OPINIA

DOTYCZĄCA PROJEKTU KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI PO WYBUDOWANIU NA AUTOSTRADZIE A1 ODCINEK C OD WĘZŁA KAMIEŃSK DO WĘZŁA RADOMSKO W KM 376+000 DO 392+720 JEZDNIA LEWA ORAZ W KM 390+350 DO KM 392+000

Opracował:

Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło

Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło
upr. bud. nr 85/78/Wwm
rzecz. bud. nr 11/02/R/C
rzecz. SITKom nr 1032/90

Wrocław, maj 2021 r.

Spis treści

1. Wprowadzenie 3
2. Projektowana technologia konstrukcja nawierzchni betonowej 4
3. Prognozowany ruch 6
4. Metoda weryfikacji projektu wybudowanej nawierzchni betonowej 6
5. Ocena wyników obliczeń nawierzchni betonowej 9
6. Ocena technologii wykonania konstrukcji nawierzchni betonowej 10
7. Ocena projektu 10
8. Podsumowanie 11

1. Wprowadzenie

Przedmiotem opracowania jest opinia dotycząca projektu konstrukcji nawierzchni po wybudowaniu (as-built) na autostradzie A1 na odcinku C od węzła Kamieńsk do węzła Radomsko od km 376+000 do km 392+720 jezdnia lewa oraz od km 390+350 do km 392+000 jezdnia prawa.

Opinię opracowano na zlecenie firmy TPA Sp. z o.o ul. Parzniewska 8; 05 - 800 Pruszków.

Do oceny projektu dostarczono następujące materiały:

a) „Wieloczynnikowa analiza wpływu parametrów materiałowych i grubości warstw konstrukcyjnych wykonanej nawierzchni drogowej na jej trwałość na autostradzie A1 odc. C od km 376+000 do km 392+720 jezdnia lewa oraz od km 390+350 do km 392+000 jezdnia prawa" został opracowany przez firmę TPA Sp. z o.o. (25.02.2021) wraz z trzema załącznikami.

b) Zał. 1. Wyniki badań i pomiarów parametrów materiałowych i grubości warstw,
c) Zał. 2. Wyniki pomiarów geometrii ułożenia dybli w szczelinach – pomiary urządzeniem Mit-Scan,
d) Zał. 3. Wyniki przeprowadzonych symulacji Monte Carlo

Na całym analizowanym odcinku zaprojektowana jest nawierzchnia betonowa za wyjątkiem dojazdów do obiektów mostowych po 30 m z każdej strony obiektu na których zaprojektowano nawierzchnię podatną z warstwą ścieralną z mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA. Ponadto na jednym z odcinków nie zdecydowano jeszcze o wyborze konstrukcji ze względu na występowanie w podłożu gruntów słabonośnych (gytii).

Nawierzchnia betonowa na większości projektowanej autostrady ułożona jest na istniejącej konstrukcji nawierzchni półsztywnej tj. warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych ułożonych na podbudowie z chudego betonu, który posadowiony jest na wzmocnionym podłożu.

W projekcie wykonano ocenę trwałości konstrukcji nawierzchni betonowej po jej wykonaniu. Założono, że ocena powinna obejmować analizę wszystkich czynników mających wpływ na jej trwałość. Analiza taka polegała na wykonaniu ponownych obliczeń trwałości konstrukcji nawierzchni (analogicznie jak na etapie projektowania konstrukcji) przy wykorzystaniu parametrów materiałowych wykonanej nawierzchni („As-Built") na podstawie badań

laboratoryjnych i pomiarów in situ, biorąc pod uwagę fakt zmienności parametrów materiałowych wynikających z procesu budowy. Do oceny zmienności parametrów zastosowano metodę losową Monte Carlo.

2. Projektowana technologia konstrukcji nawierzchni betonowej

Na projektowanej trasie zastosowano 6 odcinków o nawierzchni betonowej różniących się grubością warstw pod płytą betonową oraz rodzajem wbudowanych materiałów w podbudowę i wzmocnione podłoże. Stan ten wynika z faktu, że podbudowa z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$ układana jest na istniejącej konstrukcji nawierzchni po sfrezowaniu 4 cm warstwy ścieralnej. Na wszystkich odcinkach są zaprojektowane stałe dwie warstwy tj. warstwa z betonu cementowego, grubości min. 29 cm oraz warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$ o grubości min. 10 cm na której ułożona jest warstwa poślizgowa z geowłókniny. Poniżej zestawiono charakterystykę przedmiotowych 6 odcinków. Podane grubości warstw z mma uwzględniają frezowanie 4 cm.

a) Odcinek 1 - km 376+400÷ 377+700 jezdnia lewa

- nawierzchnia betonowa z betonu C35/45 i wytrzymałości charakterystycznej na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu równą 5,5 MPa, grubości 29 cm płyty o wymiarach w planie 5,5 x4,25 m (największy wymiar),
- warstwa poślizgowa z geowłókniny,
- podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$, grubości 10 cm,
- istniejące warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej, grubości min. 9 cm,
- istniejąca podbudowa z mieszanki stabilizowanej cementem, grubości min. 18 cm,
- istniejące ulepszone podłoże gruntowe (brak charakterystyki, podany moduł warstwy z identyfikacji równy ok. 124 MPa).

b) Odcinek 2 - km 378+850÷ 379+550 jezdnia lewa

- nawierzchnia betonowa z betonu C35/45 i wytrzymałości charakterystycznej na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu równą 5,5 MPa, grubości 29 cm płyty o wymiarach w planie 5,5 x4,25 m (największy wymiar),
- warstwa poślizgowa z geowłókniny,
- podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$, grubości 10 cm,
- istniejące warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej, grubości min. 10 cm,
- istniejąca podbudowa z mieszanki stabilizowanej cementem, grubości min. 14 cm,

- istniejące ulepszone podłoże gruntowe (brak charakterystyki, podany moduł warstwy z identyfikacji równy ok. 81 MPa).

c) Odcinek 3 – km 380+900÷ 381+800 jezdnia lewa

Na odcinku tym nie zaprojektowano konstrukcji nawierzchni. Uzależniono ją od technologii wzmocnienia podłoża (gytie). Rozważa się możliwość zastosowania nawierzchni betonowej lub podatnej.

d) Odcinek 4 – km 384+600÷ 387+600 jezdnia lewa

- nawierzchnia betonowa z betonu C35/45 i wytrzymałości charakterystycznej na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu równą 5,5 MPa, grubości 29 cm płyty o wymiarach w planie 5,5 x4,25 m (największy wymiar),
- warstwa poślizgowa z geowłókniny,
- podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$, grubości 10 cm,
- istniejące warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej, grubości min. 13 cm,
- istniejąca podbudowa z mieszanki stabilizowanej cementem, grubości min. 12 cm,
- istniejące ulepszone podłoże gruntowe (brak charakterystyki, podany moduł warstwy z identyfikacji równy ok. 106 MPa).

e) Odcinek 5 – km 390+300 do 392+200 jezdnia lewa i w km 390+350 do 392+000 na jezdni prawej

- nawierzchnia betonowa z betonu C35/45 i wytrzymałości charakterystycznej na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu równą 5,5 MPa, grubości 29 cm płyty o wymiarach w planie 5,5 x4,25 m (największy wymiar),
- warstwa poślizgowa z geowłókniny,
- podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$, grubości 10 cm,
- istniejące warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej, grubości min. 11 cm,
- istniejąca podbudowa z mieszanki stabilizowanej cementem, grubości min. 17 cm,
- istniejące ulepszone podłoże gruntowe (brak charakterystyki, podany moduł warstwy z identyfikacji równy ok. 64 MPa).

f) Odcinek 6 – obejmuje konstrukcje nawierzchni po nowym śladzie oraz na poszerzeniach.

Obejmuje następujący kilometraż po nowym śladzie: km 376+000 do 376+400, km 377+700 do 378+850, km 379+550 do 381+320, km 381+720 do 384+600, km 387+600 do 390+300, km 392+200 do 392+700.

Obejmuje następujący kilometraż na poszerzeniach: km 376+400 do 377+700, km 378+850 do 379+550, km 384+600 do 387+600 i km 390+300 do 392+200.

- nawierzchnia betonowa z betonu C35/45 i wytrzymałości charakterystycznej na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu równą 5,5 MPa, grubości 29 cm płyty o wymiarach w planie 5,5 x4,25 m (największy wymiar),
- warstwa poślizgowa z geowłókniny,
- podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$, grubości 10 cm,
- podbudowa zasadnicza dolna warstwa z mieszanki związanej cementem $C_{5/6}$, grubości 13 cm,
- podbudowa pomocnicza z mieszanki związanej cementem $C_{5/6}$, grubości 15 cm,
- istniejące ulepszone podłoże gruntowe G1 o module 80 MPa.

3. Prognozowany ruch

Na podstawie prognozy ruchu Projektant oszacował liczbę osi standardowych 115 kN jaka przejdzie przez najbardziej obciążony pas nawierzchni betonowej w okresie 30 lat.
Prognozowana liczba osi 115 kN w okresie 30 lat wynosi 95 550 000 na pas obliczeniowy. Natomiast dla nawierzchni podatnej liczba ta wynosi 129 710 000 osi 100 kN na pas obliczeniowy w okresie 30 lat. W prognozie uwzględniono w 12% pojazdów ciężarowych przekroczenie dopuszczalnych obciążeń.

4. Metoda weryfikacji projektu wybudowanej nawierzchni betonowej

Do weryfikacji poprawności wybudowanej nawierzchni betonowej zastosowano mechanistyczną metodę w której przyjęto model konstrukcji nawierzchni jako sprężystą półprzestrzeń warstwową, na której jest ułożona płyta betonowa o skończonych wymiarach w planie (maks. 5,5x4,25 m). Warstwy tworzą: podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$ oraz warstwy istniejącej konstrukcji nawierzchni. W przypadku nowych odcinków oraz poszerzenia podbudowa zasadnicza składa się z dwóch warstw z mieszanki związanej cementem $C_{8/10}$ oraz $C_{5/6}$. Pod warstwą podbudowy zasadniczej jest podbudowa pomocnicza z mieszanki związanej cementem $C_{5/6}$. Poniżej podłoże gruntowe o wtórnym module min. 80 MPa.
Jak wspomniano powyżej do weryfikacji obliczeń konstrukcji nawierzchni przyjęto model płyty betonowej spoczywającej na uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej. Wyznaczono naprężenia pochodzące od ruchu pojazdów oraz od temperatury w trzech charakterystycznych

miejscach płyty (w środku, na krawędzi, w narożu). W celu obliczenia trwałości zmęczeniowej wybrano punkty, gdzie występują maksymalne naprężenia - założono najniekorzystniejszy wariant występowania naprężeń.

Zastosowano następującą procedurę obliczeń:

– założono odpowiednią geometrię płyty betonowej;

– założono parametry materiałowe poszczególnych warstw w tym płyty betonowej i podłoża;

– obliczono naprężenia od temperatury;

– obliczono naprężenia od ruchu;

– uwzględniono wpływ współczynnika przenoszenia obciążeń (przy użyciu płyt dyblowanych) oraz współczynnika uwzględniającego zmniejszanie się naprężeń przy obciążeniach powtarzalnych;

– obliczono trwałość zmęczeniową przy najniekorzystniejszym, kumulatywnym oddziaływaniu obciążenia od ruchu z uwzględnieniem działania wysokiej temperatury oraz przy najniekorzystniejszym oddziaływaniu obciążenia od ruchu;

– obliczono całkowitą trwałość zmęczeniową z uwzględnieniem hipotezy Minera-Palmgrena

Warstwy w modelu obliczeniowym zostały opisane modułami sprężystości oraz współczynnikami Poissona oraz grubościami.

Analizie poddano następujące elementy konstrukcji nawierzchni:

— beton nawierzchniowy:

grubość warstwy – h1;

moduł sprężystości warstwy – E1;

wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu warstwy – Rzg;

ułożenie dybli – wskaźnik dybli;

— podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem C8/10:

grubość warstwy – h2;

moduł sprężystości – E2;

— podbudowa zasadnicza z mieszanki związanej cementem C5/6:

grubość warstwy – h3;

moduł sprężystości – E3;

— podbudowa pomocnicza z mieszanki związanej cementem C5/6:

grubość warstwy – h4;

moduł sprężystości – E4.

Parametry te oznaczono na podstawie wyników badań wbudowanych materiałów w warstwy konstrukcji nawierzchni.

Grubości warstw mierzono podczas wbudowywania. Moduły betonu nawierzchniowego oraz mieszanek $C_{8/10}$ oraz $C_{5/6}$ oznaczono na podstawie zależności korelacyjnych wynikających z badań wytrzymałości na ściskanie tych materiałów. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu warstwy betonowej określono również na podstawie badań belek w laboratorium. Wpływ nierównomierności ułożenia dybli oceniono na podstawie programu EverFE 2.26. Program analizuje stany naprężeń w płycie jako pasmo złożone z kilku płyt połączonych dyblami. W programie wprowadza się rzeczywiste położenia dybli. W tym przypadku wykorzystano pomiary ułożenia dybli za pomocą skanera MITScan.

Analizę wpływu geometrii ułożenia dybli wykonano zgodnie z opisem przedstawionym poniżej, przyjęto dwa warianty:

– Wariant 1 (W1) – dyble wbudowane zgodnie z założonym projektem,

– Wariant 2 (W2) – dyble z uwzględnionymi odchyłkami geometrycznymi: przesunięcie w pionie, przesunięcie w poziomie (wzdłuż kierunku jazdy), odchyłka w pionie oraz odchyłka w poziomie.

Stosunek trwałości w obu wariantach (W2 / W1) przedstawiono jako wskaźnik wpływu ułożenia dybli. Do analizy wpływu ułożenia dybli na trwałość nawierzchni przyjęto co 7 szczelinę spośród pomierzonych na podstawie Raportu MITscan. Dane geometryczne dybli użyte do analizy Monte Carlo wrażliwości trwałości konstrukcji nawierzchni przedstawiono w Załączniku 2 projektu.

Dla tak zidentyfikowanych w/w parametrów oszacowano ich rozkłady (częstotliwość występowania). Dane wejściowe w metodzie Monte Carlo w trakcie symulacji są próbkowane (losowane) z rozkładów statystycznych i wielokrotnie wyznaczana jest wartość prognozowana. Uzyskane obserwacje pozwalają na oszacowanie wartości prognozowanego parametru (trwałości konstrukcji nawierzchni).

Obciążenie modelu przyjęto jako równoważne i równomiernie rozłożone na powierzchni prostokąta, odpowiadające naciskowi koła 57,5 kN. Założono, ze obciążenie działa na środku, krawędzi i narożu płyty. Wybrano wariant najniekorzystniejszy na krawędzi. Uwzględniono wpływy temperaturowe. Przyjęto gradient $0,7^0$ C/cm. Obliczenie naprężeń od obciążenia i temperatury w płycie betonowej o wymiarach 5,5x4,25 m wykonano za pomocą programu KENSLAB w trzech charakterystycznych obciążeniach płyty (środek, krawędź oraz naroże). Do obliczeń przyjęto maksymalne występujące na krawędzi jako superpozycję od obciążenia kołem i temperaturą. Trwałość zmęczeniową obliczano korzystając z hipotezy zmęczeniowej

Minera- Palmgrena. Przy czym założono, że maksymalna temperatura działa na płytę w okresie 25% czasu eksploatacji nawierzchni. W obliczeniach uwzględniono występowanie dybli i kotew oraz ich geometrię ułożenia. Przyjęto dyble o średnicy 25 mm, długości 50 cm i rozstawie co 25 cm. Kotwy przyjęto o średnicy 20 mm i długości 80 cm w rozstawie 1,1 m. Korzystając z wyżej opisanego algorytmu obliczono 500 iteracji symulacji Monte Carlo trwałości konstrukcji nawierzchni. Minimalna trwałość zmęczeniowa z analizy wyniosła 877 mln osi 115 kN. Dodatkowo wykonano obliczenia dla parametrów projektowych konstrukcji z nowych materiałów tj. odcinek 6 opisany w p.2. Obliczenia wykonano zgodnie z założeniami pierwotnego projektu „Indywidualny projekt konstrukcji nawierzchni dla trasy głównej autostrady A1 odc. C od km 376+000 do km 392+720 węzeł Kamieńsk (bez węzła) – węzeł Radomsko (z węzłem)" z dnia 24.10.2019 r. opracowany przez firmę TPA Sp. z o.o. wraz z czterema załącznikami.

Wszystkie obliczenia wykazały, że jest spełniona trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni betonowej.

5. Ocena wyników obliczeń nawierzchni betonowej

W projekcie Autorzy wykonali analizę wrażliwości parametrów materiałowych na uzyskiwane wartości trwałości zmęczeniowej. Z analizy wrażliwości wynika, że największą wrażliwością na zmiany trwałości charakteryzuje się wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu oraz moduł nawierzchniowej płyty betonowej.

Autorzy wykonali 500 iteracji wg metody Monte Carlo i wszystkie wyniki spełniały wymagania trwałości zmęczeniowej. W tab. 8 projektu zestawiono trwałości dla uzyskanych wartości minimalnych i maksymalnych parametrów materiałowych i grubości uzyskanych z badań laboratoryjnych uwzględniających rozrzuty wyników badań a które zostały wylosowane metodą Monte Carlo. Najniższą wartość trwałości otrzymano równą 94 480 847 dla wytrzymałości na zginanie betonu cementowego z nawierzchni równe 5,5 MPa oraz najwyższą 8 001 085 252 osi 115 dla wytrzymałości na zginanie betonu nawierzchniowego równego 8,3 MPa.

Wytrzymałość na zginanie była decydującym parametrem decydującym o trwałości zmęczeniowej. Wytrzymałość ta wahała się w przedziale 6,5 MPa do 8,3 MPa. Wobec wymaganej charakterystycznej 5,5 MPa.

6. Ocena technologii wykonania konstrukcji nawierzchni betonowej

Nie wnoszę zasadniczych uwag do technologii wykonania konstrukcji nawierzchni. Warunkiem zasadniczym uzyskania projektowanej trwałości zmęczeniowej jest zapewnienie odpowiedniego połączenia międzywarstwowego. Połączenie to powinno być zapewnione pomiędzy warstwami z mieszanek związanych cementem $C_{8/10}$ oraz $C_{5/6}$ jak również $C_{5/6}$ z $C_{5/6}$ jak również $C_{8/10}$ z istniejącą nawierzchnią z mma. Konstrukcja nawierzchni z betonu cementowego na wszystkich odcinkach spełnia warunek zapewnienia odporności podłoża na wysadziny.

7. Ocena projektu

Koncepcję projektu powykonawczego z wykorzystaniem parametrów materiałowych wraz z oceną ich rozkładu oraz losowością wyboru zgodnie z metodą Monte Carlo oceniam pozytywnie. Ciekawy jest również pomysł włączenia do analizy metody uwzględniającej dewiację (odchyłki od wymagań) wbudowanych dybli i kotew. Z analizy uzyskanych wyników widać, że jest spełniona trwałość zmęczeniowa konstrukcji. Przyjęty model jest poprawny jak również nie wnoszę uwag do przyjętej metody analizy. Mam uwagi do przyjętych parametrów materiałowych, które przedstawię poniżej:

a) Moduły warstw określono z zależności korelacyjnych wytrzymałości na ściskanie. Moim zdaniem jest to pewnego rodzaju uproszczenie. Biorąc pod uwagę fakt, że beton cementowy ma duże wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu to należało zastosować zależności korelacyjne moduł - wytrzymałość na rozciąganie. Ale najlepszym sposobem na określenie modułów byłoby wyznaczenie ich z badań identyfikacyjnych ugięciomierzem dynamicznym FWD.
b) Przy bardzo dużych wytrzymałościach betonu na rozciąganie z pewnością występują duże wartości modułów. Duże wartości modułów powodują powstanie dużych naprężeń rozciągających co może powodować obniżenie trwałości zmęczeniowej.
c) Analizę trwałości przeprowadzono dla jednego typu konstrukcji a mianowicie konstrukcji na nowych odcinkach i na poszerzeniach. Czyli konstrukcji na odcinku nr 6 wg zestawień wykonanych w p.2.
d) Ciekawe byłoby zestawienie trwałości na pozostałych odcinkach na których moduły określano na podstawie identyfikacji wykorzystując badania ugięciomierzem dynamicznym FWD.

e) Na rys. 1 opiniowanego projektu płyta nawierzchniowa oznaczona jest o grubości h_p oraz module E_p natomiast w obliczeniach i innych zestawieniach oznaczano odpowiednio jako h_1 oraz E_1. Oczywiście nie wpływa to na obliczone wartości trwałości ale jest błędem redakcyjnym.

W przypadku gdyby Autorzy chcieli przeprowadzić identyfikację modułów na podstawie badań ugięciomierzem FWD to proponuję do badań identyfikacyjnych przyjąć układ dwuwarstwowy tj. płyta betonowa o znanej grubości ułożona na podłożu o równoważnym module. Taki sam model można by przyjąć przy obliczeniach trwałości zmęczeniowej. Można zastosować również metodę Monte Carlo. W takim przypadku będzie znacznie mniejsza liczba parametrów materiałowych i tym samym zwiększona dokładność. Można by w ten sposób sprawdzić również pozostałe odcinki technologiczne a nie tylko odcinek nr 6 jak to wykonano w tym przypadku.

8. Podsumowanie

Pozytywnie oceniam zastosowaną metodę do oceny zaprojektowanej konstrukcji nawierzchni z betonu cementowego na autostradzie A1 na odcinku C od węzła Kamieńsk do węzła Radomsko od km 376+000 do km 392+720 jezdnia lewa oraz od km 390+350 do km 392+000 jezdnia prawa. Jak wynika z przedstawionych przez Autorów wyników obliczeń nawierzchnia betonowa ma zapewnioną trwałość zmęczeniową od obciążeń pojazdami samochodowymi wraz wpływami temperatury. Podłoże nawierzchni jest zabezpieczone przed wysadzinami. W prognozie ruchu uwzględniono w 12% pojazdów ciężarowych przekroczenie dopuszczalnych obciążeń. Niedosyt opiniującego dotyczy przyjętych parametrów materiałowych, głównie modułów nawierzchni betonowej. Należałoby je przyjąć na podstawie badań identyfikacyjnych nawierzchni z wykorzystaniem ugięciomierza FWD. Ponadto niedosyt opiniującego pojawia się co do zakresu przyjętych odcinków technologicznych do analizy. W projekcie ograniczono się do konstrukcji nowoprojektowanych oraz poszerzeń. Na pozostałych odcinkach można było wykonać podobną analizę tym bardziej, że są wyniki badań i identyfikacji pochodzące z ugięciomierza FWD. Bardzo ciekawa jest analiza kompleksowa wpływu niejednorodności ułożenia dybli i kotew, która uwzględnia zespół płyt. Opiniujący zawsze prezentował pogląd, że należy analizować grupę płyt a nie pojedyncze odchyłki poszczególnych płyt.

Podsumowując opiniujący prezentuje pogląd, że opiniowana nawierzchnia posiada wystarczającą trwałość zmęczeniową, biorąc pod uwagę fakt bardzo wysokich wartości

wytrzymałości betonu nawierzchniowego na rozciąganie przy zginaniu. Przedstawione uwagi powyżej są porządkowe mające na celu zwrócenie uwagi Autorom na popatrzenie kompleksowo na cały odcinek C (Kamieńsk – Radomsko) autostrady A1.