

Analiza statyczna nowej kładki dla pieszych obok stadionu na EURO 2012 we Wrocławiu

Architektoniczna forma kładki została ustalona w wyniku konkursu otwartego, zorganizowanego przez biuro projektów opracowujące ogólny projekt zagospodarowania wschodniej części obszaru obok nowego stadionu. Przedstawiona na rys. 1 koncepcja rozwiązania zaproponowana przez zespół biura Kabarowski Misiura Architekci została zatwierdzona jako punkt wyjścia do projektowania. Idea zakładała zrealizowanie obiektu z betonu.



Rys. 1. Wizualizacja obiektu

Charakterystyczną cechą rozwiązania jest brak symetrii i linii prostych w geometrii. Ogólny kształt układu można z architektonicznego punktu widzenia postrzegać jako spłaszczony łuk. Kolejną istotną cechą jest to, że przęsło jest silnie zakrzywione w widoku z góry; znak krzywizny zmienia się w kierunku podłużnym. Szerokość przęsła jest zróżnicowana wzdłuż mostu, przy czym na środku przęsła jest około dwa razy większa niż w sąsiedztwie podpór. Zastosowano konstrukcję ramową, ponieważ w rozwiązaniu łukowym duże skręcanie byłoby trudniejsze do przeniesienia przez wąskie przekroje podporowe. Istotne było zamknięcie przepływu sił w konstrukcji i przekazanie na posadowienie siły pionowej oraz możliwie najmniejszego momentu zginającego. Ponieważ odległość pomiędzy poziomem ciągu dla pieszych i poziomem przyczółków jest znacząca (porównywalna z szerokością obiektu), wykorzystano całą dostępną przestrzeń przekroju poprzecznego (ograniczoną przez architektoniczny szkic obiektu) do przeniesienia skręcania, stosując przekrój skrzynkowy. W ten sposób dolna część ustroju nośnego tworzy łuk do przeniesienia głównych sił działających na kierunku podłużnym, natomiast górna część wraz z elementami środników formuje przekroje skrzynkowe do przeniesienia skręcania.

Rozwiązanie konstrukcyjne i koncepcja projektowa

Przekrój skrzynkowy konstrukcji znajduje się w strefie podparcia i przechodzi w przekrój płytowy w strefie środkowej przęsła. W ten sposób nośność przekrojów na skręcanie maleje, idąc od podpór w stronę środka przęsła, zgodnie ze zmiennością rozkładu momentu skręcającego. Grubość ścian przekrojów skrzynkowych wynosi 0,70 m. Zamknięta przestrzeń będzie wypełniona betonem lekkim. Grubość płyty jest zmieniana we wszystkich kierunkach; w pobliżu środka przęsła wynosi

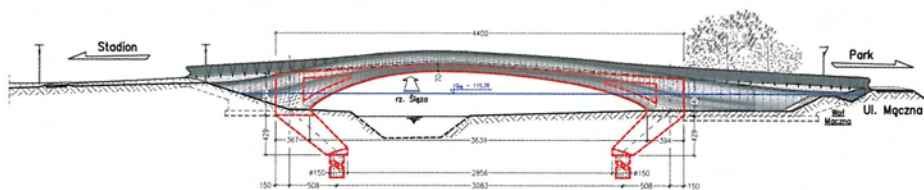
minimalnie 0,62 m na środku szerokości przekroju i zmniejsza się do 0,30 m na krawędziach przekroju w kierunku poprzecznym. Ustrój nośny przęsła został zaprojektowany z betonu sprężonego. Trasę kabli przyjęto tak, aby nie wprowadzać żadnego poziomego zginania w ustroju nośnym. Oznacza to, że środek ciężkości układu kabli powinien zbiegać się ze środkami bezwładności przekrojów poprzecznych w widoku z góry. Trasa kabli jest skomplikowana, ale jest ona taka sama w przy-

padku każdego kabla. Odległość w pionie od osi kabla do górnej powierzchni konstrukcji jest ustalona na 0,35 m. Kable są ułożone w środku grubości górnej płyty w strefie podparcia i ekscentrycznie w płycie w rejonie środka przęsła. Przyczółki są pochylone, aby uzyskać małe momenty zginające w przęsle i aby momenty przekazywane na pale były niewielkie. Obiekt jest posadowiony na jednym rzędzie pali na każdej podporze (5 pali średnicy 1,20 m na każdym przy-

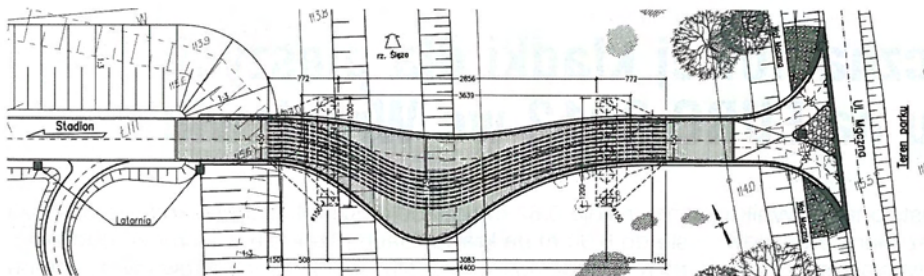
czółku). Rozwiązanie, w przeciwieństwie do łuku bez ściągu, zakłada „zamknięcie” sił w konstrukcji i przekazywanie tylko pionowych składowych sił na fundamenty. Dzielić myślowo globalny układ ramowy na elementy składowe, można go postrzegać jako łuk ze ściągiem, ale przesuniętym do poziomu klucza łuku i spinającym konstrukcję przyczółków u góry. Tak spięte przyczółki stanowią podparcie łuku w węzłach, przekazując siłę rozporu na ściąg (myślowo punkt obrotu dźwigni można przyjąć w poziomie głowicy pali).

- **Model uproszczony.** Taki model jest dużym uproszczeniem, ale dobrze przedstawia główną ideę rozwiązania. Wstępnie problemy związane z kierunkiem poziomym mogą być pominięte i jest rozważany tylko przekrój podłużny (por. rys. 2). Rozwiązanie przedstawione na rys. 2 może być traktowane jako rama z przęsłem rozpiętości 41 m. Taki ustrój można myślowo podzielić na pas dolny (w formie łuku), pas górny (w formie płyty) i domyślny środnik (łączy pas górny i dolny).

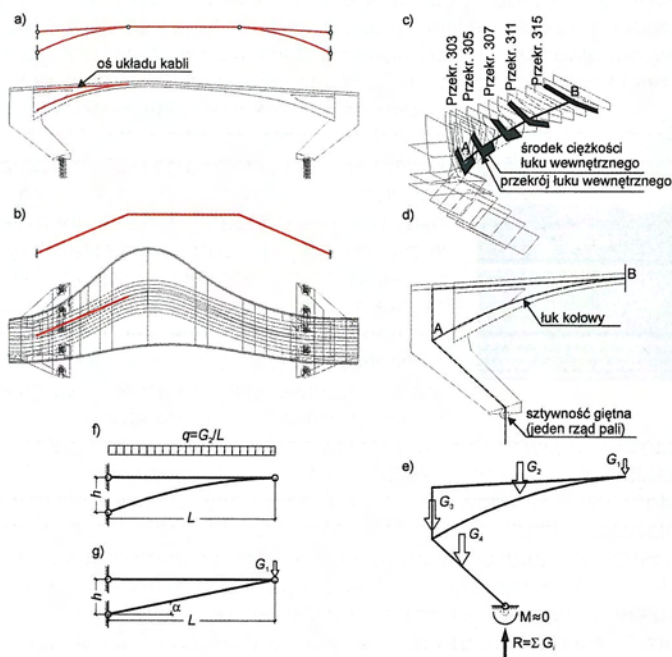
Założeniem systemu jest przeniesienie sił w kierunku podłużnym przez „pas dolny” oraz wykorzystanie „pasa górnego” do przeniesienia reakcji poziomej. Przy tym założeniu siły poprzeczne w wirtualnym środniku nie pojawiają się; przenosi on jedynie skręcanie. Górny pas jest zaprojektowany z betonu sprężonego. Rzut z góry trasy kabli przedstawiono na rys. 3. Pochylone przyczółki, podparte na jednym rzędzie pali, zostały zaprojektowane tak, aby „zamknąć” przepływ sił w obiekcie. Założono, że w palach mogą wystąpić tylko siły pionowe od ciężaru własnego i mają być takie same we wszystkich palach danego przyczółka. Do tych celów wykorzystano szczegółowe modele MES, a różne ich konfiguracje, wraz z palami, analizowano wiele razy, aby uzyskać rozwiązanie optymalne. Wprowadzenie myślowe belki *Gerbera* w kierunku podłużnym (rys. 4a), w połączeniu z uproszczonym odzwierciedleniem skomplikowanej geometrii



Rys. 2. Przekrój podłużny kładki



Rys. 3. Rzut poziomy kładki

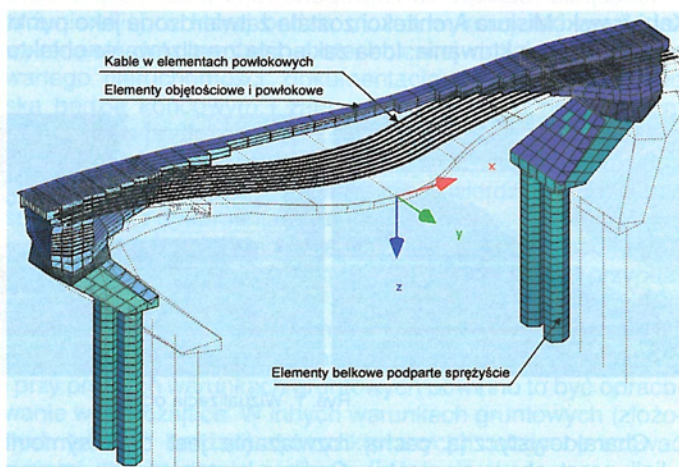


Rys. 4. Uproszczony model konstrukcji: a) przekrój podłużny, b) widok z góry, c) zdefiniowanie wewnętrznego łuku, d) model układu samorównoważącego się, e) obciążenia układu samorównoważącego się, f) model łukowo-kratownicowy uwzględniający obciążenie równomiernie rozłożone układu samorównoważącego się, g) model kratownicowy uwzględniający obciążenia punktowe od ciężaru ustroju nośnego przęsła w belce Gerbera

w widoku z góry (rys. 4b), prowadzi do uproszczonego modelu konstrukcji. Składa się on z dwóch wirtualnych elementów: prostego samorównoważącego się układu przedstawionego na rys. 4e i belki Gerbera. Pierwsza część jest wynikiem podejścia przedstawionego na rys. 4c, d – założenie wewnętrznego łuku zostało potwierdzone później w analizach MES. Na podstawie modelu z rys. 4e obliczenia „ręczne” można przeprowadzić, wykorzystując schematy przedstawione na rys. 4f, g. W tak prostym modelu sprężenia pasa górnego można uwzględnić jako siłę w górnym pasie kratownicy, zgodnie z rys. 4f, g. Oczywiście kable są ciągłe, a obszar środka przęsła jest także sprężony. Ponieważ odległość środka ciężkości kabli od górnej powierzchni przekrojów jest stała i równa 0,35 m (kable są w środku grubości płyty górnej w obszarze podpór), występuje ekscentryczne sprężenie obszaru środka przęsła (grubości płyty różnią się od 0,30 m na krawędziach do 0,62 m w środku szerokości przekroju). W tej sytuacji cały obiekt może być

w pełni sprężony w prosty sposób. Pole przekroju poprzecznego przęsła jest zmienne i wynosi od 10,3 m² w obszarze podpory do 4,4 m² w przęśle.

• **Model MES.** Konstrukcję nośną przęsła i przyczółków modelowano, stosując 8-węzłowe elementy objętościowe. Dzięki temu można było przeanalizować wstępnie konstrukcję podpartą w środku ciężkości układu pali (zablokowane rotacje). Mając zdefiniowane odpowiednie proporcje i pochylenia przyczółków tak, aby uzyskać „zerowe” momenty zginające na podporach, zaprojektowano i włączono do modelu odpowiedni układ pali. Do ich modelowania zastosowano elementy belkowe i sprężyny (rys. 5). Dodatkowo wprowadzono do modelu elementy powłokowe, aby we właściwy sposób uwzględnić efekty sprężania (program



Rys. 5. Model końcowy składający się z elementów brylowych, powłokowych, belkowych, kabli oraz sprężyn

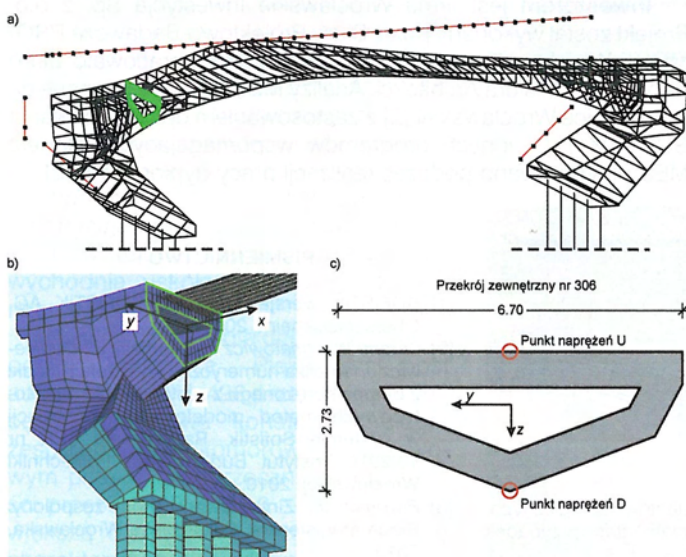
nie umożliwił prostego sprężenia elementów objętościowych) oraz aby podzielić elementy powierzchniowe na grupy w celu łatwiejszego przypisania obciążeń w różnych miejscach konstrukcji (choć można również to zadanie rozwiązać inaczej). Ponieważ numerycznie kable mogą być użyte tylko do elementów belkowych i powierzchniowych, nie brylowych, pomysł polegał na wpleceniu kabli w wirtualne elementy powłokowe i użyciu wspólnych węzłów odpowiednich powłok i brył. Ostateczny model z kablami przedstawiono na rys. 5.

Takie podejście wymaga spełnienia odpowiednich warunków. Należy brać pod uwagę to, że elementy brytowe mają tylko translacyjne stopnie swobody, w przeciwieństwie do wszystkich sześciu stopni swobody w elementach powłokowych. Z uwagi na to, że kable sprężające przekazują siły tylko w węzłach, podejście dobrze odzwierciedla rzeczywistą pracę konstrukcji wtedy, kiedy sztywność elementów powłokowych jest odpowiednia, co jest kwestią kluczową. Osiowa i giętą sztywność elementów musi być wystarczająco mała, aby nie wprowadzać dodatkowej sztywności do modelu (alternatywnie było możliwe dodanie elementów powierzchniowych o rzeczywistej sztywności zamiast jednej warstwy elementów brylowych) i wystarczająco duża, aby zapewnić, że standardowe podejście obliczeniowe w stosunku do elementów powłokowych sprężonych kablami, realizowane w oprogramowaniu, działa i jest wciąż wiarygodne (na przykład rotacje węzłów powinny być zachowane na poziomie możliwie niewielkim). Sztywności i grubości elementów powierzchniowych zostały

ustalone po przeprowadzeniu studium parametrycznego, w połączeniu z analizami porównawczymi przemieszczeń i naprężeń w przypadku różnych modeli.

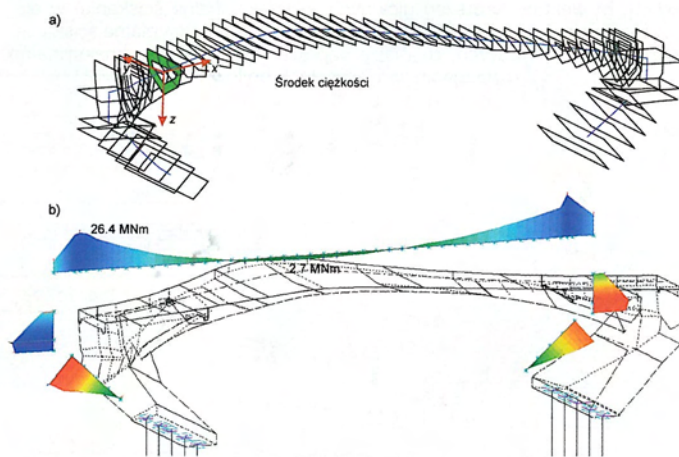
Uwzględniono odpowiednie przypadki obciążeń, a więc sprężenie (P), ciężar własny konstrukcji ($G1$), wyposażenie ($G2$), obciążenie zmienne od tłumu ($Q1$), pojedynczy pojazd ($Q2$), dodatkową warstwę ziemi na przyczółkach ($Q3$), przemieszczenia podpór (ZF), temperaturę (T), skurcz i pęcznienie (C). Górna powierzchnia ustroju nośnego składa się z 16 powierzchni geometrycznych, dzięki czemu uwzględniono 16 indywidualnych przypadków obciążeń $Q1$, które działają na odpowiednich obszarach. W obliczeniach założono etapowanie budowy konstrukcji (CS), realizowane przez moduł CSM [1]. W ten sposób przyrostowe przypadki obciążeń są tworzone wraz z przypadkami całościowymi. Na przykład na etapie budowy CS10 wyniki w przypadku przyrostowym obciążeń są zapisane pod numerem 5010 oraz w sumarycznym przypadku obciążeń pod numerem 4010. Ciężar własny całej konstrukcji jest aktywowany w kroku początkowym ($CS10$), przy założeniu technologii podparcia do momentu sprężenia na pełnym deskowaniu i na rusztowaniach. Następnie sprężenie jest zrealizowane w kroku CS11, po czym w kroku CS15 kolejno uwzględnia się częściowy skurcz i pęcznienie betonu. Potem w kroku CS20 dodaje się wyposażenie obiektu i w etapie CS25 oblicza ostateczny skurcz i pęcznienie. Ponieważ ostatni etap analizy numerycznej jest podzielony na 4 części w celu uzyskania większej dokładności obliczenia efektów reologicznych, ostateczny przypadek obciążenia ma numer 4028. Szczegółowe wyjaśnienie przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w [2]. Ważną sprawą, gdy są używane elementy brytowe typu BRIC, jest „ręczne” wprowadzenie parametrów skurczu i pęcznienia, jako że nie może to być automatycznie uwzględnione przez moduł CSM; dlatego należało zmodyfikować pliki pomocnicze podczas obliczeń.

Podejście wykorzystujące virtualne zewnętrzne przekroje zostało zastosowane (rys. 6), aby zaprojektować właściwą trasę kabli i ogólnie do zymiarowania konstrukcji. W tym celu ustrój nośny przęśla virtualnie przecięto w globalnej płaszczyźnie XY . Przekroje zewnętrzne zostały stworzone przez moduł SIR, który jest w programie [1]. Płaszczyzna cięcia definiuje unikatowe przekroje w wyniku cięcia bryły przestrzennej obiektu. Na podstawie tak uzyskanej geometrii można było obliczyć charakterystyki geometryczne przekrojów, a w kolejnym kroku wyznaczyć współrzędne ich środków ciężkości (rys. 8a). Zgodnie z tym było możliwe zaprojektowanie trasy kabli w taki spo-



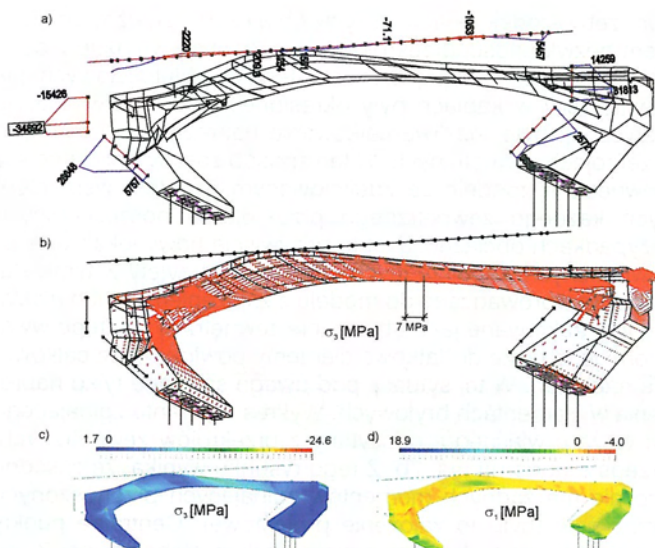
Rys. 6. Wprowadzenie przekrojów zewnętrznych: a) główny model z zaznaczeniem przekrojów (przykładowy nr 306 został wyszczególniony), b) przekrój nr 306 na tle modelu MES, c) geometria i punkty do obliczania naprężeń w przekroju nr 306

sób, żeby środek układu wszystkich kabli był zbliżony ze środkiem bezwładności przekrojów zewnętrznych w rzucie z góry. Ponieważ rozkład naprężeń w elementach objętościowych, jak również siły w kablach były określone poprawnie w analizie statycznej, było możliwe całkowanie naprężeń w virtualnych przekrojach zewnętrznych. W ten sposób zostały obliczone siły wewnętrzne zgodnie ze zdefiniowanym układem współrzędnych każdego zewnętrznego przekroju w poszczególnych przypadkach obciążeń. Jest to oczywiście nowy lokalny układ zewnętrznych współrzędnych przekrojów przyjęty w tym celu. Kable są wprowadzane do modelu z założeniem, że ich działanie jest traktowane jako obciążenie zewnętrzne. Dlatego wyłączono je, a także dodatkowe elementy powłokowe, z całkowania naprężeń. W tej sytuacji pod uwagę są brane tylko naprężenia w elementach brytowych. Wykres momentu zginającego od ciężaru własnego, odczytany z przekrojów zewnętrznych, przedstawiono na rys. 7b. Z tego rysunku wynika, że zasadniczo nie ma żadnych momentów zginających przenoszonych przez pale (było to założenie projektowe). Centralne punkty układu pali są lekko przesunięte wzdłuż globalnej osi Y (oś rzędu pali jest równoległa do osi Y), aby uzyskać te same siły we wszystkich palach na każdym przyczółku.

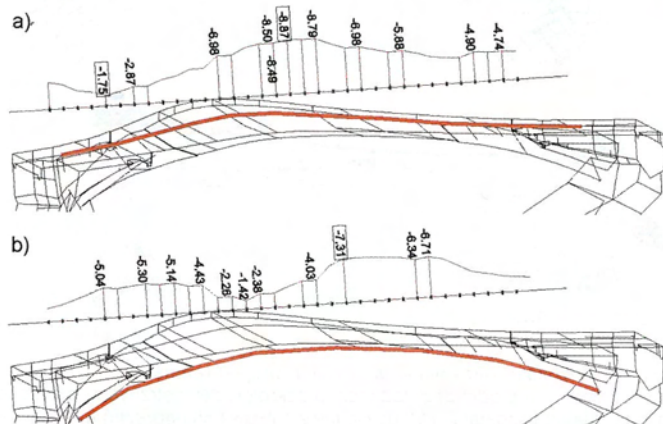


Rys. 7. Rezultaty otrzymane w wyniku projektowania na przekrojach zewnętrznych: a) środki bezwładności przekrojów zewnętrznych połączone linią, b) momenty zginające M_y uzyskane z całkowania naprężeń (przypadek 4010 od ciężaru własnego bez uwzględnienia sprężenia ani zjawisk reologicznych)

Procedura całkowania naprężeń została zastosowana w przypadku każdego obciążenia, a więc w każdym przypadku uzyskano wyniki obliczeń statycznych na podstawie głównego modelu (przemieszczenia węzłów, naprężenia, siły w kablach itp.). Jednocześnie uzyskano wyniki całkowania sił wewnętrznych (siły osiowe i poprzeczne, momenty zginające i skręcające) w przypadku virtualnego dwuwymiarowego modelu składającego się z przekrojów zewnętrznych w virtualnej przestrzeni (do celów tej analizy była to płaszczyzna XZ). Następnie uwzględniono różne kombinacje obciążeń, aby uzyskać odpowiednie zestawy sił wewnętrznych do analizy zewnętrznych przekrojów i do analizy warunków stanu granicznego nośności i użyteczności. Na rysunku 8 przedstawiono mapy naprężeń, wraz ze skalkulowanym momentem zginającym M_y w przekrojach zewnętrznych od charakterystycznej kombinacji obciążeń stałych, zawierającej efekty sprężania (moment zginający M_y zmniejszony wskutek sprężenia w stosunku do zilustrowanego na rys. 7b). Możliwe były również analizy wartości naprężeń w celu prawidłowego przyjęcia siły sprężającej. Wartości naprężeń w punktach charakterystycznych (górny i dolny punkt każdego przekroju) w kombinacji obciążeń długotrwałych, w tym sprężenia, podano na rys. 9. Z tego rysunku widać, że kryterium pełnego sprężenia jest zapewnione w przypadku tej kombinacji, a wyniki są zbliżone z przedstawionymi na rys. 8.

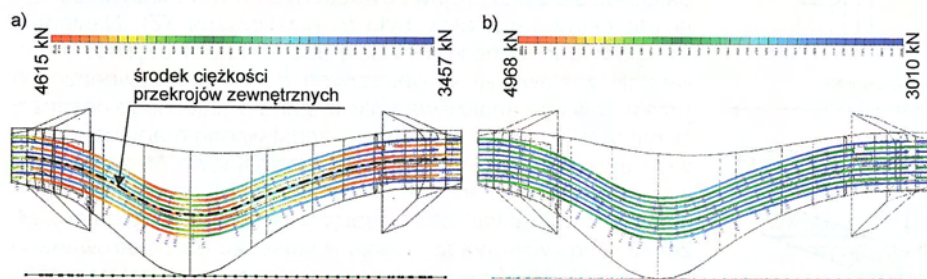


Rys. 8. Wynik analiz uwzględniających kombinację charakterystycznych obciążeń stałych, w tym sprężenia oraz docelowych efektów reologicznych (4028): a) moment zginający M_y w przypadku przekrojów zewnętrznych [kN·m], b) wektory naprężeń głównych σ_3 (maksymalne ściskanie) w elementach brylowych, c) mapy naprężeń głównych σ_3 (maksymalne ściskanie) w elementach brylowych, d) mapy naprężeń głównych σ_1 (maksymalne rozciąganie) w elementach brylowych



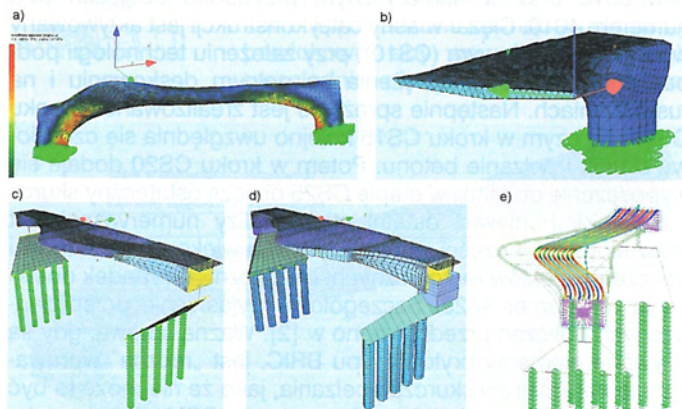
Rys. 9. Naprężenia σ_x w punktach naprężeń przekrojów zewnętrznych zgodnie z rys. 6 od kombinacji charakterystycznych obciążeń stałych wraz ze sprężeniem oraz docelowymi efektami reologicznymi (LC4028): a) punkt naprężeń U, b) punkt naprężeń D

Założono użycie kabli 22C15, przy odległości między nimi równej 0,50 m. Zaprojektowano 9 kabli; kable z numerami nieparzystymi mają być naciągnięte na lewym przyczółku, a z numerami parzystymi powinny być naciągnięte na prawym przyczółku. Siły w kablach podano na rys. 10. Niezależnie od



Rys. 10. Siły w kablach sprężających: a) po sprężeniu (przypadek 4011, bez efektów reologicznych, środek ciężkości przekrojów zewnętrznych zaznaczony na widoku z góry), b) ostatni etap (przypadek 4028, z efektami reologicznymi)

głównego modelu zbudowanego z elementów objętościowych, dodatkowe modele zostały zbudowane do analiz parametrycznych i kontroli uzyskanych wyników. Model z elementów typu tetra (rys. 11a, b) został specjalnie użyty do szczegółowych obliczeń naprężeń w strefie przejściowej między przęsłem a przyczółkiem, ponieważ odpowiada rzeczywistej geometrii w sposób możliwie dokładny (przy zastosowaniu elementów 8-węzłowych geometria strefy przejściowej nie była modelowana w sposób wystarczająco dokładny na potrzeby analizy naprężeń w tej strefie). Był on użyty ponadto do parametrycznych analiz sztywności podparcia (przyczółek z fundamentami zastąpiony „sprężynami”). Model zbudowany z elementów powłokowych (por. rys. 11c, d, e) był wykorzystywany do potwierdzenia słuszności podejścia stosowanego w przypadku kabli w modelu głównym; wyniki dotyczące obu modeli pokrywają się (rys. 11e w porównaniu z rys. 10a).



Rys. 11. Dodatkowe modele: a) model z elementów typu tetra z wizualizacją naprężeń zredukowanych od ciężaru własnego, b) model z elementów typu tetra: przecięcie w środku rozpiętości przęsła, c) model powłokowy: bez wizualizacji grubości, d) model powłokowy: wizualizacja grubości, e) model powłokowy: siły w kablach po sprężeniu (LC 4011)

Obiekt nie jest częścią infrastruktury na EURO 2012, lecz elementem usprawniającym komunikację pomiędzy stadionem a parkiem. Zgodnie z planem jest przewidziany do wybudowania w drugim etapie realizacji zagospodarowania terenu wschodniego, czyli po EURO 2012.

★ ★ ★

Inwestorem jest firma Wrocławskie Inwestycje Sp. z o.o. Projekt został wykonany przez Biuro Projektowo-Badawcze PRO-MOST Wrocław. Koncepcję architektoniczną opracowało biuro Kabarowski Misiura Architekci. Analizy MES zostały wykonane na Politechnice Wrocławskiej [2] z zastosowaniem oprogramowania SOFiSTiK [1] i innych programów wspomagających. Modele MES przygotowano podczas realizacji pracy dyplomowej [3].

PIŚMIENNICTWO

- [1] SOFiSTiK wersja 12.67-23. SOFiSTiK AG, Oberschleissheim, 2009.
- [2] Lorenc W., Ignatowicz L., Gierczak J., Dudkiewicz J.: Analiza numeryczna konstrukcji kładki z betonu sprężonego z zastosowaniem prototypowych metod modelowania konstrukcji w systemie Sofistik. Raport serii SPR nr 10/2010. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 2010.
- [3] Piwoński J.: Zintegrowany most zespolony. Praca magisterska. Politechnika Wroclawska, 2010.