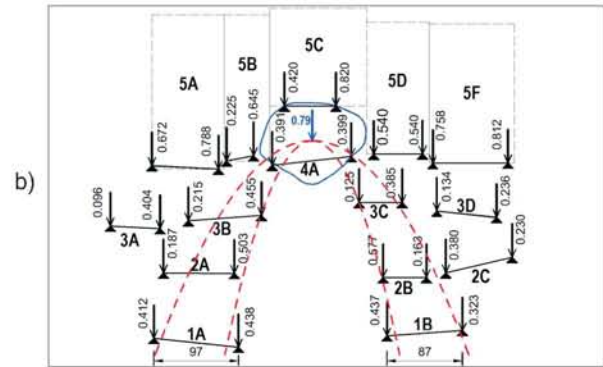


Fig. 12. Computational model used in case of bridge A: a) areas of action, b) model of structure

Rys. 12. Model obliczeniowy zastosowany w przypadku mostu A: a) pola oddziaływań, b) model konstrukcji

Zastosowano następujące oznaczenia (Rys. 13): w przypadku belki 2B: R_L oznacza reakcje w podporze po lewej stronie belki, a R_R – reakcję w podporze po prawej stronie belki. Reakcje R_L i R_R są wywołane ciężarami własnymi poszczególnych gładów oraz ciężarami tych gładów, które występują powyżej strefy rozpatrywanego gładu. Na Rys. 13b wprowadzono oznaczenia gładów odpowiednio do poziomów usytuowania ich w konstrukcji. Poziom 1 odpowiada gładom najniższym, a numeracja warstw rośnie ku górze. Nie wszystkie z podanych wartości zostały wykorzystane w analizie. Pozostałe zamieszczono na zasadzie informacji uzupełniającej odnośnie konstrukcji mostów.

Fig. 12-13 show the computational model used for determining the state of equilibrium in the arches of both bridges: A and B. The analysis was reduced to determining vertical reactions in beams representing boulders in arbitrarily defined support points, corresponding to the limits of the physical boulders. The forces and points to which they were applied were determined with the aid of graphical computer program.



The following designations are used (Fig. 13): for beam 2B: R_L – reaction at the left-hand side support of the beam and R_R – reaction at the right-hand side support of the beam. Reactions R_L and R_R are caused by the self-weights of the respective boulders and the weights of the boulders located above them. The designations of boulders in Fig. 13b indicate their location in the structure. Number 1 indicates location on the lowermost level and the numbering of layers increases in the upward direction. Not all the values appearing in the drawing have been used in the analysis. The rest of them were provided as supplementary information on the structure of the analysed bridges.

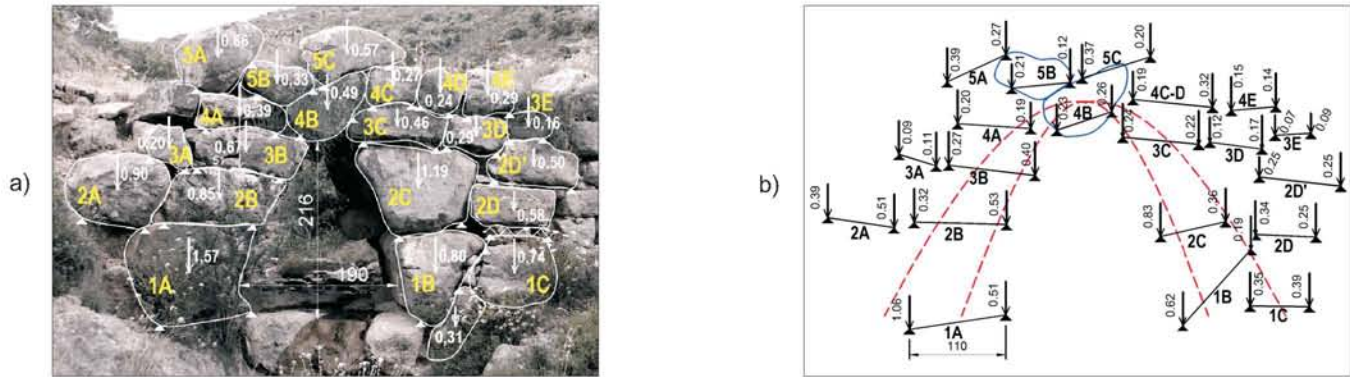


Fig. 13. Computational model used in case of bridge B: a) self-weights of the elements and the application points, b) force diagram from equivalent beams

Rys. 13. Model obliczeniowy zastosowany w przypadku mostu B: a) ciężary własne elementów i ich punkty przyłożenia, b) schemat oddziaływań od umownych belek

Wyniki analizy mostu A przedstawiono w Tabl. 1. Biorąc pod uwagę, że jest to analiza stanu istniejącego, należy podkreślić występowanie stanu granicznego na poziomie 2 w belce 2B. Wartość wewnętrznej reakcji $R_{R(2B)}$ jest w przybliżeniu równa zero, co odpowiada chwiejnemu stanowi równowagi. Pozostałe belki znajdowały się w stanie stabilnym w różnym stopniu. Stan bliski granicznemu występuje na poziomie 1 w belce 1A w R_L , gdzie reakcja po stronie lewej stanowi w przybliżeniu 10% reakcji w podporze prawej R_R . Tak uzyskane niekorzystne rezultaty nie osłabiają przyjętego założenia o pominięciu tarcia i spójności, a także parcia pomiędzy elementami z tego względu, że pominięte oddziaływania tworzą zapas nośności konstrukcji. Obecnie poza ciężarem własnym materiałów budowlanych podstawowym oddziaływaniem są wstrząsy sejsmiczne, które przy ich dużych energiach i impulsowej dystrybucji w czasie uzasadniają uwzględnianie w podstawowym oszacowaniu jedynie sił pionowych.

The output of analysis of bridge A is presented in Table 1. Bearing in mind that the analysis concerns the current situation attention is drawn to the limit state in beam 2B (level 2). With the internal reaction $R_{R(2B)}$ approximating zero the authors deal with a state of unstable equilibrium. The remaining beams were found to be stable to a varying degree. A state close to the limit occurs in level 1 in beam No. 1A at R_L , where reaction on the left-hand side approximates 10% of the reaction on the right-hand side representative. These unfavourable results do not challenge the assumption to leave out forces of friction and cohesion, as well as the pressure between elements because of the margin of strength resulting from the omitted actions. Presently, besides the self-weight of the materials, the main actions on the structure are caused by seismic shocks, which due to their high levels of energy and impulse distribution over time justify considering vertical forces only.

Table 1. Vertical actions at levels 4-1 for the present day configuration of bridge A

Tablica 1. Oddziaływania pionowe na poziomach od 4 do 1 dla obecnej konfiguracji mostu A

Level No. / Poziom	Beam No. 4 / Belka 4			
4	R_L		R_R	
	0.95		1.08	
3	Beam No. 3B / Belka 3B		Beam No. 3C / Belka 3C	
	R_L	R_R	R_L	R_R
	0.72	2.51	2.08	0.58
	Beam No. 2A / Belka 2A		Beam No. 2B / Belka 2B	
2	R_L	R_R	R_L	R_R
	0.69	4.25	3.42	-0.01
1	Beam No. 1A / Belka 1A		Beam No. 1B / Belka 1B	
	R_L	R_R	R_L	R_R
	0.53	5.26	4.37	1.29

Kolejnym spostrzeżeniem jest występowanie dominujących sił w podporach w sąsiedztwie otworu przepływowego. To z kolei wskazuje, że obszarem występowania największych wyteżeń jest sąsiedztwo wewnętrznej linii parabolicznej ograniczającej obwiednię. Jest to równie niekorzystne jak występowanie zerowych i małych reakcji w sąsiedztwie zewnętrznej granicznej paraboli. Podsumowując wyniki obliczeń, należy uznać, że forma łukowa została wprowadzona intuicyjnie i jest odległa od obecnej przyjętej koncepcji łuku.

Most B został przeanalizowany w sposób odmienny niż most A, jako że starano się odtworzyć przebieg wznoszenia jego ściany zlokalizowanej od strony odpływu. W rezultacie uzyskano wyniki zawarte w Tabl. 2. W rozważaniach istotne były te głązy, które zostały ułożone do poziomu zwornika. Przy wyznaczaniu sił uwzględniono mechanizm układania zwornika. Belki znajdujące się w lewej gałęzi łuku były obciążane jego ciężarem w pozycji pionowej, jeszcze przed pełnym obrotem zwornika. Na belkę 3C, już po obrocie (Rys. 13), działała jedynie reakcja $R_{R(AB)}$. Most B charakteryzuje wyższy poziom stabilności konstrukcji, co wykazano zarówno przy zastosowaniu pierwszej, jak i drugiej metody analizy. W tej ostatniej najsłabsze stadium montażu stanowił najwyższy poziom pod zwornikiem, tj. poziom 3. Wystąpiła tu najmniej korzystna proporcja reakcji w umownej belce 3B, ale miara stabilności na poziomie 15% sprawiła, że stan był bezpieczny. Dodatkowo możliwe były dociążenia elementu 3B poprzez przejściowe lub trwałe ułożenie głazów.

Another observation is the location of principal forces in the supports near the opening. This in turn indicates that utilisation of strength is the greatest near the inner parabola of the envelope. This is as unfavourable as zero or very small values of reactions near the outer envelope limit. The calculation output values support the conclusion that arch system was used intuitively and it is far from the present day concept of arch.

Bridge B was approached in a different way. In this case the authors tried to reconstruct the process of construction of the bridge, and, more precisely, of the wall on the downstream side. This has led to obtaining the values which are compiled in Table 2. Relevant to the authors' considerations were the boulders located up to the keystone level. In determining the forces the mechanics of the keystone installation process was taken into account. The beams on the left-hand leg of the arch were not loaded with the weight of vertically oriented keystone before it was fully rotated in position. After keystone rotation (Fig. 13) the only force applied to beam 3C is reaction $R_{R(AB)}$. Bridge B has a more stable construction, as confirmed by both methods were used in the analysis. In the latter method the most unstable situation occurred during erection of the uppermost level under the keystone, i.e. level 3. Here the reaction ratio in the equivalent beam 3B was the least favourable, yet with the measure of stability of 15% it is still considered safe. Moreover, the builders had an option to use boulders to secure beam 3B during construction and thereafter remove them or leave in place as appropriate.

Table 2. Accumulated vertical actions at levels 1-4 for the present day configuration of bridge B
Tablica 2. Sumaryczne oddziaływania pionowe na poziomach od 1 do 4 dla obecnej konfiguracji mostu B

Level No. / Poziom	Action / Oddziaływanie	Beam No. / Belka			
		1A		1B	
1	self-weight / ciężar własny + level 2 / + poziom 2 + level 3 / + poziom 3 + level 4 rotation / + poziom 4 obrót	R_L	R_R	R_L	R_R
		1.06	0.51	0.62	0.18
		1.95	0.98	1.84	0.15
		1.99	1.61	1.91	0.20
2	self-weight / ciężar własny + level 3 / + poziom 3 + level 4 rotation / + poziom 4 obrót	2B		2C	
		R_L	R_R	R_L	R_R
		0.32	0.53	0.83	0.37
		0.45	1.18	0.80	0.98
3	self-weight / ciężar własny + level 4 rotation / + poziom 4 obrót	3B		3C	
		R_L	R_R	R_L	R_R
		0.27	0.40	0.24	0.22
		0.15	1.01	0.70	0.21

Z powyższej analizy wynika również ciekawy wniosek dotyczący stateczności belki 1B, która ze względu na jej niekorzystny profil może budzić niepokój. W przypadku mostu B zastosowanie schematu łukowego wydaje się być uzasadnione.

7. WNIOSKI

Mosty mykeńskie są uznawane za jedne z najstarszych mostów na świecie, ale wiedza o nich jest znikoma, co wydaje się paradoksem w kontekście ich wagi dla dziedzictwa kultury technicznej ludzkości. Na podstawie przeprowadzonej inwentaryzacji, porównań i prostej analizy statycznej można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski.

W rezultacie analizy porównawczej konstrukcji murowych występujących w obrębie ruin twierdzy Tyryns rozpoznano sposoby rozwoju różnych technik budownictwa w okresie mykeńskim. Podstawową technologię stanowiło wznoszenie otworów w murach według schematu statycznego wspornikowego połączonego ze stosowaniem lub niestosowaniem zwornika w kluczu. Zauważono duże podobieństwo kształtowania otworów w murach i mostach mykeńskich, co nasuwa myśl o tej samej technice budowania.

Most mykeński A w całości jest konstrukcją mieszaną, polegającą na jednoczesnym stosowaniu układu głazów połączonych w prymitywny łuk ze zwornikiem oraz, gdy było to najwłaściwsze, płaskich głazów wspornikowych. Natomiast most mykeński B wydaje się być bardziej interesujący pod względem konstrukcyjnym. Ściana mostu od strony napływu zbudowana jest w układzie wspornikowym, który prawdopodobnie przetrwał w oryginalnej formie do dziś. Natomiast ściana od strony odpływu jest analogiczna do tej rozpatrywanej odnośnie mostu A.

Analiza statyczna układu głazów w przypadku mostu A pozwoliła na wyznaczenie reakcji w przyjętych podporach belek, uwzględniając aktualną konfigurację głazów z istniejącą fragmentacją. Wprowadzając założenia związane z bezpieczeństwem konstrukcji otrzymano obraz oddziaływań między poszczególnymi głazami. Zidentyfikowano najsłabsze miejsce, tj. równowagę chwiejną, w jednym z głazów łuku na drugim poziomie. Na przykładzie mostu B przeprowadzono analizę statyczną odpowiadającą sekwencji układania głazów podczas wznoszenia muru od strony odpływu. W tym przypadku konstrukcję oceniono jako stabilną, przy najsłabszej ocenie wynoszącej 15% na płaskim głazie, na poziomie 3, podczas ustawienia zwornika w pozycji do obrotu.

Just as a matter of interest the problem of stability of beam 1B was noted which is a concern due to its unfavourable profile. In the case of bridge B the arch system appears to be justified.

7. CONCLUSIONS

Although the Mycenaean bridges are believed to be the oldest bridges in the world our knowledge of them is very small which is quite astonishing taking into account their significance as part of the industrial heritage of humanity. Below are the observations and conclusions from the research which comprised field survey, comparison and simple structural analysis.

With the comparative analysis of masonry structures located in the ruins of the Tiryns fortress the authors were able to recognise the development of the various Mycenaean construction techniques. Openings in walls were generally constructed in corbelling system, either with or without the keystone at the top. A high degree of resemblance was noted between the openings in the walls and in the Mycenaean bridges supporting the thesis that they were built using the same technique.

The Mycenaean bridge A is based on a mixed structural system combining a primitive arch made of boulders, including keystone element, with corbelled flat stones at the most appropriate locations. Bridge B is more interesting from structural design perspective. The upstream wall is a corbelled system and apparently survived unchanged to the present day. The system of the downstream wall is the same as that of bridge A.

Structural analysis of bridge A included determining reactions at arbitrarily defined beam supports, according to the existing system affected by fragmentation. By introducing structural safety considerations the authors were able to recognise the interactions between the individual boulders making up the structure. The weakest point was identified i.e. the state of unstable equilibrium in one of the boulders of the arch on level 2. The static situation during erection of the wall on the downstream side of the bridge was analysed on the basis of bridge B. In this case the structure was rated as stable with the lowest stability ratio of 15% obtained on the flat stone on level 3, which occurred when the keystone was placed on it before being rotated in position.

Having compared the two bridges the authors have discovered the structure of bridge B to be more stable. The structural stability of the corbelled system was found

Porównując oba mosty stwierdzono, że most B jest konstrukcją bardziej stabilną. Analiza ściany wspornikowej prowadzi do w pełni bezpiecznej oceny stabilności. Odnotowano wysunięcie wewnętrznego głazu do otworu przepływowego, co odpowiada występowaniu największych wartości reakcji w sąsiedztwie wewnętrznych linii granicznych obwiedni umownych łuków parabolicznych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Hellebois A., Launoy A., Pierre C., De Laènye M., Espion B.*: 100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance. *Construction and Building Materials*, **44**, 2013, 149-160
- [2] *Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Tucholski Z.*: Wiadukt żelbetowy z początków XX wieku - analiza mikrostruktury stuletniego betonu. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **9**, 3, 2010, 23-37
- [3] *Wichtowski B.*: Load-carrying capacity of steel railway bridges of the second half of XIX century - discussion. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **13**, 3, 2014, 261-269
- [4] *Karaś S.*: Unique Hennebique Bridges in Lublin, Poland. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, **1**, 2, 2013, 47-51
- [5] *Szcześniak W.E.*: Zbiór zadań z mechaniki teoretycznej. Statyka. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2014
- [6] *Beaudry P.*: Filippo Brunolleschi's Mind and the Catenary Principle, 2012, http://amatterofmind.org/Pieres_PDFs/EPISTEMOLOGY_I/10_FILIPPO_BRUNELLESCHI'S_MIND_AND_THE_CATENARY_PRINCIPLE.pdf, 10.01.2016
- [7] *Gentry T.R., Lesniewski A.*: Structural Design and Construction of Brunolleschi's Duomo di Santa Maria del Flore. The Masonry Society, Proceedings of 11th North American Masonry Conference "Transforming Traditions", Minneapolis, Minnesota, USA, 2011
- [8] *Butrica J.L., Joyal M.A.* (red.): *Echos du Monde Classique. Classical Views.* Classical Association of Canada, University of Calgary Press, **41**, 3, 1997
- [9] <http://archhades.blogspot.com/2012/11/ancient-greek-art-mycenaeans.html>, 04.08.2015
- [10] *Bevz M., Karas S., Sloma J.*: Military importance of a bridges over the centuries. 7th International Conference on Current Issues in Research, Conservation, and Restoration of Historical Fortifications, Lvov, 2015
- [11] Arkadiko Bridge: <http://openbuildings.com/buildings/arkadiko-bridge-profile-12548>, 06.07.2015
- [12] Kazarma Mycenaean Bridge: <http://www.ermioni.info/kazarma>, 06-07-2015
- [13] *Karaś S.*: Mosty w Turcji: od antyku do współczesności. *Drogownictwo*, **LXIX**, 5, 2014, 147-156
- [14] <http://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/quake-info/>; 09-07-2015
- [15] *Łagoda G., Łagoda M.*: Podstawy wytrzymałościowe analizy mostowych konstrukcji murowanych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **4**, 4, 2005, 31-72

uncompromised. One of the internal boulders was found to be jutting out in the direction of the bridge opening at the place where the greatest reactions have been determined near the inner envelope limits of arbitrarily defined parabolic arches.