



EUGENIUSZ ZAWISZA

Uniwersytet Rolniczy
w Krakowie
kiwig@ur.krakow.pl



RADOSŁAW KAZIOR

Instaleko Sp. z o.o.
radoslawkazior@gmail.com

Ścisłość żużli wielkopieczowych oraz ich mieszanek z popiołami lotnymi

Wraz z postępem technologicznym pojawia się problem odpadów w wyniku rosnącego popytu na dobra konsumpcyjne, wzrostu ludności i szeregu innych czynników wynikających z działalności bytowej i przemysłowej człowieka. Odpady oznaczają każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza pozbyć się lub do ich pozbycia się jest zobowiązany [12]. Odpady te w większości przypadków są uciążliwe dla środowiska i samo składowanie ich stanowi problem natury obszarowej oraz szkodliwości środowiska; szczególnie problem ten dotyczy odpadów przemysłowych wytworzonych

w procesie wytwarzania energii (energetyka), przemśle górniczym czy metalurgicznym. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2008 r. wytworzono w Polsce 114,9 mln ton odpadów innych niż komunalne, z czego ok. 74,9% zostało podane odzyskowi, a ok. 21,7% zostało unieszkodliwione [13].

W wyniku spalania węgla kamiennego w tradycyjnych piecach bez odsiarczania powstają popioły krzemianowo-glinowe. Innymi produktami ubocznymi są stałe produkty spalania, takie jak żużel [1]. Wraz ze wzrostem wytwarzania coraz większej ilości odpadów oraz problemów z ich składowaniem pojawiły się możliwości ich wykorzystywania. Główną dziedziną, w której odpady przemysłowe stanowią alternatywę dla innych materiałów jest inżynieria lądowa, gdzie wykorzystanie znalazły głównie żużle, popioły lotne oraz mieszanki popiołowo-żużłowe. Materiał ten został wszechstronnie przebadany w zastosowaniach drogowych i jest objęty Polską Normą S-02205 dotyczącą robót ziemnych [10], stanowi więc dobry budulec przy wykonywaniu nasypów w budownictwie drogowym oraz w wielu innych działach budownictwa ziemnego.

W przemyśle metalurgicznym materiały odpadowe stanowią żużle wielkopieczowe i konwertorowe. W zależności od rodzaju procesu oraz składu materiału wsadowego, a nawet materiału ogniotrwałego użytego do obudowy pieca, odpady hutnicze mają nieco odmienny skład chemiczny, mineralogiczny i mogą różnić się własnościami fizycznymi [5]. Dlatego podczas oceny przydatności odpadów hutniczych do celów budownictwa ziemnego należy za każdym razem określić ich własności geotechniczne. Poza oznaczeniem uziarnienia gruntów i wskaźnika uziarnienia, który ma istotny wpływ na zagęszczalność, należy również określić ścisłość czy wy-

trzymałość na ścinanie. Te właściwości mechaniczne mają wpływ na stateczność i odkształcalność, a co za tym idzie wykorzystanie odpadów do celów inżynierskich jako antropogeniczne grunty budowlane.

Charakterystyka geotechniczna badanych materiałów

Badania przeprowadzono, wykorzystując następujące materiały:

- Popiół lotny pobrany ze zsypu przy elektrofiltrze Elektrowni Skawina.
- Żużel wielkopieczowy o uziarnieniu 0–31,5 mm, pochodzący ze składowiska „Pleszów” Huty ArcelorMittal Poland S.A – oddział w Krakowie.
- Mieszanki żużla wielkopieczowego z dodatkiem 10, 20 i 30% popiołu lotnego (wagowo).

Zakres badań obejmował oznaczenie podstawowych właściwości geotechnicznych popiołów, żużli oraz ich mieszanek, to jest składu granulometrycznego, gęstości właściwej szkieletu, wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu. Skład granulometryczny oznaczono, stosując analizę sitową dla ziaren większych od 0,063 mm; dla cząstek mniejszych od 0,063 mm posłużono się analizą areometryczną. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono metodą kolby miarowej w wodzie. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu oraz wilgotność optymalną oznaczono w aparacie Proctora. W przypadku popiołów lotnych użyto aparat standardowy z cylindrem o objętości 1 dcm³, (d = 11,2 cm, h = 10 cm). W przypadku żużla wielkopieczowego oraz mieszanek żużla z popiołem, zastosowano aparat średniowymiarowy o objętości cylindra 9,8 dcm³, (d = 25 cm, h = 20 cm). Energia jednostkowa zagęszczania poszczególnych próbek wynosiła 0,59 J·cm⁻³.

Kąt tarcia wewnętrznego i spójność dla żużla i mieszanek podano w oparciu o badania Koniecznego [2]. Oznaczenia te wykonano przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,0$ w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania, o wymiarach skrzynki 30 × 30 × 20 cm. Kąt tarcia wewnętrznego oraz spójność popiołów lotnych podano w oparciu o badania wykonane w Laboratorium Badania Właściwości Skal i Wyróbów Kamieniarskich AGH [3].

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że żużel wielkopieczowy pod względem geotechnicznym odpowiada żwirom (tab. 1). Mieszanki żużla z dodatkiem 10, 20 i 30% popiołu zostały sklasyfikowane jako żwir gliniasty. Popiół lotny odpowiada pyłowi. Według wskaźnika różnorodności żużel wielkopieczowy oraz mieszanki żużla z popio-

Tabela 1. Podstawowe właściwości geotechniczne badanych materiałów

Parametr	Wartość				
	popiół elektro-wniany	żużel wielko-piecowy	mieszanki żużla wielkopiecowego z dodatkiem popiołu:		
			10%	20%	30%
Zawartość frakcji [%]:					
– kamienista (> 40 mm)	–	–	–	–	–
– żwirowa (40–2 mm)	–	79,84	52,57	64,12	43,25
– piaskowa (2–0,05 mm)	19,21	14,29	24,31	15,58	22,44
– pyłowa (0,05–0,002 mm)	77,33	5,89	9,48	14,03	24,32
– ilowa (< 0,002 mm)	3,46		3,63	6,27	9,99
Nazwa wg normy PN-86/B-02480	II	Ż	Żg	Żg	Żg
Wskaźnik różnoziarnistości [–]	1,73	30,91	1200	4286	2889
Gęstość właściwa szkieletu [$g \cdot cm^{-3}$]	2,34	2,56	2,48	2,43	2,40
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu [$g \cdot cm^{-3}$]	1,24	1,96	2,11	2,03	1,91
Wilgotność optymalna [%]	31,0	8,30	9,35	11,1	12,80
Spójność [kPa] przy $I_s = 1,00$	19,8**	91,16*	66,0*	64,55*	44,43*
Kąt tarcia wewnętrznego [°] przy $I_s = 1,00$	32,5**	50,5*	49,9*	39,9*	39,6*

* Konieczny [2008]

** Laboratorium ... [2007]

tem można sklasyfikować jako materiały bardzo różnoziarniste, a popiół jako równoziarnisty.

Wilgotność optymalna żużla wielkopiecowego była najmniejsza spośród badanych materiałów i wyniosła 8,3%, a popiołu lotnego największa – 31%. Wraz ze wzrostem ilości popiołu w mieszankach popiołowo – żużlowych wartość wilgotności optymalnej zwiększała się i była największa dla żużla z dodatkiem 30% popiołu – około 13%.

Najmniejszą wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu wykazał popiół – 1,22 $g \cdot cm^{-3}$. Najwyższą wartością tego parametru odznaczał się żużel z dodatkiem 20% popiołu – 2,03 $g \cdot cm^{-3}$, w przypadku żużla oraz pozostałych mieszanek zawierał się on w przedziale od 1,88 do 1,96 $g \cdot cm^{-3}$.

Gęstość właściwa szkieletu popiołu była najmniejsza i wyniosła 1,24 $g \cdot cm^{-3}$, natomiast żużla wielkopiecowego była największa – 2,56 $g \cdot cm^{-3}$. W przypadku mieszanek żużla z popiołem wartość tego parametru malała wraz ze wzrostem ilości popiołu i tak dla mieszanki z 10% dodatkiem popiołu wyniosła 2,48 $g \cdot cm^{-3}$, dla mieszanki z 20% dodatkiem mieszanki – 2,43 $g \cdot cm^{-3}$, a dla mieszanki z 30% dodatkiem popiołu – 2,40 $g \cdot cm^{-3}$.

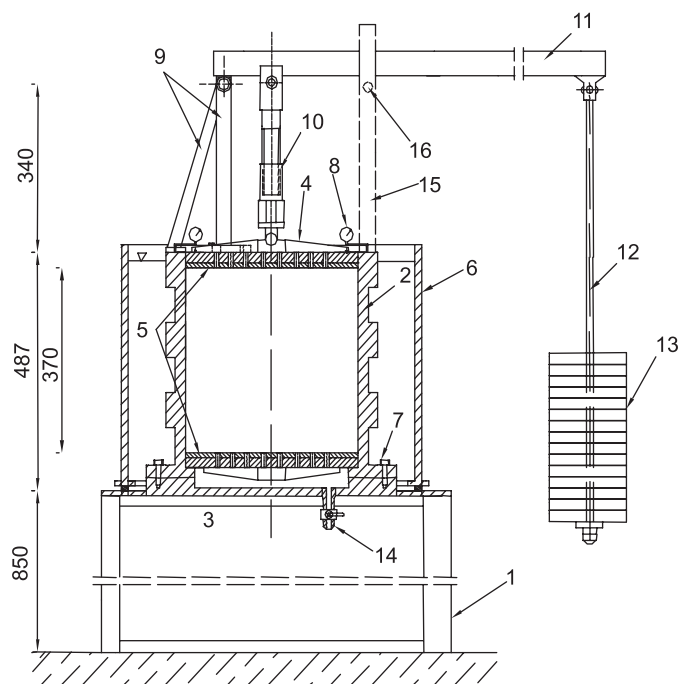
Parametry charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie, to jest spójność oraz kąt tarcia wewnętrznego, były największe dla żużla wielkopiecowego i wyniosły odpowiednio ponad 91 kPa i 50°. Najmniejsze wartości wykazał popiół – spójność wyniosła około 20 kPa, a kąt tarcia wewnętrznego około 33,5° – przy takim samym wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,0$. Dla mieszanek żużla z popiołem wartości tych parametrów malały wraz ze wzrostem dodatku popiołu – w przypadku spójności od 66 do 44 kPa odpowiednio do zwiększającego się dodatku popiołu od 10 do 30%, a w przypadku kąta tarcia wewnętrznego przy 30% dodatku popiołu od około 50 do 40°.

Cel i metodyka badań ściśliwości

Celem badań było określenie wartości modułów ściśliwości pierwotnej i wtórnej oraz osiadań żużla wielkopiecowego o uziarnieniu 0–31,5 mm oraz ich mieszanek żużla z popiołem lotnym. Badania zostały wykonane przy wilgotności optymalnej oraz tym samym wskaźniku zagęszczenia dla wszystkich materiałów $I_s = 1,0$.

Badania przeprowadzono w edometrze średniowymiarowym [4]. Edometr składa się z metalowego cylindra wewnętrznego o średnicy i wysokości 374 mm oraz zewnętrznego o średnicy i wysokości 738 mm, które są przytwierdzone do podstawy (rys. 1.). Przeźnięcie pomiędzy cylindrami można wypełnić wodą, aby nawodnić próbkę gruntu uformowanego w wewnętrznym cylindrze. Nawodnienie od-

tem można sklasyfikować jako materiały bardzo różnoziarniste, a popiół jako równoziarnisty.



1. Podstawa edometru (stół metalowy), 2. Cylinder wewnętrzny, 3. Dno (pokrywa dolna), 4. Pokrywa górna, 5. Filtry, 6. Cylinder zewnętrzny, 7. Śruby mocujące cylinder badawczy z podstawą, 8. Czujniki zegarowe, 9. Wsporniki ramienia dźwigni, 10. Trzpień do przekazywania obciążenia, 11. Ramię dźwigni, 12. Wieszak do podwieszania obciążników, 13. Obciążniki, 14. Zawór spustowy wody.

Rys. 1. Schemat edometru średniowymiarowego [4]

bywa się poprzez filtry porowate, które znajdują się w dolnej części edometru. Cylinder wraz z próbą jest podnoszony i ustawiany na podstawie oraz zdejmowany za pomocą wciągarki łańcuchowej.

Edometr spełnia warunki dotyczące zachowania proporcji pomiędzy średnicą i wysokością cylindra/próbki oraz pomiędzy średnicą cylindra/próbki, a średnicą maksymalnych ziaren w próbce [9]:

$$D : h = 1$$

$$D : d_{\max} > 5$$

gdzie:

D – średnica próbki,

h – wysokość próbki,

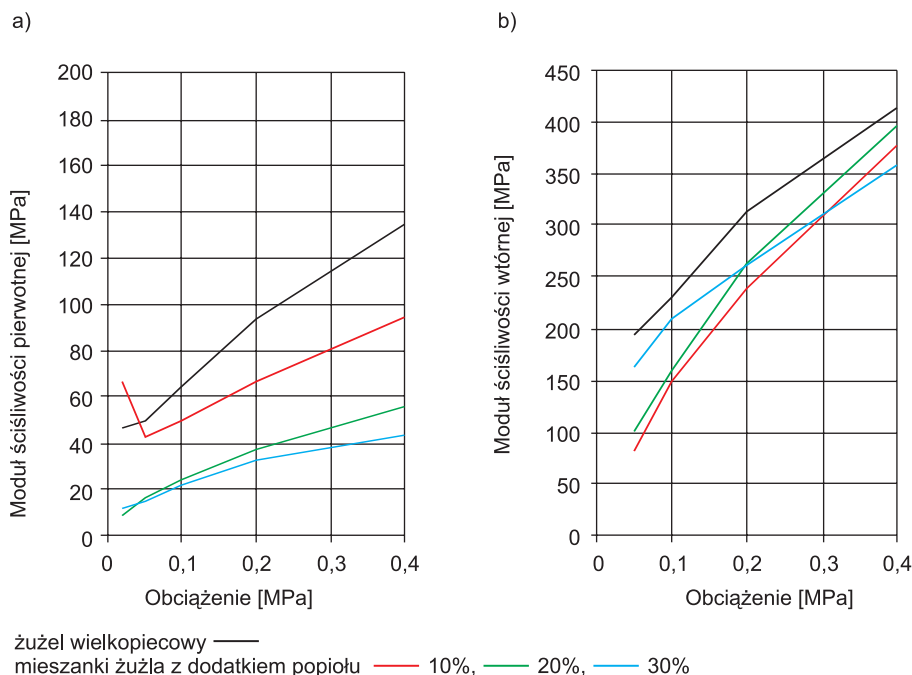
d_{\max} – średnica maksymalna ziaren.

Proces konsolidacji próbki odbywał się w wyniku obciążenia zadawanego mechanicznie przez system dźwigniowy o przełożeniu 1:10. Przebieg osiadania próbki rejestrowano poprzez dwa czujniki zegarowe umieszczone na pokrywie górnej. Formowanie próbek w cylindrze odbywało się w cylindrze wewnętrznym przez zagęszczanie kolejnych warstw o grubości 6,2 cm aż do wypełnienia całego cylindra. Zagęszczanie próbek prowadzono do osiągnięcia wskaźnika zagęszczenia $I_s = 1,0$ przy wilgotności zbliżonej do optymalnej dla danego materiału. Każdą próbkę poddawano obciążeniu pierwotnemu, odciążeniu oraz obciążeniu wtórnemu. Wartości kolejnych stopni obciążenia wynosiły: 0,02; 0,05; 0,10; 0,20; 0,40 MPa.

Wyniki badań ścisłości oraz ich analiza

Konsolidacja badanych materiałów zachodziła stosunkowo szybko; czas konsolidacji próbek przy obciążeniu pierwotnym wynosił 7 dob, a przy obciążeniu wtórnym 5–6 dob. Cechą charakterystyczną dla poszczególnych stopni obciążenia było występowanie w ciągu pierwszej minuty największych osiadań, które wraz z upływem czasu stopniowo malały aż do osiągnięcia pełnej stabilizacji. Przy maksymalnym obciążeniu, to jest 0,40 MPa nastąpiły największe osiadania. Wartości modułów ścisłości pierwotnej ogólnie zwiększały się wraz ze wzrostem obciążenia (rys. 2). Największe wartości modułów ścisłości pierwotnej wykazał żużel wielkopieczowy, a najmniejsze mieszanka żużla z 30% dodatkiem popiołu. Wartości modułów ścisłości wtórnej były znacznie większe niż wartości modułów ścisłości pierwotnej i również zwiększały się wraz ze wzrostem obciążenia. Największe wartości modułów ścisłości wtórnej wykazał żużel wielkopieczowy, natomiast najmniejsze żużel z 10% dodatkiem popiołu.

W celu porównania wyników otrzymanych dla poszczególnych materiałów wartości modułów ścisłości uśredniono dla całego zakresu obciążenia, a wartości



Rys. 2. Wpływ obciążenia na wartości modułów ścisłości: a) pierwotnej, b) wtórnej

osiadania przedstawiono jako ich procentowy stosunek do początkowej wysokości próbki (odkształcenie – tab. 2). W wyniku analizy stwierdzono, że:

Odkształcenie przy obciążeniu pierwotnym wyniosło 0,28% dla żużla wielkopieczowego, natomiast dla mieszanek zwiększało się od 0,39% do 1,04% – odpowiednio do zwiększania dodatku popiołu do żużla od 10 do 30%.

- Wielkości odkształcenia przy obciążeniu wtórnym były 3–10-krotnie mniejsze niż przy obciążeniu pierwotnym. Dla wszystkich próbek odkształcenia były zbliżone i wyniosły od 0,09% do 0,11%.
- Moduł ścisłości pierwotnej był największy dla żużla wielkopieczowego (135 MPa), natomiast dla mieszanek zmniejszał się od 94 do 44 MPa – odpowiednio do zwiększania dodatku popiołu do żużla od 10 do 30%.
- Wartości modułu ścisłości wtórnej były od 3 do 10-krotnie większe niż modułu ścisłości pierwotnej. Najmniejszą wartość modułu wykazała mieszanka z 30% dodatkiem popiołu (359 MPa), a największą żużel wielkopieczowy (413 MPa).
- Wartości wskaźnika skonsolidowania (M_o/M) wykazały wyraźną zależność od zawartości popiołu w badanej próbce

Tabela 2. Uśrednione wartości odkształceń i modułów ścisłości

Materiał		Odkształcenia [%] przy obciążeniu		Moduł ścisłości [MPa]		Wskaźnik skonsolidowania $\beta = M_o/M$
		pierwotnym	wtórnym	pierwotny M_o	wtórny M	
Żużel wielkopieczowy		0,28	0,09	135	413	0,33
Mieszanki żużla z dodatkiem popiołu lotnego	10%	0,39	0,10	94	378	0,25
	20%	0,66	0,09	56	397	0,14
	30%	1,04	0,11	44	359	0,12

i tak dla żużla wielkopieczowego wartość ta wyniosła 0,33 a dla mieszanki z 30% dodatkiem popiołu 0,12. Wartości te były znacznie mniejsze niż dla gruntów mineralnych, które zawierają się według [10] w przedziale od 0,60 – 0,90.

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań oraz ich analiza pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Konsolidacja badanych materiałów zachodziła stosunkowo szybko, a największe przyrosty osiadania występowały przy większych wartościach obciążenia.
2. Ścisłość żużla wielkopieczowego oraz mieszanek żużla z popiołem lotnym wykazuje istotne różnice i tak:
 - najmniej ściśliwy jest żużel wielkopieczowy o wartościach modułów ściśliwości pierwotnej 135 MPa oraz wtórnej 413 MPa,
 - nieco bardziej ściśliwa jest mieszanka żużla wielkopieczowego z 10% dodatkiem popiołu o wartościach modułów ściśliwości pierwotnej 94 MPa oraz wtórnej 378 MPa,
 - jeszcze większą ściśliwością wykazała się mieszanka żużla wielkopieczowego z 20% dodatkiem popiołu lotnego o wartościach modułów ściśliwości pierwotnej 56 MPa oraz wtórnej 397 MPa,
 - największą ściśliwością wykazała się mieszanka żużla wielkopieczowego z 30% dodatkiem popiołu o wartościach modułu ściśliwości pierwotnej 44 MPa oraz wtórnej 359 MPa.
3. Wszystkie badane materiały wykazały znacznie mniejszą ściśliwość przy obciążeniu wtórnym, niż przy obciążeniu pierwotnym.
4. Żużel wielkopieczowy oraz mieszanki żużla z popiołem lotnym wykazały ogólnie niedużą ściśliwość oraz znaczną wytrzymałość na ścinanie, co potwierdzają wyniki wcześniejszych badań [6], [7], [8]. Dlatego materiały te mogą

być na szeroką skalę wykorzystywane w budownictwie ziemnym, a w szczególności drogowym.

Bibliografia

- [1] Brożyna M., Mazurkiewicz M., *Możliwości wykorzystania odpadów z palenisk fluidalnych*. Materiały Szkoły Gospodarki Odpadami. Ryto-Kraków 2000
- [2] Konieczny K. *Badania wytrzymałości na ścinanie mieszanek odpadów hutniczych i elektrownianych*. Praca magisterska. Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego. AR w Krakowie 2008, maszynopis
- [3] *Laboratorium. Badania Właściwości Skał i Wyrobów Kamieniarskich*. AGH 2007, maszynopis
- [4] *Projekt średniowymiarowego edometru*. Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego, Akademia Rolnicza w Krakowie, 2000, maszynopis
- [5] Sobczyński P. Żużle hutnicze – ich natura oraz przydatność gospodarcza. *Mat. Międz. Konf. Nauk. -Tech. pt. „Odpady przemysłowe i komunalne. Powstawanie oraz możliwość ich wykorzystania”*. Kraków 1999, 51-55
- [6] Zawisza E., Suknarowski M. *Badania wpływu zagęszczenia i nawodnienia na ściśliwość kruszywa z żużla wielkopieczowego*. „Przegląd Górniczy”, nr 7-8, 82-86. 2006
- [7] Zawisza E., Kawala J. *Wpływ dodatku popiołu lotnego na zagęszczalność i wytrzymałość na ścinanie żużla wielkopieczowego*. *Gruntowe materiały budowlane w inżynierii lądowej i wodnej*, Monografia wydana z okazji 70-lecia Prof. S. Piśarczyka. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska 54, 141-151, 2007
- [8] Zawisza E., Kawala J. *Wytrzymałość na ścinanie mieszanek popiołu lotnego z żużlem wielkopieczowym*, *Mat. Konf.: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych*. Wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2009
- [9] Żurek J. *Przybliżona metoda obliczania osiadań korpusów zapór ziemnych i namulowych*, *Gospodarka Wodna*, s.10. 1969
- [10] PN-S-02205: 1998. *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*
- [11] PN-86/B-02480. *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*
- [12] Ustawa o odpadach z dnia 27.04.2001 r. *Dz.U.* 2001, nr 62, poz. 628
- [13] <http://www.ekoportal.pl/jetspeed/portal/portal/Odpady>
- [14] <http://www.ekotech.pl/40,Budowa-nasypow-z-popiolo-zuzli.html> ■

Z prasy zagranicznej

Zastosowanie sieci neuronowych do analizy przeglądów mostów

W 2003 r. stwierdzono, że 27,1% z 590750 mostów w USA ma uszkodzenia konstrukcyjne lub ograniczenia w użytkowaniu ze względu na niewystarczającą skrajnię. Oceniono, że aby je usunąć potrzeba będzie przez 20 lat nakładów w wysokości 9,4 mld USD rocznie. Mosty oceniane są w przedziale 2-letnim w skali od 0 do 9. Oceny te obarczone są błędami i niejednoznacznością. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych i logiki rozmytej pozwoliło na pokonanie tych niedogodności.

Journal of Bridge Engineering ASCE, 4, 2010

A.N.

Przyczyny katastrofy mostu w Minneapolis

Katastrofa trójprzęsłowego mostu kratowego na Mississippi wydarzyła się w 2007 r. W katastrofie uczestniczyło 111 pojazdów, 13 osób zginęło a 145 było rannych. Przyczyną była zbyt cienka górna blacha węzłowa nieuwzględniająca przestrzenną pracę kratownicy. Obliczenia MES nieliniowego modelu 3-wymiarowego wykazały, że naprężenia w tym elemencie

konstrukcji osiągały granicę plastyczności. Po katastrofie zwrócono uwagę na kryteria i sposoby oceny węzłów mostów kratownicowych. Zaproponowano szybką metodę klasyfikacji w poszukiwaniu najniebezpieczniejszych miejsc w konstrukcji. Uwzględniono 4 elementy: rodzaj łączników, parametry blach ściskanych i rozciąganych oraz ścinanie.

Journal of Bridge Engineering ASCE, 5, 2010

A.N.

Najnowocześniejszy system monitorowania w moście Rion-Antirion

Z myślą o wczesnym ostrzeganiu przed zagrożeniem w wyniku trzęsienia ziemi, w moście podwieszonym Rion-Antirion nad Zatoką Koryncką w Grecji zastosowano kompleksowy system monitorowania. System zdalnego zbierania informacji jest jednym z najnowocześniejszych w świecie. Na najbardziej wrażliwych elementach mostu zamontowano czujniki tensometryczne odkształceń i siły, przyspieszeniomierze, czujniki temperatury i przemieszczeń. Otrzymane automatycznie dane w czasie rzeczywistym pozwalają na podjęcie decyzji o zamknięciu mostu lub przeprowadzeniu jego przeglądu.

Bridge Design & Engineering, 55, 2009

A.N.