



ANDRZEJ JANOWSKI

TPA sp. z o.o.
Andrzej.janowski@tpaqi.com



SZYMON SAREK

TPA sp. z o.o.
Szymon.sarek@tpaqi.com

Skuteczność przenoszenia obciążeń – zalecenia przy pomiarach na nawierzchniach podatnych i półsztywnych

W numerze 2 z 2019 r. „Drogownictwa” opublikowano artykuł dotyczący nietypowego wykorzystania pojęcia skuteczności przenoszenia obciążenia między fragmentami spękaną nawierzchni podatnych lub półsztywnych [1]. Badanie tego parametru wykonuje się mierząc ugięcie nawierzchni po obydwóch stronach szczeliny pod ugięciem dynamicznym. Ze względów technicznych punkty pomiaru są od siebie oddalone, a zatem uwzględniając na krzywiznę nawierzchni pod obciążeniem nawet przy doskonałej

obciążenia, wzory (1) i (2) dają zbieżne wyniki (1 i d_u/d_l). Mamy zatem do czynienia z pewną estymacją wartości j , d_u oraz d_l , oznaczanymi dalej jako LTE_δ , D_u i D_l . Ostatecznie, wykonując korektę geometryczną [7] (lub korzystając z np. z programu Elmod), zastosowanie znajduje wzór (3), gdzie współczynnikiem korekcyjnym jest wyrażenie D_{IM} / D_{uM} . Potrzeba korekty sprawia, że wymagany jest pomiar referencyjny, korygujący wartość wynikającą z pomiaru przy szczelinie pęknięcia.

$$LTE_\delta = \frac{D_u}{D_l} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$LTE_\delta = \frac{D_{uJ}}{D_{lJ}} \cdot \frac{D_{IM}}{D_{uM}} \cdot 100\% \quad (3)$$

oznaczenia: indeks J odnosi się do pomiaru ugięcia w pobliżu szczeliny,
indeks M do pomiaru referencyjnego.

współpracy jej fragmentów, stosunek ugięć nie będzie równy 1. Jednym z warunków poprawnej oceny parametru jest uwzględnienie krzywizny czaszy ugięcia. Bez tej korekty trudno odnosić się do klasyfikacji w rodzaju tej, którą zaproponowano w Załączniku D 9 katalogu przebudów i remontów [2]. Autorzy niniejszego artykułu postawili tezę, że w pewnych warunkach prawidłowe wyznaczenie współczynnika korekty z wykorzystaniem urządzeń typu FWD/HWD, może być znacznie prostsze niż zalecane to jest w [7] lub instrukcji do programu Elmod (Dynatest). Celem badania jest też sprecyzowanie warunków, w jakich dodatkowy pomiar referencyjny powinien być wykonywany.

W przypadku nawierzchni sztywnej, która jest podzielona na płyty, zaleca się, by pomiar referencyjny był wykonany na środku płyty. W przypadku nawierzchni podatnych i półsztywnych autorzy [1] piszą o pomiarze „w pewnej odległości (2–3 m) od pęknięcia”. Pomiar referencyjny jest istotnym utrudnieniem badań, warto więc sprawdzić co oznacza „pewna odległość”. Sprowadza się to do ustalenia, kiedy zanika wpływ swobodnej krawędzi fragmentu nawierzchni na kształt czaszy ugięcia.

Metodologia wykonania pomiaru

Jeszcze w latach czterdziestych XX wieku Westergaard zaproponował współczynnik efektywności przenoszenia obciążenia, j , zdefiniowany równaniem (1) [3].

$$d_l - d_u = (1 - j) \cdot (d_l^* - d_u^*) \quad (1)$$

w którym:

d_l i d_u są ugięciami przylegających krawędzi obciążonego i nieobciążonego fragmentu nawierzchni,

d_l^* i d_u^* są ugięciami jakie pojawiłyby się, gdyby przenoszenie obciążenia nie występowało.

W praktyce zastosowanie wzoru (1) jest niemożliwe, a więc realizacja badania sprowadza się do zmierzenia ugięć w pewnym oddaleniu od krawędzi, a wzór (1) zastępowany jest wzorem (2) lub innym równoważnym. W skrajnych przypadkach doskonałego i bardzo złego przenoszenia

Analiza ugięć spękaną nawierzchni podatnych i półsztywnych

Badanie wykonano prowadząc obliczenia metodą elementów skończonych, przyjmując uproszczony dwuwarstwowy model nawierzchni, dotyczący konstrukcji zalecanych przez katalog typowych konstrukcji [4] dla kategorii ruchu KR4–KR7. Ponieważ w rzeczywistości zarówno grubości nawierzchni, jak i właściwości mechaniczne wbudowanych materiałów mają losowy rozrzut w pewnych granicach, obliczenia wykonano stosując metodę Monte Carlo [5], losując wartości parametrów do obliczeń według rozkładu beta [6].

Rozważane katalogowe konstrukcje wraz z zakresami zmienności grubości i modułów sprężystości warstw, determinującymi parametry rozkładu beta, przedstawiono w ta-

Tabela 1. Parametry warstw nawierzchni podatnych i półsztywnych według katalogu typowych konstrukcji [4] oraz zakres zmienności ich wartości

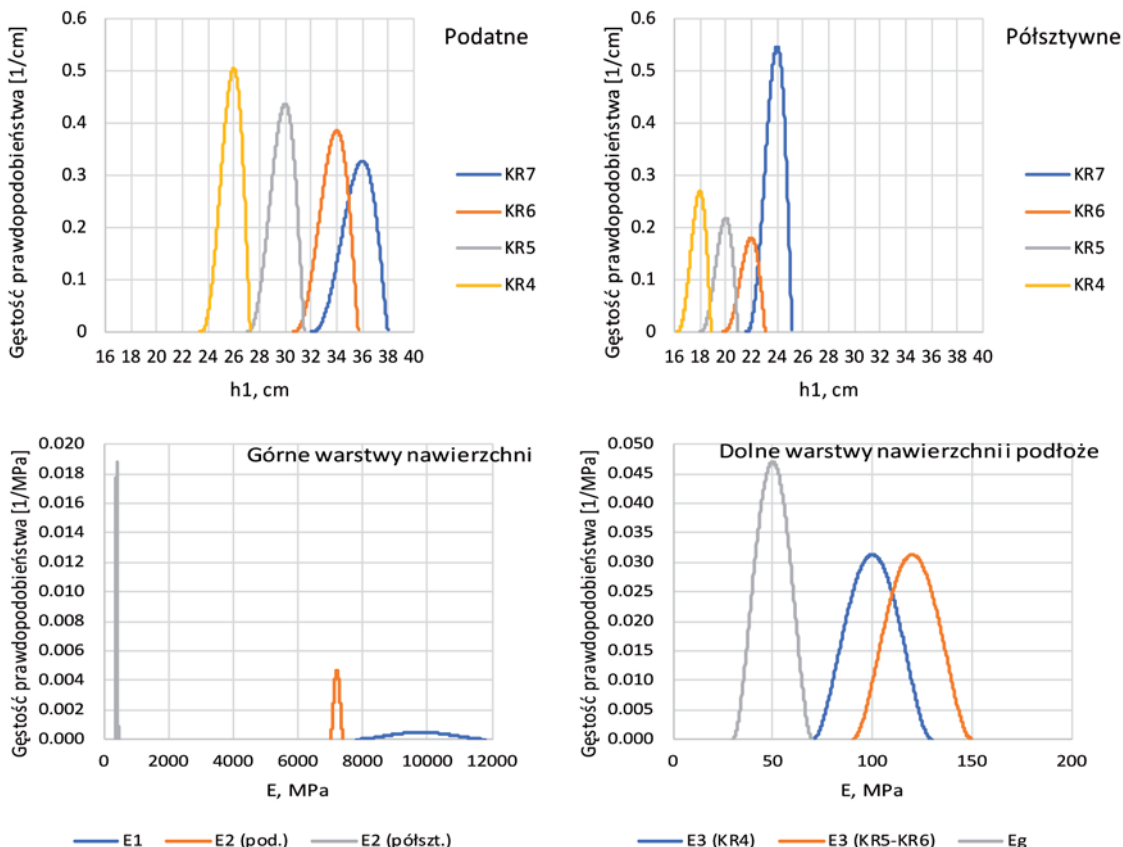
| Kat. ruchu | Parametr rozkładu | h1, cm | E1, MPa | h2, cm | E2, MPa | h3, cm | E3, MPa | E4, MPa | Typ konstrukcji |
|------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------|
| | | +5 -10% | ±2000 | +5 -10% | ±50 | +5 -10% | ±30 | ±20 | |
| KR4 | min | 23.40 | 7 800 | 13.50 | 350 | 21.60 | 70 | 30 | TYP 9 + TYP B |
| | moda | 26.00 | 9 800 | 15.00 | 400 | 24.00 | 100 | 50 | |
| | max | 27.30 | 11 800 | 15.75 | 450 | 25.20 | 130 | 70 | |
| KR5 | min | 27.00 | 7 800 | 15.30 | 350 | 40.50 | 90 | 30 | TYP 4 + TYP B |
| | moda | 30.00 | 9 800 | 17.00 | 400 | 45.00 | 120 | 50 | |
| | max | 31.50 | 11 800 | 17.80 | 450 | 47.25 | 150 | 70 | |
| KR6 | min | 30.60 | 7 800 | 15.30 | 350 | 40.50 | 90 | 30 | TYP 4 + TYP B |
| | moda | 34.00 | 9 800 | 17.00 | 400 | 45.00 | 120 | 50 | |
| | max | 35.70 | 11 800 | 17.80 | 450 | 47.25 | 150 | 70 | |
| KR7 | min | 32.00 | 7 800 | 15.30 | 350 | 40.50 | 90 | 30 | TYP 4 + TYP B |
| | moda | 36.00 | 9 800 | 17.00 | 400 | 45.00 | 120 | 50 | |
| | max | 38.00 | 11 800 | 17.80 | 450 | 47.25 | 150 | 70 | |
| KR4 | min | 16.20 | 7 800 | 19.80 | 7000 | 21.60 | 70 | 30 | TYP 9 + TYP C |
| | moda | 18.00 | 9 800 | 22.00 | 7200 | 24.00 | 100 | 50 | |
| | max | 18.90 | 11 800 | 23.10 | 7400 | 25.20 | 130 | 70 | |
| KR5 | min | 18.00 | 7 800 | 19.80 | 7000 | 40.50 | 90 | 30 | TYP 4 + TYP C |
| | moda | 20.00 | 9 800 | 22.00 | 7200 | 45 | 120 | 50 | |
| | max | 21.00 | 11 800 | 23.10 | 7400 | 47.25 | 150 | 70 | |
| KR6 | min | 19.80 | 7 800 | 21.60 | 7000 | 40.50 | 90 | 30 | TYP 4 + TYP C |
| | moda | 22.00 | 9 800 | 24.00 | 7200 | 45 | 120 | 50 | |
| | max | 23.10 | 11 800 | 25.20 | 7400 | 47.25 | 150 | 70 | |
| KR7 | min | 21.60 | 7 800 | 21.60 | 7000 | 40.50 | 90 | 30 | TYP 4 + TYP C |
| | moda | 24.00 | 9 800 | 24.00 | 7200 | 45 | 120 | 50 | |
| | max | 25.20 | 11 800 | 25.20 | 7400 | 47.25 | 150 | 70 | |

beli 1, natomiast wynikające stąd rozkłady są zilustrowane na rysunku 1 i 2.

Kształt czaszy ugięcia wyznaczano umieszczając płytę naciskową w kilku-nastu odległościach od krawędzi fragmentów nawierzchni, rozdzielonych pęknięciem. Układ obliczeniowy, tj. siatkę dla metody elementów skończonych i lokalizację płyty naciskowej, przedstawiono na rysunku 3.

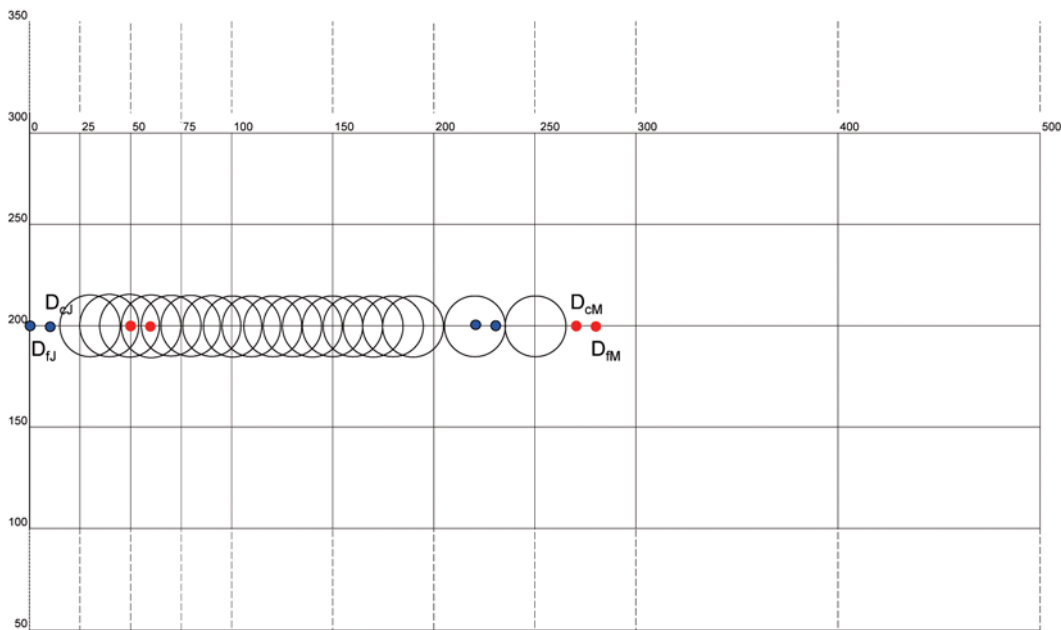
Analizie podlegały ugięcia w punktach położonych symetrycznie względem płyty naciskowej, są one oznaczone na rysunku 3 jako D_{fJ} i D_{cJ} oraz D_{fM} i D_{cM} . Stosunek wartości par ugięć informuje o pochyleniu czaszy ugięcia po obydwóch stronach płyty naciskowej. Symetria pochyleń oznacza brak wpływu swobodnej krawędzi.

Przy każdej lokalizacji płyty wykonano 20 losowań parametrów konstrukcji, tj.



Rys. 1. Rozkłady grubości warstwy 1 dla nawierzchni podatnej i półsztywnej

Rys. 2. Rozkłady modułu sprężystości górnych i dolnych warstw nawierzchni oraz podłoża gruntowego



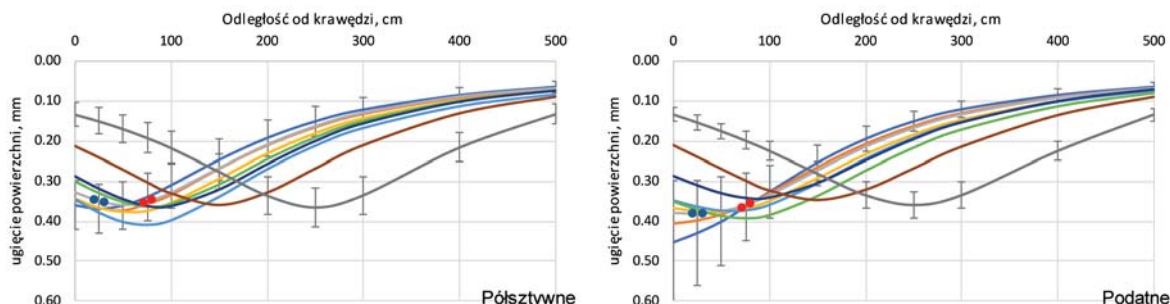
Rys. 3. Układ obliczeniowy. Ugięcia w granatowych i czerwonych punktach (pokazano tylko w skrajnych położeniach płyty naciskowej) są wskaźnikami asymetrii ugięcia nawierzchni. Ugięcia w punktach położonych symetrycznie względem płyty naciskowej są oznaczone jako D_{fJ} i D_{cJ} oraz D_{fM} i D_{cM}

grubości warstw i modułów sprężystości, przy czym najbardziej prawdopodobną wartością każdego z parametrów była wartość zalecana przez katalog typowych konstrukcji dla danej kategorii ruchu. Dzięki statystycznemu podejściu możliwe było wyznaczenie przedziałów błędów prezentowanej analizy, wynikającego z niedoskonałości rzeczywistej nawierzchni (odchylen od projektowych grubości i modułów sprężystości warstw konstrukcyjnych).

Przykładowy wynik obliczeń dotyczący jednej konstrukcji nawierzchni przedstawiono na rysunku 4. Kształt obliczonej czaszy ugięcia ulega znamiennej metamorfozie, gdy moduł sprężystości maleje od wartości 7200 MPa, charakteryzującej podbudowę z stabilizacji cementem C_{4/5}, nie spękanej do postaci bloków, do wartości 400 MPa, charakterystycznej dla wysokiej jakości podbudowy niezwiązanej.

Na nawierzchni półsztywnej obserwuje się symetrię ugięcia niezależnie od odległości miejsca przyłożenia obciążenia do krawędzi pęknięcia. W miarę zmniejszania się modułu sprężystości podbudowy, na skutek pęknięcia stopniowo na duże, a następnie małe bloki, wspomniana symetria zani-

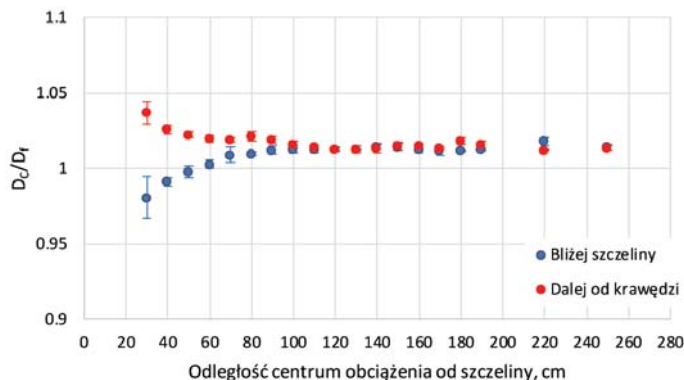
Rys. 4. Przykłady czaszy ugięcia nawierzchni półsztywnej i podatnej (ruch KR4), w przypadku gdy płyta naciskowa odsuwana jest od krawędzi, jak pokazano na rysunku 3. Przedziały niepewności (odchylenie standardowe) przedstawiono dla dwóch skrajnych lokalizacji nacisku



ka. W skrajnym przypadku nawierzchni podatnej, asymetria czaszy przy obciążeniu w pobliżu krawędzi staje się wyraźna. Przykładową ilościową ilustrację asymetrii ugięcia przedstawiono na rysunku 5.

Za parametr charakteryzujący nachylenie czaszy ugięcia przyjęto iloraz ugięć D_c/D_f mierzonych w odległościach odpowiednio $c = 200$ i $f = 300$ mm od środka obszaru, do którego przykładany jest nacisk. Zmiany kształtu czaszy widoczne na rysunku 4, wyrażone za pomocą D_c/D_f , ujawniają się w postaci dwóch rozdzielnych gałęzi, które w miarę oddalania od krawędzi obszaru ob-

ciążanego zbiegają się do wartości właściwej dla ugięcia danej konstrukcji, niezaburzonego obecnością brzegów. W przykładzie przedstawionym na rysunku 5 D_{200}/D_{300} wynosi 1.015.



Rys. 5. Parametr charakteryzujący pochylenie powierzchni po obydwóch stronach płyty naciskowej, nawierzchnia podatna (ruch KR4)

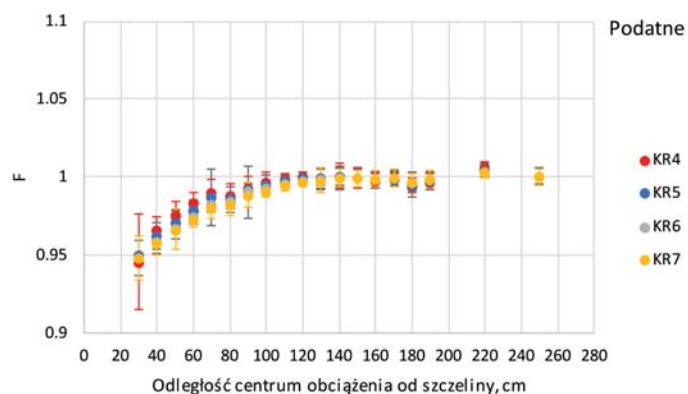
W celu przedstawienia w sposób zagregowany i porównywalny wyników dotyczących wszystkich nawierzchni wprowadzono parametr symetrii F :

$$F = \frac{D_{cJ} / D_{fJ}}{D_{cM} / D_{fM}} \quad (4)$$

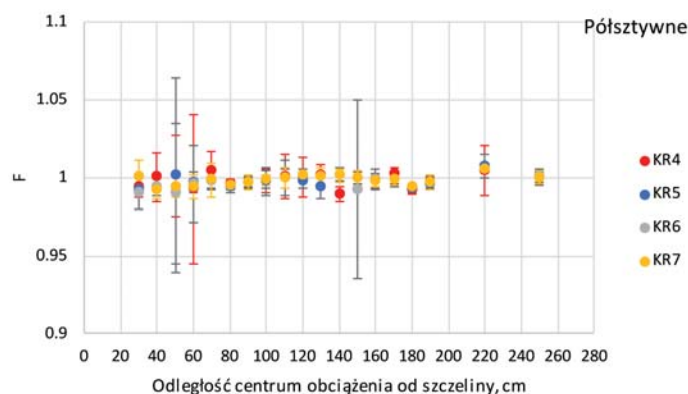
w którym:

D_{fJ} i D_{cJ} oraz D_{fM} i D_{cM} – ugięcia w punktach położonych symetrycznie względem płyty naciskowej. Znaczenie zmiennych we wzorze (4) wyjaśniono na rysunku 3.

Wartość F bliska 1 oznacza symetrię czasu ugięcia, wartości mniejsze od 1 świadczą o tym, że ugięta powierzchnia jest bardziej płaska, lub wręcz opada w kierunku do krawędzi pęknięcia, niż w obszarze oddalonym od krawędzi. Symetria z punktu widzenia prostoty pomiarów jest sytuacją pożądaną, oznacza bowiem, że do wyznaczania współczynnika korekty geometrycznej można wykorzystywać czujniki ugięcia znajdujące się po obydwóch stronach płyty naciskowej, a zatem w przedstawionej sytuacji wystarczający jest pojedynczy pomiar ugięć.



Rys. 6. Parametry asymetrii dotyczące nawierzchni podatnych



Rys. 7. Parametry asymetrii dotyczące nawierzchni półsztywnych

Zaprezentowane na rysunkach 6 i 7 wyniki dowodzą, że wpływ swobodnej krawędzi na kształt czasu ugięcia jest widoczny na nawierzchniach podatnych, gdy płyta naciskowa umieszczana jest w odległości do 110 cm od pęknięcia. W większych odległościach ugięcie w pobliżu miejsca nacisku staje się symetryczne i wobec tego można tam dokonywać pomiaru referencyjnego.

Na nawierzchniach sztywnych wpływ swobodnej krawędzi zanika znacznie szybciej i praktycznie umiejscowienie płyty naciskowej najbliższej krawędzi, jak to jest technicznie wykonalne, umożliwia pomiar jednocześnie na obydwóch krawędziach pęknięcia oraz referencyjny po drugiej stronie płyty naciskowej.

Wnioski

1. Na nawierzchniach półsztywnych, jako pomiar referencyjny można wykorzystać dane z czujników położonych symetrycznie względem płyty naciskowej do czujników mierzących ugięcia po obydwóch stronach pęknięcia pod warunkiem upewnienia się, że wskazania tych czujników są zgodne. Postępowanie takie wymaga aktualnej kalibracji względnej, której procedurę opisano np. w [8] oraz instrukcję obsługi konkretnych urządzeń pomiarowych. Szczególną uwagę należy zachować na zdegradowanych nawierzchniach półsztywnych, które mogą być takie już tylko nominalnie. Faktyczny status należy wcześniej skontrolować np. poprzez wyznaczenie modułu podbudowy. Ponieważ weryfikacja rodzaju konstrukcji nie jest w praktyce możliwa w terenie, a rzadko zdarza się, że z badaniem LTE wkracza się na wcześniej przebadaną nawierzchnię, w sytuacji budzącej wątpliwości należy zalecić postępowanie opisane w punkcie 2, to znaczy wykonać pomiar referencyjny.
2. Na nawierzchniach podatnych nie można uniknąć dodatkowego pomiaru referencyjnego, należy odsunąć się z nim na odległość co najmniej 110 cm od krawędzi pęknięcia. Należy wówczas wykorzystywać te same czujniki, którymi mierzono ugięcia po obydwóch stronach pęknięcia nawierzchni.
3. Grubość konstrukcji (czyli kategoria ruchu, dla której droga jest przeznaczona) ani błędy wykonawcze nie mają istotnego znaczenia dla sposobu postępowania, ponieważ współczynnik zmienności parametru symetrii zawiera się w przedziale 1,4 – 2,0%.

Bibliografia

- [1] A. Janowski, K. Pełczyńska, *Skuteczność przenoszenia obciążeń – jak mierzyć, jak wykorzystywać na nawierzchniach podatnych i półsztywnych*, „Drogownictwo” 2/2019.
- [2] Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDKiA, IBDiM, 2013.
- [3] P. Ullidtz, *Pavement Analysis*, Development in Civil Engineering 19, Elsevier, 1987.
- [4] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, GDDKiA, 2014.
- [5] N. Metropolis, S. Ulam, *The Monte Carlo Method*, Journal of the American Statistical Association, 44(247), 1949.
- [6] R. Davis, *Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-Beta Distributions*, INFORMS Transactions on Education 8(3), 2008.
- [7] S. N. Shoukry, G. W. William, *Evaluation of Load Transfer Efficiency Measurement*, West Virginia University Report No. WVU-2002-04, 2005.
- [8] Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation, 2nd Edition, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research COST 336, 2005.