

III. Zastosowanie teoretycznych modeli warstwy konstrukcyjnej ze zbrojeniem siatką w standardowych programach wspomagających projektowanie konstrukcji nawierzchni

1. Wstęp

Od wielu lat inżynierowie mają od dyspozycji narzędzia wspomagające projektowanie konstrukcji nawierzchni drogowych, w tym asfaltowych. Do tych narzędzi zaliczają się programy komputerowe, np. BISAR, NOAH, ELSYM 5M, JULEA, PRADO, ALIZE, VEROAD, pozwalające obliczać naprężenia i odkształcenia w konstrukcji; bazujące na liniowych rozwiązaniach zadań układów warstw o sprężystych i/lub lepkosprężystych własnościach. Modele te dotyczą tylko i wyłącznie warstw z materiałów izotropowych. Nie jest więc możliwe w sposób bezpośredni uwzględnienie w tych programach zbrojenia w postaci siatki, gdyż ta ma makroskopowo właściwości ortotropowe.

W części I przedstawiono metodę pozwalającą na analizowanie konstrukcji drogowej z warstwą zbrojącą z siatki. Sformułowane w tym celu modele aproksymacyjne, w ramach liniowej teorii sprężystości, są związkami izotropowymi, co pozwala na ich bezpośrednie zastosowanie w wymienionych standardowych programach komputerowych.

Metoda umożliwiająca uwzględnienie siatki zbrojącej konstrukcję polega w ogólności na obliczeniu parametrów materiału kompozytowego składającego się z siatki i znajdującej się w jej otoczeniu mieszanki mineralno-asfaltowej. W efekcie uzyskuje się więc zastępczy materiał kompozytowy o cechach sprężystych. W celu uproszczenia nazewnictwa z jednoczesnym zachowaniem informacji o zasadach opracowanej metody, będzie używane pojęcie „warstwa zastępcza zbrojenia”.

2. Cel

W części tej skupiono uwagę na praktycznym wykorzystaniu metody określania warstwy zastępczej zbrojenia. Oceniono efekt zbrojenia siatką konstrukcji asfaltowych przez analizę naprężeń i odkształceń obliczonych modelami sprężystym i lepkosprężystym. Ocena polegała na porównaniu wyników uzyskanych w konstrukcji bez warstwy zastępczej zbrojenia oraz w takiej samej konstrukcji z warstwą zastępczą zbrojenia. Wyciągnięto wnioski z analizy wraz z porównaniem ich ze spostrzeżeniami opisanymi w częściach I i II oraz sprawozdaniach częściowych z ubiegłych lat.

3. Program, metodyka pracy

Do analizy wpływu zbrojenia siatką warstw asfaltowych obliczono parametry warstwy zastępczej zbrojenia dla dwóch typów siatek ze względu na materiał użyty do produkcji: z włókien szklanych oraz z włókien poliestrowych. Te dwa typy siatek są najpowszechniej stosowane w Polsce i dają pogląd na inne tego typu siatki z włókien, jak: węglowe, bazaltowe czy polipropylenowe. Spośród siatek z włókien szklanych wytypowano do dalszej analizy rodzaj o największych modułach Younga przy rozciąganiu. Opis i właściwości siatek oraz obliczenia parametrów warstwy zastępczej zawarto w części II.

4. Program komputerowy VEROAD

4.1 Wstęp

Program VEROAD oblicza naprężenia i odkształcenia w nawierzchni pod obciążeniem od poruszającego się koła pojazdu, oblicza naprężenia główne, dyssypację, analizuje stan graniczny naprężeń. Umożliwia więc ocenę: trwałości konstrukcji ze względu na odkształcenia (np. rozciągające spodu warstw asfaltowych), stanu granicznego naprężeń głównych, odkształceń trwałych itp.

VEROAD umożliwia wykonanie obliczeń dla układu kilku warstw nawierzchni, przy czym równocześnie można zdefiniować warstwy lepkosprężyste i sprężyste przy ich dowolnym rozmieszczeniu. Dzięki temu można analizować między innymi wpływ warstwy zastępczej zbrojenia między lepkosprężystymi warstwami asfaltowymi.

Potwierdzeniem adekwatności modelu nawierzchni przyjętego w programie VEROAD było porównanie obliczeń (na podstawie badań laboratoryjnych zespolonego modułu sztywności oraz pełzania trójosiowego) i wyników pełnowymiarowych badań trzywarstwowej nawierzchni w urządzeniu LINTRACK.

Od roku 2002 autorzy sprawozdania posługują się programem komputerowym VEROAD opracowanym przy udziale dra Hopmana z Holandii. W programie wykorzystuje się liniowe modele reologiczne lepkosprężystości Hueta-Sayegha lub Burgersa albo sprężystości. Przyjmuje się założenie upraszczające, że współczynniki Poissona są wielkościami stałymi dla danej temperatury, zaś przestrzenne relacje konstytutywne lepkosprężystości otrzymuje się z bezpośredniego uogólnienia modeli jednowymiarowych (porównaj spr.S.3). Taka idealizacja pozwala na wyznaczenie parametrów materiałowych z badań standardowych.

4.2 Parametry modelu Burgersa

Należy zaznaczyć, że stosując model Burgersa nie otrzymuje się zadawalającej aproksymacji wyników badań w pełnym zakresie temperatury i częstotliwości.

Model Burgersa opisany jest przez cztery parametry: E , E_1 , η i η_1 , wynikające z interpretacji modelu reologicznego w postaci odpowiednio połączonych dwóch sprężyn i tłumików. Parametry te możliwe są do wyznaczenia na podstawie wyników badań laboratoryjnych zespolonego modułu sztywności E^* . Moduł ten otrzymuje się w szerokim zakresie częstotliwości w żądanej temperaturze. W różnych temperaturach uzyskuje się inne parametry modelu. Jest więc wiele zbiorów czterech parametrów dla każdej z temperatur w funkcji częstotliwości. Zespolony moduł sztywności wg modelu Burgersa opisany jest równaniem:

$$(1) \quad E^*(i\omega) = \frac{E}{1 + (i\omega \frac{\eta}{E})^{-1}} + \frac{E_1}{1 + (i\omega \frac{\eta_1}{E_1})^{-1}}$$

W programie VEROAD parametry modelu Burgersa obliczane są za pomocą podprogramu DEBUROAD. W podprogramie tym do wyznaczenia parametrów modelu wykorzystuje się długość modułu zespolonego i kąt przesunięcia fazowego z uwzględnieniem odpowiednich wag. Oznacza to, że można w tym podprogramie dopasować lepszą zgodność modelu Burgersa do sztywności $|E^*|$ lub kąta przesunięcia fazowego ϕ . Autor programu VEROAD uważa, że optymalnym przyjęciem stosunku wagi sztywności i kąta przesunięcia fazowego jest 10:1. Oznacza to, że powinno się uzyskać dość dobre dopasowanie modelu do

oznaczonych modułów, a niekoniecznie dobre, a czasem zupełnie niewystępujące, dopasowanie do kąta przesunięcia fazowego.

W programie VEROAD możliwe jest wykonanie obliczeń z warstwami sprężystymi dla takich materiałów jak warstwy z kruszywa niezwiązanego lub związanego spoiwem hydraulicznym, warstwy podłoża. Posłużono się tą możliwością także do zdefiniowania w programie VEROAD warstwy zastępczej zbrojenia, która jest materiałem sprężystym.

4.3 Parametry modelu Hueta-Sayegha

Zespolony moduł sztywności wg modelu Hueta-Sayegha opisują równania:

$$(2) \quad E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_{\infty-0}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

$$(3) \quad \tau = e^{a+bT+cT^2}$$

w których:

- i – liczba zespolona ($i^2 = -1$),
- ω – częstotliwość kątowna ($\omega = 2\pi f$, f w Hz), rad/s,
- E_0 – moduł sztywności elementu sprężystego E_0 (sztywność przy częstotliwości zero), MPa,
- $E_{\infty-0}$ – moduł sztywności elementu sprężystego $E_{\infty-0}$ ($E_{\infty-0} = E_{\infty} - E_0$), MPa,
- τ – charakterystyka czasu w funkcji temperatury ($\tau = \eta/E_{\infty-0}$), s
- δ – współczynnik proporcjonalności (wynika z założeń upraszczających równanie matematyczne) między lepkością η_b elementu tłumiącego h a lepkością η_a elementu tłumiącego k ,
- k – potęga elementu tłumiącego k ,
- h – potęga elementu tłumiącego h ,
- T – temperatura, °C,
- a, b, c – stałe materiałowe.

W modelu jest pięć parametrów: E_{∞} , E_0 , k , h , δ , które obliczane są na podstawie wyników badań laboratoryjnych zespolonego modułu sztywności E^* , w szerokim zakresie temperatury i częstotliwości metodami optymalizacji nieliniowej. W modelu uwzględnia się również funkcję τ , według modelu Arrheniusa (zależną od czasu t i temperatury T), w której występują parametry materiałowe a , b i c . Bezpośrednio do obliczeń programem VEROAD należy jednak podstawić dane dla wybranej temperatury.

W pakiecie programu VEROAD obliczenia parametrów modelu Hueta-Sayegha odbywają się według formuł w arkuszu kalkulacyjnym, który nosi nazwę HUSAROAD. Nie jest łatwe wyznaczenie parametrów modelu Hueta-Sayegha, ponieważ zagadnienie optymalizacji jest nieliniowe i dla różnych parametrów początkowych można uzyskać różne wyniki. Należy zawsze kontrolować i wykonywać wykresy teoretyczne, łącznie z naniesionymi wynikami badań. W arkuszu tym posługując się wykresami Cole-Cole, Blacka, itd. można dobrać odpowiednie wartości parametrów modelu najlepiej opisujące uzyskane wyniki badań.

4.4 Uwagi o dokładności obliczeń

Program VEROAD generuje wyniki obliczeń dla każdego punktu obliczeniowego w postaci pliku tekstowego. Zostały tam przyjęte następujące oznaczenia, użyte również w tej pracy:

- X_Load (Długość X), Y_Gauge (Szerokość Y), Z_Gauge (Głębokość Z) - współrzędne kartezjańskie,
- ux, uy, uz - składowe przemieszczenia w układzie kartezjańskim,
- Sxx, Syy, Szz, Syz, Sxz, Sxy - składowe tensora naprężenia w układzie kartezjańskim,
- Exx, Eyy, Ezz, Eyz, Exz, Exy - składowe tensora odkształcenia w układzie kartezjańskim.

W celu skrócenia czasu obliczeń w programie VEROAD wprowadzono 3 parametry sterujące jego obliczeniami. Jeden z nich służy do ograniczenia obliczeń tylko wybranej właściwości (np. naprężenie pionowe Szz) a nie wszystkich 15. Kolejny powoduje, że w przypadku obliczeń w punktach znacznie oddalonych od obciążenia (rzędu 2 do 5 m) zanika w nich dokładność obliczeń jako mało istotnych. Najważniejszym parametrem jest ACCURACY, który steruje dokładnością obliczeń. Od jego wartości istotnie zależy jakość i szybkość obliczeń. Autorzy programu VEROAD ustalili ten parametr na poziomie 0,0001 jako standardowy i wystarczający do większości zastosowań jako kompromis między dokładnością i szybkością. Uznano, że przyjęcie parametru ACCURACY równego 0,0005 jest wystarczające. Przeprowadzono także obliczenia przy standardowej wartości tego parametru.

5. Analiza wyników obliczeń

5.1 Opis przykładów obliczeniowych

Obliczenia naprężeń i odkształceń w konstrukcji wykonano programem VEROAD. Obciążenie jest zdefiniowane jako poruszające się z pewną prędkością i jest to obciążenie quasi-statyczne. Przyjęto typowe obciążenie, zgodnie z zapisami w KWRNPP-2001, s. 64.

Do analizowania wpływu warstwy zastępczej zbrojenia przewidziano jedną z typowych konstrukcji wg Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych (KTKNPP), typ A, tablica 10, dla kategorii ruchu KR6. Wykonano obliczenia dla typowej konstrukcji oraz porównawczo, tej samej konstrukcji z dodatkową warstwą zastępczą zbrojenia, bez zmiany łącznej grubości warstw asfaltowych. Warstwa zastępcza zbrojenia stanowi dolną część warstwy na niej leżącej. Przyjęto również typowe materiały do warstw konstrukcyjnych, tj. mieszanki z betonu asfaltowego dla kategorii ruchu od KR3 do KR6 wg PN-S-96025:2000 z asfaltem zwykłym D50 (dane do analizy sprzed 3 lat). Były to mieszanki gruboziarniste o stosunkowo małej zawartości asfaltu. Parametry podbudowy niezwiązanej oraz podłoża gruntowego przyjęto zgodnie z KTKNPP z 1997 r., s. 73 i 74. Wykorzystano dane o właściwościach betonów asfaltowych określonych w pracy badawczej dla GDDKiA z 2003 r., dotyczącej zastosowania programu VEROAD do przewidywania deformacji trwałych i zmęczenia w konstrukcjach asfaltowych. Układ, grubość i rodzaj warstw przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1 Układ warstw konstrukcji nawierzchni typowe.

Warstwa	Grubość warstwy, cm	Materiał
ścieralna	5	beton asfaltowy BA16
wiążąca	8	beton asfaltowy BA20
podbudowy zasadniczej	18	beton asfaltowy BA25
podbudowy pomocniczej	20	mieszanka kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie
podłoże gruntowe	-	-

Parametry modelu Burgersa dla poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono w tablicy 2. W tablicy 3 zestawiono parametry modelu Hueta-Sayegha dla każdej z mieszanek.

Tablica 2 Parametry modelu Burgersa.

Temperatura °C	Waga	E_1 MPa	E_2 MPa	η_1 MPa.s	η_2 MPa.s
BA 0/16					
40	10	352	40	1996	515
30	10	3395	1350	912	90
20	10	6687	3939	2473	230
10	10	12337	13956	8633	735
0	10	20032	37580	23475	1486
BA 0/20					
40	10	406	45	2136	609
30	10	3333	1390	1067	90
20	10	7584	4929	3128	275
10	10	14000	14582	9847	637
0	10	18945	46437	27845	2203
BA 0/25					
40	10	1573	1223	118	59
30	10	324	152	3506	3693
20	10	8598	10613	927	357
10	10	14853	29806	2547	705
0	10	21296	81936	6653	2251

Tablica 3 Parametry modelu Hueta-Sayegha.

Sym bol mieszanki	E 0 , MPa	E $\infty-0$, MPa			\square	a	b	c	η 1	η 2
BA 0/16	1 30	4 4 870	,20	,57	3000	3, 0,	- 2475	0, 0020	0, 46	1, 52
BA 0/20	1 70	4 3 980	,19	,55	8464	2, 0,	- 1058	0, 0,2980	0, 19	0, 54
BA 0/25	8 0	4 5 580	,18	,58	3875	3, 1,	- 0,3758	0, 0025	0, 73	2, 46

Do obliczeń przyjęto:

- obliczenia dla temperatury 40 °C,
- współczynnik Poissona warstw asfaltowych dla temperatury 40 °C: 0,35,
- współczynnik Poissona podbudowy pomocniczej i podłoża gruntowego: 0,3,
- moduł Younga podbudowy pomocniczej: 400 MPa,
- moduł Younga podłoża gruntowego: 100 MPa,
- obciążenie nawierzchni od pojazdu o nacisku koła 50 kN,
- ciśnienie kontaktowe 0,65 MPa, co daje promień kontaktu koła z nawierzchnią równy 0,1565 m,
- brak działania sił poziomych,
- prędkość ruchu pojazdu 60 km/h (16,7 m/s),
- pełne połączenie warstw konstrukcyjnych (program VEROAD nie daje możliwości uwzględnienia niepełnego połączenia między warstwami albo poślizgu warstw),
- parametry siatki G2 zgodnie z tablicą II.11.

Zaprojektowano obliczenia na głębokościach (wzdłuż osi Z) co 10 mm oraz dodatkowych przekrojach poziomych w okolicy granicy warstw. W każdym przekroju poziomym ustalono punkty obliczeniowe w układzie siatki XY: 10x10 mm do odległości ok. 3-krotności promienia obciążenia, czyli do 630 mm.

Obliczenia te wykonano w celu stwierdzenia, które części konstrukcji nawierzchni wykazują największe zmiany pod wpływem działania obciążenia. Z obliczeń wynika, że największe naprężenia i odkształcenia występują pod kołem lub w bliskiej odległości od śladu koła. Maksimum naprężeń normalnych występują w środku śladu koła lub z niewielkim przesunięciem dla każdej z warstw. Największe odkształcenie pionowe występuje w środku śladu koła dla każdej z warstw. Ekstrema pozostałych parametrów (odkształcenia wzdłuż osi Y i X, naprężenia styczne i przemieszczenia) występują do około 2-krotności promienia obciążenia. Te same wnioski były sformułowane w pracy IBDiM dla GDDKiA sprzed 3 lat. Z tego powodu oraz obszerności wyników obliczeń zamieszczono tylko charakterystyczne i istotne rezultaty.

5.2 Porównanie naprężeń i odkształceń w konstrukcji bez warstwy zastępczej zbrojenia i konstrukcji z tą warstwą

Dane z obliczeń różnych parametrów (naprężeń, przemieszczeń) najwygodniej jest przedstawiać graficznie, zwłaszcza przy porównywaniu różnych konstrukcji. W punkcie tym przedstawiono wykresy zawierające wyniki obliczeń odkształceń, naprężeń i przemieszczeń konstrukcji bez warstwy zastępczej zbrojenia i konstrukcji z tą warstwą. Zamieszczono tylko wyniki, w których wystąpiły widoczne różnice.

Linie dla wyników obliczonych w konstrukcji bez warstwy zastępczej zbrojenia oznaczono symbolem „BS” („bez siatki”), a w konstrukcji z tą warstwą: „ZS” („z siatką”) oraz dodano odległość od środka obciążenia wzdłuż osi Y (szerokość w przekroju poprzecznym).

Na rys. od 1 do 5 przedstawiono wykresy składowych stanu naprężenia wzdłuż zmiennej Z, czyli po głębokości, przy ustalonych zmiennych X i Y (długość i szerokość). Na rys.1 pokazano naprężenie pionowe. Na rys.1a zamieszczone są wykresy w przekroju pod osią obciążenia, gdzie wartości są bliskie ekstremalnych. Wyraźnie widoczne jest, że wprowadzenie warstwy ze zbrojeniem nie zmienia charakteru tego wykresu w porównaniu z warstwą bez zbrojenia. Podobnie jest dla innych przekrojów (porównaj także rys.1b i c). Efekty związane z wprowadzeniem zastępczej warstwy zbrojenia zauważalne są na wykresach innych składowych naprężenia. Na rys.2 zamieszczone są wykresy naprężeń normalnych S_{yy} , natomiast na rys.3 przedstawiono te wykresy w większej skali w obszarze wokół zbrojenia. Na rys.2a oraz 3a, które dotyczą naprężeń w funkcji głębokości w osi obciążenia widzimy skok wartości naprężenia S_{yy} w warstwie nad zbrojeniem i pod zbrojeniem. Bezwzględna wartość tego skoku nad zbrojeniem wynosi ok. 0,46 MPa, a pod zbrojeniem ok. 0,33 MPa. W warstwie zbrojenia naprężenia są praktycznie jednakowe i wynoszą ok. 0,16 MPa. Warstwa zbrojenia jest rozciągana w kierunku Y. Bezwzględna wartość skoku naprężeń S_{yy} w konstrukcji bez warstwy zbrojenia wynosi ok. 0,13 MPa i jest praktycznie równa różnicy $0,46 - 0,33 = 0,13$ MPa. Naprężenia S_{yy} w warstwie nad zbrojeniem są ujemne, podobnie jak w warstwie pod zbrojeniem. Jest tak zarówno w konstrukcji ze zbrojeniem, jak i bez zbrojenia. Warstwa zbrojenia jest rozciągana, co praktycznie nie ma najmniejszego wpływu na wartości naprężeń poziomych S_{yy} w warstwach nawierzchni. Na rys.2b i 3b oraz 2c i 3c, gdzie wykresy naprężenia S_{yy} są blisko krawędzi obciążenia i poza nim, w warstwie zbrojącej są naprężenia ściskające odpowiednio o wartościach -0,11 MPa i -0,19 MPa. Nie ma to jednak istotnego wpływu, gdyż wykresy naprężeń w warstwach konstrukcyjnych są niemal identyczne jak w konstrukcji bez zbrojenia. Podobna jest interpretacja wykresów naprężeń normalnych S_{xx} (patrz rys.4).

Wykresy naprężeń stycznych przedstawiono na rys.5. Wykresy naprężeń S_{xz} i S_{yz} dla konstrukcji z warstwą zbrojenia i bez niej są prawie identyczne. Na wykresach naprężeń S_{xy} widoczna jest różnica między porównywanymi konstrukcjami (patrz rys.5c i d). Pomimo tych różnic nie ma to istotnego wpływu na wartości naprężeń stycznych w warstwach konstrukcyjnych.

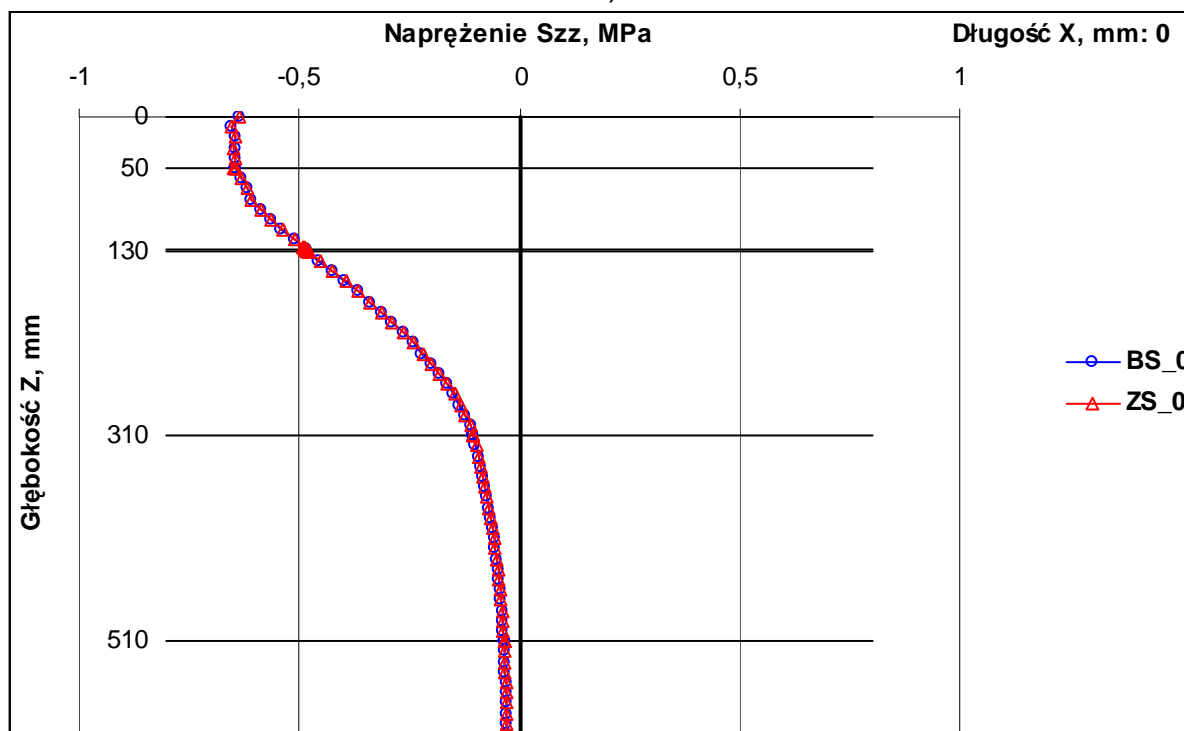
Na rys.6 podano przykładowe wykresy odkształceń normalnych. Nie zamieszczono innych wyników, gdyż ich interpretacja jest analogiczna jak w przypadku naprężeń. Pomimo wprowadzenia warstwy zbrojenia wartości odkształceń w warstwach konstrukcyjnych nie ulegają istotnej zmianie.

Wykonano także obliczenia dla konstrukcji ze zbrojeniem, dla której przyjęto 10-krotnie większą sztywność niż realne moduły sztywności badanych siatek. Także i w tym przypadku nie stwierdzono istotnego wpływu zbrojenia na uzyskane wyniki.

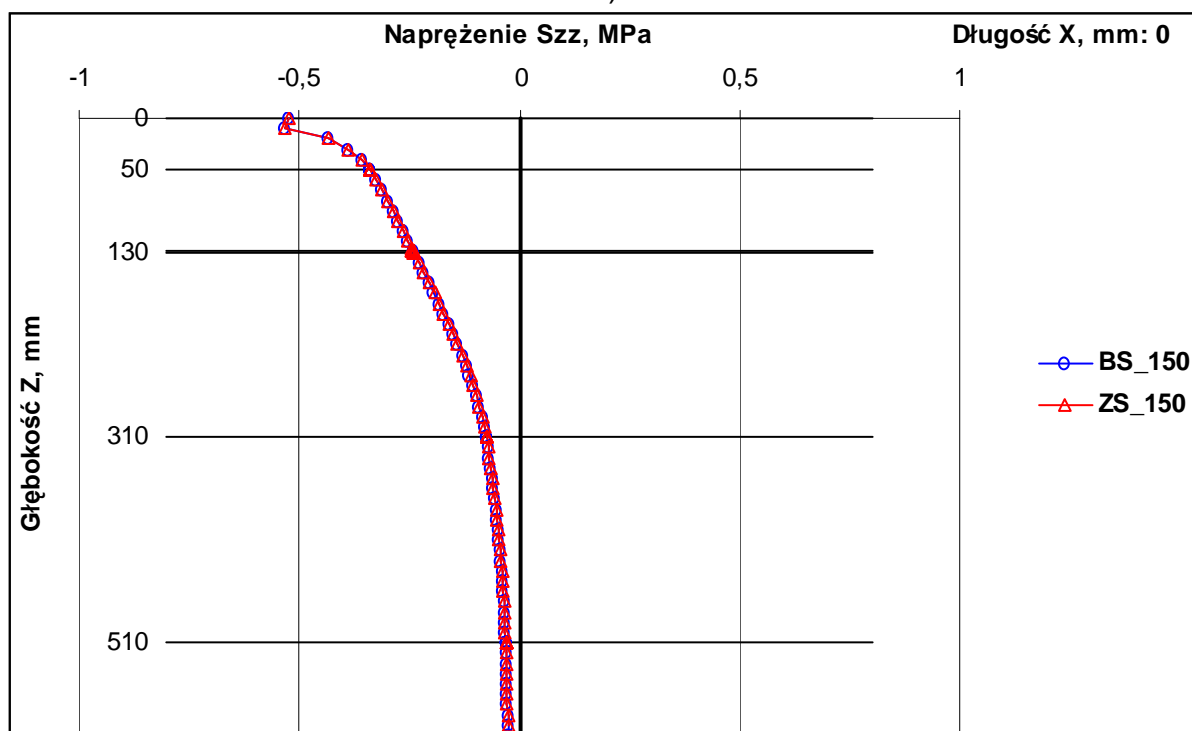
Znamienne jest, że w omówionym przykładzie sposobu zbrojenia jest ono umieszczone między warstwami wiążącą i podbudowy asfaltowej oraz zbrojenie te znajduje się w strefie ściskania (naprężenie ściskające S_{yy}). Zamodelowano więc tą samą konstrukcją, przy czym zbrojenie siatką umieszczono na spodzie warstwy podbudowy asfaltowej, w strefie rozciąganej. Wnioski płynące z porównania naprężeń i odkształceń w konstrukcji bez siatki i z siatką w spodzie warstw asfaltowych są identyczne, jak w przypadku umiejscowienia siatki w wyższej strefie. Przykładowe wykresy porównawcze dla konstrukcji z siatką pod warstwami asfaltowymi pokazano na rys.7.

Stosowanie siatki między warstwami asfaltowymi nie ma działania zbrojącego w pierwszym okresie (przed pojawieniem się spękań) eksploatacji drogi o typowej konstrukcji.

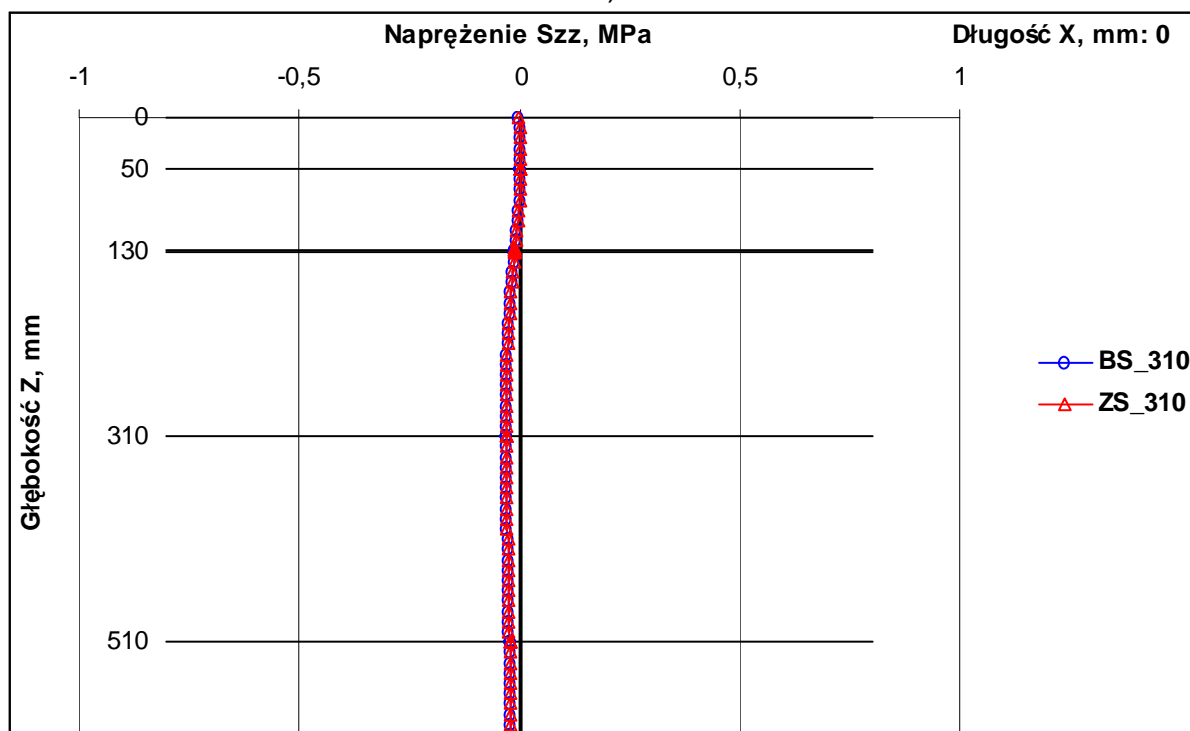
a)



b)

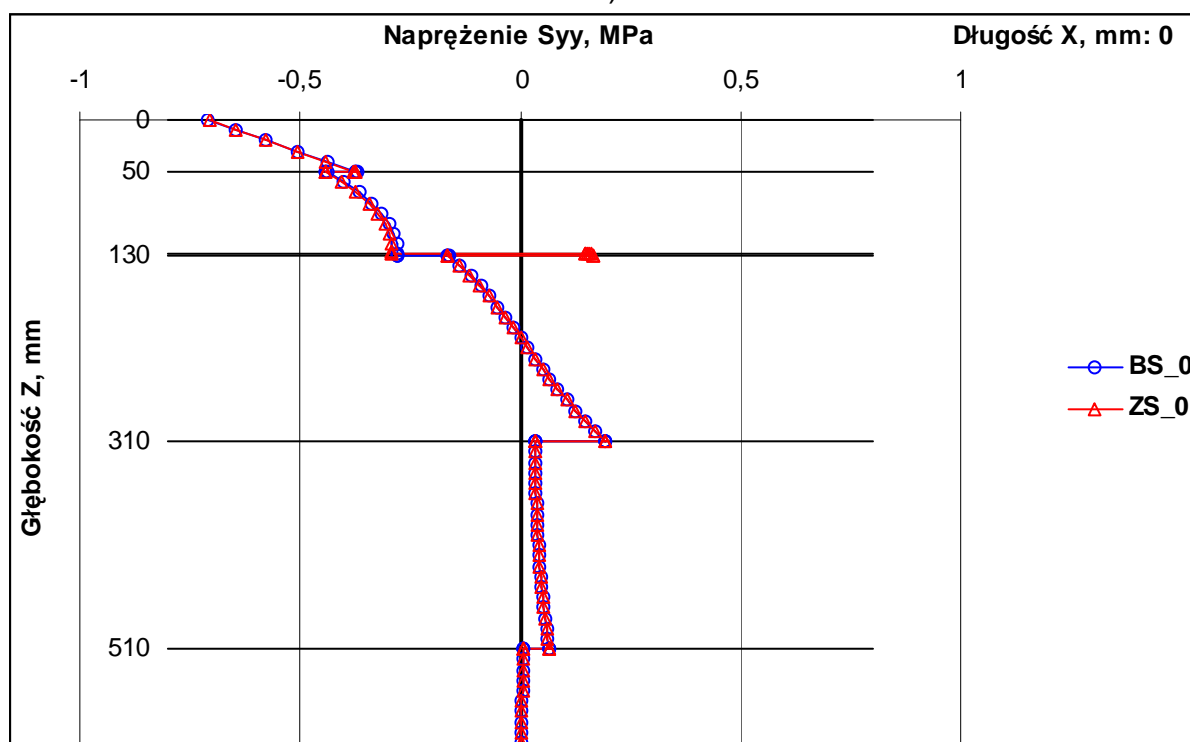


c)

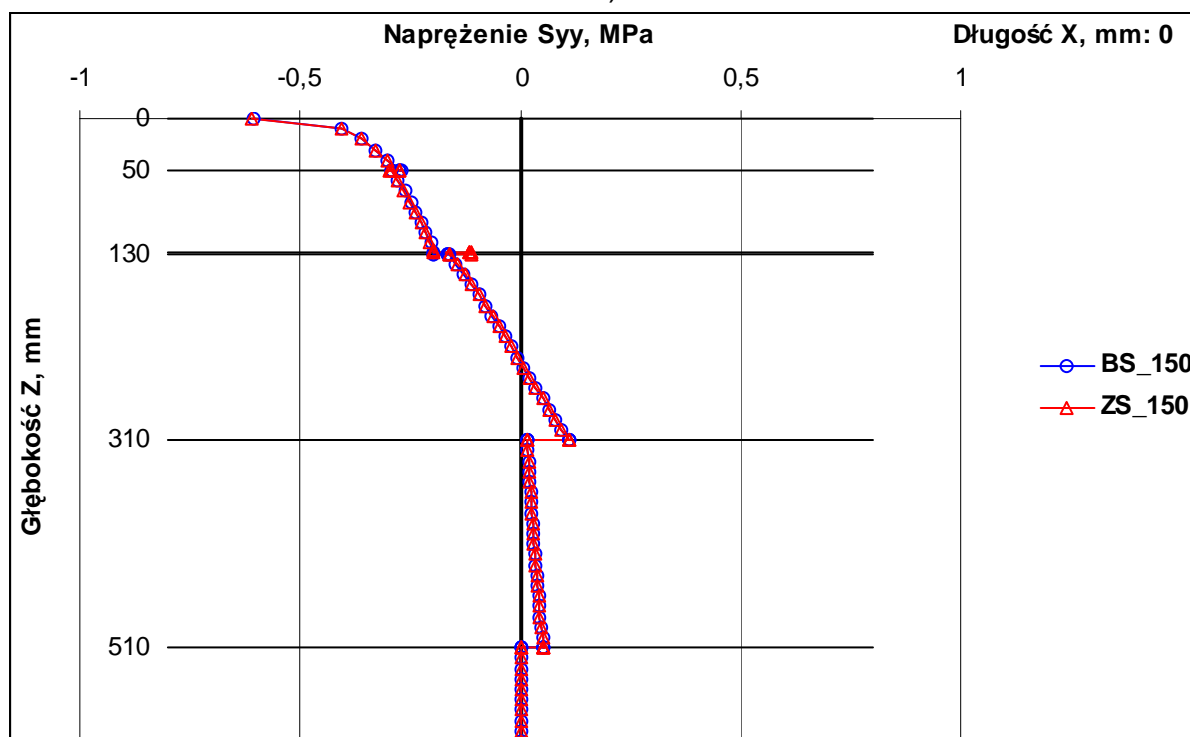


Rys.1. Wykresy pionowych naprężeń normalnych w typowej konstrukcji i konstrukcji z siatką w przekroju poprzecznym w osi obciążenia, w odległości: a) $X = 0$ mm, $Y = 0$ mm; b) $X = 0$ mm, $Y = 150$ mm (w pobliżu krawędzi obciążenia, pod nim); c) $X = 0$ mm, $Y = 310$ mm.

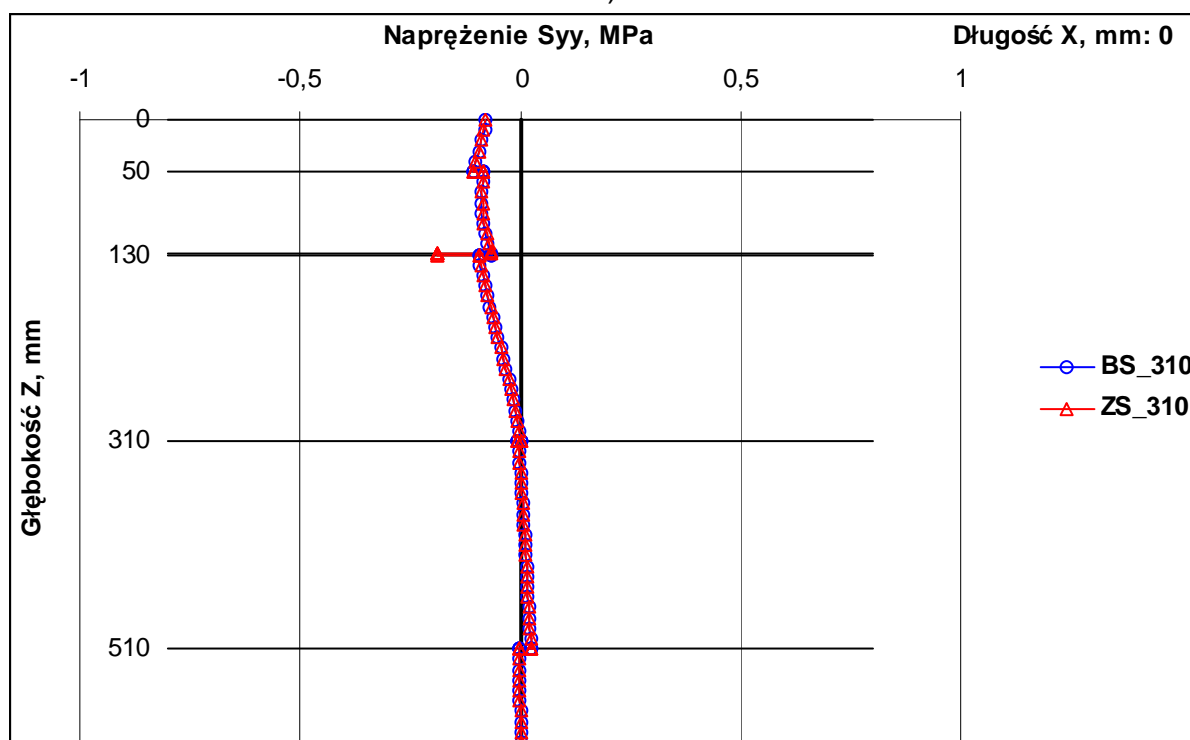
a)



b)

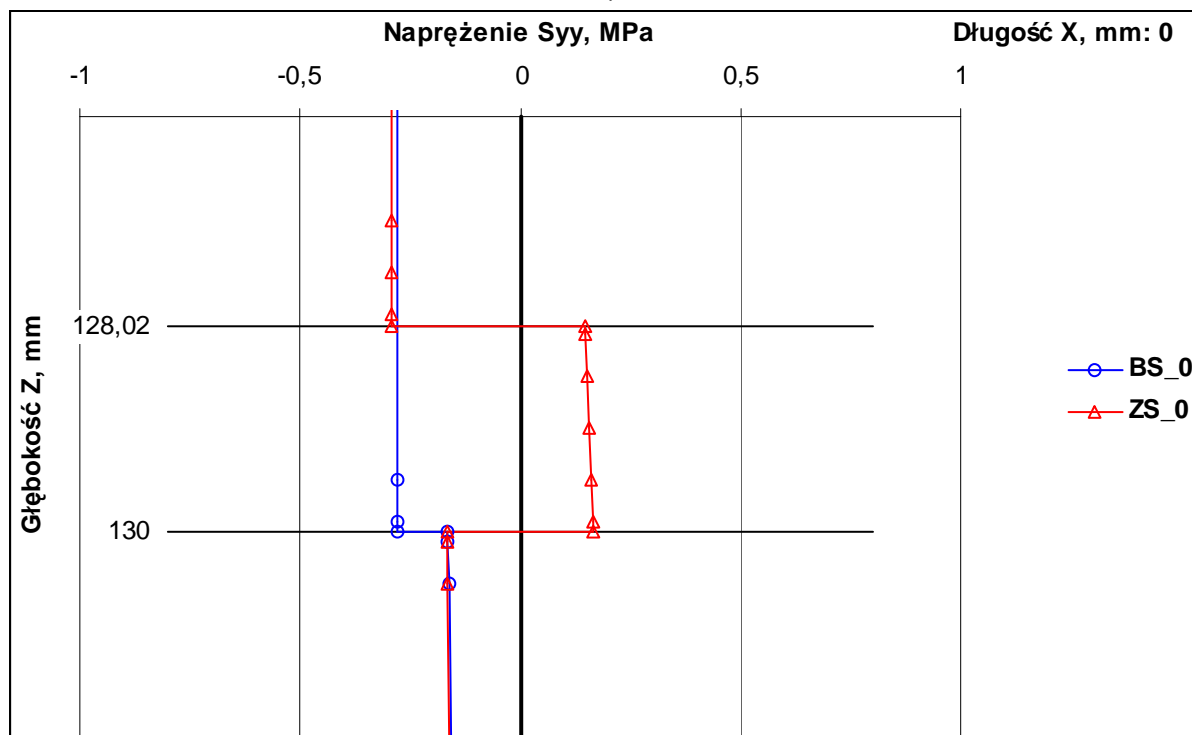


c)

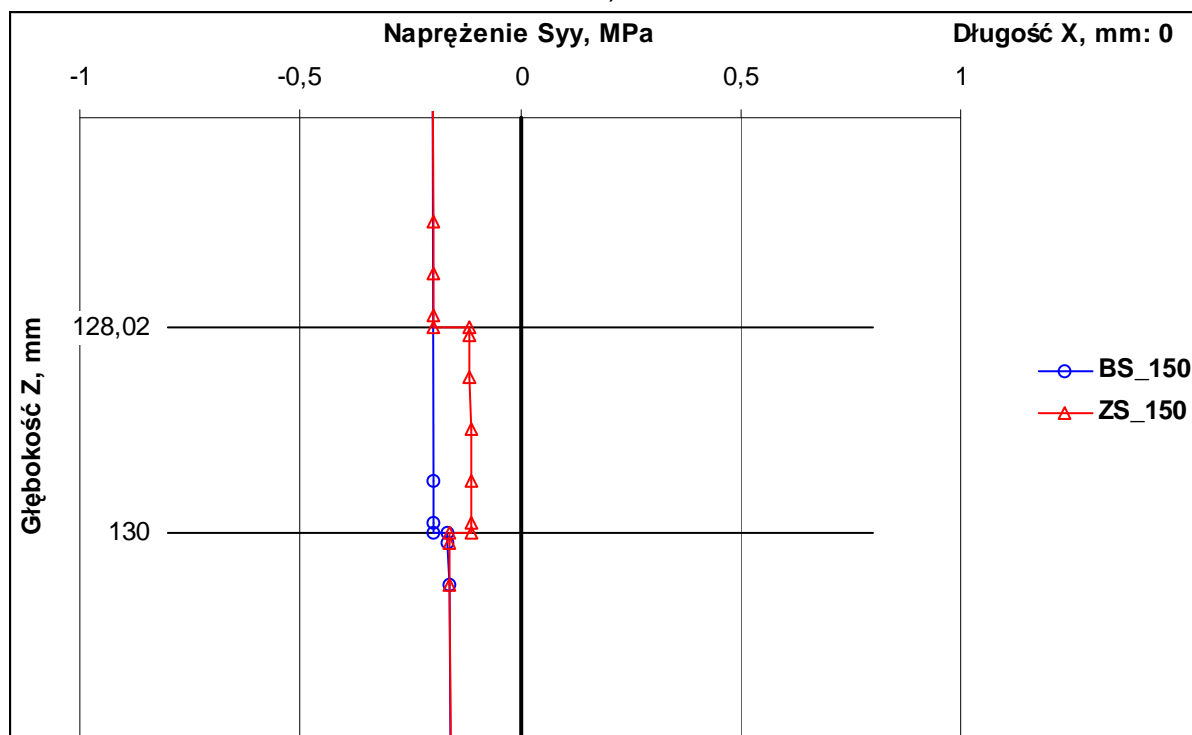


Rys.2. Wykresy poziomych naprężeń normalnych w typowej konstrukcji i konstrukcji z siatką w przekroju poprzecznym w osi obciążenia, w odległości: a) $X = 0$ mm, $Y = 0$ mm; b) $X = 0$ mm, $Y = 150$ mm (w pobliżu krawędzi obciążenia, pod nim); c) $X = 0$ mm, $Y = 310$ mm.

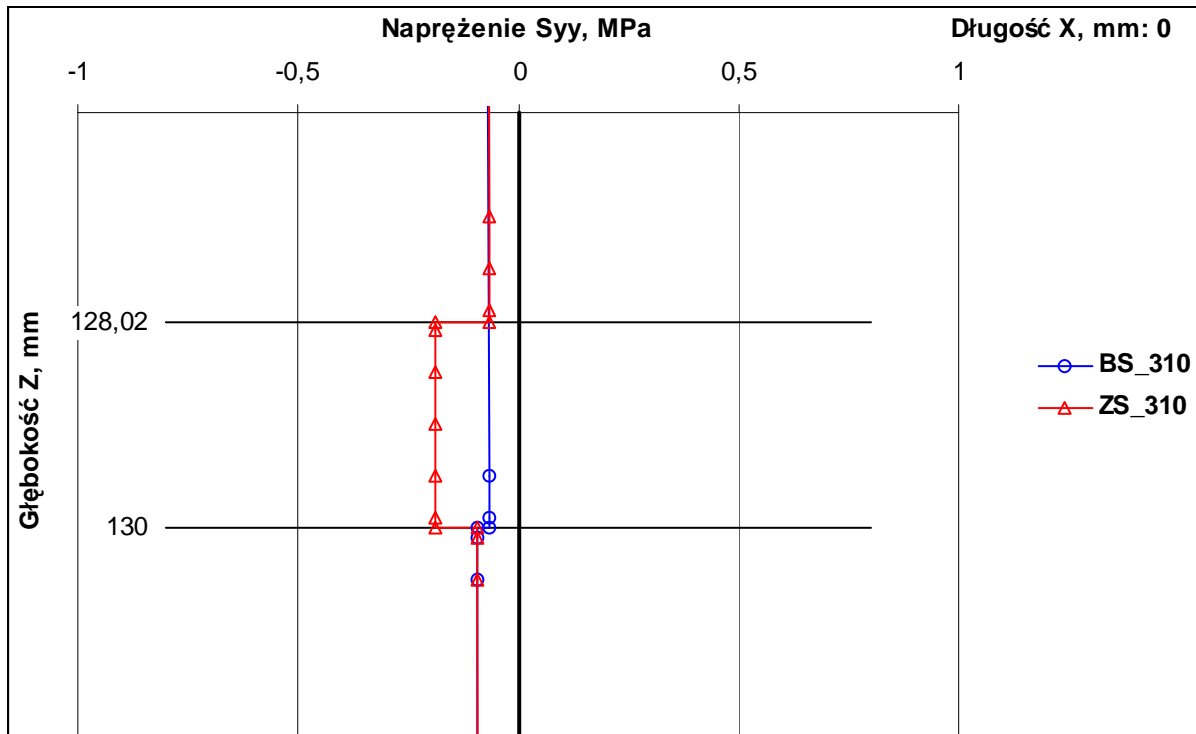
a)



b)

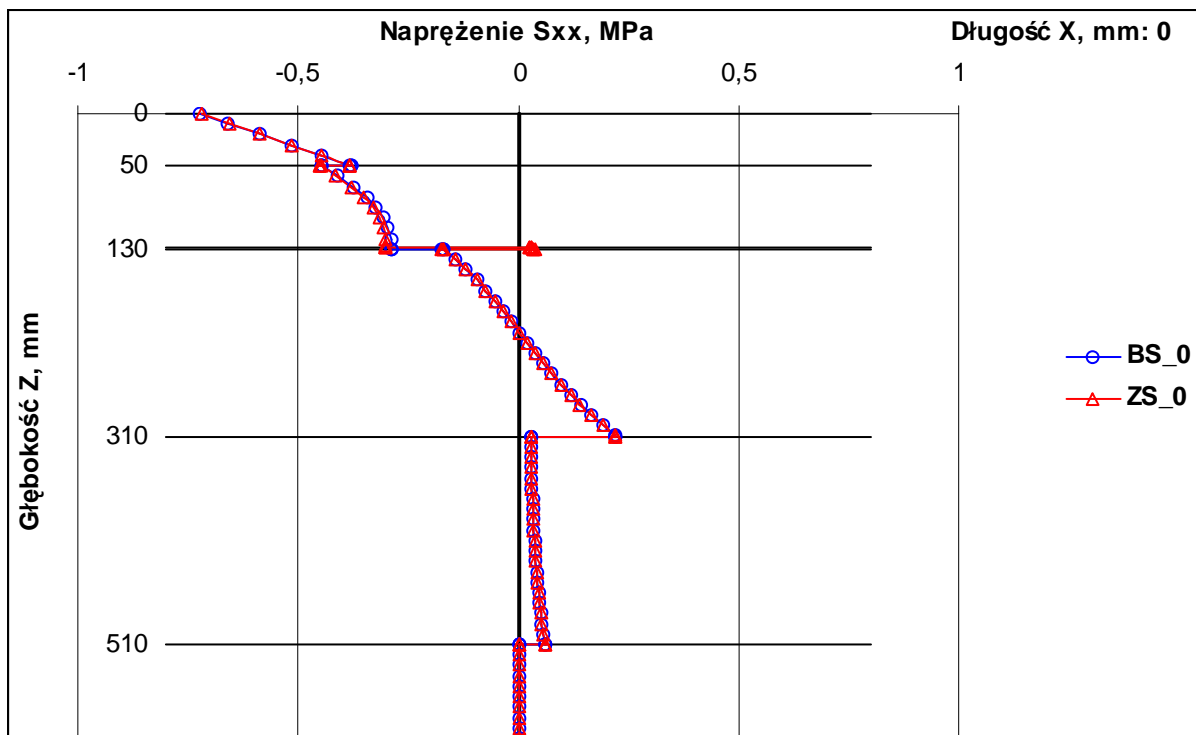


c)

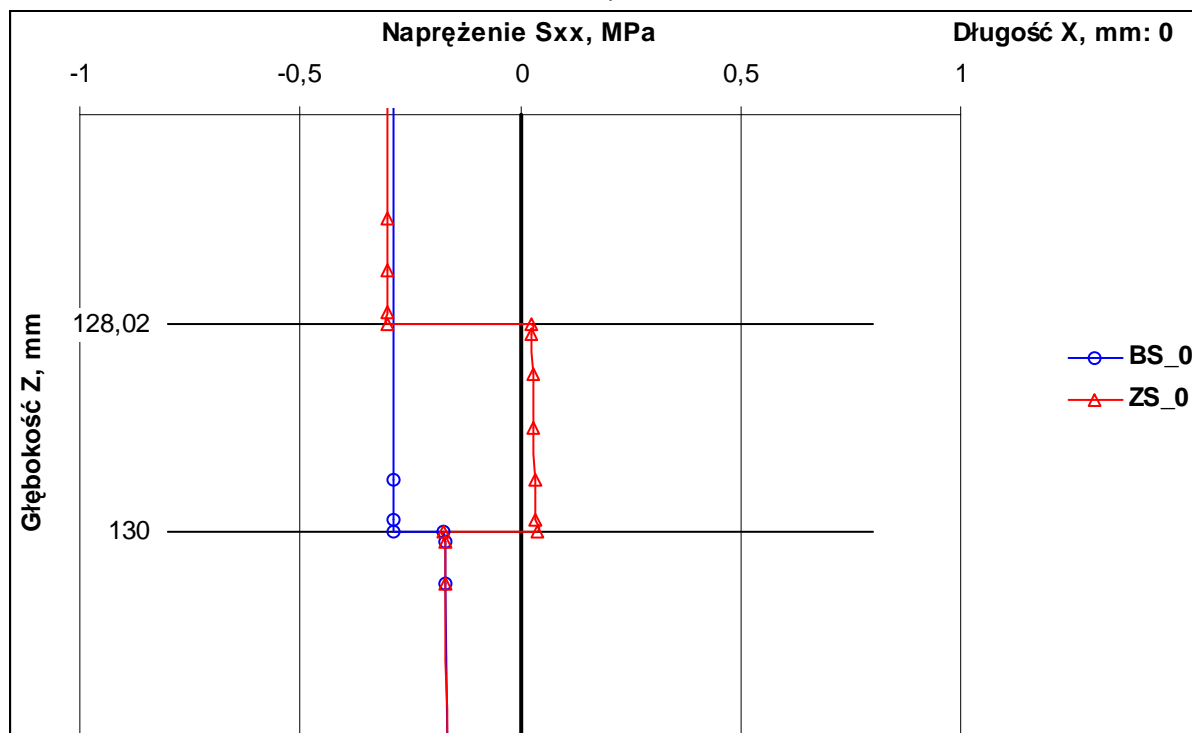


Rys.3. Wykresy poziomych naprężeń normalnych w typowej konstrukcji i konstrukcji z siatką w obszarze zastępczej warstwy zbrojenia, w przekroju poprzecznym w osi obciążenia, w odległości: a) $X = 0$ mm, $Y = 0$ mm; b) $X = 0$ mm, $Y = 150$ mm (w pobliżu krawędzi obciążenia, pod nim); c) $X = 0$ mm, $Y = 310$ mm.

a)

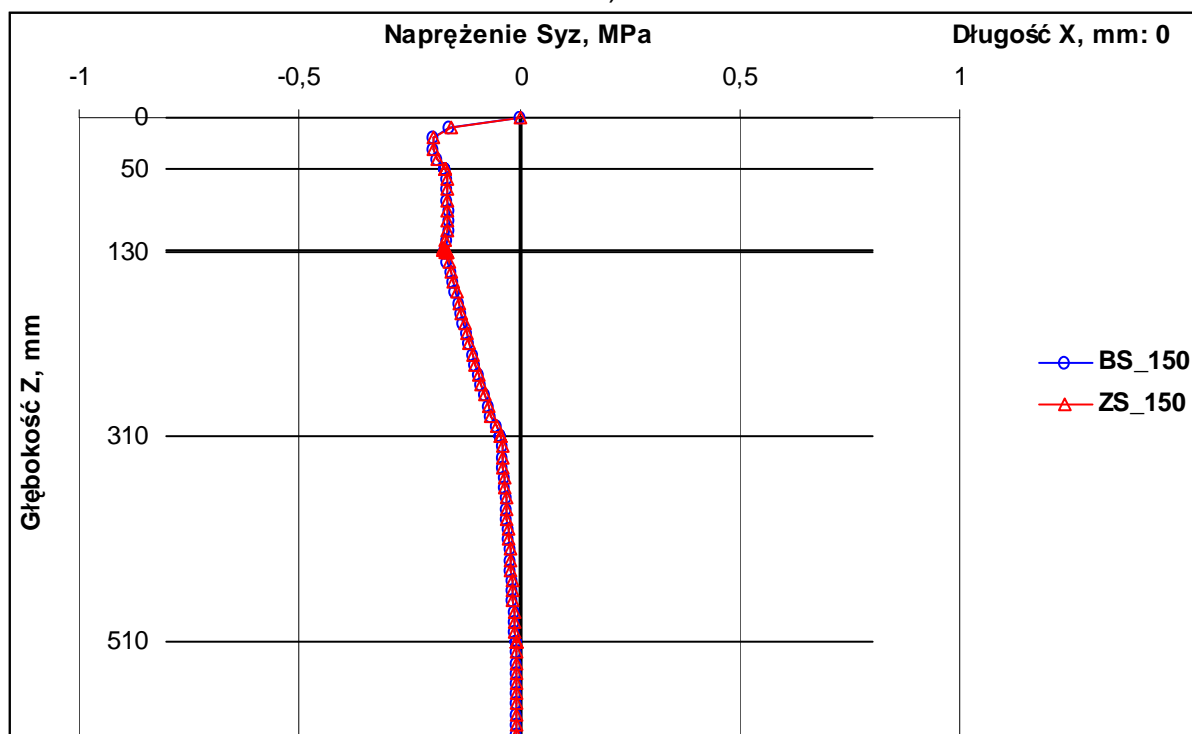


b)

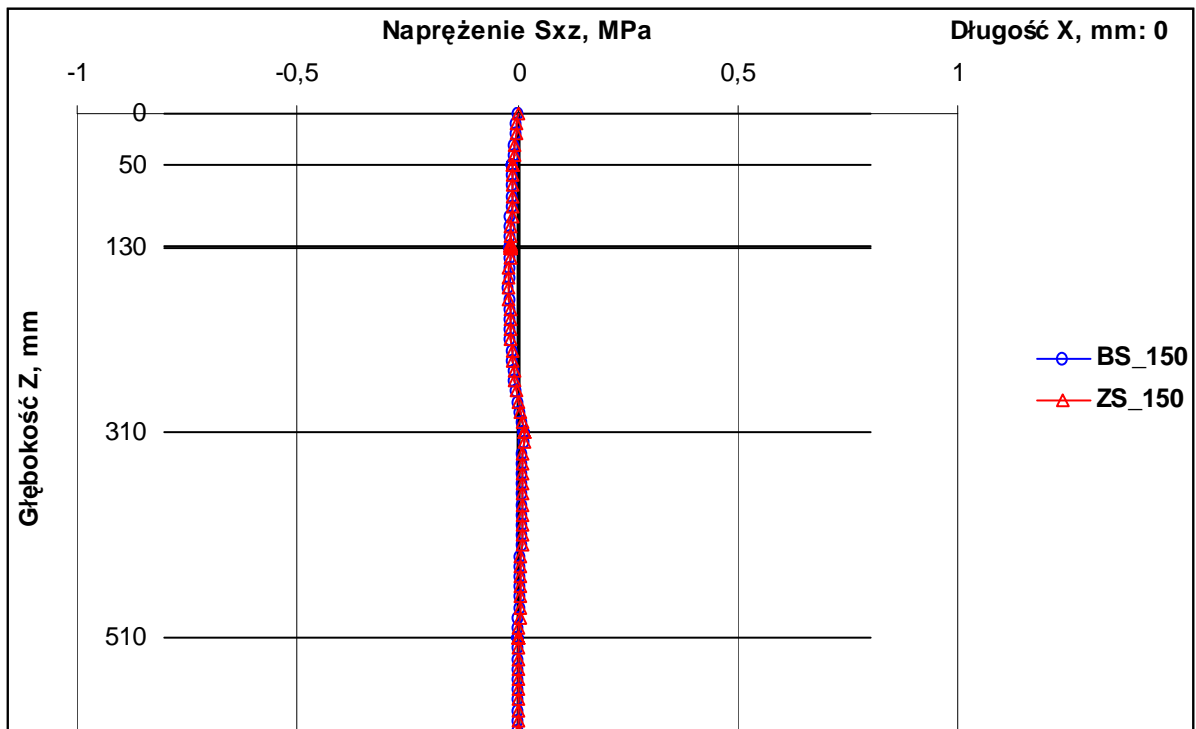


Rys.4. Wykresy poziomych naprężeń normalnych w typowej konstrukcji i konstrukcji z siatką w przekroju poprzecznym w osi obciążenia (a) oraz w obszarze zastępczej warstwy zbrojenia (b).

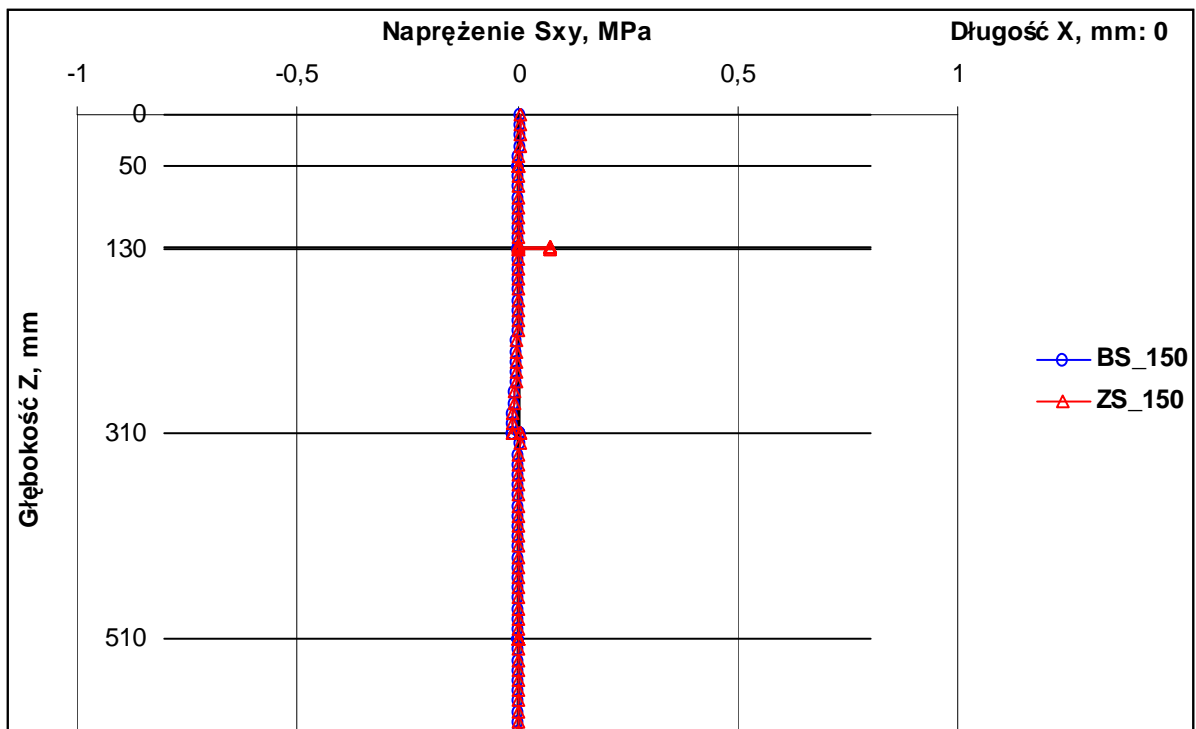
a)



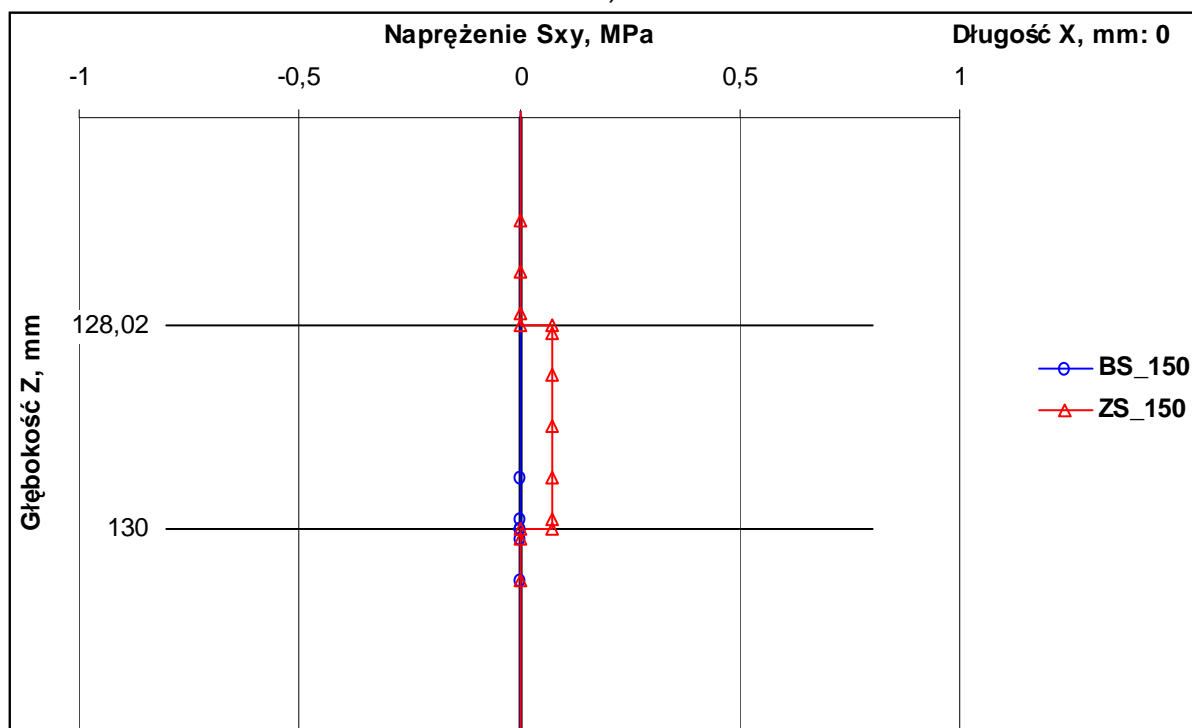
b)



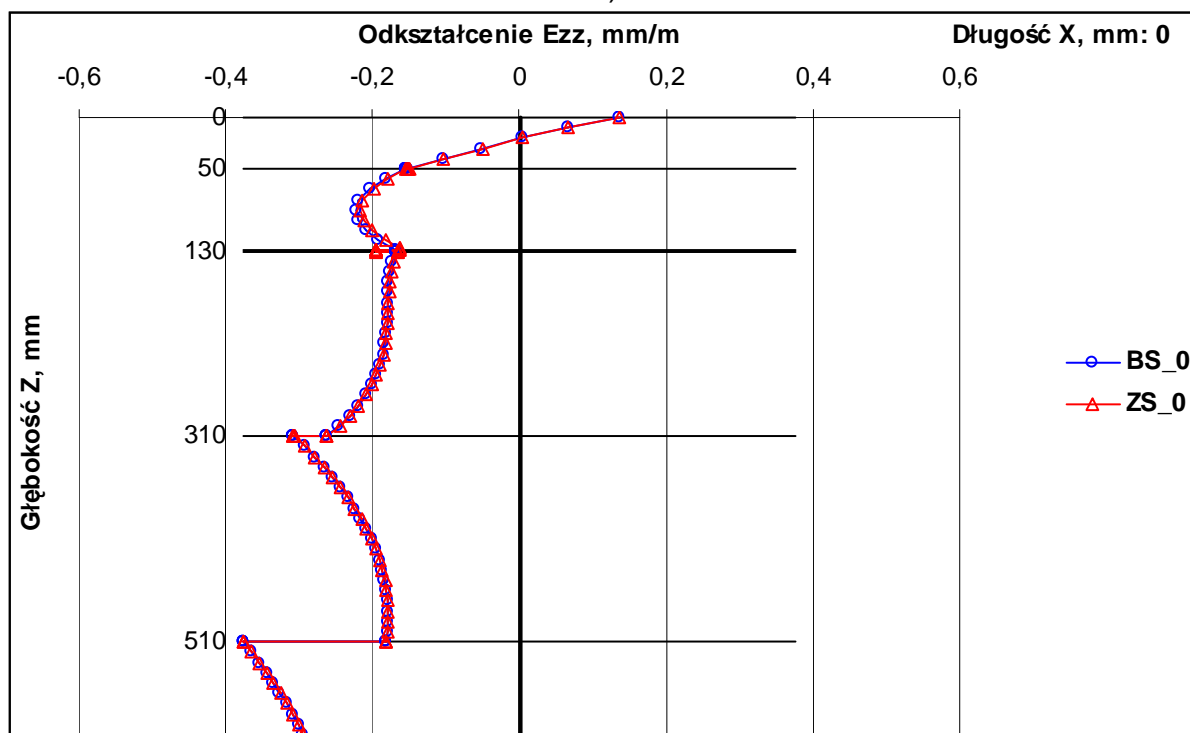
c)



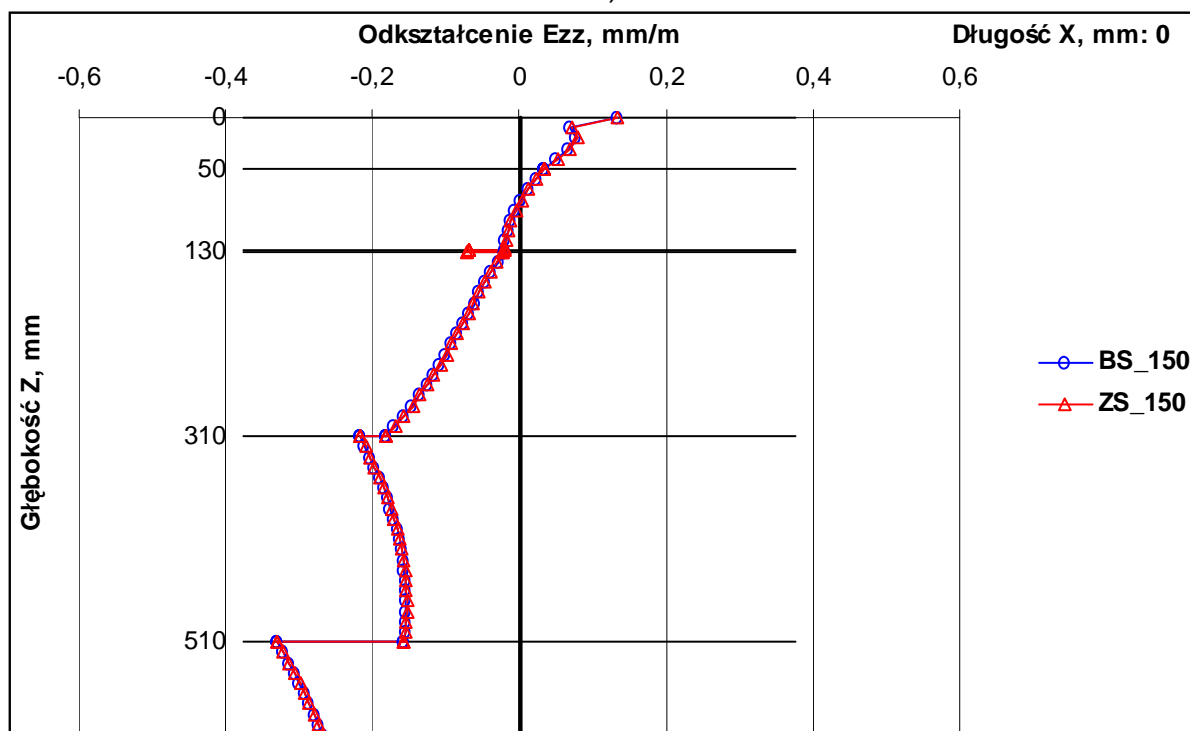
d)

Rys.5. Wykresy naprężeń stycznych: a) S_{yz} , b) S_{xz} , c) i d) S_{xy} .

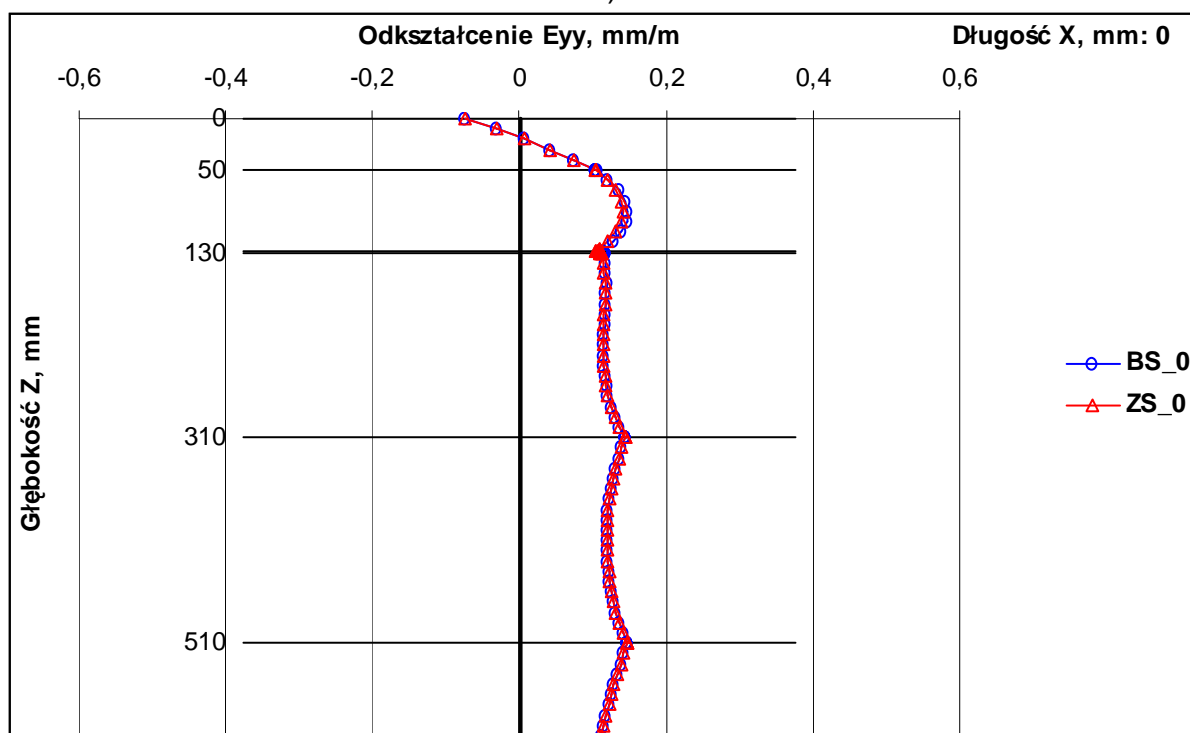
a)



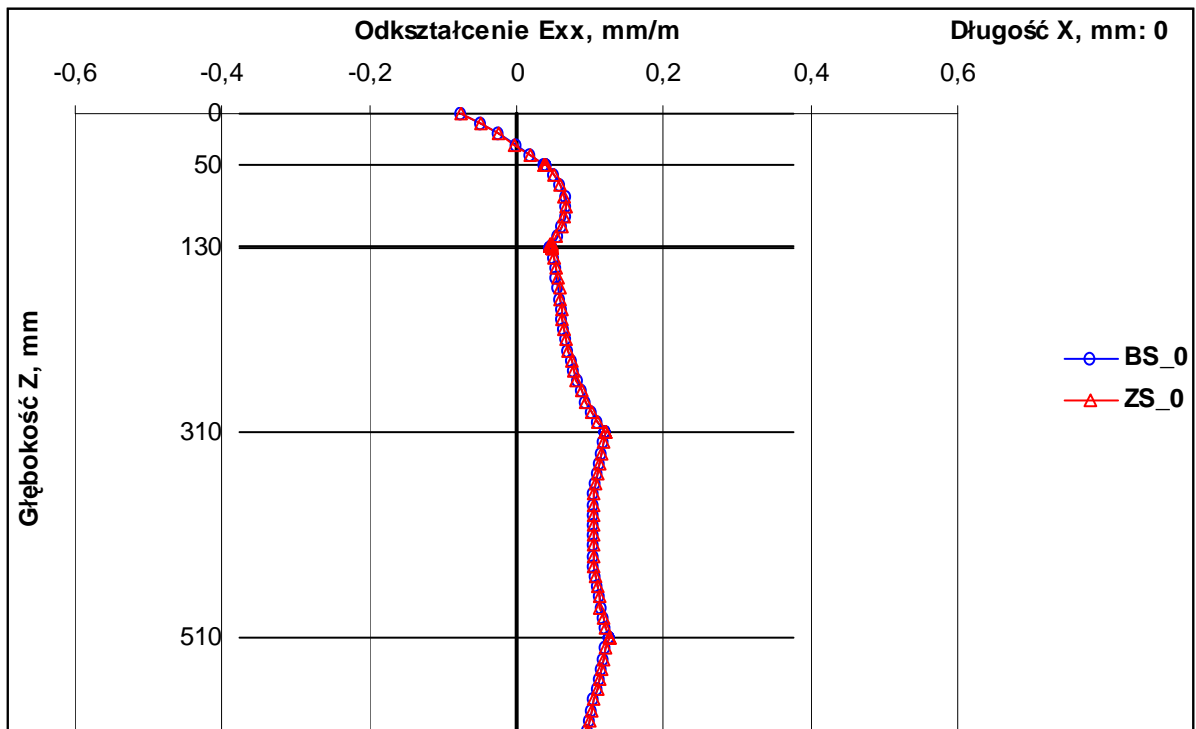
b)



c)

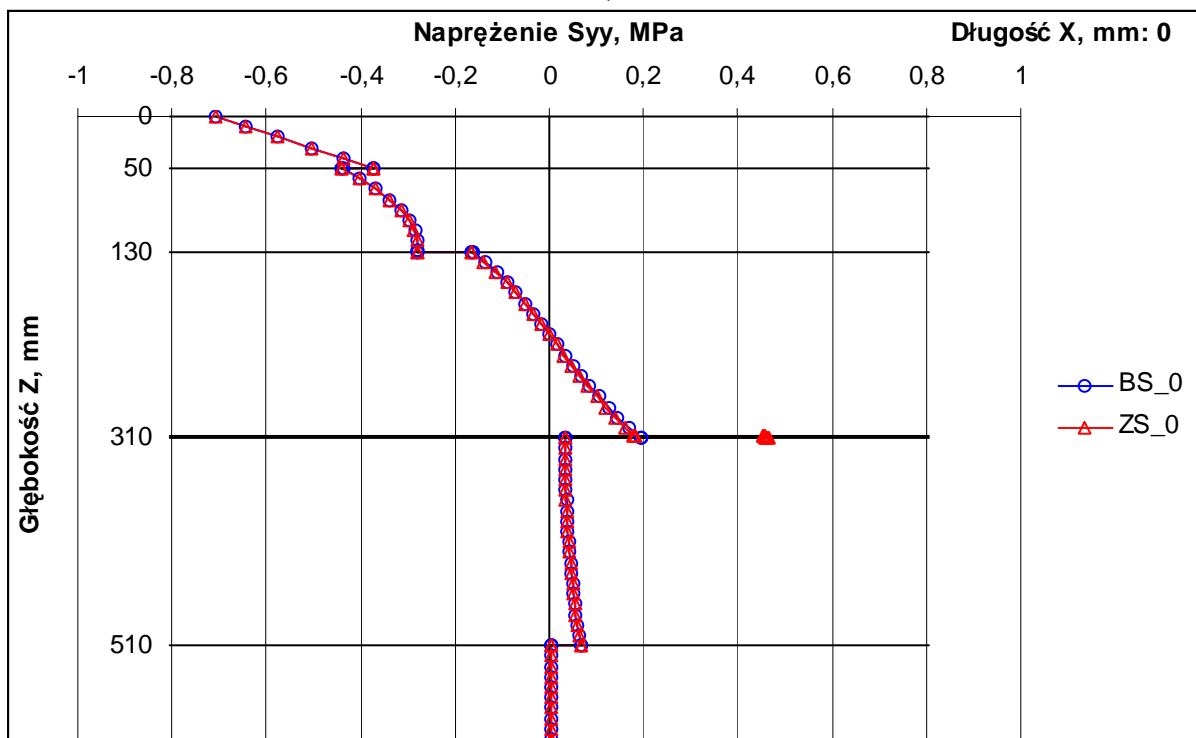


d)

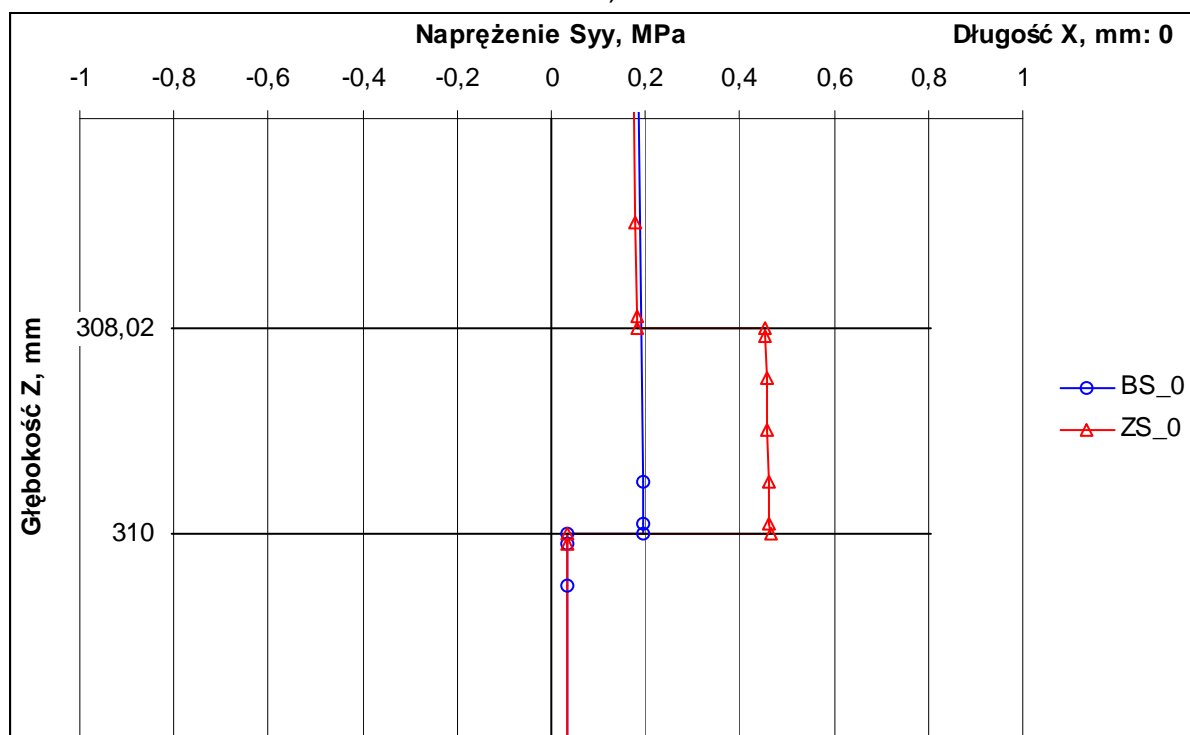


Rys.6. Wykresy odkształceń normalnych.

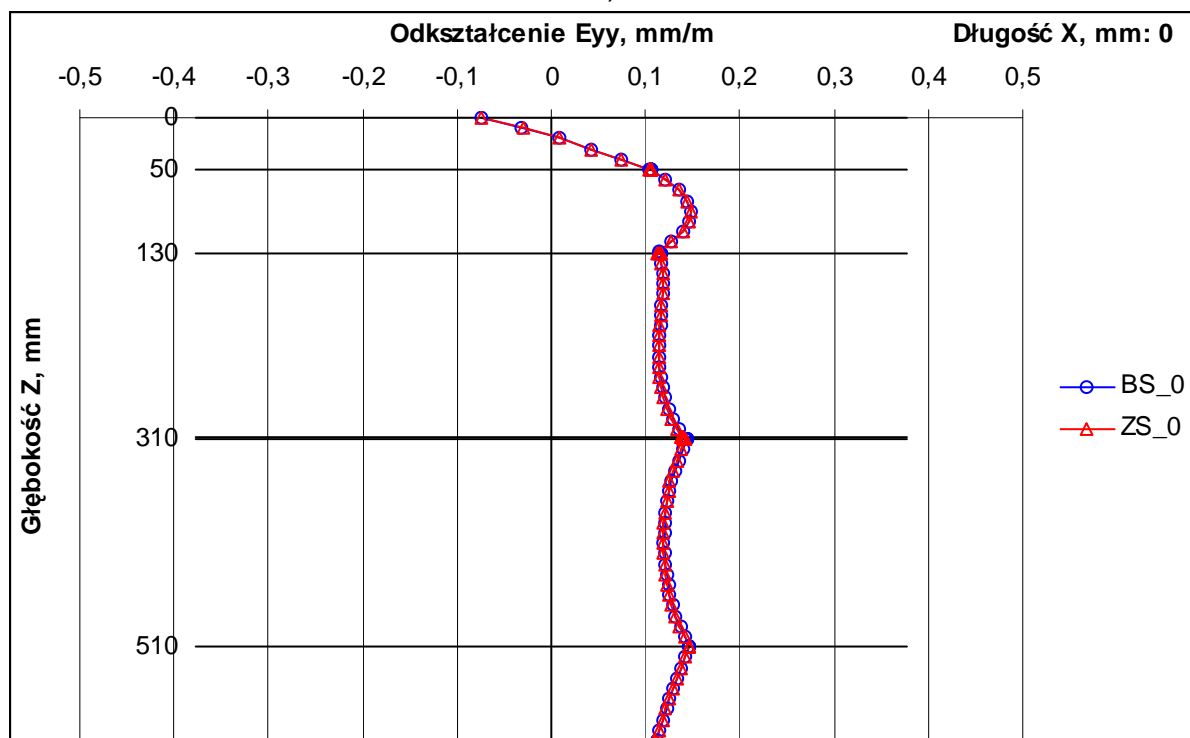
a)



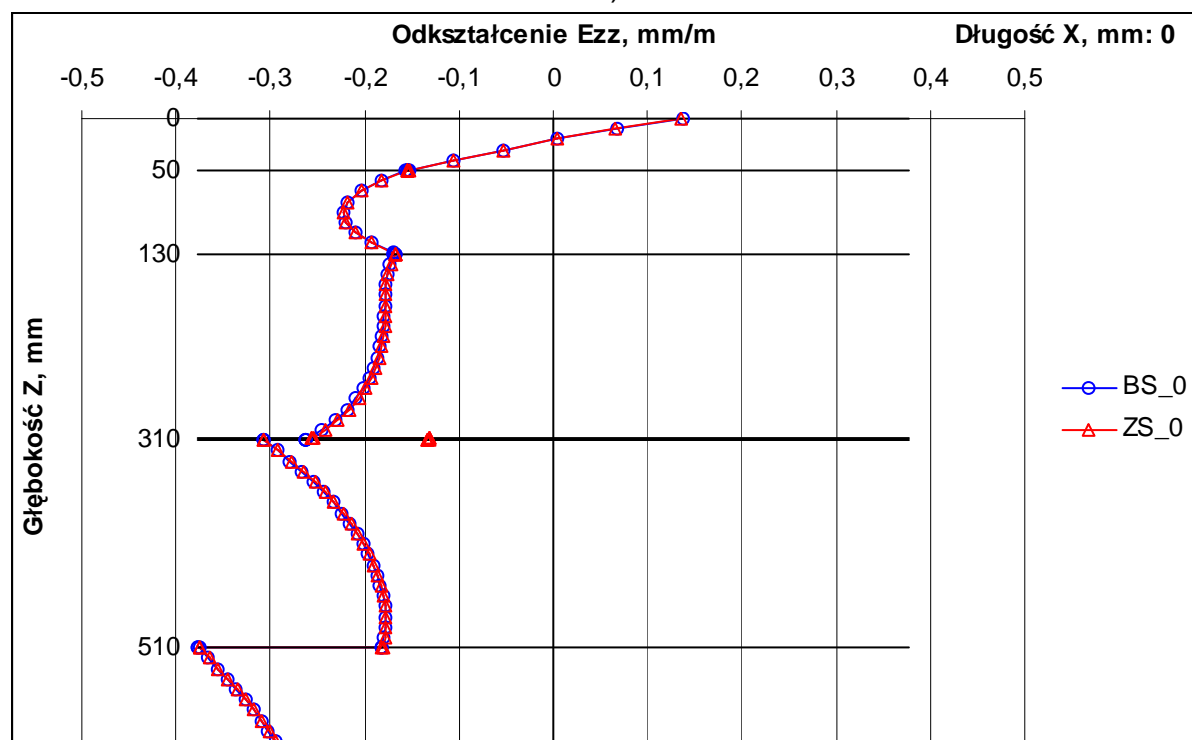
b)



c)



d)



Rys.7. Wykresy porównawcze wybranych odkształceń i przemieszczeń normalnych konstrukcji typowej bez zbrojenia oraz ze zbrojeniem w spodzie warstwy podbudowy asfaltowej.

Literatura do rozdz. III

Hopman P. C., Nilsson R. N., Pronk A. C.: „Theory, validation and application of the visco-elastic multilayer program VEROAD”. *th Int. Conf. on asphalt pavements, ISAP, Washington 1997

Hopman P. C., Nilsson R. N.: „Mix design dealing with mechanical distresses in the pavement. Mechanical Tests for Bituminous Materials”. Lyon '97, ISBN 90 5410 8762

Hopman P. C.: „The visco-elastic multilayer program VEROAD”. Heron, Volume 41, 1996, No 1

Hopman P. C.: „Visco-elastic design and evaluation of pavements and mixes” (Lepkosprężysta ocena i projektowanie mieszanek i nawierzchni). VII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce 8-9 maj 2001 r., tom II, str. 265-272

VEROAD: “User manual”, Version 2000 April. Appendix B: “Additional Theory”. NPC by, Utrecht, Netherlands 2000

Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDP-IBDiM, Warszawa 1997

Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDP-IBDiM, Warszawa 2001

PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe - Wymagania