

POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Drogowej

ul. G. Narutowicza 11
80-233 GDAŃSK

Tel: (0-58) 347 13 47

Fax: (0-58) 347 10 97

**MODELOWANIE TEORETYCZNE WPŁYWU
SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA
ZACHOWANIE SIĘ NAWIERZCHNI
ASFALTOWYCH**

RAPORT Z PIERWSZEGO ETAPU

Opracowano na zlecenie:

**Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
ul. Żelazna 59
00-848 WARSZAWA**

Opracowali:

prof. dr hab. inż. Józef Judycki – autor kierujący

dr inż. Piotr Jaskuła

mgr inż. Aleksandra Grądzka

Kierownik Katedry Inżynierii Drogowej - prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, listopad 2011

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	5
1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA	5
1.2. CEL PRACY	5
1.3. ZAKRES PRACY	5
1.3.1. Zakres całej kilkuetapowej pracy badawczej	5
1.3.2. Zakres I etapu pracy stanowiącego niniejsze opracowanie	6
2. WPŁYW SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA ZACHOWANIE SIĘ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI	7
3. MODELOWANIE SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ.....	15
3.1. PIERWSZE PRACE.....	15
3.2. MODEL SHANINA - ANALIZY POŚLIZGU WARSTWY Z BETONU ASFALTOWEGO I JEGO WPŁYW NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI	17
3.2.1. Model obliczeniowy.....	18
3.2.2. Efekt poślizgu	19
3.2.3. Wpływ obciążeń poziomych.....	21
3.2.4. Trwałość zmęczeniowa.....	22
3.3. MODEL HUANG'A - ANALIZY PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI, WYZNACZANIE SCZEPNOŚCI W PROGRAMIE <i>KENLAYER</i>	25
3.3.1. Teoria Burmistera	25
3.3.2. Układ dwuwarstwowy.....	25
3.3.3. Układ trójwarstwowy	26
3.3.4. Szczepność w programie <i>KENSLABS</i>	28
3.4. MODEL GOMBA, MEHTA - WSKAŹNIK USZKODZENIA WARSTWY SCZEPNEJ	30
3.4.1. Moduł warstwy asfaltowej	30
3.4.2. Wskaźnik uszkodzenia warstwy szczepnej <i>TFR (Tack Coat Failure Ratio)</i>	32
3.4.3. Efekt poślizgu	34
3.5. MODEL CRISPINO - WYKORZYSTANIE NOWEGO TESTU DYNAMICZNEGO.....	37
3.5.1. Interakcje międzywarstwowe	37
3.5.2. Aparatura do badania	40
3.5.3. Metodologia badań	40
3.5.4. Moduł reakcji międzywarstwowej (aspekty ilościowe).....	42

3.6. MODEL OZERA - NISZCZĄCY MODEL TARCIA	43
3.6.1. <i>Wprowadzenie</i>	43
3.6.2. <i>Metodologia i cel</i>	43
3.6.3. <i>Elementy związania międzywarstwowego i realizacja MES</i>	44
3.6.4. <i>Konstrytuwny model związania międzywarstwowego</i>	46
3.6.5. <i>Mechanizm pięknienia związania (utrata szczepności)</i>	47
3.6.6. <i>Wskaźnik plastyczności</i>	49
3.6.7. <i>Wyniki obliczeń</i>	51
3.6.8. <i>Związanie międzywarstwowe MMA – MMA</i>	52
3.7. MODEL AL-HAKIMA - OBLICZENIA ODWROTNE NA PODSTAWIE ANALIZ FWD.....	54
3.7.1. <i>Analizy wrażliwości</i>	54
3.7.2. <i>Nowa metoda obliczeń odwrotnych</i>	58
3.7.3. <i>Przykład obliczeniowy</i>	59
3.7.4. <i>Wpływ obciążenia ruchem, temperatury i wieku konstrukcji na sztywność związania międzywarstwowego</i>	61
3.8. MODEL ROMANOSCHI I METCALF- ZASTOSOWANIE MES, MODELOWANIE W PROGRAMIE ABAQUS.....	62
3.8.1. <i>Badanie ścinania przy normalnym obciążeniu</i>	62
3.8.2. <i>Konstrytuwny model związania międzywarstwowego</i>	63
3.8.3. <i>Konstrytuwne modele związania międzywarstwowego w MES</i>	66
3.9. LITERATURA	69

1. WSTĘP

1.1. Podstawa opracowania

Opracowanie niniejsze wykonano na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie (GDDKiA w Warszawie) w ramach umowy nr 3097/2011 z dnia 18.11.2011 r., wg harmonogramu dla etapu I.

1.2. Cel pracy

W pracy zostanie rozpoznany rzeczywisty mechanizm pracy połączenia między warstwami asfaltowymi, zostanie znaleziony model teoretyczny, który uwzględni rzeczywistą pracę połączenia lub osłabienia, czy braku połączenia warstw asfaltowych na stan naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni. Zostanie uwzględniony fakt braku szczepności przy pobieraniu próbek podczas odwiertu, ale występowaniu tarcia, minimalnego sklejenia i zazębienia warstw. Zweryfikowany stan naprężeń i odkształceń zostanie wykorzystany w mechanistycznych metodach analizy konstrukcji nawierzchni.

Celem pracy jest udzielenie odpowiedzi na pytania:

- W jakim stopniu wbudowanie warstw asfaltowych z zakłóconą szczepnością międzywarstwową wpływa niekorzystnie na konstrukcję nawierzchni?
- Czy konieczne jest frezowanie warstw asfaltowych po niekorzystnych wynikach szczepności?
- Jakie są minimalne wartości szczepności międzywarstwowej?

1.3. Zakres pracy

1.3.1. Zakres całej kilkuetapowej pracy badawczej

Praca została podzielona na trzy etapy, a w zakres każdego etapu wchodzi:

Etap I (prace wstępne) – niniejszy raport jest sprawozdaniem z badań w tym etapie)

Etap II (przewidziany do realizacji w 2012 roku)

1. Określenie modelu teoretycznego z wykorzystaniem MES i wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, który uwzględni wpływ rzeczywistej szczepności międzywarstwowej na prace konstrukcji nawierzchni.

2. Uwzględnienie dotychczasowych pomiarów szczepności aparatem Leutnera, ugięć nawierzchni na odcinku doświadczalnym w obliczaniu konstrukcji nawierzchni.

Etap III (przewidziany do realizacji w 2013 roku)

1. Opracowanie wytycznych pozwalających na prowadzenie badań szczepności międzywarstwowej aparatem Leutnera.
2. Opracowanie minimalnych wymagań szczepności międzywarstwowej do stosowania na budowach oraz zaleceń mających na celu zwiększenie szczepności międzywarstwowej podczas budowy.
3. Wypracowanie schematu postępowania przy stwierdzonym braku szczepności międzywarstwowej podczas obioru robót.

1.3.2. Zakres I etapu pracy stanowiącego niniejsze opracowanie

Niniejsze opracowanie składa się z trzech rozdziałów. Zawiera ono sprawozdanie z prac badawczych wykonanych w okresie od października do końca listopada 2011 roku. Zakres poszczególnych rozdziałów odpowiada treści harmonogramu zawartemu w programie badawczym – integralnej części umowy.

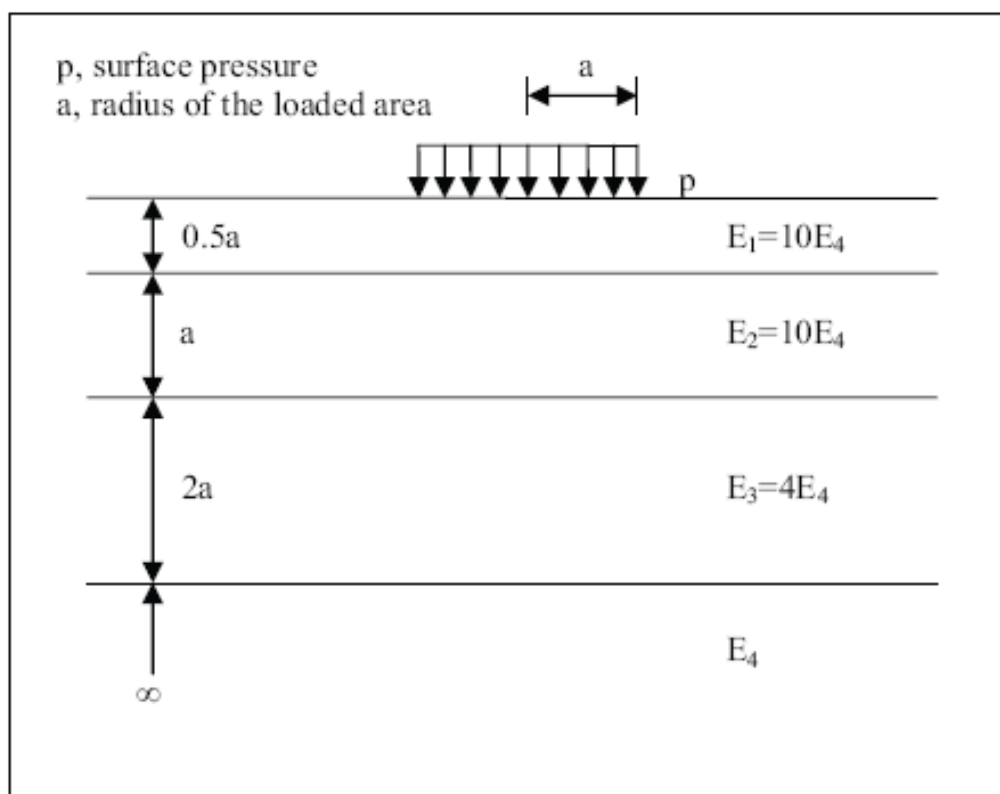
Rozdział 1 – to wstęp.

Rozdział 2 zatytułowany „**Wpływ braku szczepności na pracę konstrukcji nawierzchni**”, w którym wskazano na zmiany stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w konstrukcji nawierzchni przy braku szczepności międzywarstwowej. Brak szczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi zmniejsza efektywną sztywność pakietu warstw asfaltowych, zwiększając ugięcia nawierzchni, a te zwiększają odkształcenia rozciągające na spodzie warstw. Większe odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych wpływają na obniżenie trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni.

Rozdział 3 zatytułowany „**Przegląd dostępnych metod modelowania układu warstw konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem modelowania szczepności międzywarstwowej**”, który zawiera zestawienie prób modelowania szczepności międzywarstwowej w pakiecie warstw asfaltowych, z wykorzystaniem metod opartych na analizie mechanistycznej konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej oraz metody elementów skończonych (MES). Zastosowanie MES umożliwia uwzględnienie w analizach obliczeniowych złożonego zjawiska szczepności międzywarstwowej, to jest zazębienia (tarcia), jak i sklejenia warstw poprzez lepiszcze asfaltowe (stanu lepko-sprężystego asfaltu).

2. WPŁYW SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA ZACHOWANIE SIĘ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI

Już w 1968 roku Romain [23] rozpoczął badania wpływu szczepności na zachowanie się czterowarstwowej konstrukcji nawierzchni (rys. 2.1.). Grubości i sztywności warstw są relatywne do promienia powierzchni obciążenia i do sztywności podłoża. Romain, opierając się na teorii Burmistera [3] z 1945 roku (między warstwami istnieje pełna szczepność, albo pełny poślizg) zbadał wpływ szczepności na zmianę naprężeń, odkształceń i ugięć w konstrukcji nawierzchni. Wyniki jego obserwacji przedstawia tablica 2.1.



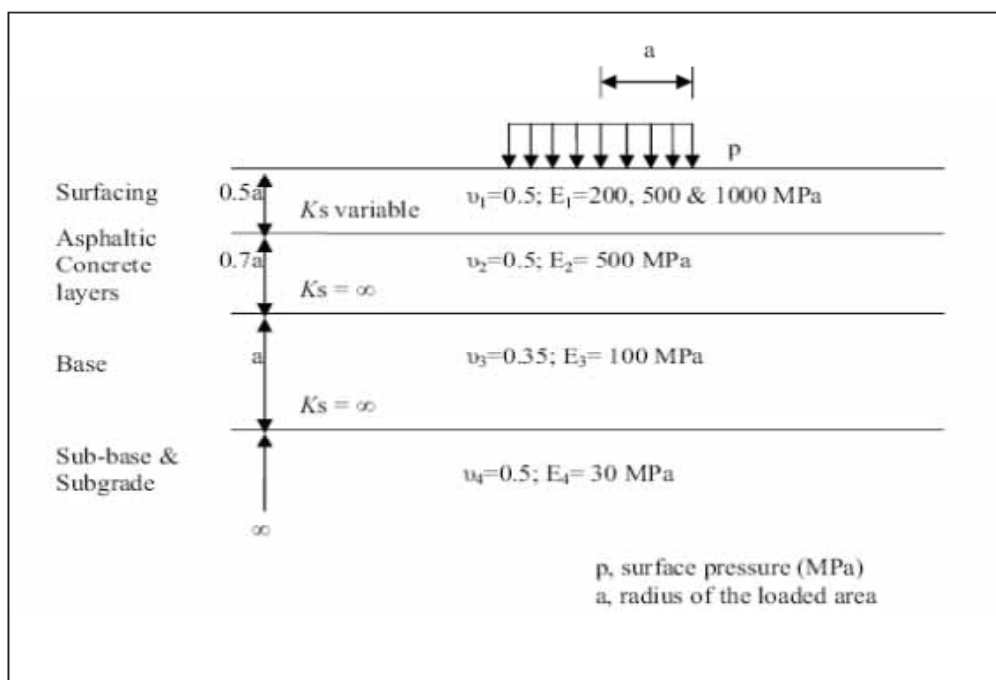
Rys. 2.1. Schemat czterowarstwowej konstrukcji analizowanej przez Romaina [23].

Na podstawie badań Romaina, w 1978 roku Uzan [33] przedstawił typowy przyrost naprężeń, odkształceń i ugięć podczas, gdy warunki szczepności zmieniają się z pełnego związania do pełnego poślizgu. Maksymalne odkształcenie przy rozciąganiu w pierwszej warstwie, porównując do odkształcenia w drugiej warstwie (pomiędzy warstwami jest pełny poślizg) może

wywołać gwałtowniejsze uszkodzenie warstwy pierwszej niż drugiej. Użano analizował wpływ związania między warstwą ścieralną a wiązającą za pomocą programu *BISAR*, opierając się na czterowarstwowej konstrukcji ze zmiennym parametrem K_s (rys. 2.2).

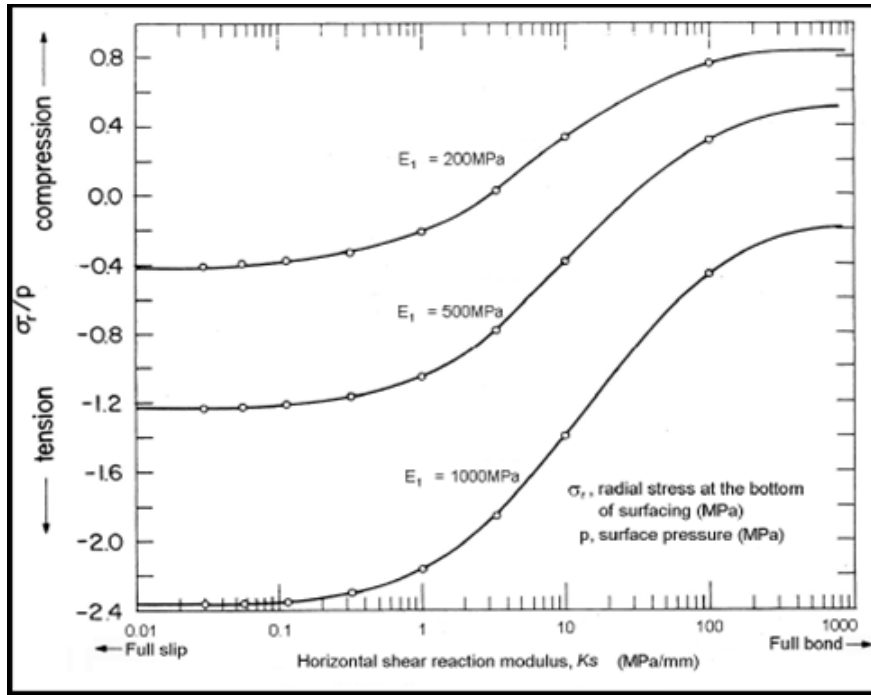
Tablica 2.1. Wyniki analizy wpływu szczepności na czterowarstwową konstrukcję nawierzchni, wg Romain [23].

		Bond conditions			
		First layer – second layer	Full slip	Full bond	Full slip
		Second layer – third layer	Full bond	Full slip	Full slip
		Third layer – fourth layer	Full bond	Full bond	Full bond
First layer	Max. compressive stress		0.79	1.07	0.89
	Max. tensile stress		2.19	1.92	2.69
	Max. compressive strain		2.83	1.07	3.07
	Max. tensile strain		1.93	1.10	2.07
	Deflection		1.20	1.19	1.43
Second layer	Max. compressive stress		1.74	0.98	1.81
	Max. tensile stress		1.08	2.26	2.73
	Max. compressive strain		1.27	1.72	2.25
	Max. tensile strain		1.30	1.44	1.89
Third layer	Max. compressive stress		1.55	1.48	2.29
	Max. tensile stress		1.38	1.23	1.77
	Max. compressive strain		1.28	0.92	1.18
	Max. tensile strain		1.22	0.92	1.29
Fourth layer	Max. compressive stress		1.40	1.74	2.40
	Max. compressive strain		1.37	1.37	1.97
	Deflection		1.19	1.39	1.58

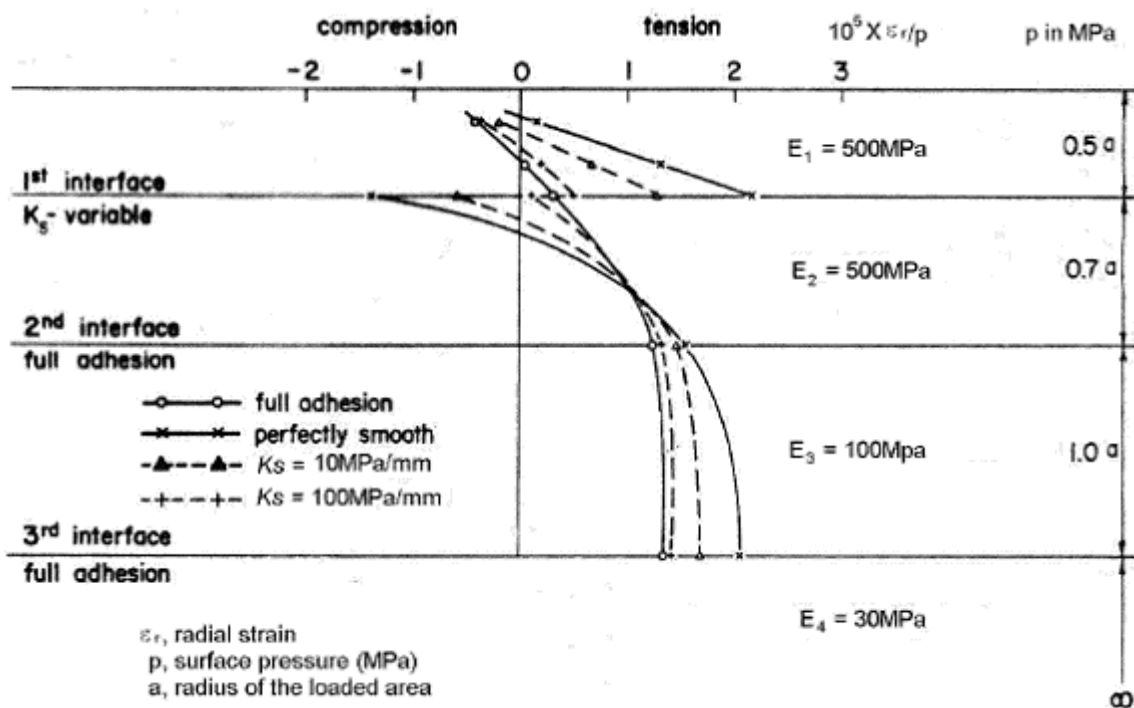


Rysunek 2.2. Schemat czterowarstwowej konstrukcji nawierzchni analizowanej przez Uzana [33].

Na rysunku 2.3 wyraźnie widać istotną zmianę radialnych odkształceń przy rozciąganiu, podczas, gdy moduł ścinania K_s zmienia się od 1 do 100 MPa/mm. Uzan przedstawił wpływ szczepności na rozchodzenie się odkształceń w głąb nawierzchni. Rysunek 2.4 pokazuje wzrost radialnych odkształceń przy rozciąganiu na spodzie warstwy ścieralnej i warstwy wiążącej z betonu asfaltowego, gdy K_s zmienia się od pełnej szczepności do pełnego poślizgu (perfekcyjna gładkość). Można też zauważyć, że odkształcenia przy rozciąganiu na spodzie warstwy ścieralnej przewyższają odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych (czyli na granicy warstw asfaltowych i podbudowy) oraz, że odkształcenia poziome na górze warstw asfaltowych zmieniają się z rozciągających w ściskające, gdy następuje pełny poślizg. Takie warunki spowodować mogą szybsze zniszczenie warstwy ścieralnej.

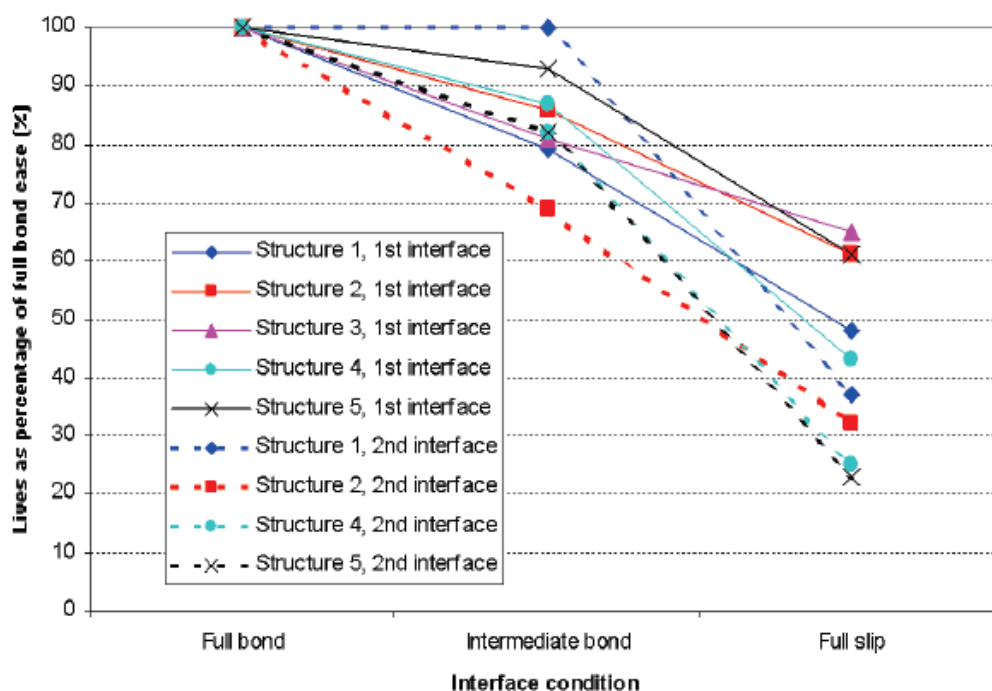


Rysunek 2.3. Wpływ szczepności na naprężenia radialne na spodzie warstwy ścieralnej [33].



Rysunek 2.4 Propagowanie odkształceń w głąb nawierzchni [33].

W 1984 roku Brown i Brunton [2] za pomocą *BISARA* badali wpływ szczepności zarówno na pierwsze, jak i na drugie połączenie międzywarstwowe (czyli połączenie między warstwą ścierną i wiążącą oraz między warstwą wiążącą i podbudową). Wyniki pokazały, że żywotność konstrukcji zmniejsza się o 75% jeżeli następuje zmiana połączenia między warstwami z pełnej szczepności na pełny poślizg. Stwierdzili, że pośrednie warunki powiązania mogłyby zredukować zmniejszanie się żywotności do 30%. Zauważono też, że zmiany szczepności w drugim połączeniu są bardziej wyraźne i mają większy wpływ na zachowanie się nawierzchni.

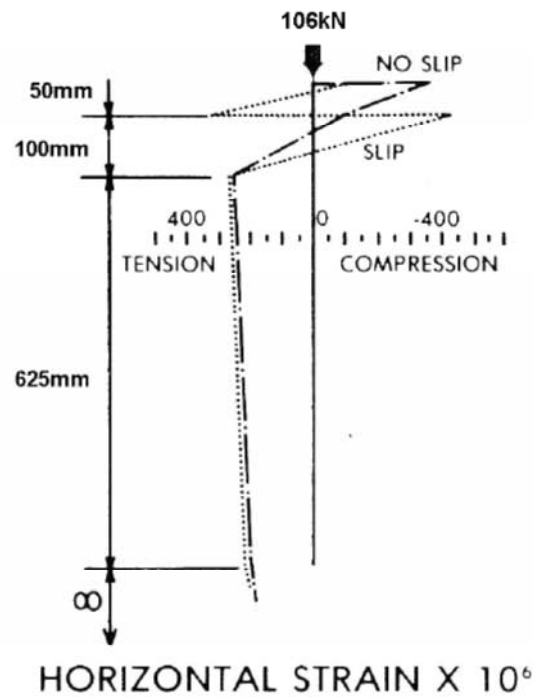


Rysunek 2.5. Wpływ szczepności na żywotność konstrukcji nawierzchni [2].

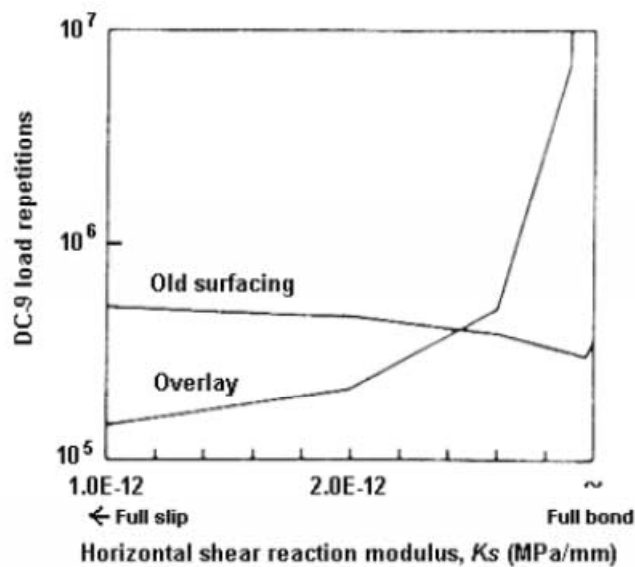
Shanin [27] w 1987 roku również za pomocą *BISARA* badał wpływ szczepności między nakładką asfaltową a starą warstwą ścierną na nawierzchni lotniskowej pod obciążeniem 106 kN. Znaczące jest to, że ciśnienie kontaktowe wynosiło 900 kPa, czyli było o 50% większe niż ciśnienie standardowej opony.

Na rysunku 2.6 przedstawiono wpływ poślizgu na rozchodzenie się odkształceń poziomych na spodzie starej warstwy ścierniej. Shanin przedstawił efekt szczepności dla określonej liczby powtarzalnych obciążeń. Stwierdził, iż w przypadku poślizgu nakładka asfaltowa ulegnie szybszemu zniszczeniu niż

istniejąca warstwa ścieralna. Zbadał też wpływ poziomych obciążeń na górną warstwę nawierzchni. Poziome obciążenia występują w momencie przyspieszania, zwalniania, hamowania i skręcania. Intensywność obciążeń poziomych sterowana jest współczynnikiem tarcia pomiędzy oponą a nawierzchnią i zmienia się w zależności od rodzaju opony i nawierzchni do granicznej wartości 0,8.

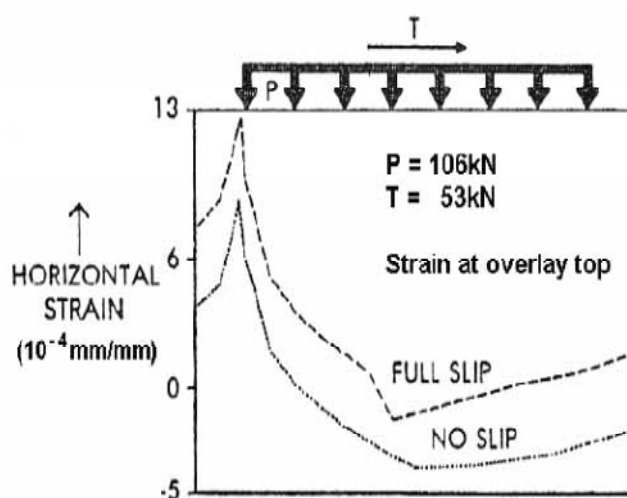


Rysunek 2.6. Rozkład odkształceń poziomych [27].

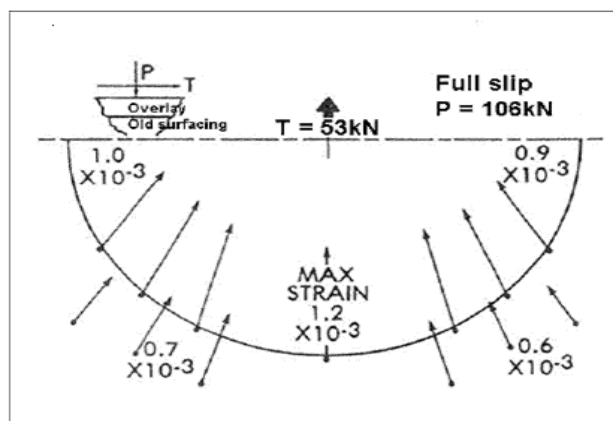


Rysunek 2.7. Wpływ szczepności na żywotność konstrukcji nawierzchni [27].

Podsumowując, obciążenie poziome to połowa obciążenia pionowego. Shanin porównał odkształcenia poziome nakładki w przypadku występowania poślizgu i jego braku (rys. 2.8.). Zauważyć można ponad 50% wzrost maksymalnych odkształceń na wierzchu warstwy podczas, gdy K_s zmienia się od pełnej szczepności do poślizgu. Co więcej Shanin zbadał rozchodzenie się maksymalnych odkształceń (ich wartości i kierunki). Największe odkształcenie występuje zaraz pod obszarem kontaktu w kierunku 180° , od kierunku działania obciążenia (rys. 2.9.). Określił, że wysoka częstotliwość odkształceń wzdłuż krawędzi obszaru kontaktu może doprowadzić do zniszczenia (spękania półksiężycowe).

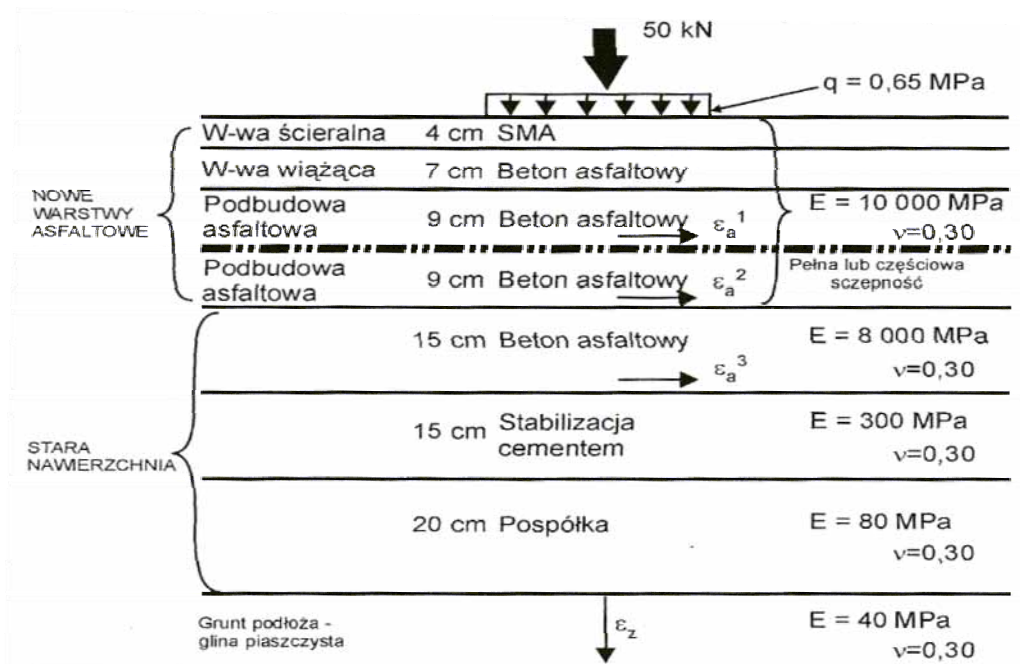


Rysunek 2.8. Wpływ szczepności i obciążeń poziomych na odkształcenia poziome nawierzchni [27].

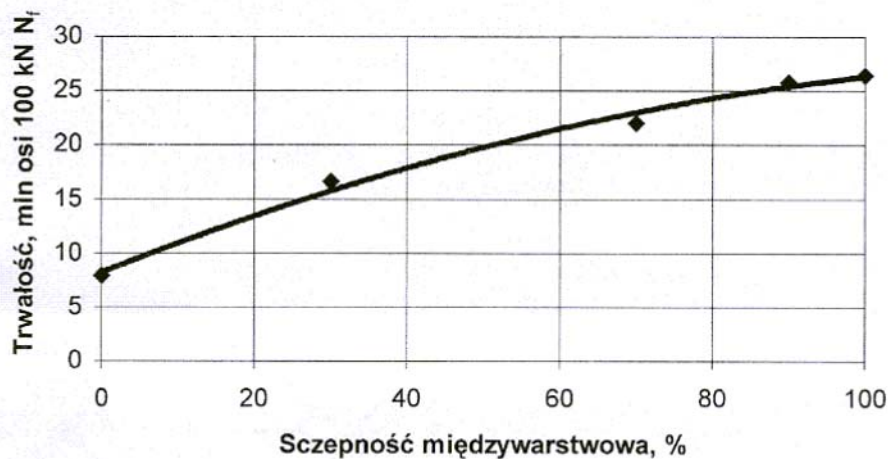


Rysunek 2.9. Rozkład odkształceń rozciągających wzdłuż krawędzi powierzchni kontaktu [27].

W 2003 roku Judycki [10] rozważył model konstrukcji nawierzchni przedstawiony na rys. 2.10. Założył różne warunki szczepności między górną i dolną warstwą podbudowy i przyjął obciążenie równe 100kN oraz ciśnienie kontaktowe równe 650 kPa. Za pomocą *BISARA* udowodnił, że brak szczepności lub też jej zmniejszenie wywołuje zmianę rozkładu odkształceń w poszczególnych warstwach. Wykazał on, że podczas zmiany z pełnej szczepności do pełnego poślizgu następuje kilkukrotne zmniejszenie żywotności konstrukcji.



Rysunek 2.10. Konstrukcja nawierzchni analizowanej przez Judyckiego [10].



Rysunek 2.11. Wpływ szczepności na trwałość zmęczeniową nawierzchni [10].

3. MODELOWANIE SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ

3.1. Pierwsze prace

Pierwsze teorie, dotyczące warunków związania międzywarstwowego sięgają lat czterdziestych, kiedy to Burmister [3] w swojej teorii sprężystości układu warstwowego założył, że między warstwami istnieje pełna szczepność, albo pełny poślizg. Whifin i Lister [34] założyli, że między warstwami nie istnieje ani pełna szczepność, ani pełny poślizg, istnieją zaś wartości pośrednie.

W 1978 roku Uzan [33] korzystając z prawa Goodmana zaproponował sposób określania stopnia związania międzywarstwowego (czyli tego co jest między pełną szczepnością a pełnym poślizgiem) za pomocą wzoru:

$$\tau = K_s(\Delta U),$$

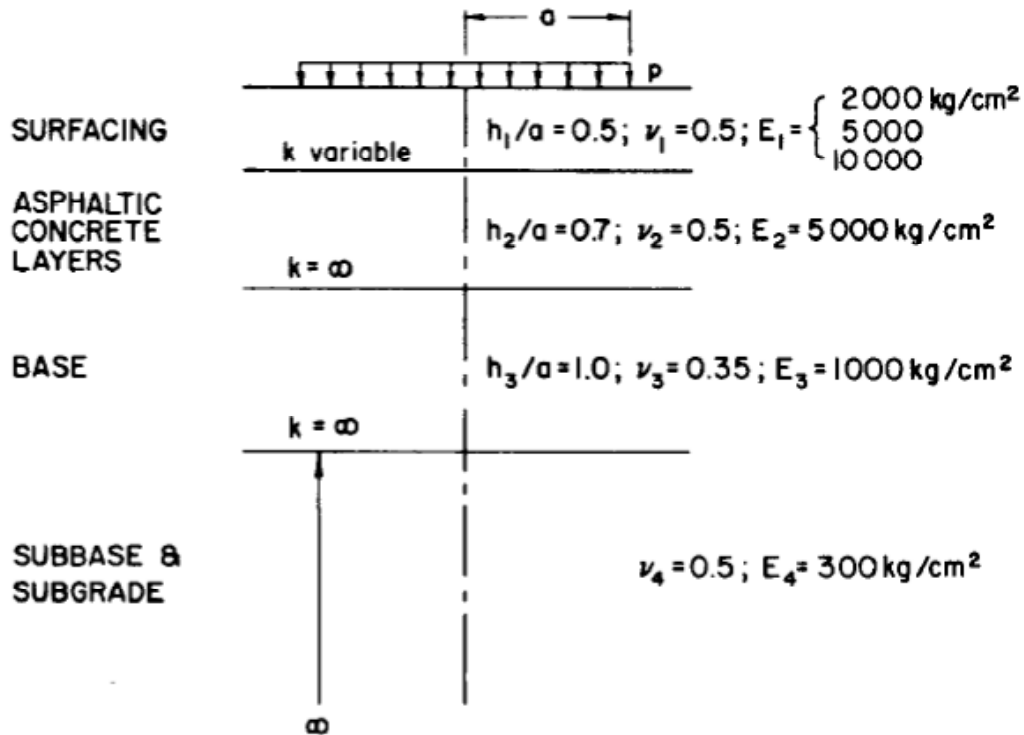
gdzie:

τ - naprężenie ścinające w związaniu międzywarstwowym [MPa],

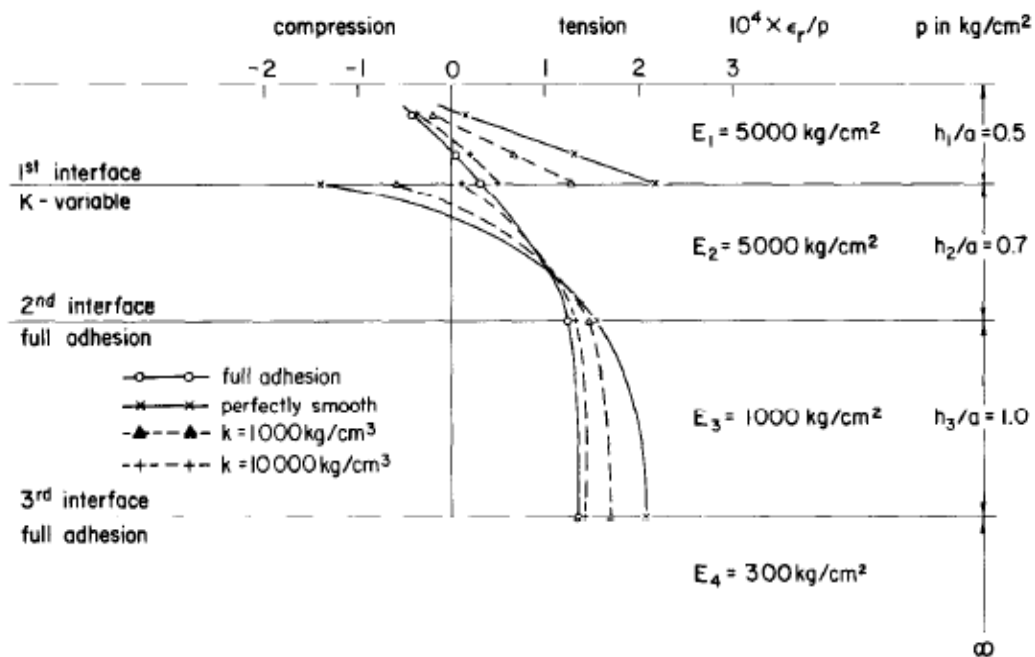
ΔU - względne przemieszczenia poziome w pomiędzy warstwami [mm],

K_s - moduł reakcji poziomej [MPa/mm].

Zgodnie z liniową teorią sprężystości, współczynnik K_s powinien być stały. Uzan analizował czterowarstwową konstrukcję (rys. 3.1), określając wpływ właściwości najwyższego styku warstw na rozchodzenie się naprężeń. Z badań wynikało, że najwięcej zmian w radialnych naprężeniach rozciągających pojawia się, kiedy K_s zmienia się od 100 do 10000 MPa/mm. Sposób rozchodzenia odkształceń radialnych przedstawiono na rys. 3.2. dla czterech przypadków: związanie idealnie szorstkie ($K_s=\infty$), związanie idealnie gładkie ($K_s=0$), $K_s=1000$ MPa/mm oraz $K_s=10000$ MPa/mm.



Rysunek 3.1. Schemat konstrukcji analizowanej przez Uzana [33].



Rysunek 3.2. Rozkład naprężeń normalnych [33].

W 2000 roku Kruntcheva [14] użyła miękkiego materiału umieszczonego między warstwą ścierną a wiążącą, aby zasymulować warunki szczepności metodą

elementów skończonych (MES) używając programu ANSYS. Romanoschi i Metcalf [24] w 2002 podzielili krzywą naprężeń/odkształceń ścinających w zespoleniu międzywarstwowym na trzy części i opracowali dwupoziomowy model w programie ABAQUS za pomocą MES.

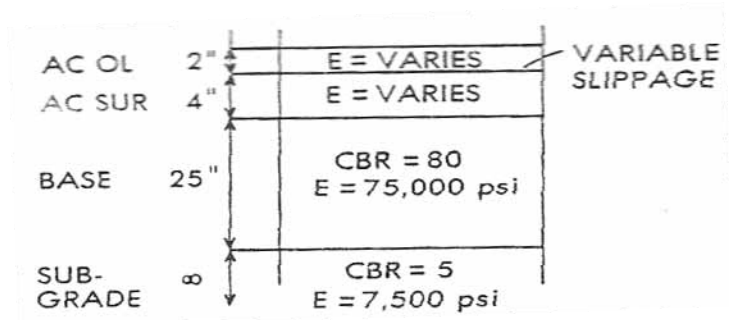
W 2008 roku Ozer [20] przedstawił przełomowy model oparty na wyznaczeniu tarcia do scharakteryzowania połączenia między warstwami. Jednocześnie przedstawił rozmaite sposoby utraty wytrzymałości i wyraził je za pomocą nieliniowego modelu.

W rozdziale tym przedstawiono i opisano wybrane sposoby modelowania szczepności międzywarstwowej, które nazywano od nazwiska badacza.

3.2. Model Shanina - analizy poślizgu warstwy z betonu asfaltowego i jego wpływ na trwałość konstrukcji

Naprężenia i odkształcenia w przekroju konstrukcji nawierzchni spowodowane obciążeniem wywołanym przez samolot obliczono na podstawie wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Model zmęczeniowy wykorzystano do przewidywania (obliczania) trwałości konstrukcji. Wykazano, iż wpływ na wytrzymałość konstrukcji ma poślizg międzywarstwowy, grubości warstw, sztywność asfaltu oraz obciążenie.

Przekrój analizowanej konstrukcji nawierzchni pokazano na rys. 3.3. Konstrukcja zaprojektowana została, by przenosić obciążenia od samolotu DC-9, przy założeniu dość słabego podłoża (CBR=5%). Dodano 2-calową nakładkę asfaltową i założono różne wartości poślizgu w stosunku pod nakładką a istniejącą konstrukcją.



Rysunek 3.3. Konstrukcja nawierzchni badanej przez Shanina [27].

3.2.1. Model obliczeniowy

Do obliczania naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w konstrukcji nawierzchni użyto programu *BISAR 3*. Program wykorzystuje teorię sprężystości warstw do analizy wielowarstwowych konstrukcji poddanych obciążeniom pionowym i poziomym. *BISAR 3* pozwala różnicować poślizg (szczepność) pomiędzy warstwami, uznając, że względne przesunięcie warstw jest proporcjonalne do naprężeń ścinających w ich styku. Stopień związania waha się od całkowitej szczepności do całkowitego poślizgu.

BISAR 3 modeluje szczepność międzywarstwową za pomocą dwóch współczynników: *AK* (*standard shear spring compliance*) oraz *ALK* (*reduced shearspring compliance*).

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1 + \nu}{E} \times a}$$

$$ALK = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times a$$

gdzie:

a - promień obciążenia [m]

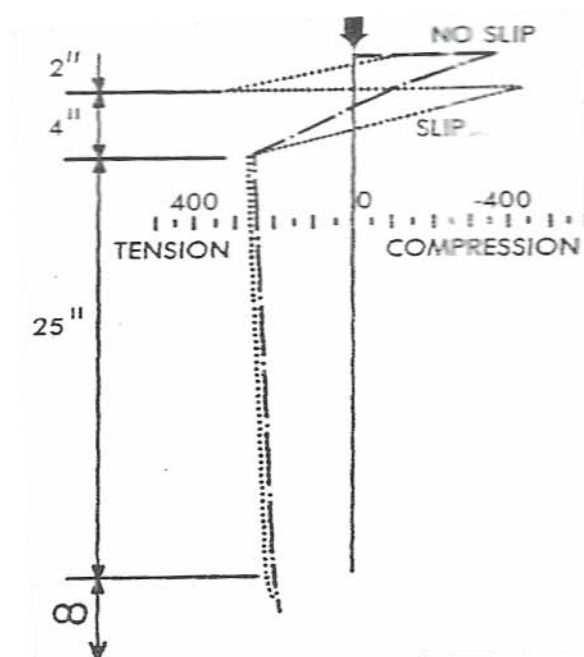
E - moduł sprężystości warstwy leżącej nad analizowanym połączeniem międzywarstwowym [MPa]

ν - współczynnik Poissona danej warstwy [-]

α - współczynnik tarcia

3.2.2. Efekt poślizgu

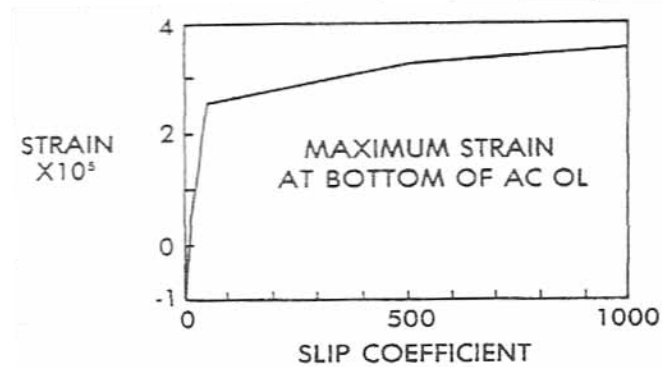
Rysunek 3.4 przedstawia wielkości pionowych odkształceń w konstrukcji nawierzchni bezpośrednio pod obciążeniem kołem samolotu DC-9 zarówno dla całkowitego poślizgu, jak i całkowitej szczepności między warstwami zademonstrowane przez Shanina [27].



Rysunek 3.4. Odkształcenia poziome pod osią obciążenia [27].

W przypadku braku szczepności maksymalne odkształcenia rozciągające występują na spodzie istniejącej warstwy ścieralnej. Jeżeli jest szczepność między nakładką, a istniejącą warstwą naprężenia rozciągające występują na spodzie obu warstw (istniejącej i nakładki). Zbadano również pionowe odkształcenia w podłożu pod osią koła. Jeśli występuje poślizg między nakładką, a istniejącą warstwą, efektywna sztywność obu warstw maleje, obciążenia są w mniejszym stopniu przenoszone na podłoże, a pionowe odkształcenia ściskające w podłożu wzrastają.

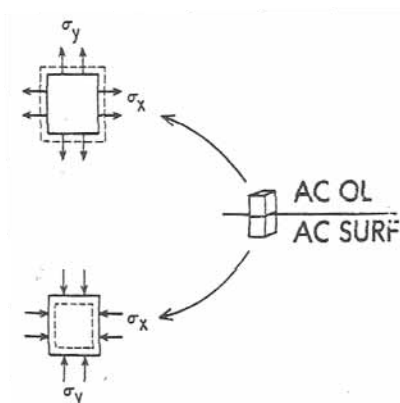
Dla zilustrowania wpływ poślizgu na konstrukcję nawierzchni, zastosowano różne wartości współczynnika K ($K=0$ – brak poślizgu, $K=1000$ – całkowity poślizg), który odpowiada współczynnikowi ALK z programu BISAR 3. Rysunek 3.5. pokazuje jak wzrastają odkształcenia poziome wraz ze wzrostem poślizgu.



Rysunek 3.5. Wpływ poślizgu międzywarstwowego na odkształcenia poziome [27].

Z rysunku 3.5. wywnioskować można , że:

1. na spodzie nakładki (AC OL) odkształcenia wzrastają gwałtownie przy blisko zerowym poślizgu, natomiast wzrastają stopniowo, gdy poślizg jest większy. Oznacza to, że nawet mała wartość poślizgu (K zbliżone do 0) wywołuje odkształcenia, które rosną później wraz ze wzrostem współczynnika K.
2. przy bardzo małym poślizgu na spodzie nakładki występuje poziome rozciąganie. Jednocześnie na górze istniejącej warstwy wytwarzają się pionowe odkształcenia ścinające. Te różne odkształcenia, spowodowane poślizgiem, wywołują zakłócenia w niektórych miejscach (różne kierunki odkształceń w tych samych punktach, ale po różnych stronach związania międzywarstwowego). To jeszcze bardziej osłabia szczepność międzywarstwową, wywołując jeszcze większy poślizg i tym samym wzrost odkształceń.

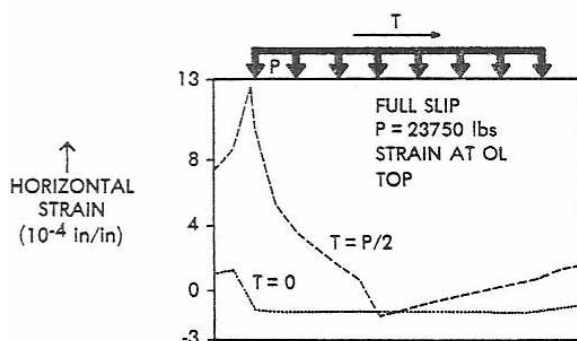


Rysunek 3.6. Zakłócenia w stanie naprężeń i odkształceń w sąsiadujących warstwach [27].

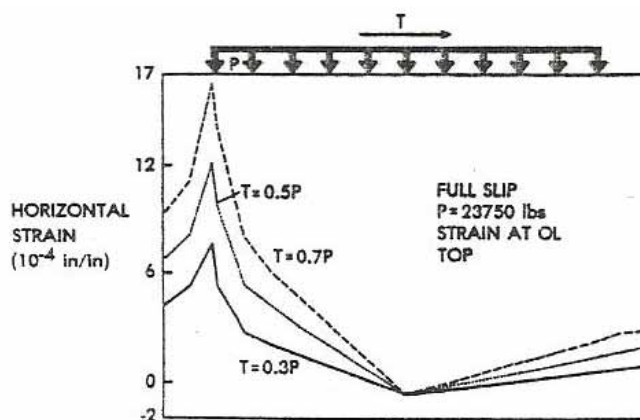
3.2.3. Wpływ obciążeń poziomych

Przy projektowaniu nawierzchni zazwyczaj uwzględnia się jedynie obciążenia pionowe. Obciążenia poziome mają duży wpływ na zachowanie się nawierzchni. Obciążenia poziome generowane są przez pojazd w momencie hamowania, przyspieszania i skręcania, ich wielkość zależy od współczynnika tarcia między oponą, a nawierzchnią. W celach badawczych przyjęto, że siła pozioma równa jest połowie obciążenia pionowego ($0,5P$). W zależności od obciążeń poziomych, zwiększają się krytyczne naprężenia i odkształcenia w nawierzchni oraz zmienia się położenie maksymalnego odkształcenia w stosunku do centrum przyłożenia obciążenia.

Rysunek 3.7. przedstawia dystrybucję maksymalnych odkształceń poziomych na wierzchu nakładki asfaltowej, gdy występują obciążenia poziome równe $T=0,5P$ oraz gdy brak obciążeń poziomych ($T=0$).



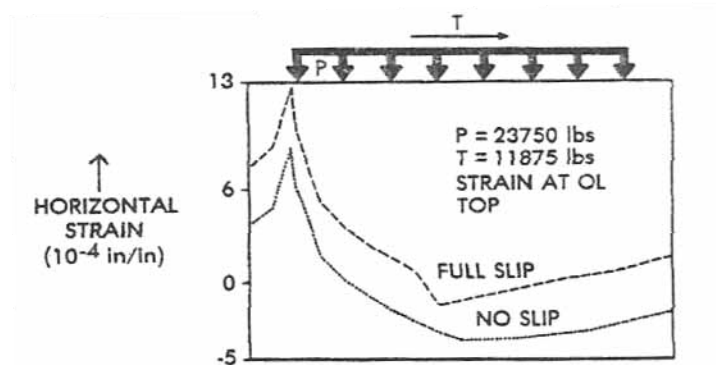
Rysunek 3.7. Odkształcenia w nakładce asfaltowej [27].



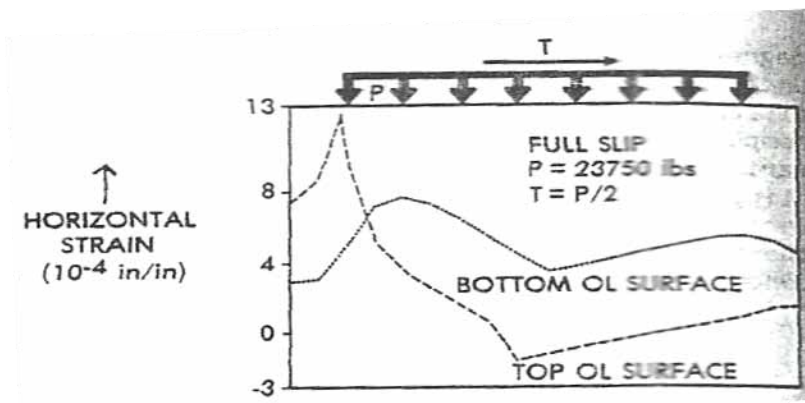
Rysunek 3.8. Odkształcenia w nakładce asfaltowej przy różnych wartościach obciążenia [27].

Maksymalne odkształcenia poziome w górnej części nakładki asfaltowej przy poślizgu i jego braku przedstawiono na rys. 3.9. Odkształcenia są krytyczne ($0,855 \times 10^{-3}$) nawet przy pełnej szczepności między warstwami i wzrastają prawie o 50%, gdy występuje poślizg.

Rysunek 3.10. przedstawia odkształcenia zarówno na powierzchni, jak i na spodzie nakładki asfaltowej. Mniejsze odkształcenia występują na spodzie warstwy, a odkształcenia maksymalne występują pod powierzchnią śladu koła.



Rysunek 3.9. Wpływ poślizgu międzywarstwowego na odkształcenia [27].



Rysunek 3.10. Odkształcenia w nakładce na spodzie i na górze warstwy [27].

3.2.4. Trwałość zmęczeniowa

Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni jest zależna od trzech rodzajów odkształceń: pionowych odkształceń ściskających w górnej części podłoża, poziomych odkształceń rozciągających na spodzie nakładki i poziomych odkształceń rozciągających na spodzie istniejącej warstwy asfaltowej.

Odkształcenia te wpływają na trwałość zmęczeniową odpowiednio: podłoża, nakładki, istniejącej warstwy asfaltowej. Trwałości zmęczeniowe w wymienionych miejscach porównywano, w celu ustalenia krytycznej trwałości zmęczeniowej dla całej konstrukcji.

Rozważono model zniszczenia (French Shell Model), który wykorzystuje trzy parametry mieszanki mineralno-asfaltowej i wiąże je z maksymalnym odkształceniem poziomym.

$$e = [(4,102)(PI) - 0,205(PI)(V) + (1,904)V - 2,707](S^{-0,36})N^{-0,2},$$

gdzie:

e - max odkształcenie rozciągające (poziome),

V - objętościowa zawartość bitumu w mieszance [%],

PI - indeks penetracji [%],

S - moduł sztywności mieszanki [N/m^2],

N - trwałość konstrukcji, cykle obciążenia.

Podstawiając $V=9,8\%$, $PI=0$ otrzymamy:

$$N = 3,3 \times 10^4 (1/S)^{1,8} (1/e)^5$$

Trwałość zmęczeniową podłoża obliczono na podstawie pionowym odkształceniom ściskającym w podłożu wykorzystując wzór:

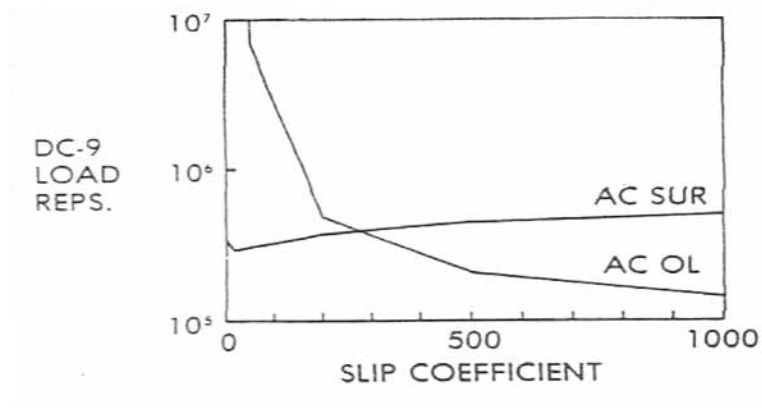
$$e_v = 5,511 \times 10^{-3} [1/N^{0,1532}],$$

gdzie:

e_v - pionowe odkształcenia ściskające w podłożu,

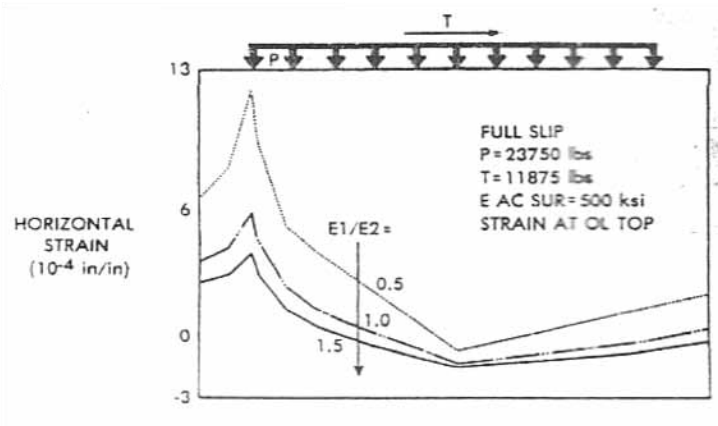
N - trwałość konstrukcji.

Dla małych wartości poślizgu, przy obciążeniu pionowym, trwałość zmęczeniowa istniejącej warstwy asfaltowej wpływa na trwałość zmęczeniową całej konstrukcji (rys. 3.11). Gdy poślizg wzrasta, na spodzie nakładki (AC OL) występują większe odkształcenia rozciągające niż na spodzie istniejącej warstwy (AC SUR).

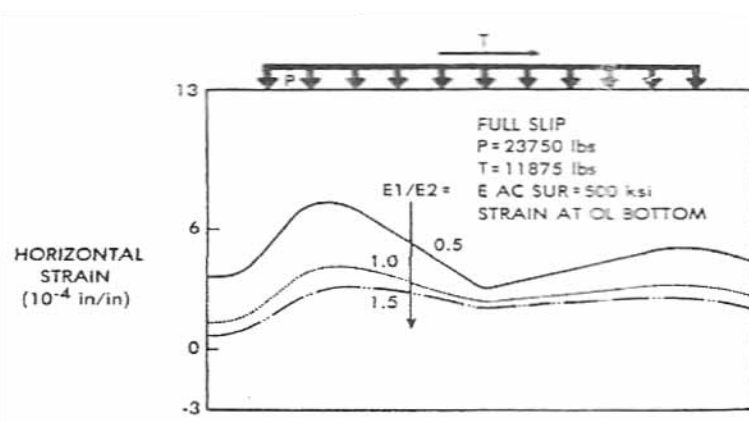


Rysunek 3.11. Trwałość zmęczeniowa nawierzchni w zależności od poślizgu międzywarstwowego [27].

Na rysunkach 3.12 i 3.13 z ilustrowano wpływ sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej nakładki podczas braku szczepności na odkształcenia rozciągające na spodzie i powierzchni nakładki.



Rysunek 3.12. Wpływ modułów nakładki asfaltowej na odkształcenia na powierzchni nakładki [27].



Rysunek 3.13. Wpływ modułów nakładki asfaltowej na odkształcenia na spodzie warstwy [27].

3.3. Model Huang'a - analizy projektowania konstrukcji nawierzchni, wyznaczanie szczepności w programie *KENLAYER*.

3.3.1. Teoria Burmistera

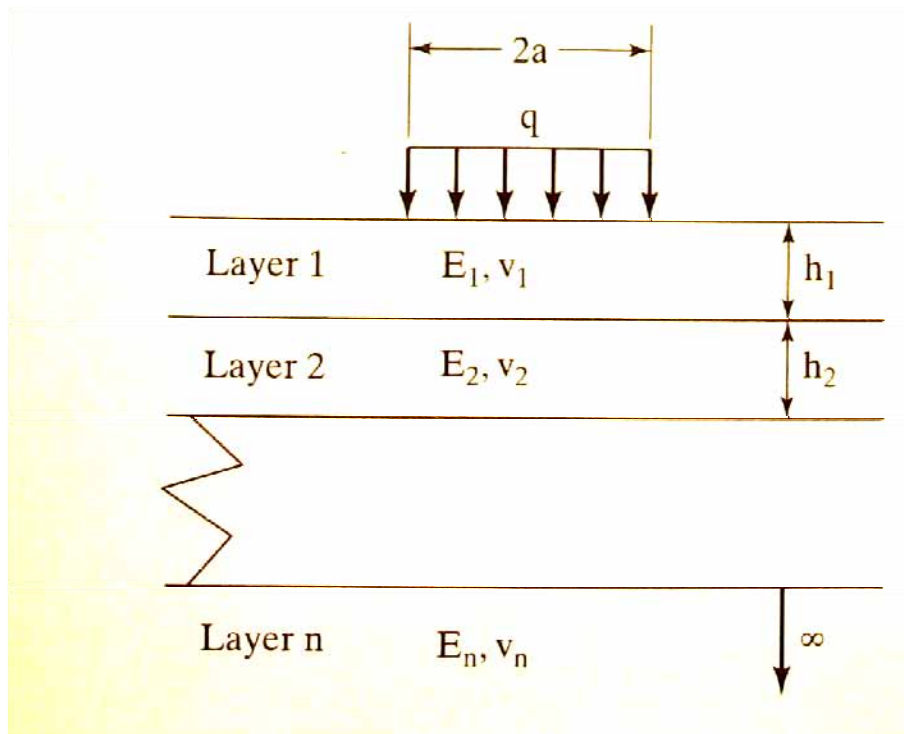
Według teorii Burmistera [3] z 1943 roku podstawowe założenia projektowe w teorii warstwowej konstrukcji nawierzchni to:

- 1) każda warstwa jest jednorodna, izotropowa i liniowo elastyczna o module E i współczynniku Poissona ν ,
- 2) materiał jest nieważki i nieskończony,
- 3) każda warstwa posiada skończoną grubość h (z wyjątkiem warstwy ostatniej),
- 4) równomierne obciążenie q rozłożone jest na powierzchni koła o promieniu a ,
- 5) zakłada się ciągłość warstw na co wskazują te same naprężenia poziome, naprężenia ścinające, odkształcenia radialne, odkształcenia pionowe. Dla połączenia między warstwami pozbawionego tarcia ciągłość przemieszczeń zastąpiona jest przez 0.

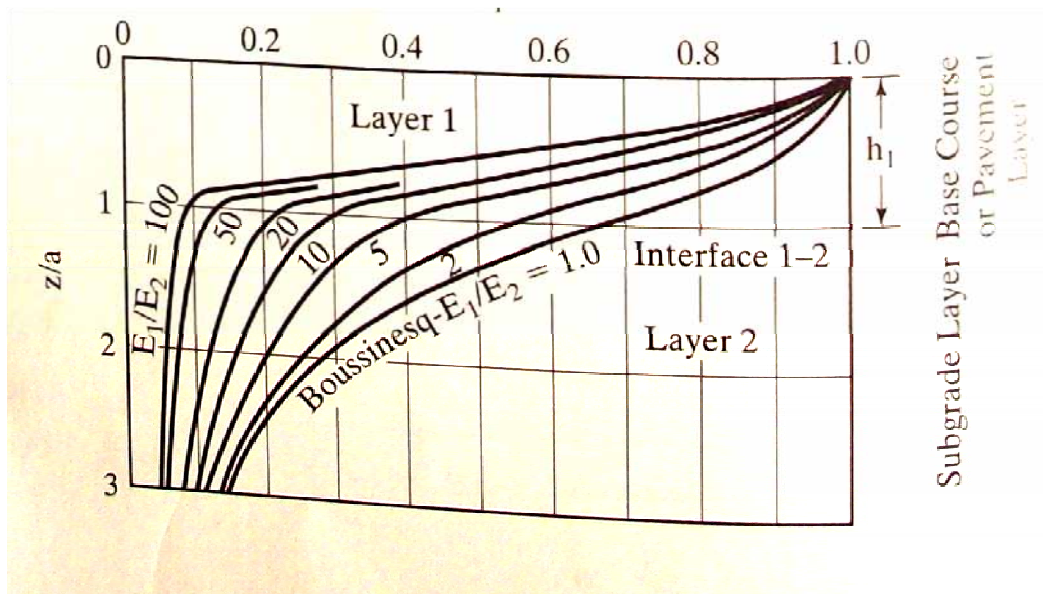
2.3.2. Układ dwuwarstwowy

Naprężenia pionowe na górze podłoża są ważnym aspektem w projektowaniu. Jedną z funkcji nawierzchni jest redukcja naprężeń przenoszonych na podłoże w taki sposób, aby konstrukcja nie deformowała się strukturalnie. Dopuszczalne naprężenia w podłożu zależą od modułu podłoża. Aby uwzględnić te czynniki odkształcenia pionowe są najczęstszym kryterium projektowania.

Naprężenia w dwuwarstwowym układzie zależą od stosunku modułów E_1/E_2 i stosunku h_1/a . Rysunek 3.15 pokazuje w jaki sposób rozchodzą się naprężenia w dwuwarstwowej konstrukcji. Wykres ma zastosowanie w przypadku, gdy grubość pierwszej warstwy $h_1 = a$. Zauważyć można, że pionowe naprężenia gwałtownie maleją ze wzrostem stosunku E_1/E_2 . Na styku warstw konstrukcyjnych i podłoża naprężenie wynosi ok. 68% zadanego obciążenia, gdy $E_1/E_2 = 1$ i zredukowane jest do ok. 8% gdy $E_1/E_2 = 100$.



Rysunek 3.14. Schemat n- warstwowej konstrukcji nawierzchni [8].



Rysunek 3.15. Wykres rozchodzenia się naprężeń pionowych w dwuwarstwowej konstrukcji wg Burmistera [8].

3.3.3. Układ trójwarstwowy

Rysunek 3.16. przedstawia trzywarstwową konstrukcję i naprężenia w związku międzywarstwowym w osi symetrii. Naprężenia te zawierają pionowe naprężenia

w związku 1, σ_{z1} , pionowe naprężenia w związku 2, σ_{z2} , radialne naprężenia na spodzie warstwy 1, σ_{r1} , radialne naprężenia na górze warstwy 2, σ'_{r1} , radialne naprężenia na spodzie warstwy 2, σ_{r2} , radialne naprężenia na górze warstwy 3, σ'_{r2} . Zauważyć należy, że w symetrii osiowej naprężenia styczne i radialne są równe oraz, że naprężenia ścinające są równe 0.

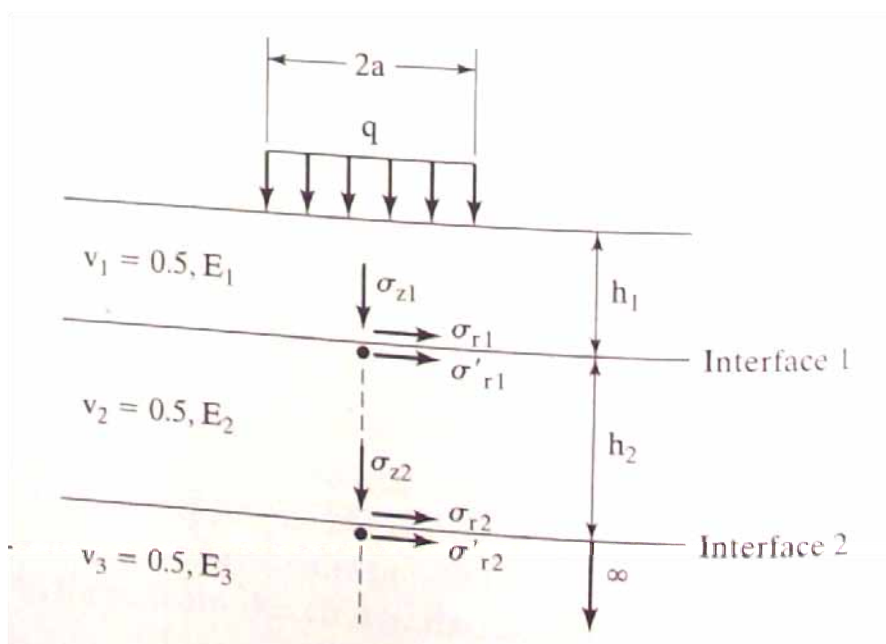
Kiedy współczynnik Poissona $\nu = 0,5$:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \sigma_r)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2E}(\sigma_z - \sigma_r)$$

Wzory te wskazują na to, że radialne odkształcenia równe są połowie odkształceń pionowych z przeciwnym znakiem:

$$\varepsilon_z = -2\varepsilon_r$$



Rysunek 3.16. Naprężenia w związku międzywarstwowym w konstrukcji trzywarstwowej [8].

W konstrukcji trzywarstwowej naprężenia zależą od współczynnika k_1 , k_2 , A i H . Zachodzą następujące zależności:

$$k_1 = \frac{E_1}{E_2}, \quad k_2 = \frac{E_2}{E_3}, \quad A = \frac{a}{h_1}, \quad H = \frac{h_1}{h_2}$$

Ciągłość poziomych przemieszczeń w związku międzywarstwowym oznacza, że radialne odkształcenia na spodzie warstwy są równe odkształceniom na wierzchu kolejnej warstwy.

$$\sigma_{z1} = \sigma'_{r1} = \frac{\sigma_{z1} - \sigma_{r1}}{k_1}$$

$$\sigma_{z2} = \sigma'_{r2} = \frac{\sigma_{z2} - \sigma_{r2}}{k_2}$$

3.3.4. Szczepność w programie KENSLABS

Program *KENSLABS* opracowany został przez Huanga [8] w 1985 roku do obliczania nawierzchni sztywnych. Oparty jest na metodzie elementów skończonych, gdzie płyty podzielone są na prostokątne skończone elementy o dużej ilości węzłów. Zarówno obciążenie od kół, jak i reakcje podłoża zadawane są w postaci skoncentrowanych, pionowych sił w węzłach.

KENSLABS zakłada pełne związanie międzywarstwowe lub pełny poślizg. W programie rozpatrywać można zarówno połączenie warstwy asfaltowej z betonową (podczas wzmocnienia), jak i warstwy betonowej z warstwą stabilizowaną cementem (podbudowy pod płytą).

3.3.4.1. Warstwy związane (szczepność)

Rysunek 3.17 odnosi się do warstwy asfaltowej o grubości h_1 , module sprężystości E_1 i współczynnika Poissona ν_1 , która leży na płycie betonowej o parametrach h_2 , E_2 , ν_2 . Rysunek po lewej stronie jest oryginalnym podziałem o określonych szerokościach, a po prawej stronie jest podziałem zastępczym, gdzie szerokość warstwy asfaltowej jest zredukowana do E_1/E_2 . Gdy rozważymy moment na spodzie warstwy ścieralnej, odległość d od osi neutralnej do spodu płyty wynosi:

$$d = \frac{(E_1/E_2)h_1(0,5h_1 + h_2) + 0,5h_2^2}{(E_1/E_2)h_1 + h_2}$$

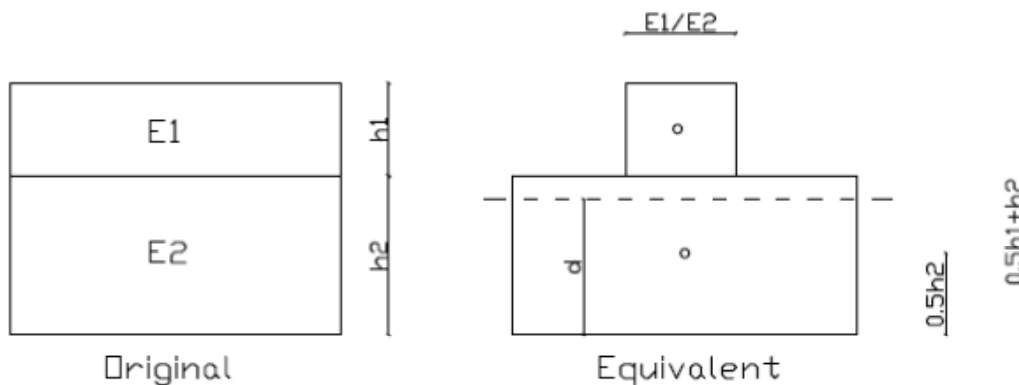
Moment bezwładności względem osi neutralnej wynosi:

$$I_c = \left(\frac{E_1}{E_2}\right) \left[\frac{1}{12} h_1^3 + h_1(0,5h_1 + h_2 - d)^2 \right] + \frac{1}{12} h_2^3 + h_2(d - 0,5h_2)^2$$

Zakładając moment M , naprężenie zginające f na spodzie płyty wynosi:

$$f = \frac{Md}{I_c}$$

Powyższy wzór może też być używany do określania naprężeń w dowolnym punkcie, zakładając, że d oznacza odległość punktu od osi neutralnej. Gdy warstwy są związane KENSLABS pokaże naprężenia dla czterech miejsc (na górze i spodzie każdej warstwy).



Rysunek 3.17. Oryginalny i zastępczy podział nawierzchni zastosowany przez Huanga [8].

W metodzie elementów skończonych z udziałem jednej warstwy macierz sztywności płyty zależy od modułów sztywności.

$$R = \frac{EI}{1 - \nu^2} = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^3)}$$

Kiedy zaś płyty składają się z dwóch warstw, macierze sztywności warstw liczone są osobno:

$$R_1 = \frac{E_1 \left[\frac{1}{12} h_1^3 + h_1 (0,5h_1 + h_2 - d)^2 \right]}{1 - \nu_1^2}$$

$$R_2 = \frac{E_2 \left[\frac{1}{12} h_2^3 + h_2 (d - 0,5h_2)^2 \right]}{1 - \nu_2^2}$$

3.3.4.2. Warstwy niezwiązane (poślizg)

Kiedy brak szczepności dwie warstwy traktowane są niezależnie od siebie. Dlatego też macierz sztywności jest sumą macierzy sztywności dwóch warstw. Gdy określone zostaną przemieszczenia, wyznaczyć można momenty w każdym węźle, by następnie obliczyć naprężenia zginające:

$$f = \frac{Md}{I}$$

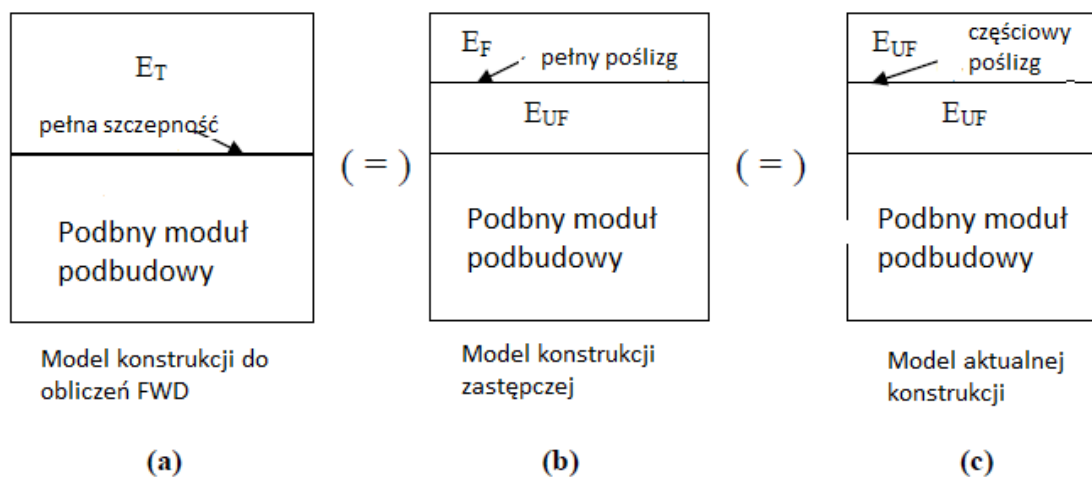
Zauważyć można, że brak związania pomiędzy warstwą asfaltową i betonową ma bardzo mały wpływ na redukcję naprężeń zginających w warstwie betonowej.

3.4. Model Gomba, Mehta - wskaźnik uszkodzenia warstwy szczepnej

3.4.1. Moduł warstwy asfaltowej

W 2004 roku Gomba i Metha [16] wyznaczyli wielkość poślizgu, wykorzystując obliczone za pomocą FWD naprężenia radialne w związaniu międzywarstwowym. Efekt poślizgu określony został jako algebraiczna różnica pomiędzy naprężeniami bezpośrednio nad i pod połączeniem międzywarstwowym.

W standardowych obliczeniach wszystkie warstwy asfaltowe traktowano jako jedną warstwę w konstrukcji nawierzchni. Od kiedy zaś zaczęto rozważać wielkość poślizgu rozdzielono je na dwie warstwy (rys. 3.18.).



Rysunek 3.18. Schemat rozdzielania warstw asfaltowych. E_F - moduł nawierzchni asfaltowej (warstwa górna), E_T - efektywny moduł warstw asfaltowych, E_{UF} - aktualny moduł warstwy asfaltowej = średni efektywny moduł E_T [16].

W 1993 Huang [8] wyznaczył równanie dla modułu zastępczego pakietu warstw asfaltowych dla dwóch warstw.

$$E_1 = \left[\frac{h_{1a}(E_{1a})^{\frac{1}{3}} + h_{1b}(E_{1b})^{\frac{1}{3}}}{h_{1a} + h_{1b}} \right]^3$$

gdzie:

h- grubości poszczególnych warstw,

E- moduły poszczególnych warstw.

Dla równej grubości warstw asfaltowych wzór został uproszczony do postaci:

$$E_F = \left[2(E_T)^{\frac{1}{3}} - (E_{UF})^{\frac{1}{3}} \right]^3$$

Reasumując w obszarze występowania pełnego związania (brak poślizgu) E_F jest równe E_{UF} . W przypadku pojawienia się poślizgu E_F jest mniejsze od E_{UF} . Wynika z tego, iż szczepność warstw regulować można w obliczeniach za pomocą modułów warstw asfaltowych. Im większy będzie moduł warstwy drugiej (E_{UF}) w

stosunku do modułu warstwy pierwszej (E_F) tym większy będzie poślizg między nimi, czyli gorsze powiązanie międzywarstwowe.

3.4.2. Wskaźnik uszkodzenia warstwy szepnej *TFR* (Tack Coat Failure Ratio)

Pojęcie wskaźnika uszkodzenia warstwy szepnej stworzono w celu określenia w prosty ilościowy sposób efektu poślizgu. *TFR* jest stosunkiem modułu górnej warstwy asfaltowej do modułu warstwy leżącej poniżej. Zależność tą przedstawia poniższy wzór:

$$TFR = \frac{E_{topHMAlayer}}{E_{lowerHMAlayer}} = \frac{E_F}{E_{UF}}$$

gdzie:

$E_{topHMAlayer}=E_F$ - moduł górnej warstwy asfaltowej,

$E_{lowerHMAlayer}=E_{UF}$ - moduł warstwy niżej położonej.

Dla pełnego związania międzywarstwowego $TFR=1$, dla całkowitego poślizgu zaś $TFR=0$.

Tablice 3.1 i 3.2 przedstawiają wyniki badań przeprowadzonych przez Gomba i Mehta [16]. Zarówno *TFR*, jak i moduły warstw asfaltowych wyznaczone zostały w oparciu o badania FWD.

Tablica 3.1. Wskaźniki TFR i moduły obliczone przez Gomba i Mehta [16].

FWD ID	Station	Load (kip)	Section	FWD-Calculated E_T (ksi)	Average E_T (ksi)	E_T (ksi)	E_T (ksi) (Calculated from Equation)	E_{UF} (ksi) (Avg. E_T , UF Section)	TFR
24920	3+45	11	UF	1,700	1,750	-	-	-	-
24924	3+55	11	UF	1,800		-	-	-	-
24928	3+65	11	F	1,571	-	1,571	1,405	1,750	0.803
24932	3+75	11	F	1,550		1,550	1,366	1,750	0.780
24921	3+45	23	UF	1,600	1,606	-	-	-	-
24925	3+55	23	UF	1,612		-	-	-	-
24929	3+65	23	F	1,300	-	1,300	1,036	1,606	0.645
24933	3+75	23	F	1,000		1,000	570	1,606	0.355
24922	3+45	35	UF	1,310	1,270	-	-	-	-
24926	3+55	35	UF	1,230		-	-	-	-
24930	3+65	35	F	820	-	820	491	1,270	0.387
24934	3+75	35	F	515		515	141	1,270	0.111

Tablica 3.2. Wskaźniki TFR i moduły obliczone przez Gomba i Mehta [16].

FWD ID	Station	Load (kip)	Section	FWD-Calculated E_T (ksi)	Average E_T (ksi)	E_T (ksi)	E_T (ksi) (Calculated from Equation)	E_{UF} (ksi) (Avg. E_T , UF Section)	TFR
24856	3+45	11	UF	1,700	1,662	-	-	-	-
24860	3+55	11	UF	1,625		-	-	-	-
24864	3+65	11	F	1,500	-	1,500	1,380	1,662	0.811
24916	3+75	11	F	1,525		1,525	1,395	1,662	0.839
24857	3+45	23	UF	1,510	1,490	-	-	-	-
24861	3+55	23	UF	1,470		-	-	-	-
24865	3+65	23	F	1,050	-	1,050	706	1,490	0.474
24917	3+75	23	F	1,150		1,150	866	1,490	0.581
24858	3+45	35	UF	1,200	1,175	-	-	-	-
24862	3+55	35	UF	1,150		-	-	-	-
24866	3+65	35	F	700	-	700	374	1,175	0.318
24918	3+75	35	F	775		775	477	1,175	0.407

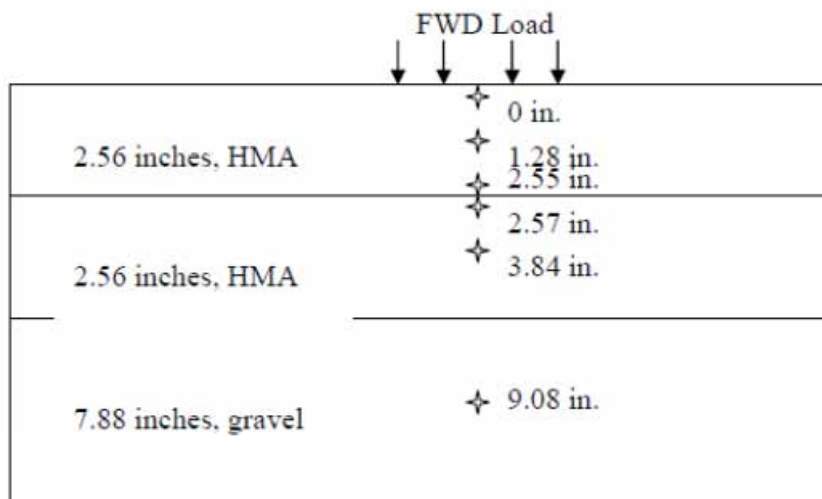
3.4.3. Efekt poślizgu

Określenie wskaźnika uszkodzenia warstwy szepnej (TFR), modułów warstw asfaltowych oraz porównanie naprężeń radialnych powyżej i poniżej związania międzywarstwowego na podstawie wyników badań FWD posłużyło do bardziej szczegółowych rozważań.

Do obliczeń wykorzystano program *BISAR 3*, który stosuje dwie różne liczby do określania wartości związania międzywarstwowego. Pierwsza z nich nie ma swojej nazwy w programie, jednak Gomba i Mehta nazwali „*BISAR slip number*”, druga zaś to liczba „*spring compliance*” którą określano wyznaczając dane wyjściowe do projektowania konstrukcji. Dla efektywnego użycia programu do wyznaczenia efektu poślizgu ważne było wyznaczenie zależności pomiędzy tymi liczbami.

Kalibracji metody obliczeń dokonano analizując w programie *BISAR 3* (a także dla sprawdzenia w programie *KENLAYER*) trzywarstwową konstrukcję nawierzchni (rys. 3.19.). Wartości modułów i obciążeń przyjęto z wcześniejszego badania FWD. Dla przypadku pełnej szepności i pełnego poślizgu wyznaczono następujące wielkości: odkształcenie poziome i pionowe, przemieszczenia poziome, naprężenia poziome i pionowe. Wielkości wyznaczano bezpośrednio pod obciążeniem na głębokościach 0; 1,28; 2,55; 2,57; 3,48 i 9,08 cali od powierzchni.

W analizach obliczeniowych wyznaczono zakres *BISAR slip number* od 0 do 1.000.000. Przy czym 0 *BISAR slip number* odpowiada 0 *spring compliance*, a 1.000.000. *BISAR slip number* odpowiada 1 *spring compliance*. Zauważono też, iż 0 *spring compliance* odpowiada 1 w programie *KENLAYER* (pełna szepność), zaś 1 *spring compliance* to 0 w programie *KENLAYER* czyli pełny poślizg.

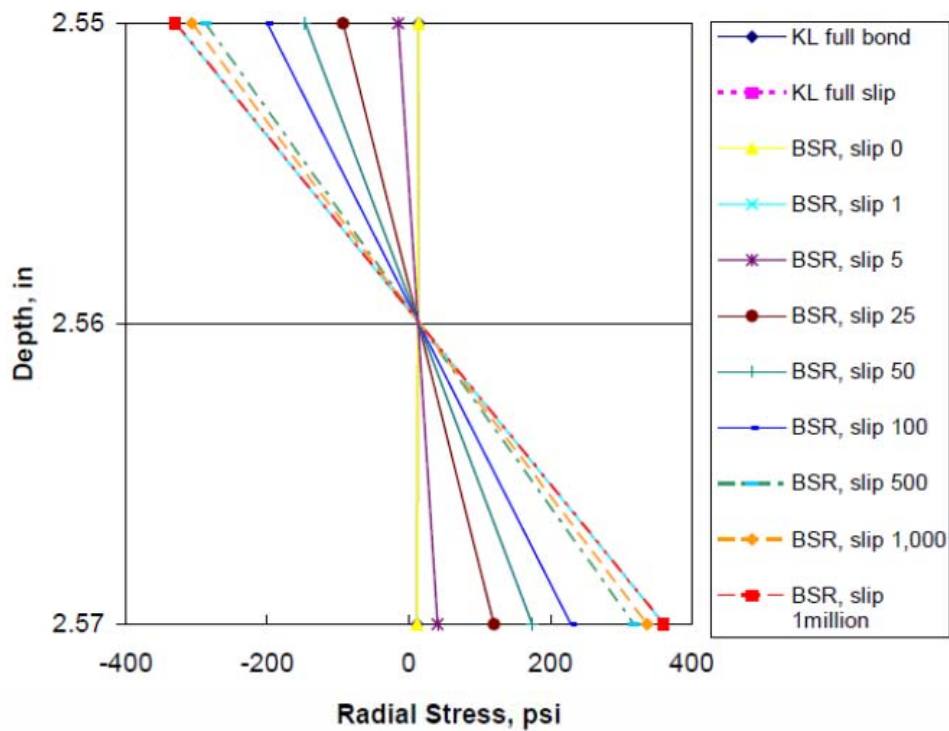


Rysunek 3.19. Schemat konstrukcji nawierzchni przyjęty do obliczeń przez Gomba i Metha [16].

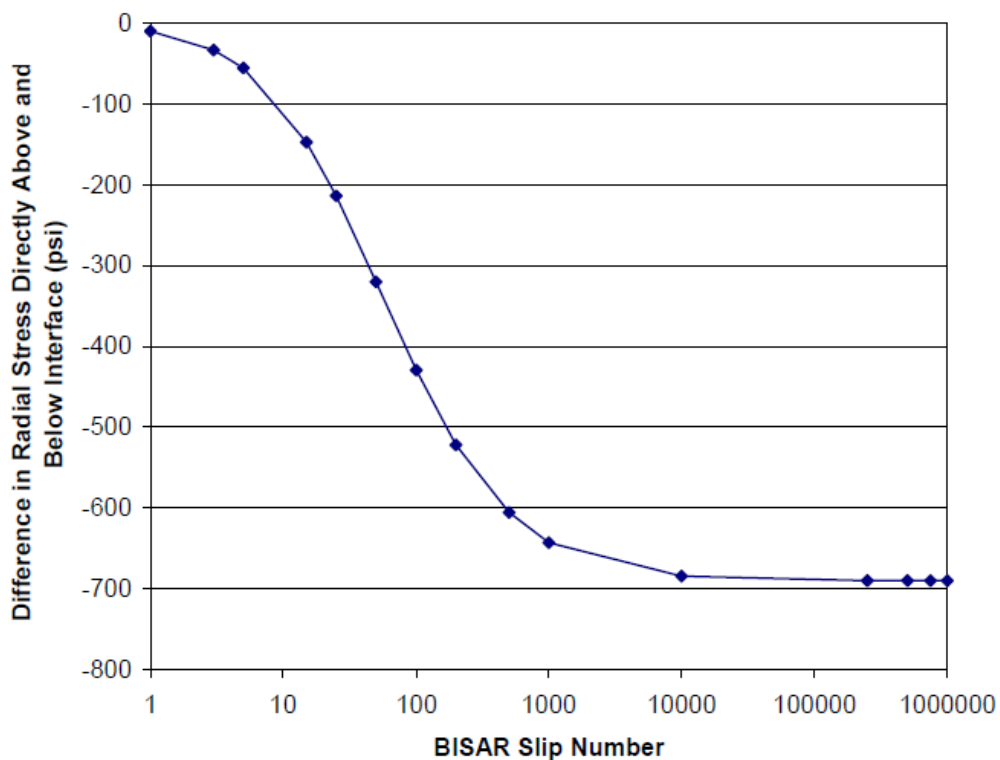
Tablica 3.3. Wartości stopnia poślizgu w programie BISAR i KENLAYER [16].

KENLAYER Interface Number	BISAR Slip Number	BISAR Interface Spring Compliance	Physical Meaning
1	0	0.0	Fully Bonded
0	1,000,000	1.0	Fully Slipped

Poślizg mierzony był w oparciu o różnicę naprężeń radialnych powyżej i poniżej połączenia między warstwami. Rysunek 3.20. przedstawia naprężenia radialne dla poszczególnych wartości poślizgu, rys 3.21. zaś pokazuje zależność naprężeń od *BISAR slip number*. Z wykresów wywnioskować można, że naprężenia rosną proporcjonalnie do wartości poślizgu oraz wraz ze wzrostem różnicy naprężeń pomiędzy dwoma punktami (powyżej i poniżej połączenia międzywarstwowego) rośnie wartość poślizgu.



Rysunek 3.20. Naprężenia radialne w punktach powyżej i poniżej połączenia międzywarstwowego dla poszczególnych stopni poślizgu [16].

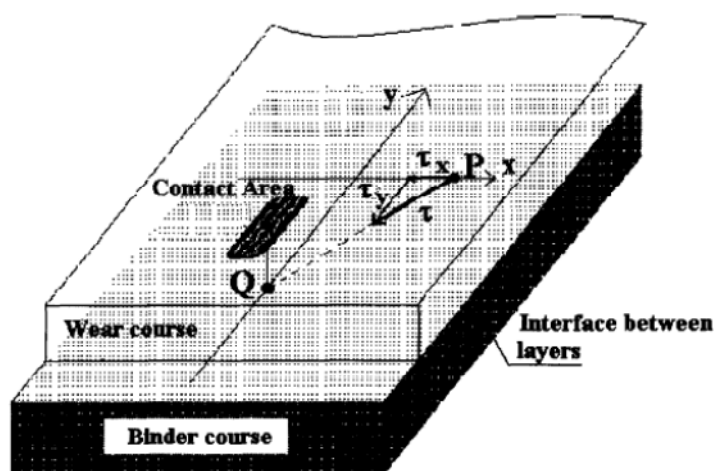


Rysunek 3.21. Zależność naprężeń radialnych od BISR slip number [16].

3.5. Model Crispino - wykorzystanie nowego testu dynamicznego

3.5.1. Interakcje międzywarstwowe

Projektowanie nawierzchni podatnych odbywa się zwykle przy użyciu sprężystych lub lepko-sprężystych systemów strukturalnych złożonych z wielu warstw i odtwarzaniu zjawiska poziomych interakcji między warstwami. System taki został wykorzystany do wstępnej analizy przeprowadzonej w celu zdefiniowania warunków testu (rozchodzenie i zakres zmian ścinania i naprężeń normalnych w związku międzywarstwowym). Należy zauważyć, że wektor naprężenia w danym punkcie (gdy koło się porusza) zmienia się. Zmianie ulega zarówno moduł, jak i kierunek (jest zawsze skierowany do punktu Q w centrum rzutu powierzchni koła) – rys. 3.22. W celu uproszczenia analiz rozważa się naprężenia równoległe i prostopadłe do ruchu koła (odpowiednio wzdłuż osi Y i X)



Rysunek 3.22. Wektor naprężenia ścinającego w punkcie P pomiędzy dwoma warstwami i jego składowe [4].

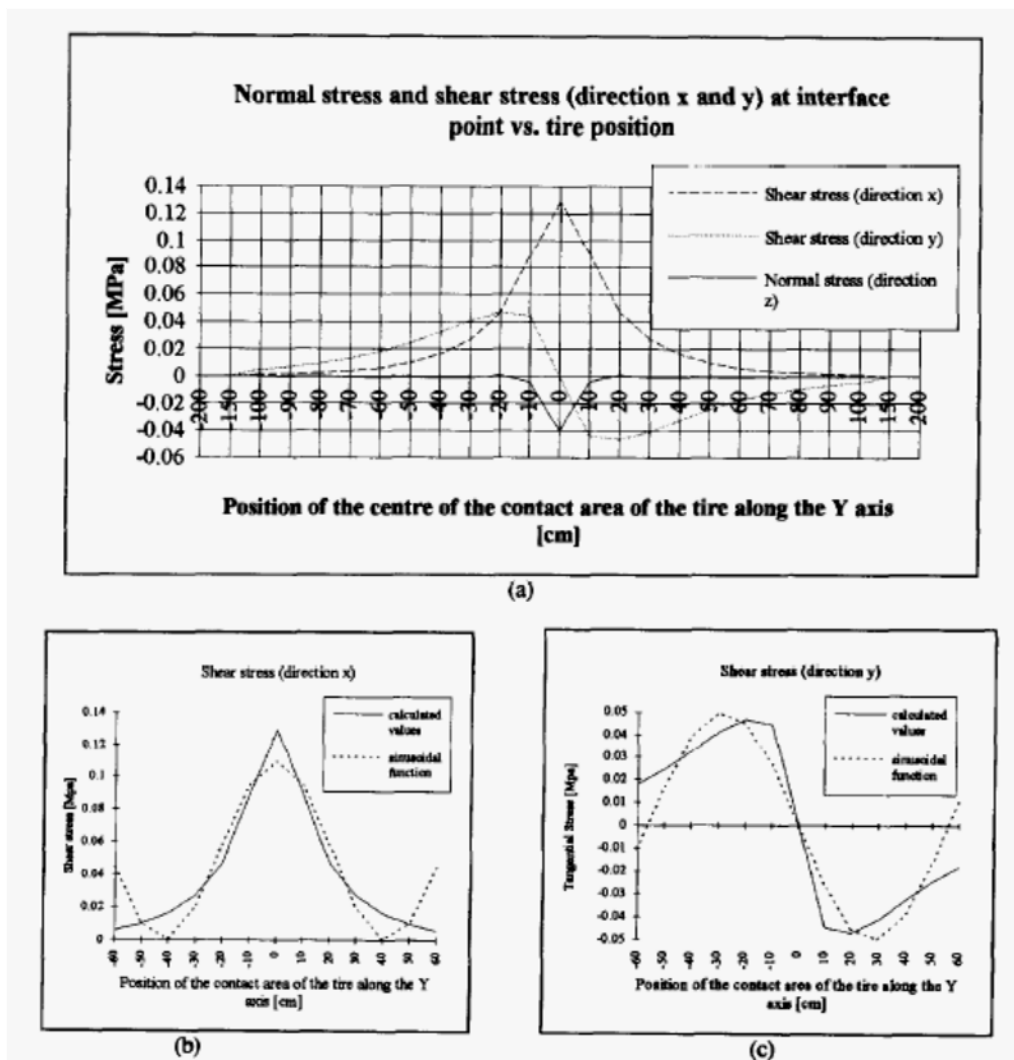
Analizy pokazują, że w punkcie P pomiędzy dwoma warstwami:

- składowe naprężeń ścinających zmieniają się sinusoidalnie (rys.3.23);
- średnia wartość naprężeń ścinających wzdłuż osi Y równa jest 0 (rys. 3.23 c);
- średnia wartość naprężeń ścinających wzdłuż osi X równa jest $\frac{\tau_{max}}{2}$ (rys.3.23 b)
- wartość max naprężenia dla obciążenia kołem 600 kPa waha się do ok. 0,3 MPa;
- max wartości naprężeń normalnych występują jednocześnie z max

- naprężeniami ścinającymi skierowanymi wzdłuż osi X;
- składowe naprężeń normalnych występujących jednocześnie z max naprężeniami wzdłuż osi Y są praktycznie zerowe.

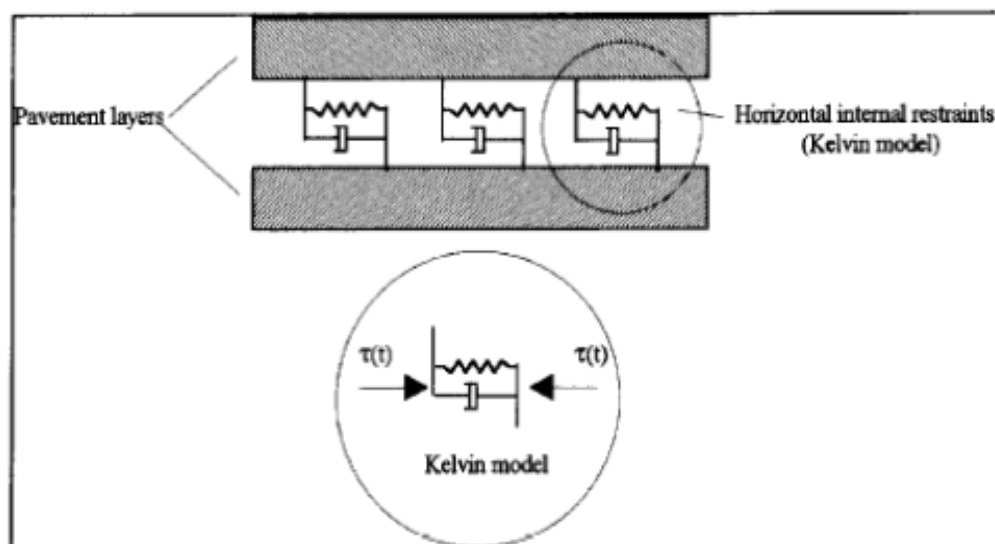
Początkowe wartości wejściowe do badań pochodziły z analiz teoretycznych. Poddanie dwuwarstwowej próbki dynamicznym naprężeniom ścinającym o wielkości 0,1-0,3 MPa wykazało, że względny poślizg między dwiema warstwami próbkami jest:

- prawie całkowicie odwracalny;
- sinusoidalny i przesunięty w stosunku do naprężeń (zachowanie lepkie).



Rysunek 3.23. a) Przykład jednoczesnego zachowania się składowych naprężeń ścinających wzdłuż osi X i Y oraz naprężeń normalnych w punkcie P (związanie); b) i c) naprężenia ścinających [4].

Na podstawie tych analiz stwierdzono, że poziomy opór między warstwami asfaltowymi jest lepko-sprężysty. Następnie opór wewnętrznego przedstawiono zgodnie z modelem Kelvina, tak aby scharakteryzować interakcję międzywarstwową (rys. 3.24.).



Rys. 3.24. Model interakcji poziomej [4].

Rozwiązując równanie różniczkowe dla warunków równowagi modelu Kelvina, przy sinusoidalnym obciążeniu $\tau(t) = \tau_{max}e^{iat}$, otrzymano następujący wzór na przemieszczenie $s(t)$ między warstwami:

$$s(t) = s_{max}e^{i(at-\varphi)}$$

Dlatego też wprowadzić można złożony moduł reakcji międzywarstwowej KI^* wyrażony wzorem:

$$KI^* = \frac{\tau(t)}{s(t)} = \frac{\tau_{max}e^{iat}}{s_{max}e^{i(at-\varphi)}} = \frac{\tau_{max}}{s_{max}} \cos\varphi + i \frac{\tau_{max}}{s_{max}} \sin\varphi$$

gdzie:

τ_{max} - amplituda sinusoidalnych naprężeń ścinających,

s_{max} - amplituda poślizgu między dwoma warstwami,

φ - kąt fazowy między naprężeniami i odkształceniami.

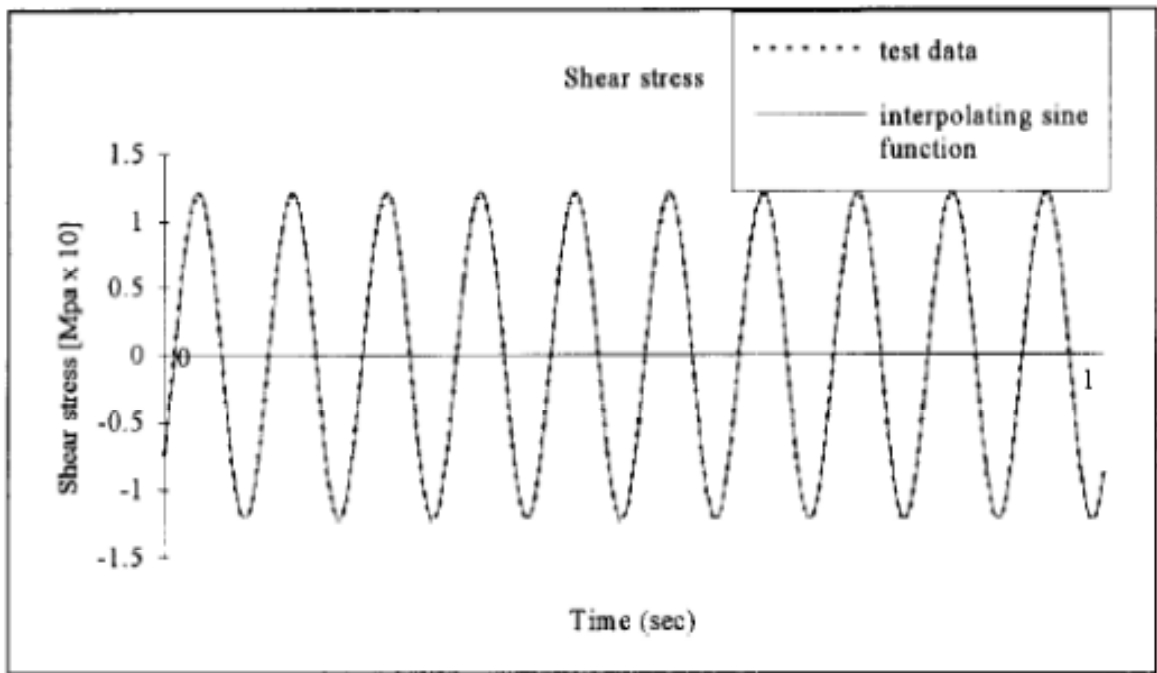
3.5.2. Aparatura do badania

Aby odtworzyć zjawiska interakcji między warstwami Crispino i inni [4] zaprojektowali specjalną aparaturę do badań. Urządzenie jest w stanie poddać dwuwarstwową próbkę obciążeniu skierowanemu równolegle do powierzchni związania międzywarstwowego. Sinusoidalne siły ścinające dostarczane są przez elektrycznie sterowane podłączenia do sprzętu wykonującego badania dynamiczne (INSTRON 8500). Pomiar bezwzględnego przemieszczenia pomiędzy warstwami prowadzony jest przez urządzenie LVDT, umieszczone w specjalnie zaprojektowanej lokalizacji i połączone do elektrycznie kontrolowanego systemu zbierania danych. Urządzenie umieszczone jest wewnątrz cyfrowo sterowanej termostatycznej komórki.

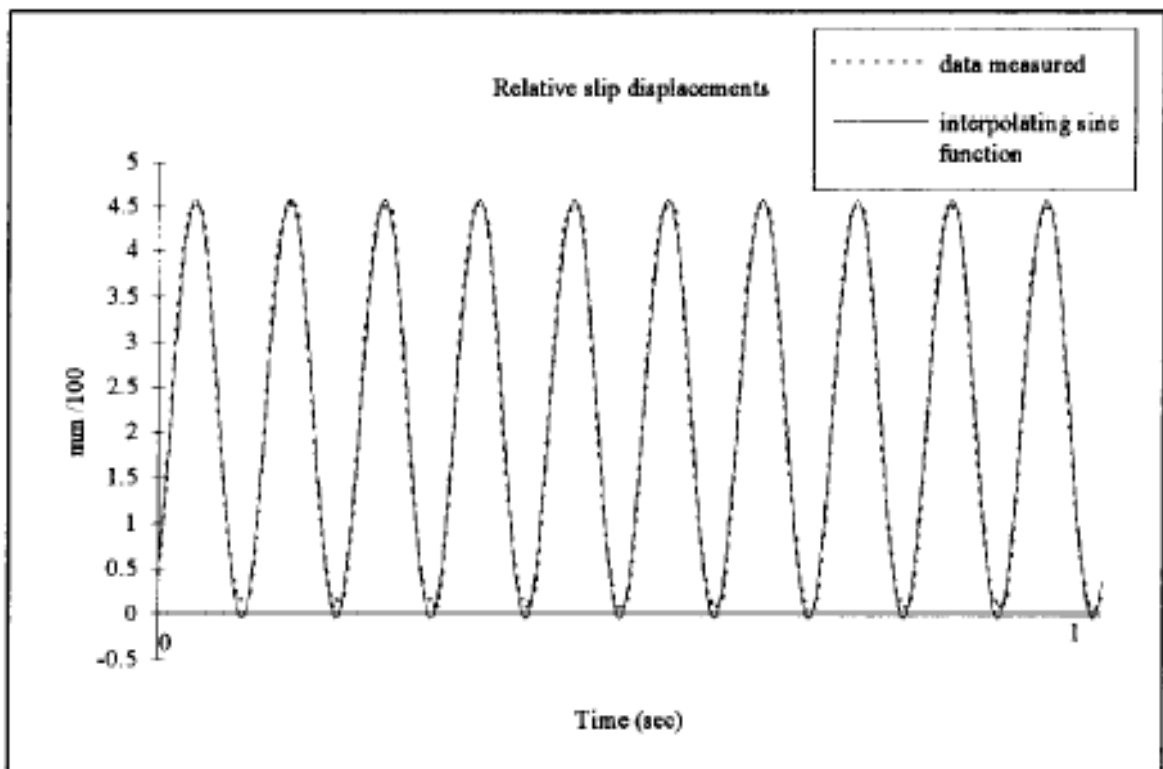
3.5.3. Metodologia badań

Procedura: przeprowadzono około 300 prób badania „na sucho”, w celu skalibrowania sprzętu i metody badań. Po testach ustalono:

- tryb testowy, typ funkcji obciążenia: sinusoidalna, amplituda i częstotliwość naprężeń ścinających osiągnana przez dynamiczny system badania (rys. 3.25.);
- deformacje w związaniu międzywarstwowym (monitorowane przez LVDT), z powodu względnego przesunięcia pomiędzy powierzchniami próbki, odzwierciedlają sinusoidalne zachowanie zgodnie z oczekiwaniami; sinusoidalne krzywe, wykreślone z uzyskanych danych są bardzo regularne, co potwierdza trafność tego badania (rys. 3.26.);
- wskazane jest przeprowadzenie około 100 cykli, aby usunąć początkową fazę przejściową, w której następuje osiadanie próbki;
- otwarcie termostatycznej komórki, w celu umiejscowienia próbki, wywołuje znaczne wahania temperatury; temperatura odgrywa fundamentalną rolę w zachowaniu próbki, dlatego przed rozpoczęciem badania należy osiągnąć jej odpowiednią wartość;
- parametr KI^* zależy od orientacji próbki (konsekwencja nieizotropowego zachowania próbki na styku dwóch warstw).



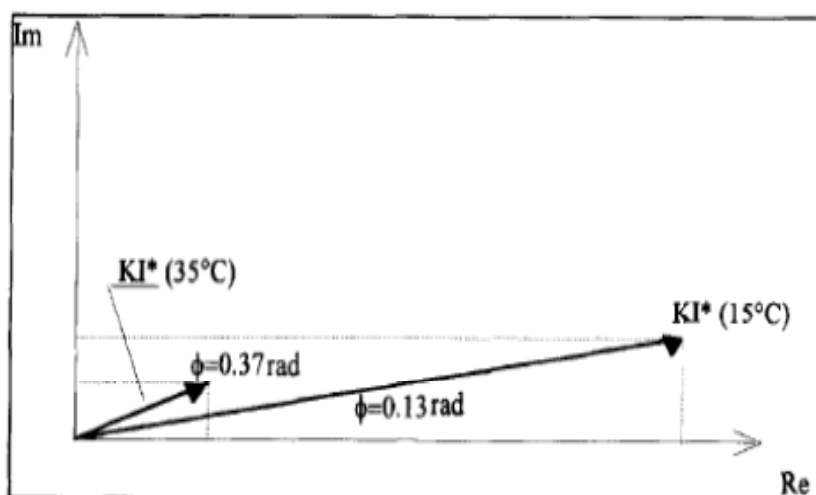
Rysunek 3.25. Przykład interpolacji naprężeń ścinających [4].



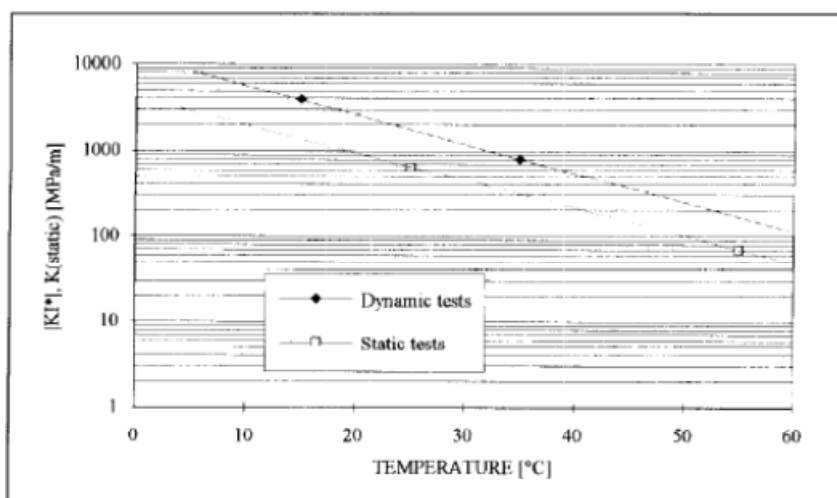
Rysunek 3.26. Przykład interpolacji względnych przemieszczeń wywołanych poślizgiem [4].

3.5.4. Moduł reakcji międzywarstwowej (aspekty ilościowe)

Po analizie niezawodności metody badania, ważnym okazuje się posiadanie wiedzy na temat ilościowych aspektów $|K_I^*|$ oraz o wpływie temperatury na ten parametr. W temperaturze 35°C średnia wartość $|K_I^*| = 817$ MPa/m, a średnia wartość kąta fazowego między obciążeniami a odkształceniem wynosi 0,37 rad. Porównując te wartości do $|K_I^*| = 3940$ MPa/m i kąta fazowego równego 0,13 rad (przy temperaturze 15°C) okazuje się, że temperatura ma istotny wpływ na połączenie międzywarstwowe (rys. 3.27). Wyjaśnia to wrażliwość temperaturowa lepiszcza bitumicznego. Wykres (rys. 3.28) przedstawia statyczne i dynamiczne wartości modułu $|K_I^*|$ w różnych temperaturach.



Rysunek 3.27. K_I^* i jego składowe osi rzeczywistej i urojonej w dwóch różnych temperaturach [4].



Rysunek 3.28. Wykres zależności dynamicznych i statycznych modułów reakcji międzywarstwowej od temperatury [4].

3.6. Model Oзера - niszczący model tarcia

3.6.1. Wprowadzenie

Dla opisu zachowania warstwy szczepnej zaproponowany model tarcia Oзера [20] opracowany został w oparciu o trzy ważne parametry: wytrzymałość na ścinanie, moduł reakcji połączenia międzywarstwowego oraz tarcie. Najważniejszą cechą tego modelu jest zdolność do przechwytywania całego zakresu reakcji połączenia międzywarstwowego od pełnego związania do jego całkowitego braku. Niszczący sprężysto-plastyczny konstytutywny związek został zrealizowany dla modelu tarcia. Brak szczepności, która może się pojawić w różnych trybach (czyste rozciąganie, czyste ścinanie, ścinanie z rozciąganiem, ścinanie ze ściskaniem) został sformułowany za pomocą nieliniowego, sprężysto-plastycznego konstytutywnego modelu. Naprężenie ścinające zależy od wytrzymałości związania międzywarstwowego na ścinanie i rozciąganie, ze względu na nierówności powierzchni badane są dwie właściwości tarcia w tym modelu. W rozdziale opisano kilka przykładów w celu zilustrowania szerokich możliwości modelu.

3.6.2. Metodologia i cel

Obecne modele związania międzywarstwowego w programie *ABAQUS* nie uwzględniają wpływu tarcia przy obliczaniu ścinania przesuwne. Z drugiej strony modele tarcia kontaktowego i modele poślizgu wstecznego (przesuwne) w programie *ABAQUS* mogą rozważać tarcie za pomocą modelu analogicznego do tego używanego do badania zachowań sprężysto-plastycznych. Jednak badania bezpośredniego ścinania wykazują, że wszystkie rodzaje związania międzywarstwowego doświadczają znacznego mięknięcia w fazie poszczytowej (*postpeak*). Stwierdzono, że konkretny model związania potrzebny jest do przechwytywania zachowań materiału. Dlatego też głównym celem tego badania było opracowanie modelu związania międzywarstwowego do scharakteryzowania jego reakcji w różnych warunkach obciążenia ze szczególnym uwzględnieniem tarcia. Kombinacje obciążeń mogą generować cztery stany naprężeń na styku warstw: czyste rozciąganie, czyste ścinanie (przesuwne), ścinanie ze ściskaniem i ścinanie z rozciąganiem.

Ozer [20] uznał model tarcia Mohra-Coulomba za podstawę i odpowiednio dostosował do potrzeb problemu. Model ten pozwala brać pod uwagę chropowatość powierzchni, która może spowodować odkształcenia objętościowe i określać zależności ciśnienia od powiązania międzywarstwowego.

Opracowane algorytmy zostały włączone do oprogramowania *ABAQUS* jako elementy użytkownika (*UEL*). Parametry połączenia między warstwami zostały zoptymalizowane przez badanie temperatury różnych materiałów klejących, ilości skropienia i normalnego ciśnienia na powierzchni styku.

3.6.3. Elementy związania miedzy warstwowego i realizacja MES

W ramach MES wdrożona została zerowa grubość związania międzywarstwowego. Dwu i trójwymiarowe parametry związania pokazane zostały na rys. 3.29. Klasyczna forma funkcji kształtu dla elementów liniowych została wykorzystana do sformułowania sztywności i wektora siły. Element został zintegrowany w powierzchni środkowej za pomocą 2 punktów (2D) oraz 4 punktów (3D). W przypadku pełnej szczepności naprężenia w związaniu międzywarstwowym przedstawiają wzory:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{nn} \\ \tau_{ns} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & 0 \\ 0 & k_{ns} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \delta u_n \\ \delta u_s \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{nn} \\ \tau_{ns} \\ \tau_{nt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & k_{ns} & 0 \\ 0 & 0 & k_{nt} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \delta u_n \\ \delta u_s \\ \delta u_t \end{Bmatrix}$$

gdzie:

n, s i t - normalne (n) i styczne (s i t) współrzędne dla rys. 3.29.,

σ_{nn} - normalne naprężenia,

T_{ns}, T_{nt} - naprężenia styczne,

k_{nn}, k_{ns}, k_{nt} - normalna i styczna sztywność,

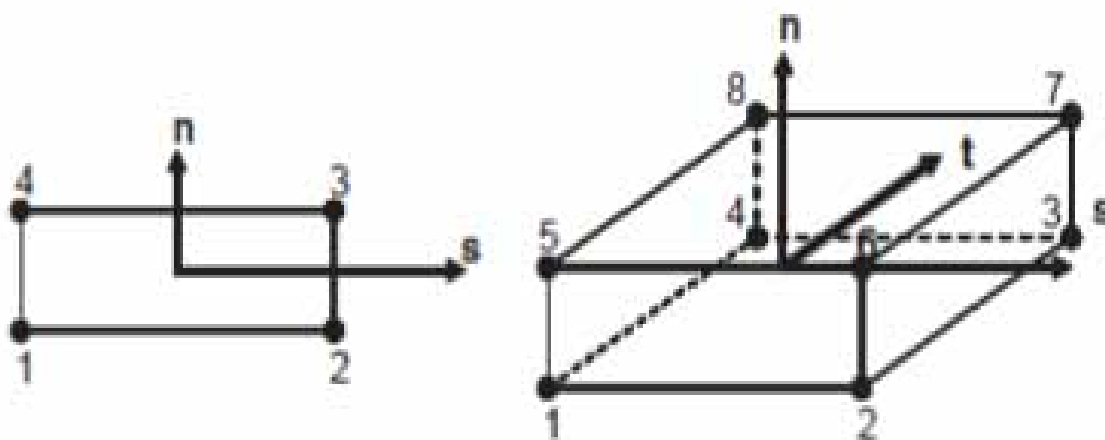
$\delta_{un}, \delta_{us}, \delta_{ut}$ - przemieszczenia przechodzące do związania międzywarstwowego.

Zasada pracy wirtualnej (δW) wyrażona jest (przy pomocy naprężeń) wzorem:

$$\delta W = \int_{\Omega} \varphi u_i (\rho \dot{v}_i - \rho b_i - \sigma_{ij,j}) d\Omega + \int_{\Gamma_t} \delta u_i (\sigma_{ij} n_j - \bar{t}_i) d\Gamma + \int_{\Gamma_c} (\delta u_i t_i) d\Gamma$$

gdzie:

σ - naprężenia, ρ - gęstość, \dot{v}_i - przyspieszenie (pochodna czasu od prędkości), Ω - dziedzina, b - siła masowa, δu_i - wektor przemieszczeń wirtualnych, Γ_t - granica naprężeń, Γ_c - granica powierzchni kontaktu.



Rys. 3.29. Liniowe elementy związania międzywarstwowego (2D i 3D) [20].

W porównaniu z istniejącymi numerycznymi zastosowaniami elementów związania międzywarstwowego, algorytmicznie zgodna sztywność styczna realizowana była w tym badaniu do wzmocnienia zbieżności z układem równań nieliniowych. Wymaga to obliczenia stycznej sztywności zgodnie z procedurami rozwiązywania globalnego systemu równań. Obliczenie stycznej sztywności i wektora siły zostało wykonane w każdej iteracji obciążeń za pomocą wzorów:

$$\mathbf{K}_{n+1}^{(i)} = \sum_{el=1}^{nnel} \left[\int_{\Gamma_c} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_{n+1}^{sp(i)} \mathbf{B} d\Gamma \right] \quad \text{and} \quad \mathbf{f}_{n+1}^{int(i)} = \sum_{el=1}^{nnel} \left[\int_{\Gamma_c} \mathbf{B}^T \mathbf{t}_{n+1}^{(i)} d\Gamma \right]$$

gdzie:

el - element związania międzywarstwowego,

$nnel$ - całkowita ilość elementów związania międzywarstwowego,

D^{ep} - algorytmicznie zgodny styczny operator,

B - macierz odkształceń-przemieszczeń,

T - transpozycja ilości wektorów,

t - trakcja w związku międzywarstwowym,

$K_{n+1}^{(i)}$ - macierz sztywności elementu związku (dla przyrostu obciążenia),

$f_{n+1}^{int(i)}$ - wewnętrzny wektor siły.

3.6.4. Konstytutywny model związku międzywarstwowego

Zachowanie związku międzywarstwowego zostało sformułowane w kategoriach stycznych i normalnych naprężeń w płaszczyźnie tego związku za pomocą podstawowych teorii tarcia. Zachowanie to jest zdolne do przechwytywania początkowo sprężystych reakcji, gdy brak jest związku międzywarstwowego. W celu wdrożenia procesu osłabiania braku związku wprowadzono funkcję wydajności (F):

$$F = \tau_{eq}^2 - (c - \sigma_{nn} * \tan \phi)^2 + (c - s * \tan \phi)^2$$

gdzie:

τ_{ep} - zastępcze naprężenie styczne,

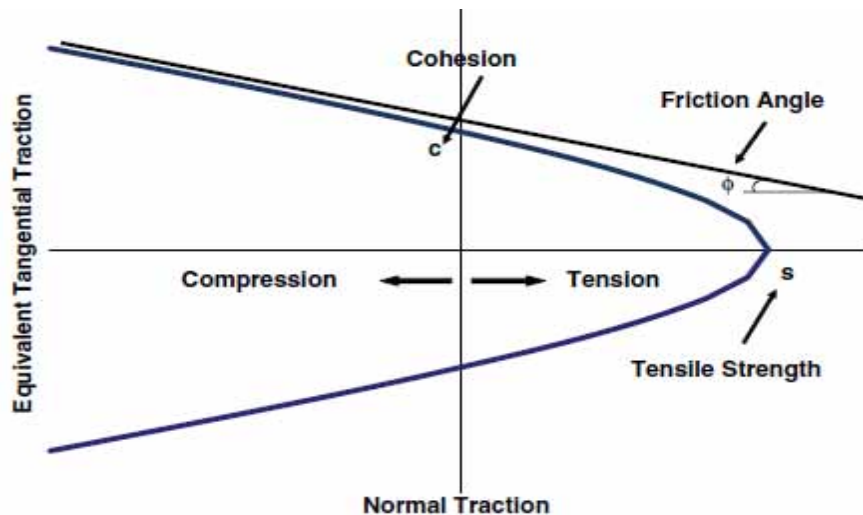
σ_{nn} - naprężenie normalne,

s - wytrzymałość na rozciąganie,

c - kohezja,

ϕ - kąt tarcia.

Rysunek 3.30. przedstawia wydajność powierzchni i podstawowe parametry określające powierzchnię. Definicja hiperbolicznej wydajności powierzchni zgodna jest z zał. Zienkiewicza [35].

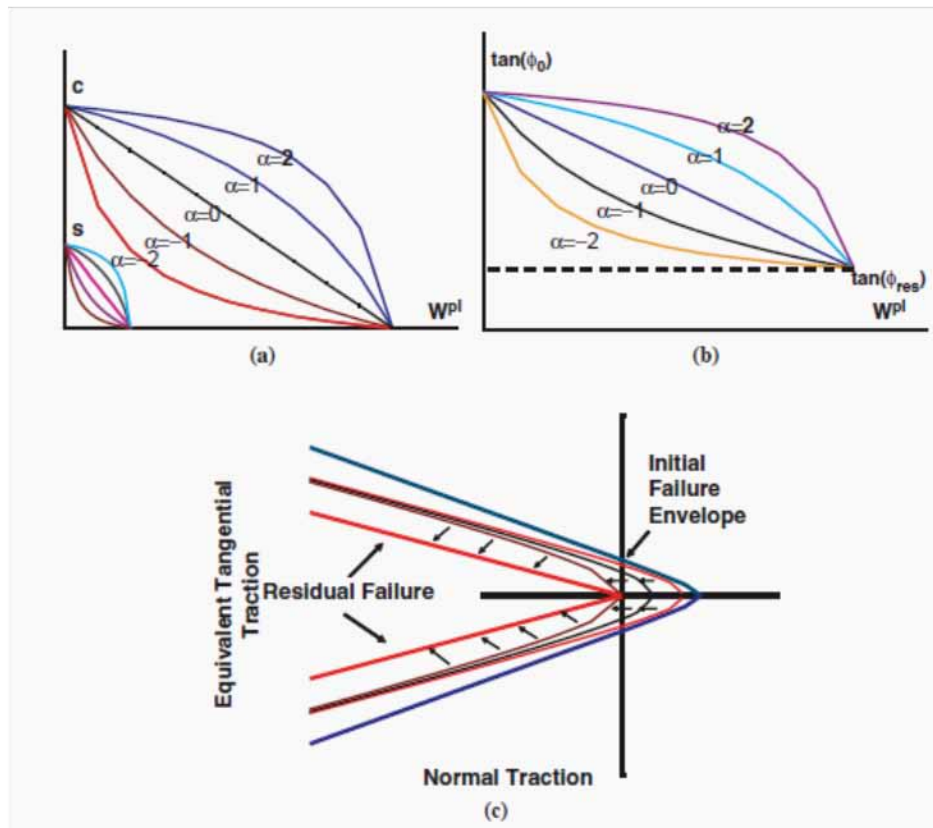


Rysunek 3.30. Hiperboliczna wydajność powierzchni [20]

3.6.5. Mechanizm pięknienia związania (utrata szczepności)

Degradacja wytrzymałości powiązania została określona za pomocą niszczącego mięknięcia i zintegrowana jako algorytm plastyczności. Ta procedura wyjaśnia mechanizm utraty szczepności w połączeniu trybów ścinania i rozciągania. Dołączony do modelu obliczeniowego mechanizm mięknięcia pozwala modelować utratę szczepności w różnych trybach (tryb I, tryb II, tryb mieszany). Mechanizm pokazano na rys. 3.31.

Zgodnie z przedstawionymi zasadami mięknięcia, degradacja wytrzymałości występuje w postaci funkcji wykładniczej energii mięknięcia i prac uplastycznienia związania międzywarstwowego. Mięknięcie (*softening*) określić można jako funkcję wykładniczą rozkładu pracy i energii zniszczenia. Plastyczność o nieliniowym mięknięciu lub twardnieniu zwiększa trudności w pozyskiwaniu równań, ale jednocześnie zapewnia podatność modelu poprzez przechwytywanie rozkładu sił z dużo większą dokładnością.



Rysunek 3.31. Główne mechanizmy zniszczenia powierzchni związania międzywarstwowego [20].

Zasady mięknienia (osłabienia) pokazane na rys. 3.31 ukazują następujące zależności:

$$\tan \phi = \tan \phi_0 - (\tan \phi_0 - \tan \phi_r) * S_\phi \left(\frac{W^{pl}}{G_f^{II}} \right)$$

$$c = c_0 \left[1 - S_c \left(\frac{W^{pl}}{G_f^{II}} \right) \right] \quad \text{and} \quad s = s_0 \left[1 - S_s \left(\frac{W^{pl}}{G_f^{II}} \right) \right]$$

gdzie:

S - funkcja skalowania,

G_f^I , G_f^{II} - energia zniszczenia, odpowiednio w trybie I i II,

ϕ_0 - początkowy kąt tarcia,

ϕ_r - pozostały kąt tarcia,

c_0 - początkowa kohezja,

s_0 - początkowa wytrzymałość na rozciąganie,

α - parametr skali, który kontroluje szybkość rozkładu,

W^{pl} - praca (uplastycznienie) wykonana nad związaniem międzywarstwowym.

Zgodnie z zasadami mięknięcia (osłabienia), mechanizm utraty szczepności rys. 3.31c, można wyjaśnić następująco:

- 1) całkowita energia rozproszona (pochodząca od pracy uplastycznienia powiązania) przechodzi do procesu zniszczenia, gdy związanie między warstwami jest rozciągane. Całkowita degradacja wytrzymałości na rozciąganie jest osiągnięta, gdy praca uplastycznienia jest równa energii zniszczenia w trybie rozciągania ($W^{pl}=G_f^I$). Mechanizm ten pokazany jest na rys. 3.31 (transpozycja powłoki zniszczenia w kierunku źródła, jak pokazują strzałki);
- 2) podczas ściskania rozproszona energia odejmowana jest jak proste tarcie. Po pierwsze wytrzymałość na rozciąganie jest w pełni zdegradowana, gdy $W^{pl}=G_f^I$, następnie z dalszej pracy pozostały stan wytrzymałości został osiągnięty, gdy $W^{pl}=G_f^{II}$. W pozostałych stanach wytrzymałości kohezja = 0, a kąt tarcia zmniejsza się przy założeniu, że chropowatość ulega rozkładowi podczas ścinania. Pod względem zniszczenia powierzchni (rys. 3.31.) początkowe zniszczenie transponuje się do pozostałych powłok.

3.6.6. Wskaźnik plastyczności

Klasyczne równanie sprężysto-plastyczne Ozer [20] wdrożył do określenia naprężeń i przemieszczeń w związaniu międzywarstwowym. Koncepcję tę podzielić można na sprężyste i plastyczne skoki przemieszczeń

$$d\delta u = d\delta u^e + d\delta u^{pl} = d \begin{Bmatrix} \delta u_{nn} \\ \delta u_{nr} \\ \delta u_{nr} \end{Bmatrix}^e + d \begin{Bmatrix} \delta u_{nn} \\ \delta u_{nr} \\ \delta u_{nr} \end{Bmatrix}^{pl}$$

Zachodzi związek:

$$\dot{\sigma} = D * (\delta \dot{u} - \delta \dot{u}^{pl})$$

gdzie:

D - jest macierzą sztywności sprężystej związania między warstwami,

$\dot{\sigma}, \delta \dot{u}$ - to odpowiednio pochodna w czasie przyczepności i przemieszczeń w związaniu.

Równanie poniżej wyraża plastyczną część skoków przemieszczeń

$$d\bar{\delta}u^{\text{pl}} = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma} = d\lambda \begin{Bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{nn}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{\tau\tau}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{\tau n}} \end{Bmatrix}$$

gdzie:

λ - mnożnik plastyczności,

Q - potencjalna powierzchnia zdefiniowana niezależnie od powierzchni zniszczenia.

$$\begin{aligned} dF(\sigma, q) &= \frac{\partial F^r}{\partial \sigma} \\ d\sigma + \frac{\partial F^r}{\partial q} \\ dq &= 0 \end{aligned}$$

gdzie:

q - zestaw zmiennych określających ewolucję parametrów wytrzymałościowych związania

$$dq = \begin{Bmatrix} ds \\ dc \\ d\phi \end{Bmatrix}$$

Warunkiem spójności z równania powyżej musi być odnalezienie przyrostu mnożnika plastyczności ($d\lambda$). Oznacza to, że naprężenie w związaniu międzywarstwowym powinno być na lub wewnątrz powierzchni.

Wewnętrzny stan zmiennych można określić też w następujący sposób:

$$dq = h d\lambda$$

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial F^r}{\partial \sigma} \mathbf{D} d\delta \mathbf{u}}{\frac{\partial F^r}{\partial \sigma} \mathbf{D} \frac{\partial Q}{\partial \sigma} - \frac{\partial F^r}{\partial q} h}$$

$$\mathbf{D}^* = \mathbf{D} - \frac{\left(\mathbf{D} \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right) \otimes \left(\frac{\partial F^r}{\partial \sigma} \mathbf{D} \right)}{-\frac{\partial F^r}{\partial q} h + \frac{\partial F^r}{\partial \sigma} \mathbf{D} \frac{\partial Q}{\partial \sigma}}$$

gdzie:

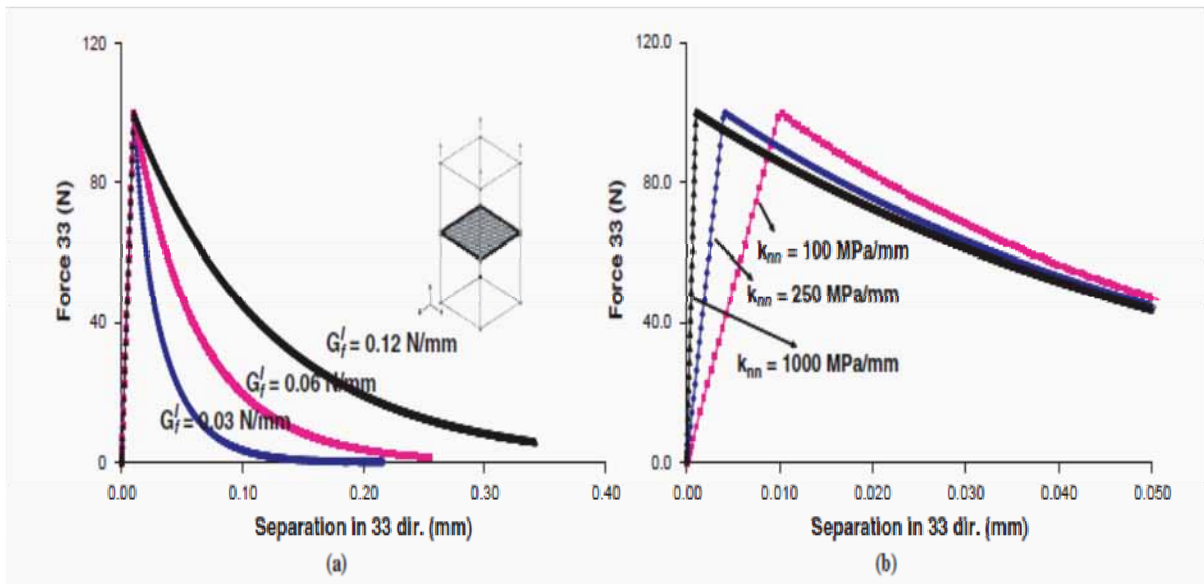
D - macierz sztywności elastycznego związania,

h - moduł stwardnienia.

Ważne jest jednak, aby pamiętać, że istnieją ciągłe definicje mnożnika plastyczności i modułów sprężysto-plastycznych, które uzyskano przez zastosowanie pochodnej powierzchni wydajności, funkcji potencjału i modułów.

3.6.7. Wyniki obliczeń

W celu zbadania wrażliwości modelu związania międzywarstwowego na zmianę jego parametrów, model 3D związania został wstawiony pomiędzy dwa ciągle 3D elementy z cegły. Model został poddany sile rozciągającej, tym samym generując zniszczenie jedynie w trybie rozciągania (tryb I). Przykład ten pokazuje zdolność modelu do symulacji procesów utraty szczepności w trybie I. Jak pokazano na rys. 3.32. model związania międzywarstwowego może z powodzeniem symulować utratę szczepności przez tryb separacji (rozciąganie pod wpływem obciążenia). Rysunek 3.32.a pokazuje, że energia zniszczenia związania wzrasta wraz ze wzrostem powierzchni pod krzywą siła- przemieszczenie (tzn. że zachowuje się bardziej plastycznie). Rysunek 3.32.b pokazuje wrażliwość modelu na zmianę sztywności (sprężystej). Oznacza to, że, gdy zmniejsza się sztywność związania początkowe nachylenie krzywej siła- przemieszczenie również maleje.



Rysunek 3.32. Wrażliwość modelu związania międzywarstwowego a) na energię zniszczenia, b) normalną sztywność związania [20].

3.6.8. Związanie międzywarstwowo MMA – MMA

Parametry tego modelu zostały zoptymalizowane przez dopasowanie eksperymentalnych wyników z symulacji 2D modelu odkształceń związania między warstwami. Przeprowadzono testy bezpośredniego ścinania by określić wpływ temperatury i ciśnienia na wytrzymałość związania między warstwami na ścinanie. Kohezja i kąt tarcia (rys. 3.31.) są parametrami wydajności powierzchni, które mogą być określone bezpośrednio z testu ścinania. Jednak testy *pull-out* są również niezbędne do określenia wytrzymałości na rozciąganie. Ponieważ dane do testu *pull-out* nie są zwykle łatwo dostępne, zakłada się, że wytrzymałość na rozciąganie jest równa kohezji.

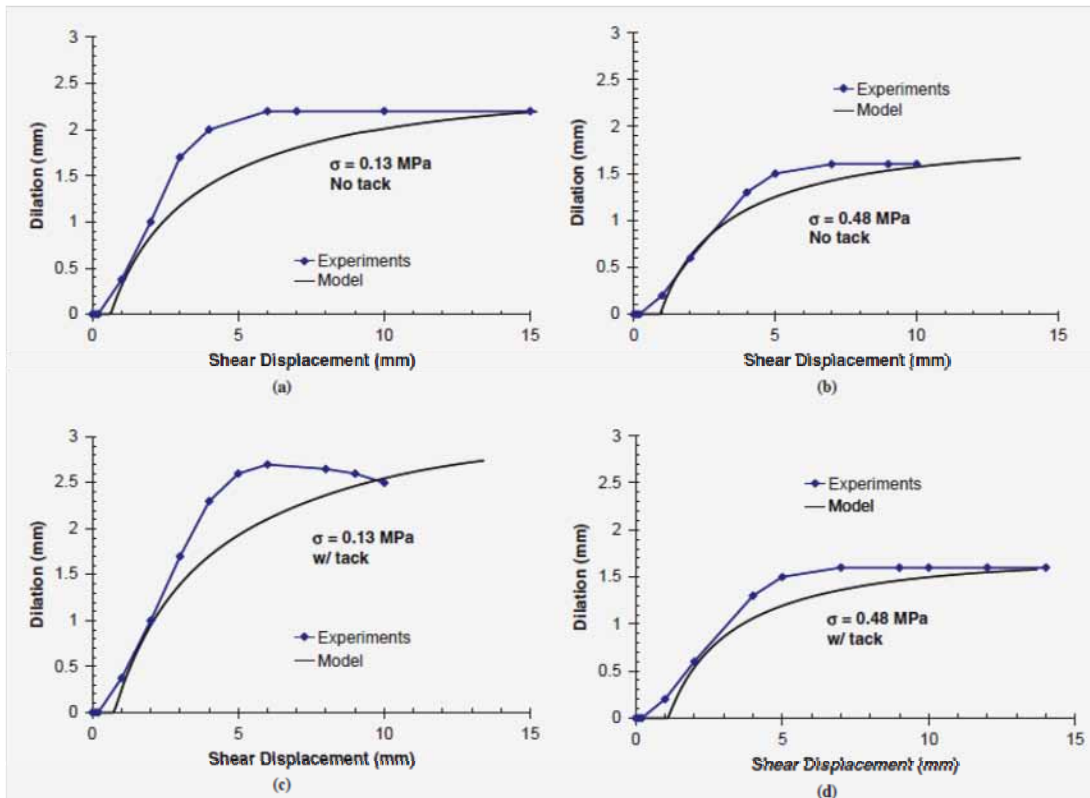
Parametry badanego modelu przedstawiono w tab. 3.4. Niektóre z nich pochodzą z poprzednich badań. Wszelkie odchylenia od oczekiwanych wartości mogą być spowodowane nieznanymi właściwościami materiału. Odchylenia te jednak uznane są za dopuszczalne.

Tablica 3.4. Właściwości związania międzywarstwowego zastosowanego w modelu [20].

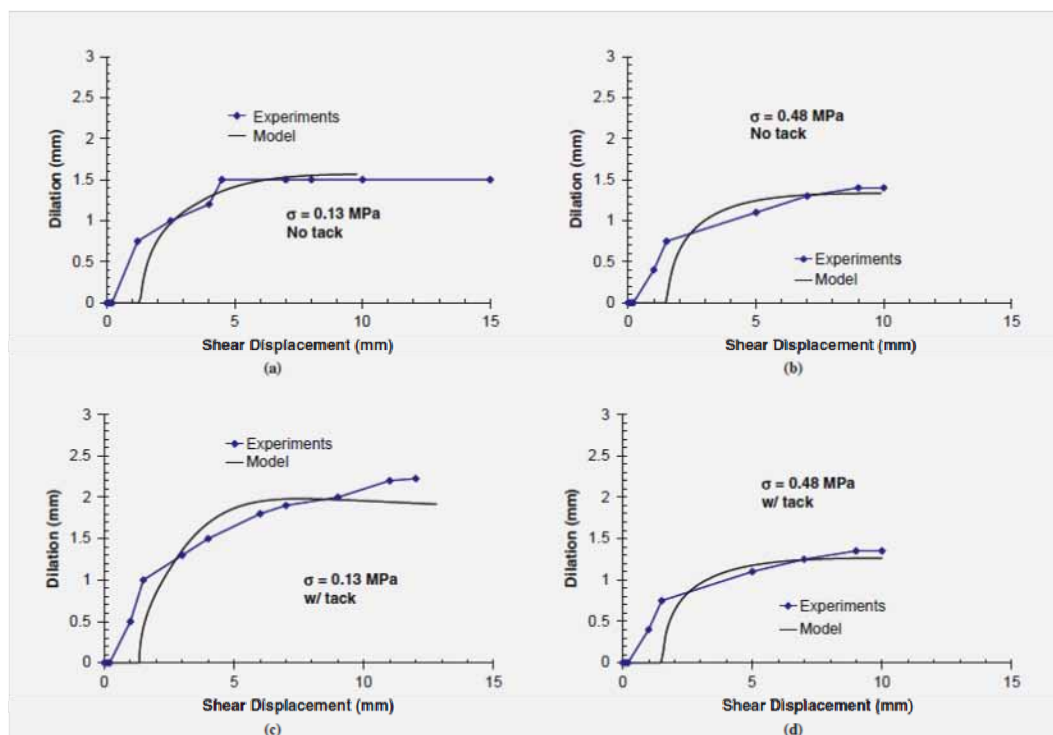
Temperature (°C)	Emulsion (kg/m ³)	Friction Angle	Residual Friction Angle	G' and G'' (N/mm)	Tensile Strength (MPa)	Cohesion (MPa)
12.5	0	41.5	35	2.4 and 3.1	0.5	0.5
12.5	0.5	45.4	35	2.5 and 3.3	0.6	0.6
-2.5	0	40.0	35	2.4 and 2.9	1.8	1.8
-2.5	0.5	32.7	30	2.0 and 2.5	2.0	2.0

NOTE: 1 MPa = 145.0377 psi; 1 N = 0.22448 lbf; 1 kg/m³ = 0.2209 gal/yd³.

Jedną z głównych cech tego modelu jest możliwość przewidywania objętościowego odkształcenia. Rysunki 3.33 i 3.34 przedstawiają wyniki numerycznego rozszerzenia w porównaniu z eksperymentalnymi pomiarami uzyskanymi w temp. 12,5°C i -2,5°C. Wielkość rozciągania maleje wraz ze wzrostem normalnego ciśnienia. Gdy naprężenie ścinające związania osiągnie max, spada do stosunkowo małej wartości. Podczas tego spadku związanie międzywarstwowe zaczyna się rozwijać i wreszcie dociera do wartości krytycznej, przy której nie występują już odkształcenia objętościowe.



Rysunek 3.33. Porównanie rozszerzeń przewidywanych i mierzonych w temperaturze 12°C i dwóch ciśnieniach normalnych [20].



Rysunek 3.34. Porównanie rozszerzeń przewidywanych i mierzonych w temperaturze $-2,5^{\circ}\text{C}$ i dwóch ciśnieniach normalnych [20].

3.7. Model Al-Hakima - obliczenia odwrotne na podstawie analiz FWD

3.7.1. Analizy wrażliwości

Przeanalizowano cztery typy konstrukcji o różnych sztywnościach warstw (E) – tab.3.5. Założono grubość warstwy bitumicznej równą 300 mm, grubość podbudowy równą 400 mm oraz podłoże o nieskończonej grubości. Dla każdej konstrukcji nawierzchni sztywność związania międzywarstwowego (K_{S1}) na głębokości 100 mm od powierzchni konstrukcji zmienia się stopniowo od 10^{-3} MN/m³ do 10^9 MN/m³, obliczono też ugięcia powierzchni nawierzchni. Rysunek 3.35. przedstawia ugięcia w centrum obciążenia ($d_{0,0}$), a także na długości radialnej 600 mm ($d_{0,6}$) i 1500 mm ($d_{1,5}$) dla każdej nawierzchni.

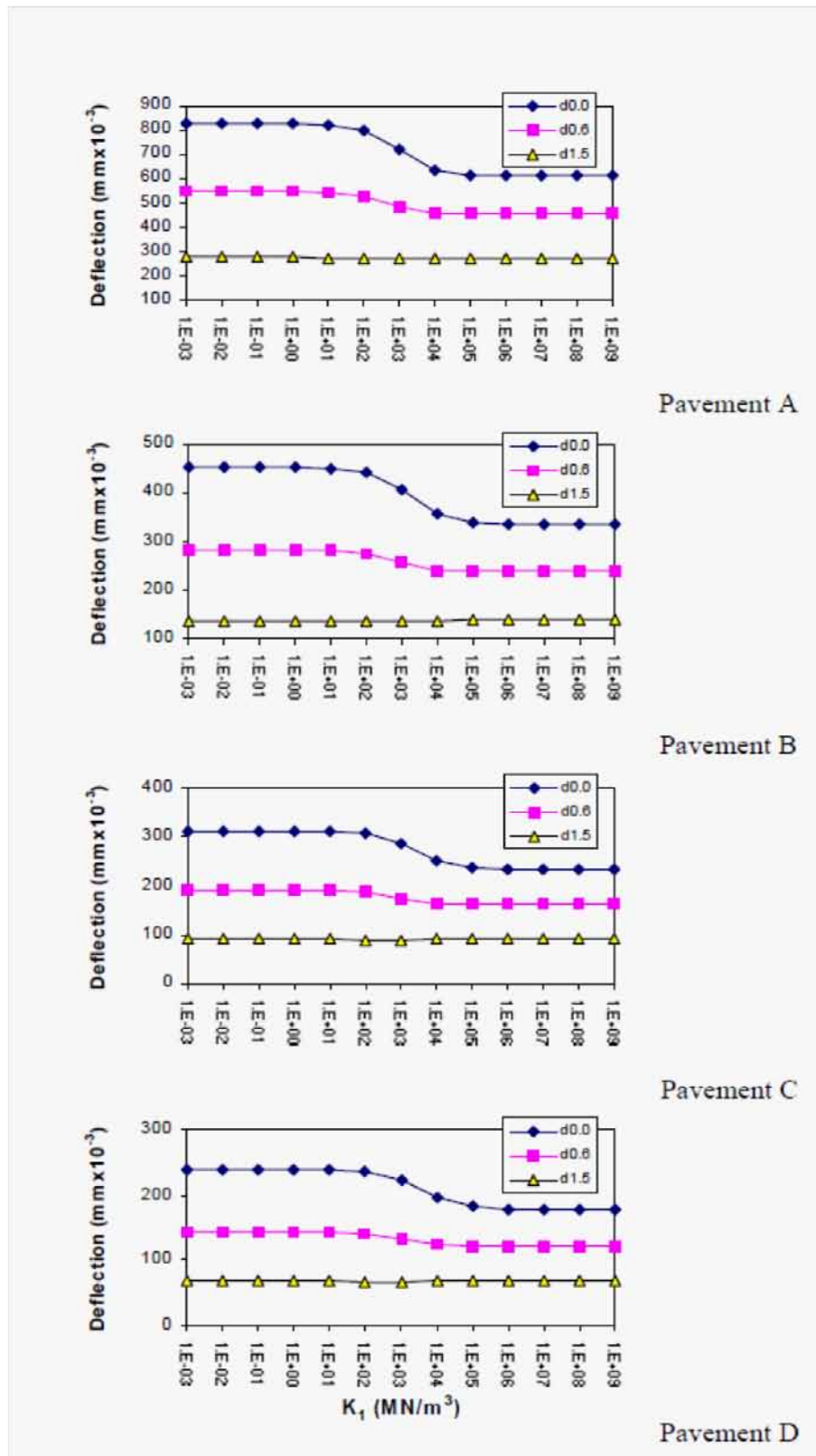
Tablica 3.5. Hipotetyczne sztywności warstw nawierzchni [1].

Pavement	Layer Stiffness (MN/m ²)		
	Bituminous	Sub-base	Subgrade
A	4000	100	50
B	6000	200	100
C	8000	300	150
D	10000	400	200

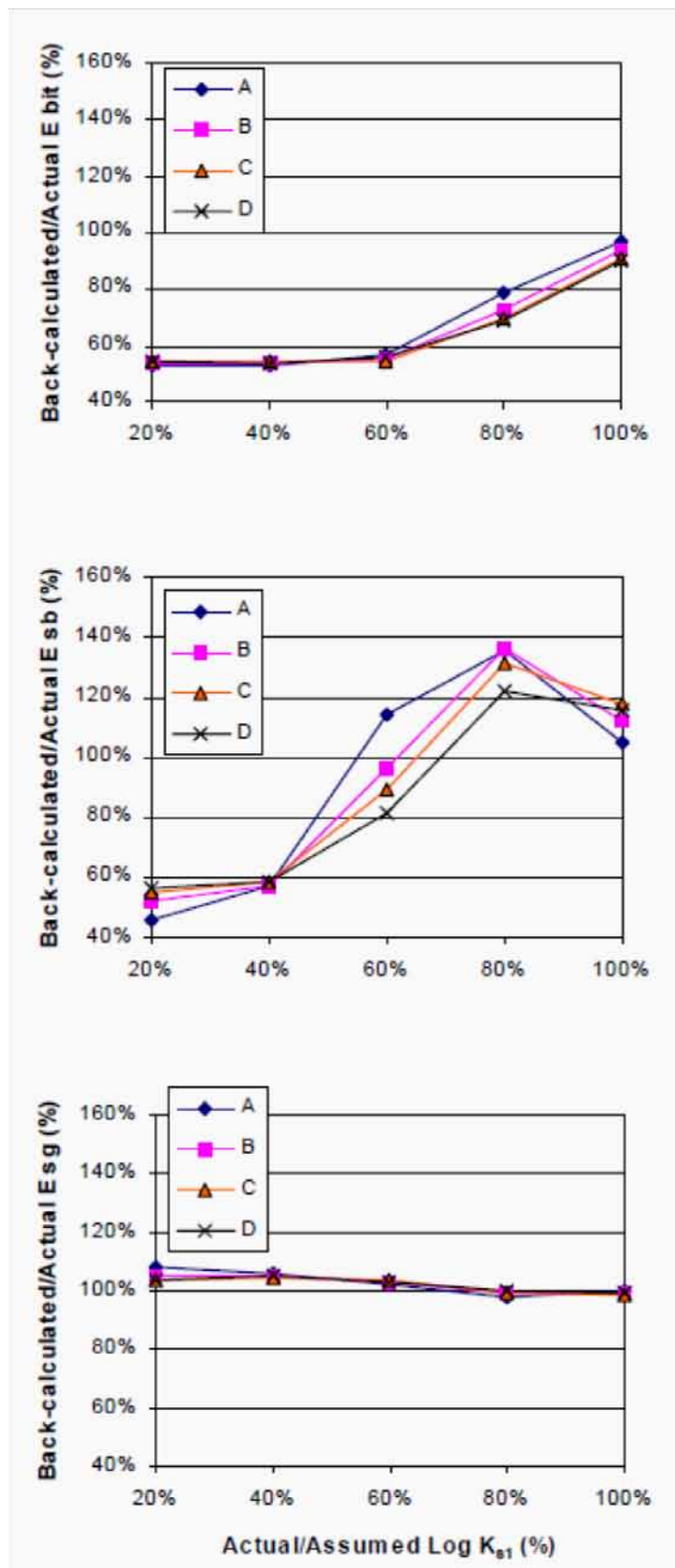
Rysunek 3.35. pokazuje, że:

- wartości K_{S1} mniejsze niż 10MN/m^3 można uznać jako całkowity brak szczepności, natomiast, gdy K_{S1} jest większe od 10^5MN/m^3 zakładać można pełną szczepność międzywarstwową. Pomiędzy tymi wartościami zachodzą ogromne różnice w reakcjach nawierzchni od ugięć w pobliżu obciążenia.
- K_{S1} ma duży wpływ na ugięcia w pobliżu centrum obciążenia, natomiast mały na ugięcia poza tym obszarem;
- im mocniejsza jest cała konstrukcja, tym mniejszy jest wpływ sztywności związania międzywarstwowego na ugięcia powierzchni.

Hipotetyczne czasy ugięć opracowane dla każdej konstrukcji, uwzględniając różne wartości sztywności związania, uznane zostały za te pomierzone za pomocą testów FWD. Dane te wprowadzono do programu *PADAL* w celu obliczeń odwrotnych sztywności trzech warstw konstrukcji, przy założeniu pełnej szczepności międzywarstwowej. Spodziewano się, że sztywności obliczone metodą odwrotną zawierać będą błędy związane z modelowaniem sztywności związania (takie jak zakładanie pełnej szczepności, podczas gdy takowa w rzeczywistości nie zachodzi). Rysunek 3.36. przedstawia stosunek sztywności warstwy rzeczywistych i tych obliczonych metoda odwrotną do rzeczywistych i przewidywanych sztywności związania.



Rysunek 3.35. Wpływ warunków szczepności na ugięcia nawierzchni [1].



Rysunek 3.36. Wpływ warunków szczepności na sztywności obliczone metodą obliczeń odwrotnych [1].

Rysunek 3.36, pokazuje, że wskaźnik sztywności warstw bitumicznych i podbudowy zmienia się nawet o 50% ze względu na błędy w modelowaniu sztywności związania. Nie zauważono jednak istotnego wpływu braku związania warstw bitumicznych na sztywność podłoża.

3.7.2. Nowa metoda obliczeń odwrotnych

Do obliczeń odwrotnych przyjęto prostą analizę statyczną nawierzchni. Konstrukcję traktuje się jako liniowo-sprężystą. Oprócz sztywności związania międzywarstwowego, metodą obliczeń odwrotnych obliczane są też sztywności poszczególnych warstw, wykorzystując przy tym czasie ugięć.

W pierwszym etapie baza danych ugięć zbudowana jest na podstawie kombinacji sztywności warstw (E) przy założeniu stałej sztywności związania (K_{S1}). Następnie przeprowadza się analizę wielokrotnej regresji dla najlepszych wzorów na sztywność (zmienna zależna) oraz ugięcia (zmiennie niezależne). Modele z najlepszych korelacji stosowane są do obliczania sztywności warstw.

Drugi etap polega na rozwoju innej bazy danych ugięć, powstałej z wykorzystaniem sztywności wyższych warstw, niezależnej od danych z pierwszego etapu. Sztywność związania międzywarstwowego waha się od pełnego poślizgu do pełnej szepności (10MN/m^3 - 10^5MN/m^3). Sztywności dolnych warstw są stałe (obliczone w pierwszym etapie). Analizie poddana zostaje czasza ugięć, sztywność nawierzchni oraz grubość warstw.

Sztywności niższych warstw wyznaczone w pierwszym etapie wraz ze sztywnościami górnych warstw z drugiego etapu, to wartości z metody obliczeń odwrotnych dla każdej czaszy ugięć.

3.7.3. Przykład obliczeniowy

Wykorzystując badania FWD, kontroli jakości poddano kilka nowo wybudowanych konstrukcji nawierzchni. Dodatkowo pobrano próbki nawierzchni, na których przeprowadzono badania sztywności pośredniego ścinania.

Konstrukcje nawierzchni podzielone zostały na kilka sekcji, według szczegółów konstrukcji i profilów ugięć (tab.3.6.). Analizie poddane zostały konstrukcje zbudowane z dwóch warstw bitumicznych o średniej grubości 100mm i 140mm, podbudowy o grubości 500mm. W sekcjach G, H, I, K, L i N grubość dolnej warstwy bitumicznej wyniosła 210mm.

Tablica 3.6. Zestawienie badanych sekcji [1].

Section	Lane	Pavement temperature during FWD testing (°C)		Core No. Within the section	Average NAT stiffness @ 20°C for each section (MN/m ²)
		1 st Visit	2 nd Visit		
A	1	5	15	1*, 2*, 3	11800
B	1	5	16	-	-
C	2	5	16	4*, 5*, 6*	9900
D	2	5	17	-	-
E	1	6	16	7*	-
F	1	6	16	8	4000
G	1	6	16	9*	4200
H	1	6	17	-	-
I	1	8	11	-	-
J	1	8	11	10*	11000
K	1	8	10	11*	5400
L	2	8	10	-	-
M	2	8	11	12*, 13*	7300
N	2	8	11	-	-

Program *PADAL* wykorzystany został do obliczania czaszy ugięć metodą obliczeń odwrotnych, przy założeniu pełnej szczepności między warstwami bitumicznymi. Wartości sztywności przedstawione zostały w tab. 3.7.

Tablica 3.7. Zestawienie właściwości nawierzchni obliczonych w programie PADAL i nową metodą obliczeń odwrotnych [1].

Section	PADAL			New Method			
	E_{Bit} (MN/m ²)	E_{SB} (MN/m ²)	E_{SG} (MN/m ²)	K_{s1} (MN/m ³)	E_{Bit} (MN/m ²)	E_{SB} (MN/m ²)	E_{SG} (MN/m ²)
A	3900	80	140	20	12100	85	145
B	12000	160	130	450	19400	60	125
C	4500	70	110	10	18900	75	110
D	13000	160	160	2400	20000	50	160
E	2600	70	200	10	8700	130	210
F	12000	90	180	200	18000	60	180
G	4600	80	110	10	11000	90	110
H	9700	130	160	2000	18000	150	165
I	9000	70	130	300	19100	140	135
J	4200	70	200	50	13700	110	225
K	5100	50	250	10	18600	180	250
L	14000	140	160	700	20000	95	165
M	5500	85	210	140	16800	100	210
N	11000	90	140	10	20000	120	140

W wielu sekcjach spodziewano się słabego związania między warstwami bitumicznymi z powodu:

- wartości sztywności z obliczeń odwrotnej są niższe niż oczekiwane dla materiałów badanych w temperaturze od 5°C do 8°C;
- zauważono brak szczepności przy wydobywaniu próbek.

Zbyt niskie wartości sztywności mogą być spowodowane złym modelowaniem konstrukcji (np. zakładanie pełnej szczepności). Uważa się, że poślizg (brak szczepności) warstw bitumicznych spowodowany był rozkładaniem mieszanki w niskiej temperaturze, na źle zagęszczonej warstwie istniejącej.

Nowa metoda obliczeń odwrotnych wykorzystywana jest do obliczania sztywności związania międzywarstwowego, jako parametru (obok sztywności warstwy) konstrukcji nawierzchni. Parametry obliczone metodą obliczeń odwrotnych przedstawia tab.3.7.

Tabela 3.7. przedstawia różne wartości sztywności związania międzywarstwowego dla poszczególnych sekcji, zaczynając od słabych warunków związania do tych pośrednich. Pokazano również sztywności

materiałów bitumicznych obliczone w programie PADAL. Z tabeli wynika też, że sztywności podbudowy (z obliczeń odwrotnych) są często niższe niż sztywności podłoża. Prawdopodobnie jest to spowodowane dużą wilgotnością i złym zagęszczeniem podbudowy. Na miejscu stwierdzono, iż badana konstrukcja posiada zły system odwodnienia.

W kilku miejscach wartości sztywności podbudowy znacznie różniły się dla dwóch metod. Może być to spowodowane różnymi technikami dopasowywania ugięć lub modelowania szczepności. Rysunek 3.36. pokazuje, że sztywność podbudowy może być niższa niż przewidywana, gdy założymy pełny poślizg, a wyższa przy założeniu pełnej szczepności.

3.7.4. Wpływ obciążenia ruchem, temperatury i wieku konstrukcji na sztywność związania międzywarstwowego

W celu zbadania wpływu temperatury, starzenia się konstrukcji i obciążenia ruchem na sztywność związania międzywarstwowego ta sama konstrukcja (opisana w poprzednim podrozdziale) zbadana była po upływie 6 miesięcy.

Zanotowano wyższe temperatury nawierzchni niż pół roku wcześniej, a więc uzyskano niższe sztywności warstw bitumicznych. W niektórych sekcjach sztywności podbudowy różniły się od tych z pierwszego badania. Prawdopodobną przyczyną różnic było poprawienie w ostatnich miesiącach systemu odwodnienia i lepsze zagęszczenie materiałów pod wpływem ruchu. Tabela 3.10. kategoryzuje różne sekcje w zakresie zmienności parametrów pomiędzy dwoma badaniami.

Z tab. 3.7 i tab. 3.10 wynika, że:

- kombinacja obciążenia ruchem i wyższa temperatura poprawia sztywność związania;
- wyższa temp. badania może wywoływać lepszą szczepność (sekcja C, i D);
- ruch poprawia szczepność między warstwami bitumicznymi (sekcja I i J);
- wiek konstrukcji nie pogarsza szczepności (sekcja L, M i N).

Tab. 3.10. Zestawienie właściwości nawierzchni obliczonych w programie PADAL i nową metodą obliczeń odwrotnych (po 6 miesiącach) [1].

Section	PADAL			K_{SJ} (MN/m ³)	New Method		
	E_{Bir} (MN/m ²)	E_{SB} (MN/m ²)	E_{SC} (MN/m ²)		E_{Bir} (MN/m ²)	E_{SB} (MN/m ²)	E_{SC} (MN/m ²)
A	3900	80	140	190	11300	100	135
B	9400	130	100	100000	13500	60	100
C	3500	70	120	50	12100	100	115
D	8700	120	110	6000	16700	60	115
E	3100	80	220	10	13500	200	210
F	11000	70	230	10000	12900	100	230
G	4800	60	110	190	12700	65	110
H	8400	100	110	100000	8700	160	115
I	13000	120	130	10000	11300	145	135
J	4500	60	200	160	14100	80	210
K	5900	50	270	10	14500	60	265
L	6500	70	240	10	13500	105	245
M	4800	70	170	280	14300	85	165
N	8800	80	170	10	19200	60	170

3.8. Model Romanoschi i Metcalf- zastosowanie MES, modelowanie w programie ABAQUS

3.8.1. Badanie ścinania przy normalnym obciążeniu

Według Divakar'a [6] najlepsze dane do stworzenia makroskopowego modelu konstytutywnego daje test ścinania przy stałym obciążeniu. W tym przypadku, dzięki założeniu stałego obciążenia, niwelowany jest wpływ wspólnego działania naprężeń.

Badaniu ścinania poddane zostało związanie pomiędzy warstwami asfaltowymi. Z nawierzchni wybudowanej na potrzeby badań w Louisianie pobrano cylindryczne próbki o średnicy 95 mm. Badania na pełną skalę wykonano na 9 jednakowych konstrukcjach (40 mm warstwy ścieralnej, 50 mm warstwy wiążącej, warstwy połączono skropiono, na końcach pasów brak skropienia) o dwóch rodzajach związania międzywarstwowego. Przeprowadzono badania ścinania przy stałym obciążeniu, podczas którego na związanie działa ścinanie (siła pozioma) oraz normalny nacisk (siła pionowa). Urządzenie do badania

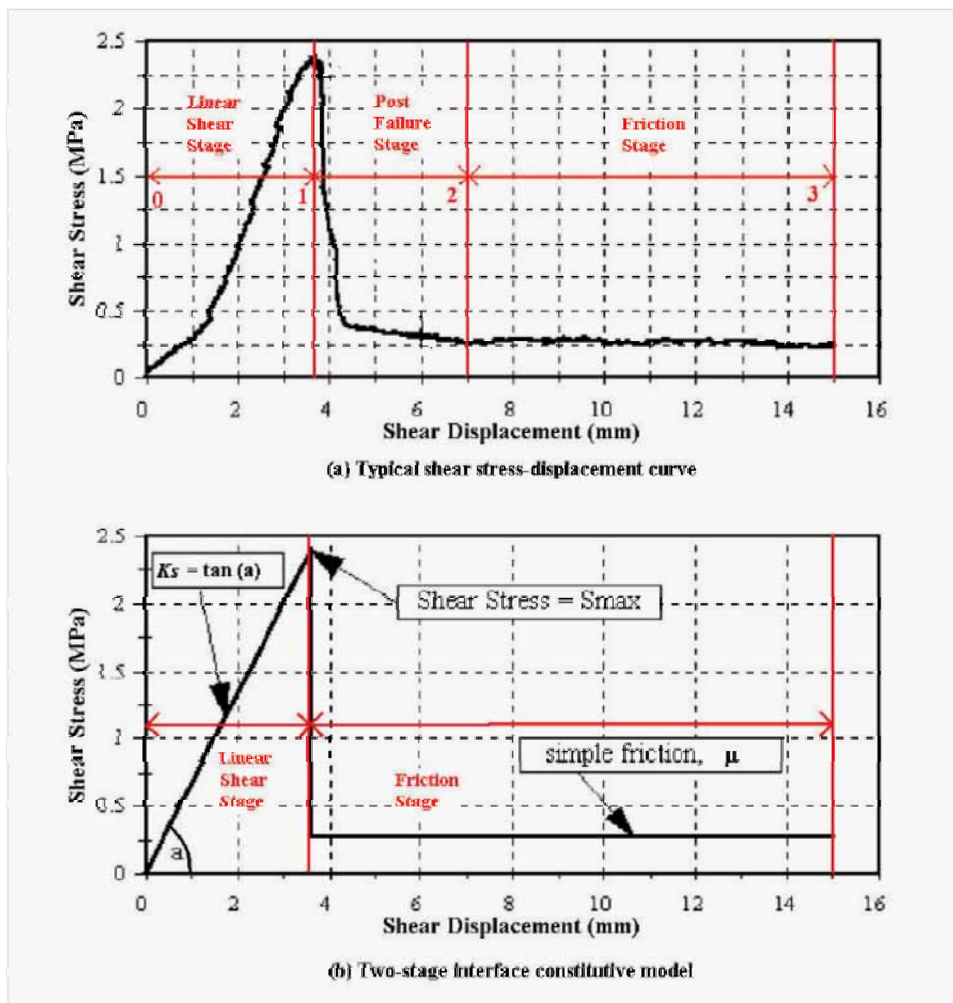
skonstruowane jest w taki sposób, aby nie występowały żadne momenty skręcające.

3.8.2. Konstitutywny model związania międzywarstwowego

Na rys. 3.37. przedstawiono wykres zależności naprężeń ścinających od przemieszczeń przy ścinaniu. Wykres podzielony został na trzy obszary:

- (0-1)- liniowa zależność między naprężeniem a odkształceniem; osiągnięte zostaje S_{max} (wytrzymałość związania na ścinanie) i następuje uszkodzenie- zerwanie związania,
- (1-2)- obszar po zniszczeniu; związanie wykazuje jeszcze szczątkowy opór; warstwy nie są całkowicie odseparowane,
- (2-3)- obszar czystego tarcia; sąsiednie warstwy są całkowicie rozdzielone.

Z powodu cyklicznej natury obciążeń oraz tego, iż poziom zniszczenia szczepności (1-2) może pojawić się tylko raz, zaczęto rozpatrywać tylko liniowe zachowania (0-1),(2-3). Zaproponowano zatem dwupoziomowy model. Pierwszy obszar opisany został przez naprężenia ścinające τ , względne przemieszczenie d oraz moduł K . Drugi obszar to czyste tarcie opisane współczynnikiem tarcia μ .



Rysunek 3.37. Wykres naprężeń- odkształceń ścinających i proponowany konstytutywny model związania międzywarstwowego [24].

Tabela poniżej przedstawia wyniki uzyskane dla wszystkich próbek w trzech różnych temperaturach i czterech poziomach obciążenia. Zauważyć można, iż zarówno wytrzymałość związania między warstwami, jak i współczynnik K maleją wraz ze wzrostem temperatury.

Tablica 3.11. Parametry konstytutywnego modelu związania międzywarstwowego [24], K - moduł reakcji poziomej, S_{max} - wytrzymałość na ścinanie

Temp.	Pnorm (KPa)		Interface Type A			Interface Type B		
			K (MPa/mm)	Smax (MPa)	mu	K (MPa/mm)	Smax (MPa)	mu
15	138	Avg	703.8	1.81	0.43	669.1	1.946	0.576
		CV (%)	14.8	12.9	47.1	27.9	20.9	8.4
	276	Avg	712.3	1.863	0.877	799.7	2.295	0.722
		CV (%)	11.8	11.2	31.5	16.4	4.8	10.6
	414	Avg	713.1	2.088	0.833	835.1	2.15	0.66
		CV (%)	10.2	5.7	34.1	15.7	23.3	4.9
522	Avg	814.4	1.894	0.753	730.4	2.068	0.644	
	CV (%)	15.7	6.4	15.7	24.1	18	9.4	
25	138	Avg	408.5	1.077	0.641	504.8	1.623	0.669
		CV (%)	14.8	6.2	10.5	10.9	11.4	19.1
	276	Avg	405.3	1.07	0.738	480.4	1.403	0.711
		CV (%)	19.8	14.4	8.7	16.4	21.2	11
	414	Avg	449	1.218	0.671	516.2	1.597	0.711
		CV (%)	18.9	11.9	2.4	9.6	7.5	5.3
522	Avg	500.1	1.538	0.884	524.2	1.64	0.718	
	CV (%)	15.8	10.6	42.1	9.1	8.1	4.9	
35	138	Avg	197.8	0.659	0.745	270.5	0.755	0.839
		CV (%)	25.3	11.8	30.4	10.8	6.8	28.2
	276	Avg	237.8	0.726	0.803	265.2	0.852	1.172
		CV (%)	8	11.8	15.1	25.2	14.2	35.9
	414	Avg	253.2	0.813	0.864	292.8	0.99	0.978
		CV (%)	10.6	13.3	20.7	6.3	5	23.4
522	Avg	276	0.906	0.729	298.4	0.882	0.759	
	CV (%)	14.2	9.1	2.8	10.2	9.9	5.2	

Wynioskować można, że:

- rodzaj związania wpływa na S_{max} i K , ale nie wpływa na μ
- poziom obciążenia ma wpływ na S_{max} i K tylko w przypadku braku istnienia powłoki wiążącej (tack-coat); wzrost naprężeń normalnych skutkuje wzrostem powierzchni styku, a w efekcie większym S_{max} i K , jeżeli powłoka istnieje pory wypełnione są materiałem- zjawisko nie zachodzi.

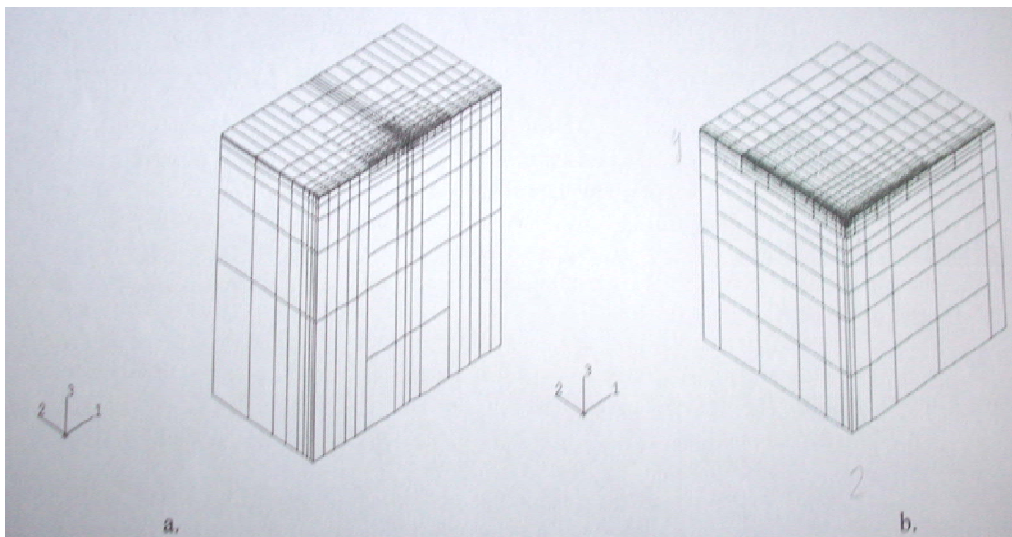
Test zmęczeniowy na ścinanie, uwzględniający powtarzalną naturę obciążeń, przeprowadzony został dla normalnej siły nacisku dwukrotnie większej od siły ścinającej. Romanoschi i Metcalf [24] wykazali, że przemieszczenie od ścinania wzrasta liniowo wraz ze wzrostem liczby powtórzeń obciążenia.

3.8.3. Konstytutywne modele związania międzywarstwowego w MES

3.8.3.1. Opis sieciowy MES

Główne mechaniczne modele powierzchni podatnych zakładają, że obciążenia działają na powierzchni wyłącznie w kierunku prostopadłym. Jeżeli w tym samym czasie siły działają poziomo oczekuje się rozwoju poszczególnych ścinań pomiędzy warstwami. Przypadek taki uważany jest za krytyczny nie tylko ze względu związania między powłokami, ale również dlatego, że może on mieć wpływ na wzrost naprężeń rozciągających. Dla związania tych związania wykorzystano Metodę Elementów Skończonych (MES), dzięki której obliczono naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia. Do analiz obliczeniowych wykorzystano program ABAQUS. Rozpatrzono dwa przypadki: wspólne działanie obciążenia poziomego (dwukrotnie mniejsze od pionowego) i pionowego na tym samym obszarze, działa tylko siła pionowa.

Ponieważ w pierwszym przypadku obciążenie jest symetryczne tylko w płaszczyźnie x-z, sformułowano dwie odrębne sieci elementów skończonych (rys. 3.38), dla obu określono odpowiednie warunki brzegowe, obciążenie przyłożono po okręgu 0,15 mm, wszystkie materiały uznano za sprężyste.



Rysunek 3.38. Modele wprowadzone do MES [24].

3.8.3.2. Modelowanie związania międzywarstwowego

Dla określenia warunków szczepności międzywarstwowej założono cztery stany:

- pełna szczepność; w tym przypadku każdy węzeł warstwy podrzędnej związany jest z najbliższym węzłem warstwy głównej;
- czyste tarcie, zdefiniowane współczynnikiem tarcia μ ; sytuacja taka ma miejsce w momencie zniszczenia związania międzywarstwowego; wartość $\mu=0,7$ uzyskana jest z testu ścinania pośredniego;
- związanie międzywarstwowe z powłoką wiążącą;
- związanie międzywarstwowe bez powłoki wiążącej

Do modelowania wykorzystano dwa stany: pełna szczepność i czyste tarcie z współczynnikiem $\mu=0,5$. Połączenie warstwy asfaltowej z warstwą kruszywa uznano za w pełni związane. Zdefiniowano 26 modeli elementów skończonych.

3.9. Literatura

- [1] Al Hakim B., An improved backcalculation method to predict flexible pavement layers moduli and bonding condition between wearing course and base course, Liverpool, UK 1997.
- [2] Brown S.F., Brunton J.M., The influence of bonding between bituminous layers, The Journal of the Institution of Highways and Transportation, UK 1984, cz. 31, str. 16-17.
- [3] Burmister D.M., The general theory of stresses and displacements in layered systems, Journal of Applied Physics, The American Institute of Physics, Melville, USA 1945, cz.16, str. 89-94, 126-127, 296-302.
- [4] Crispino M., Festa B., Giannattasio P, Nicolosi V., Evaluation of the interaction between the asphalt concrete layers by a new dynamic test, Proceeding of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, USA 1997, str. 741-754.
- [5] De Beer M., Kannemeyer L., Fisher C., Towards improved mechanistic design of thin asphalt layer surfacing based on actual tyre/pavement contact stress-in-motion (SIM) data in South Africa, Proceeding of the 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Victory Falls, Zimbabwe 1999.
- [6] Divakar M.P., Fafitis A., Micromechanics-based constitutive model for interface shear, Journal of Engineering Mechanics 1992, cz. 118, str. 1317-1337.
- [7] Hachiya T., Sato K., Effect of tack coat on bonding characteristics at interface between asphalt concrete layers, Proceeding of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, USA 1997, str. 349-362.

- [8] Huang Y.H., Pavement analysis and design, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1993.
- [9] Jaskuła P., Wpływ braku szczepności międzywarstwowej na wartość modułów warstw asfaltowych obliczanych na podstawie ugięć, Drogownictwo nr 1/2010, str. 13-17.
- [10] Judycki J., Szczepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni, Drogownictwo, nr 9/2003, str. 275-279.
- [11] Judycki J., Jaskuła P., Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Raport z I etapu badań na zlecenie GDDKiA, Gdańsk 2005.
- [12] Judycki J., Jaskuła P., Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Raport z II etapu badań na zlecenie GDDKiA, Gdańsk 2006.
- [13] Kennedy C.K., Lister N.W., Experimental studies of slippage. The Performance of Rolled Asphalt Road Surfacing, The Institution of Civil Engineers, London, UK 1980, str. 31-56.
- [14] Kruntcheva M.R., Collop A.C., Thom N.H., Theoretical and practical aspects of the importance of bonding in a pavement structure. Project Report PGR 2000-08, The University of Nottingham, UK 2000.
- [15] Lepert P., Poilane J.P., Villard-Bats M., Evaluation of various field measurement techniques for the assessment of pavement interface condition, Proceeding of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, UK 1992, cz.3, str. 224-237.
- [16] Mehta Y., Gomba S., Evaluation of interlayer bonding in HMA pavements, Department of Civil and Environmental Engineering, Rowan University, 2007.
- [17] Mohammad L.N., Raqib M.A., Wu Z., Huang B., Measurement of interlayer bond strength through direct shear tests, The 3th International Conference of Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece 2002.
- [18] Molenaar A.A.A., Heerkens, J.C.P., and Veroeven, J.H.M., Effects of Stress Absorbing Membrane Interlayers, Asphalt Paving Technology, cz. 55, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologies, 1986.
- [19] Nishiyama T., Lee D.H., Bhatti M.A., Investigation of bonding condition in concrete overlay by laboratory testing, finite element modeling and field evaluation, TRB 84th Annual Meeting, Washington DC, USA 2005.
- [20] Ozer H., Al-Quadi I.L., Leng Z., A fracture based friction model for pavement interface characterization, TRB 87th Annual Meeting, Washington DC, USA 2008.
- [21] Partl M.N., Raab C., Shear adhesion between top layers of fresh asphalt pavements in Switzerland, Proceeding of the 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Victory Falls, Zimbabwe 1999, str. 130-137.
- [22] Piłat J., Radziszewski P., Nawierzchnie asfaltowe, WKiŁ, Warszawa 2004.
- [23] Romain J.E., Contraintes, deformations et deflexions dans les systems quadricouches elastiques, Rapport de Recherche No. 147/JER/1968, Centre de Recherches Routieres, Bruxelles, Belgium 1968.
- [24] Romanoschi S.A., Metcalf J.B., Characterization of asphalt concrete layer interfaces, Transportation Research Record No. 1778, Washington DC, USA 2002, str. 132-139.

- [25] Sangiorgi C., Collop A.C., Thom N.H., Laboratory assessment of bond condition using the Leutner shear tester, The 3th International Conference of Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece 2002.
- [26] Shaat A.A., Investigation of slippage of bituminous layer in overlaid pavement in Northern Ireland, Belfast, UK 1992.
- [27] Shanin M., Kirchner K., Blackmon E.W., Analysis of asphalt concrete layers slippage and its effect on pavement performance and rehabilitation design, Proceeding of the 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA 1987, str. 958-964.
- [28] Simonin G.A., Page G.C., Musselman J.A., Upshaw P.B., Moseley H.L., Preliminary investigation of a test method to evaluate bond strength of bituminous tack coats, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2004.
- [29] Sutano M., Collop A., Airey G., Elliot R., Choi Y., Laboratory measurement of bond between asphalt layers, International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology, Liverpool, UK 2004.
- [30] Sutano M., Assessment of bond between asphalt layers, The University of Nottingham, Nottingham, UK 2009.
- [31] TRRL, Interim report of the working party on the slippage of rolled asphalt wearing courses, TRRL report SR 213UC, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK 1976.
- [32] Tschegg K.E., Kroyer G., Tan D.M., Stanzl-Tschegg S.E., Litzka J., Investigation of bonding between asphalt layers on road construction, Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Lipiec/Sierpień 1995, str. 309-317.
- [33] Uzan J., Livenh M., Eshed Y, Investigation of adhesion properties between asphalt concrete layers, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1878, cz, 47, str. 495-521.
- [34] Whiffin A.C., Lister N.W., The application of elastic theory to flexible pavements, Proceeding of the 1st International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA 1962, str. 499-552.