



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju


Generalna Dyrekcja
Dróg Krajowych i Autostrad

Diagnostyka sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów inżynierskich,
z uwzględnieniem doboru systemów monitoringu

Możliwości numerycznej symulacji uszkodzeń

dr hab. inż. Bartłomiej Błachowski – IPPT PAN

dr inż. Andrzej Świercz – IPPT PAN



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Plan prezentacji

1. Model numeryczny
2. Kalibracja, walidacja i weryfikacja
3. Modelowanie uszkodzenia
4. Zastosowanie modelowania numerycznego
5. Literatura



Model numeryczny

1. Geometria i warunki brzegowe

podział na elementy skończone (kratowe belkowe, płytowe, powłokowe, bryłowe), definicja właściwości geometrycznych i fizycznych, więzy kinematyczne

2. Model materiału

parametry związków fizycznych (moduł Younga, współczynnik Poissona), parametry materiałowe: gęstość, współczynnik rozszerzalności cieplnej

3. Model obciążenia

układ sił skupionych, powierzchniowych, ciężar własny, warunki początkowych, rozkład temperatur, imperfekcje geometryczne

Równania ruchu

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\mathbf{q}}(\boldsymbol{\theta}, t) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})\dot{\mathbf{q}}(\boldsymbol{\theta}, t) + \mathbf{K}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{q}(\boldsymbol{\theta}, t) = \mathbf{f}(t)$$

Wielkości pomiarowe

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_a\ddot{\mathbf{q}}(\boldsymbol{\theta}, t) + \mathbf{C}_v\dot{\mathbf{q}}(\boldsymbol{\theta}, t) + \mathbf{C}_d\mathbf{q}(\boldsymbol{\theta}, t)$$

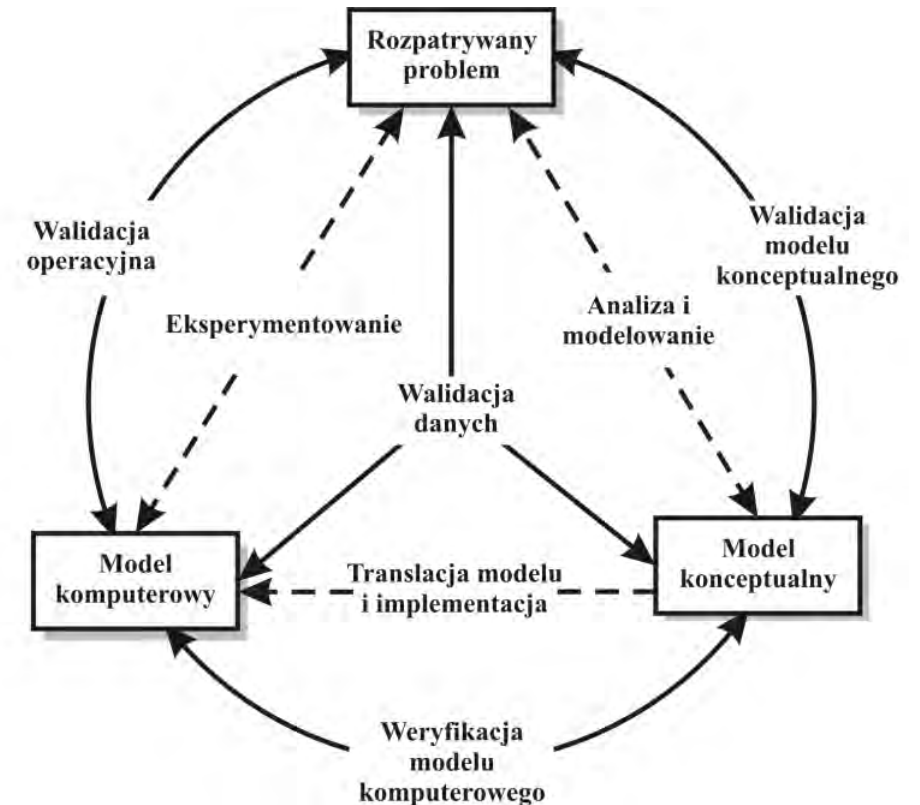


Kalibracja, walidacja i weryfikacja

Kalibracja. Dostrojenie modelu obliczeniowego (parametrów fizycznych/geometrycznych) w celu zredukowania rozbieżności z danymi pomiarowymi

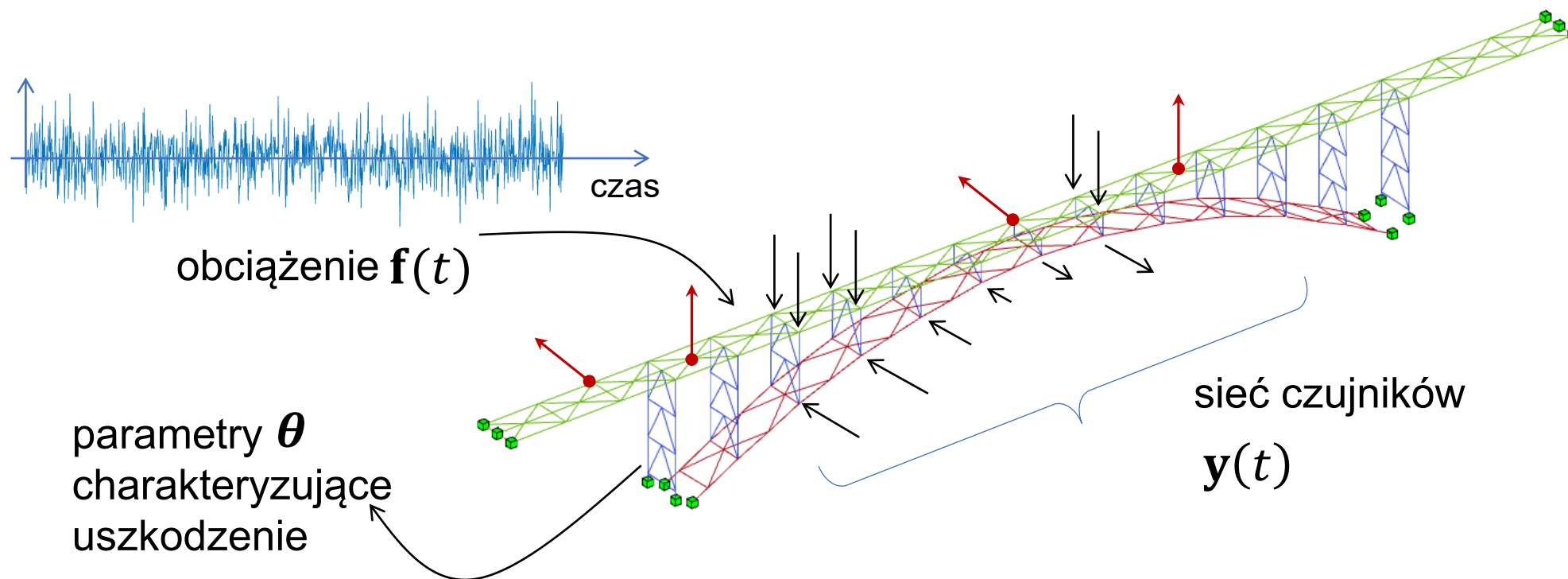
Walidacja. Sprawdzanie, czy model komputerowy ma w swojej dziedzinie zastosowań wystarczający poziom trafności (badany obiekt poddany jest innym warunkom obciążenia / pomiaru niż w przypadku kalibracji modelu)

Weryfikacja. Sprawdzanie spójności i poprawności danych modelu, parametrów analizy, skryptów do przetwarzania danych / wyników



Sargent R. G.: *Verification and validation of simulation models*, Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011

Model numeryczny

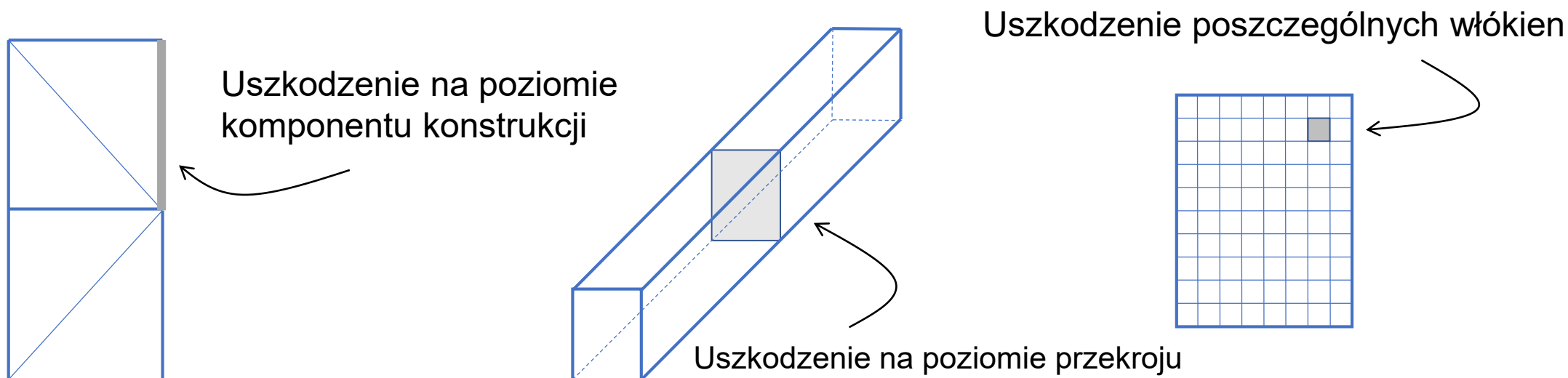


Model dynamiczny \mathcal{M} o N_d stopniach swobody i znanej macierzy mas $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N_d \times N_d}$ oraz poszukiwanej macierzy sztywności $\mathbf{K}(\theta) \in \mathbb{R}^{N_d \times N_d}$ parametryzowany przez wektor

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_{N_\theta}]^T \in \mathbb{R}^{N_\theta}$$

- Modyfikacja lokalnej macierzy sztywności $\mathbf{K}^{(\text{elem})}(\theta)$
- Modyfikacja geometrii (ponowna dyskretyzacja)
- Obciążenie zewnętrzne (imperfekcje)

Modelowanie uszkodzenia



Pole przekroju (jednorodnie)
krata/belka/cięgno
Usunięcie elementu

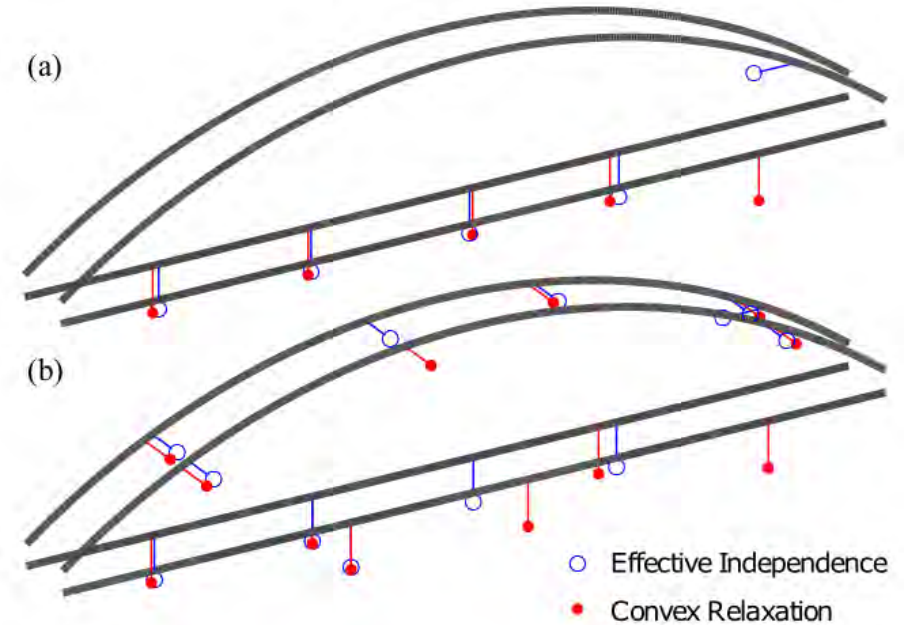
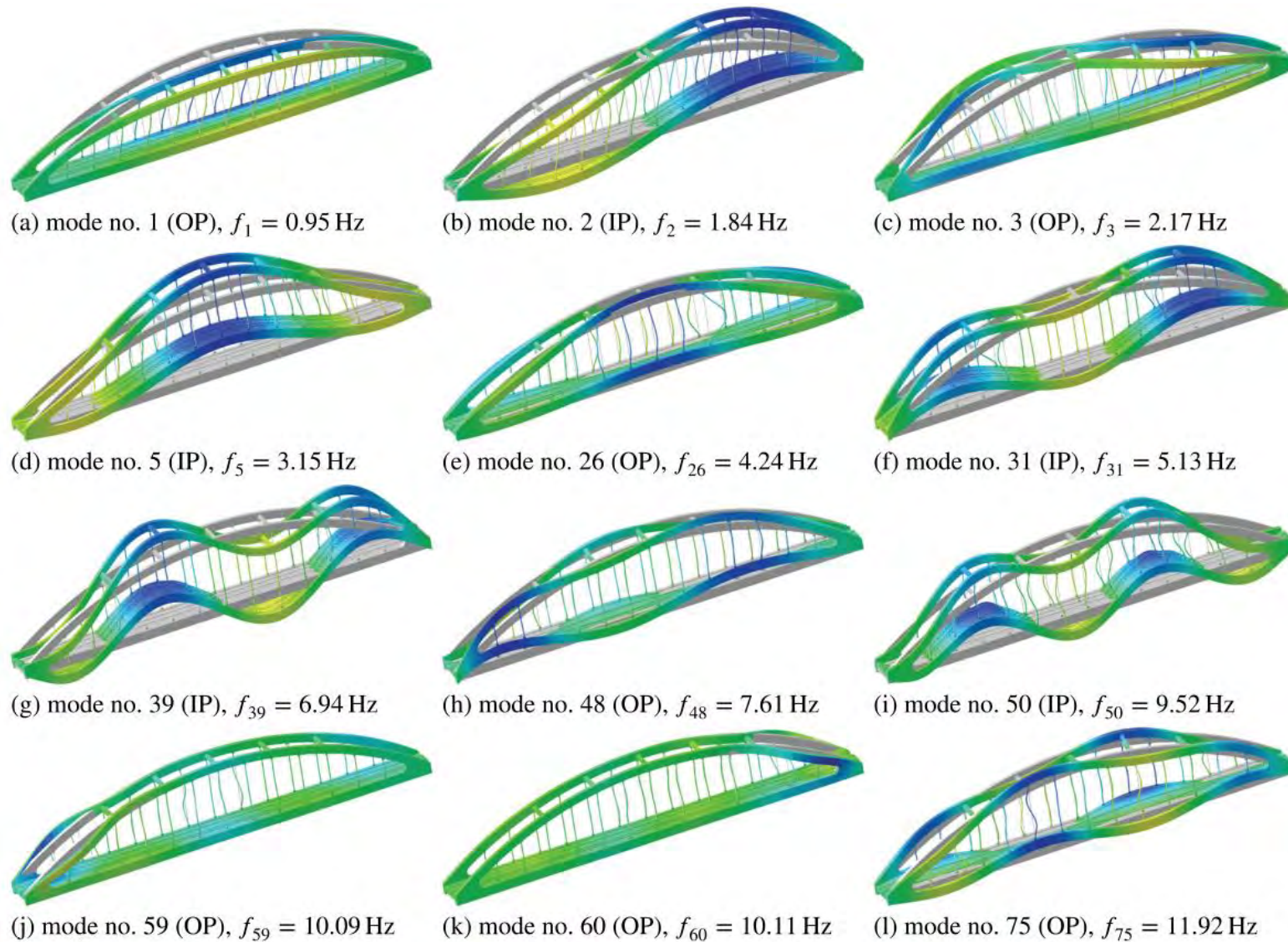
Pole przekroju (lokalnie)
krata/belka/cięgno

Zarysowanie betonu
Ubytki materiałowe

Imperfekcje geometryczne
Zmiana siły naciągu

Osiadanie podpór

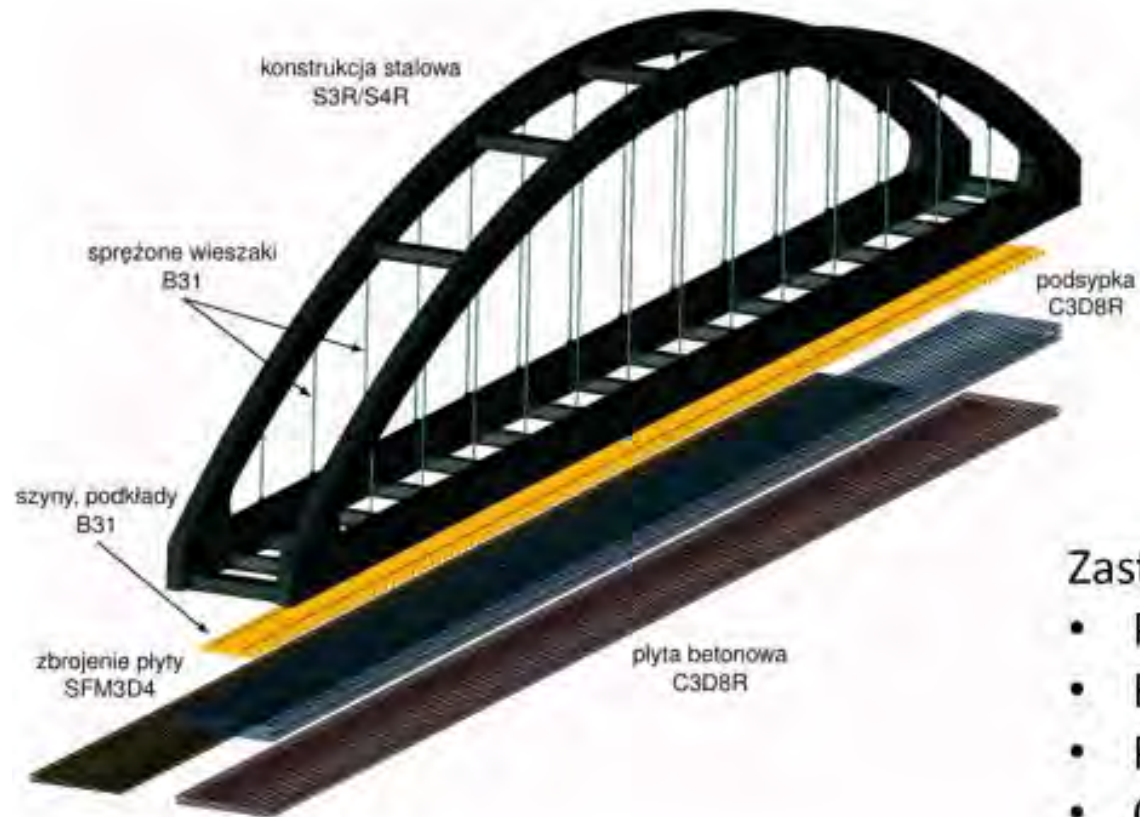
Optymalne rozmieszczenie czujników



Błachowski B., Świercz A., Ostrowski M., Tautowski P., Olaszek P., Jankowski Ł., **Convex relaxation for efficient sensor layout optimization in large-scale structures subjected to moving loads**, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.35, No.10, pp.1085-1100, 2020

Wpływ temperatury

- Kalibracja modelu z wykorzystaniem przejazdów pociągów o znanych parametrach



Środowisko obliczeniowe: Abaqus

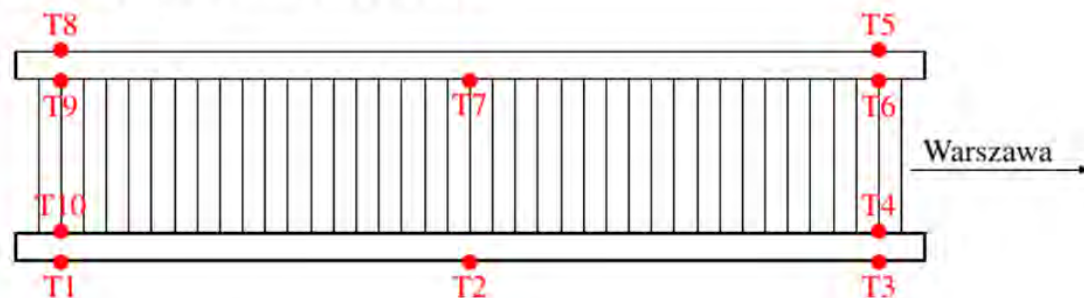
- Analiza drgań własnych
- Analiza drgań wymuszonych (pociąg testowy, Pendolino)
- Analiza deformacji konstrukcji wywołanej zmianą temperatury

Zastosowane elementy skończone

- Powłokowe (konstrukcja stalowa)
- Belkowe (wieszaki szyny i podkłady)
- Powierzchniowe (zbrojenie płyty)
- Objętościowe (plyta betonowa, podsypka)

Wpływ temperatury

Rozmieszczenie punktów pomiarowych

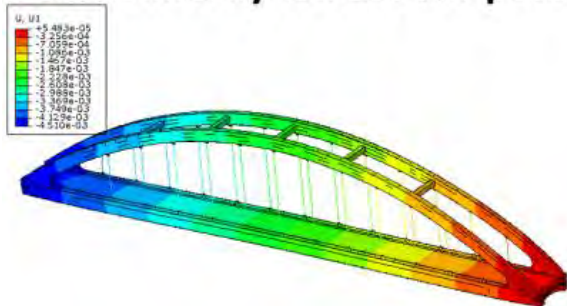


Rezultaty pomiaru temperatury

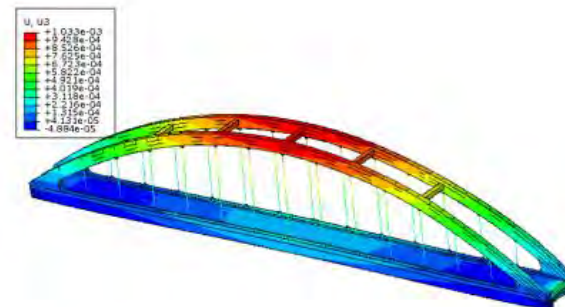
Godz.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	min(T)	max(T)	dT
10:25	13,6	10,5	13,2	7,8	6,8	7,5	13,2	8,6	14,7	9,1	6,8	14,7	7,9
11:15	14,5	13,2	12,8	9,2	8	9,6	14,7	10,1	15,1	11,2	8	15,1	7,1
12:15	13,2	15,8	12,5	10,5	9,5	11,1	15,3	11,4	13,5	12,5	9,5	15,8	6,3
13:15	12,5	16	12,5	13,1	12,6	12	14,5	12,3	13,7	13,5	12	16	4
13:50	13	14,8	12	13,3	13,4	11,8	13,4	13,5	13,6	14,5	11,8	14,8	3
min(T)	12,5	10,5	12	7,8	6,8	7,5	13,2	8,6	13,5	9,1			
max(T)	14,5	16	13,2	13,3	13,4	12	15,3	13,5	15,1	14,5			
dT	2	5,5	1,2	5,5	6,6	4,5	2,1	4,9	1,6	5,4			

Wpływ temperatury

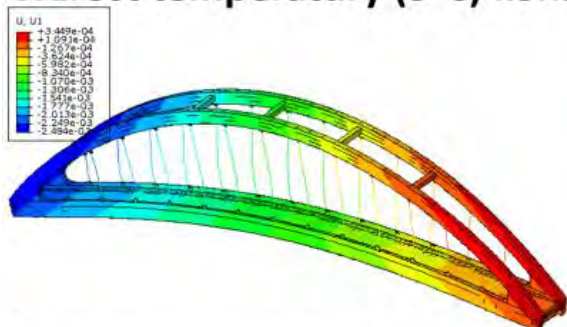
Równomierny wzrost temperatury (5°C)



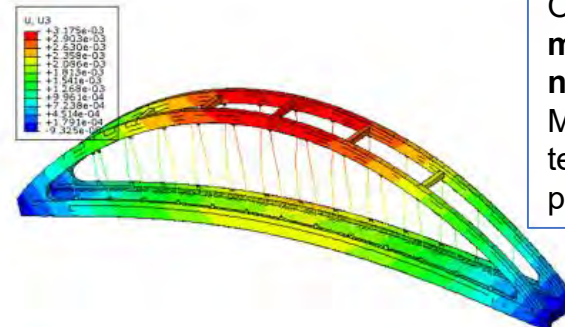
U1 [mm]	U3 [mm]
4,5	1,0



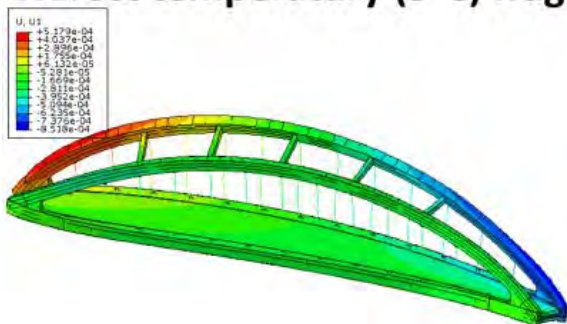
Wzrost temperatury (5°C) konstrukcji stalowej



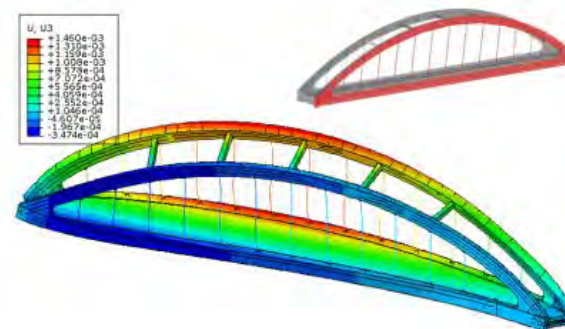
U1 [mm]	U3 [mm]
2,5	3,2



Wzrost temperatury (5°C) fragmentu konstrukcji stalowej

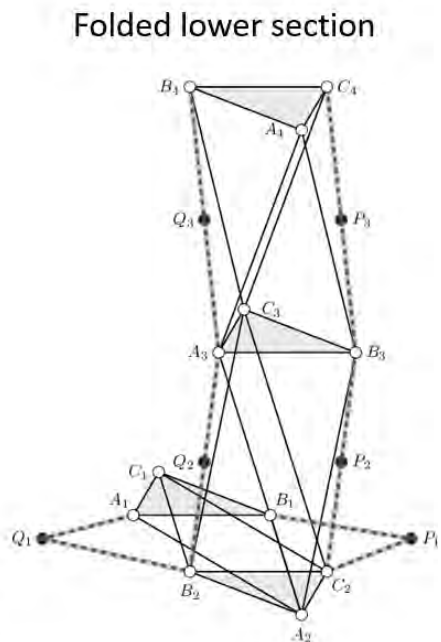
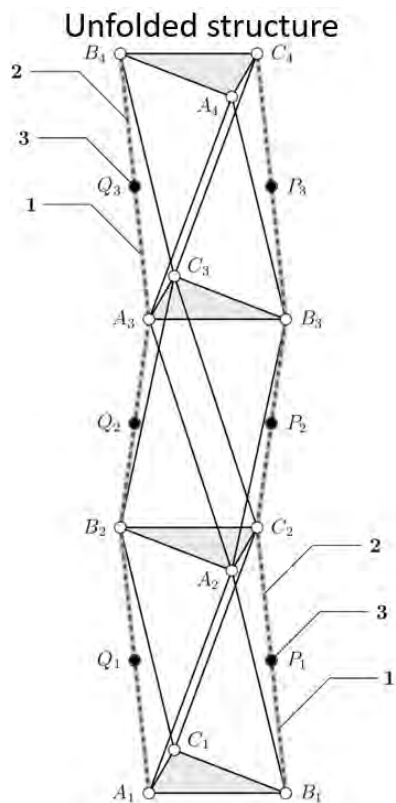


U1 [mm]	U3 [mm]
0,5	1,5

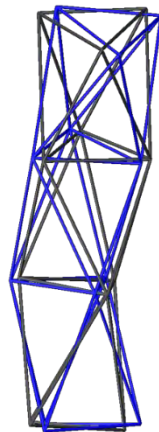


Olaszek P., Świercz A., Sala D., Kokot M., **System monitorowania łukowego wiaduktu kolejowego na linii wysokiej prędkości, WROCŁAWSKIE DNI MOSTOWE - Mosty. Przemiany w projektowaniu i technologiach budowy**, 2017-11-28/11-29, Wrocław, pp.481-488, 2017

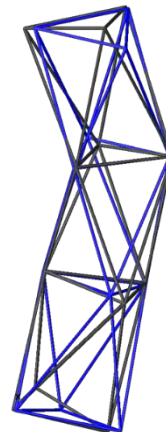
Wpływ sprężenia



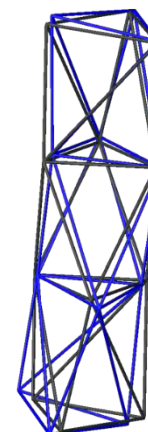
Mode 7
178.45 Hz
190.08 Hz



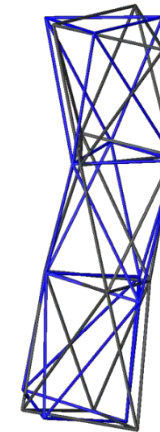
Mode 8
191.60 Hz
191.61 Hz



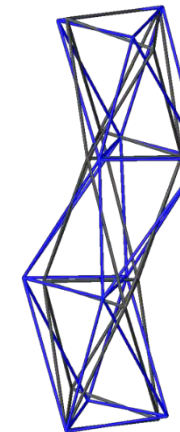
Mode 9
224.52 Hz
231.17 Hz



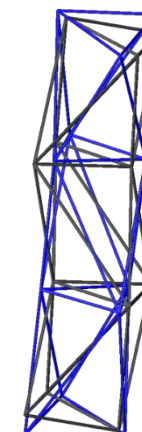
Mode 10
300.15 Hz
300.11 Hz



Mode 11
311.27 Hz
346.99 Hz



Mode 12
368.62 Hz
368.72 Hz



Mode number	Eigenfrequencies [Hz]			
	Non-tensioned	Prestressed 20 kPa	Prestressed 50 MPa	Prestressed 200 MPa
7	178.47	189.97	190.11	190.52
8	191.62	191.62	191.62	191.62
9	224.55	231.19	231.17	231.12
10	300.21	300.25	300.21	300.09
11	311.35	346.87	347.03	347.49
12	368.68	368.68	368.73	368.89

Świercz A., Holnicki-Szulc J., **Ultra-light, self-deployable, rod-cable structures**, SMART 2019, 9th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, 2019-07-08/07-11, Paris, pp.537-542, 2019

Numeryczna identyfikacja uszkodzeń

Identyfikacja uszkodzeń

- i. Obecność
- ii. Lokalizacja
- iii. Rozmiar
- iv. Bezpieczeństwo

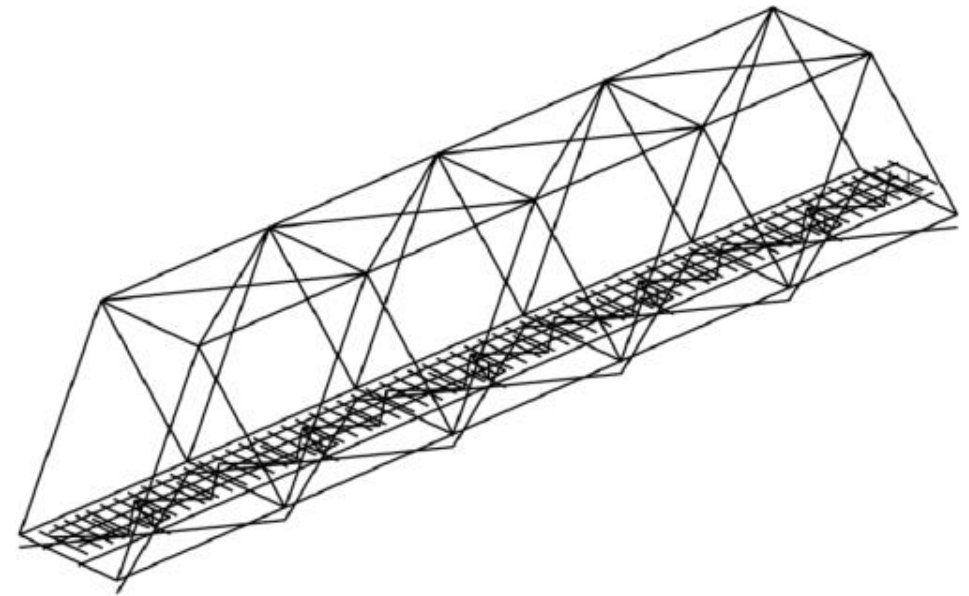
Metoda dystorsji wirtualnych

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^L + \varepsilon_i^R = \varepsilon_i^L + \sum_j D_{ij} \varepsilon_j^0 \quad \mu_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_i^0}{\varepsilon_i}$$

- Analiza wrażliwości
- Optymalizacja

$$F = \sum_{\alpha} \left[\frac{\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\alpha}^M}{\varepsilon_{\alpha}^M} \right]^2$$

A. Rytter, **Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures**, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993. 193 p.



Literatura

- Kmita J., Bień J., Machelski Cz.: *Komputerowe wspomaganie projektowania mostów*. WKŁ, Warszawa 1989.
- Bień J., *Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych*, Wydawnictwa Komunikacji Łączności, Warszawa 2010.
- Machelski Cz.: *Modelowanie sprężenia mostów*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2010.
- Oleszek R. *Modelowanie mostowych konstrukcji sprężonych w środowisku MES SOFiSTiK*. Mosty. 2016:38–44.



13:00	<i>Otwarcie prezentacji projektu RID2 DiagSC</i>	Janusz Bohatkiewicz
13:05	<i>Informacje ogólne o projekcie</i>	Piotr Olszek
13:15	<i>Procedura badań obiektów mostowych o konstrukcji Sprężonej kablobetonowej oraz podwieszanej z użyciem metody próbnego obciążenia diagnostycznego wspartej przeglądem wizualnym i inspekcją geodezyjną</i>	Piotr Olszek
13:45	<i>Metody NDT stosowane w ocenie stanu technicznego konstrukcji kablobetonowych i konstrukcji podwieszonych ze szczególnym uwzględnieniem metod akustycznych wspomaganymi metodą Georadarową i GalvaPuls</i>	Grzegorz Świt
14:15	<i>Ocena ryzyka pogorszenia stanu użytkowości konstrukcji kablobetonowych i konstrukcji podwieszanych w kontekście braku lub niewłaściwej implementacji systemu monitoringu</i>	Andrzej Świercz
14:45	<i>Dane o wszystkich obiektach mostowych GDDKiA będących przedmiotem projektu na podstawie SGM, Wybrane obiekty do badań testowych</i>	Piotr Olszek Miroslaw Biskup

16:30	<i>Typowe uszkodzenia konstrukcji podwieszonych</i>	Artur Sakowski
16:50	<i>Typowe uszkodzenia konstrukcji sprężonych kablobetonowych</i>	Miroslaw Biskup
17:10	<i>Możliwości detekcji skali uszkodzeń metodami NDT</i>	Grzegorz Świt
17:30	<i>Możliwości numerycznej symulacji uszkodzeń</i>	Andrzej Świercz
17:50	<i>Wzorcowy projekt monitoringu na przykładzie wiaduktu extradosed</i>	Piotr Olszek Artur Sakowski
18:10	Dyskusja	

