ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991
Seria: BUDOWNICTWO Z. 77 Nr kol. 1131

Wiesław SZUMIERZ
Anna ŻAK
Krzysztof CHLIPALSKI

WPŁYW POZIOMYCH PRZEMIESZCZEŃ PODŁOŻA GÓRNICZEGO NA PRACĘ NAWIERZCHNI DROGOWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono analityczne ujęcie wpływów poziomych przemieszczeń podłoża górniczego na pracę statyczną odkształcalnej nawierzchni drogowej.

W wyniku podziemnej eksploatacji górniczej zachodzą w górotworze procesy, które na powierzchni terenu ujawniają się między innymi w postaci poziomych odkształceń gruntów. Odkształcenia te mogą mieć charakter rozluźnienia bądź zagęszczenia.

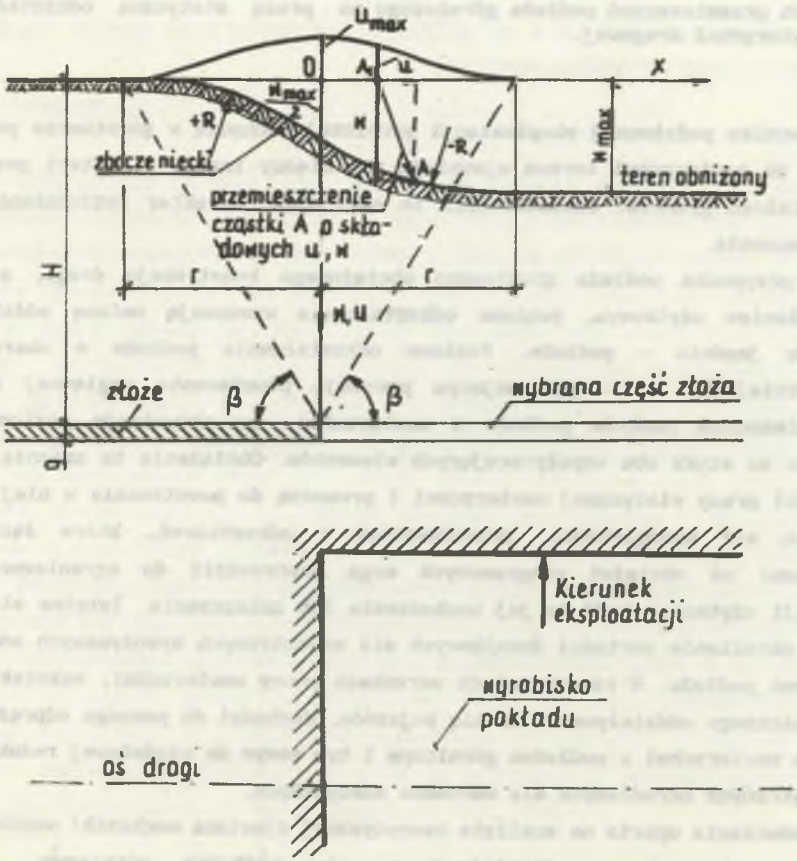
W przypadku podłoża gruntowego obciążonego konstrukcją drogi, a także obciążeniem użytkowym, poziome odkształcenia wymuszają zmianę oddziaływań układu jezdnia - podłoże. Poziome odkształcenia podłoża o charakterze rozluźniającym lub zagęszczającym powodują powstawanie względnej różnicy przemieszczeń punktów podłoża i nawierzchni, co aktywizuje poziome siły tarcia na styku obu współpracujących elementów. Obciążenia te zmieniają więc warunki pracy statycznej nawierzchni i prowadzą do powstawania w niej dodatkowych sił wewnętrznych, przemieszczeń i odkształceń, które łącznie z wpływami od obciążeń programowych mogą doprowadzić do ograniczenia jej funkcji użytkowej bądź do jej uszkodzenia lub zniszczenia. Istotne staje się więc określenie wartości dodatkowych sił wewnętrznych wywoływanych odkształceniami podłoża. W rzeczywistych warunkach pracy nawierzchni, wskutek wpływu dynamicznego oddziaływania na nią pojazdów, dochodzi do pewnego odprężenia na styku nawierzchni z podłożem górniczym i tym samym do częściowej redukcji sił wewnętrznych określonych dla warunków statycznych.

Rozważania oparto na analizie teoretycznej zjawiska mechaniki współdziałania nawierzchni z odkształcającym się podłożem górniczym, dającej ukierunkowanie badań doświadczalnych i rozwinięcie tych analiz na gruncie eksperymentalnym - w badaniach laboratoryjnych i terenowych.

1. MODEL WSPÓŁDZIAŁANIA NAWIERZCHNI Z DEFORMUJĄCYM SIĘ POZIOMO PODŁOŻEM

1.1. Warunki statyczne

Analizę wpływu poziomych przemieszczeń podłoża gruntowego występujących na stacjonarnym zboczu niecki górniczej na pracę statyczną prostej budowli liniowej nieskończenie długiej (rys. 1) przeprowadza się na przykładzie podatnej nawierzchni drogowej, typowej dla terenów górniczych [1], [2].



Rys. 1. Zbocze ustabilizowanej niecki górniczej

Fig. 1. The slope of a stabilized mining subsidence area

Ze względu na podstawowe znaczenie dla trwałości nawierzchni odporności na rozciąganie mieszanki mineralno-bitumicznej, szczególnie w warunkach niskich

temperatur, w których występuje istotny wzrost sztywności lepiszcza i mieszanek, ograniczono analizę pracy nawierzchni do warunków stanu zimowego i wiosenno-jesiennego, tzn. dla temperatur niższych od + 10°C. Jednocześnie w tym stanie temperaturowo-wilgotnościowym, poruszając się w obszarze teorii sprężystości, przyjęty model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni bardziej przystaje do warunków rzeczywistych. Zakładamy, że rozpatrywana konstrukcja nawierzchni tworzy płytę ciągłą posiadającą pewną sztywność podłużną EA, jest ciałem jednorodnym liniowo-sprężystym, o stałej E niezależnej od temperatury i czasu. Analizę pracy nawierzchni przeprowadzono opierając się na teorii małych odkształceń ciała stałego.

Przemieszczenia podłoża wymuszające przemieszczenia osiowe nawierzchni opisano w przybliżeniu funkcją:

$$u_1 = \frac{u_{max}}{2}(1 + \cos\pi\xi) \tag{1}$$

gdzie: $u_{max} = 0,4\, w_{max}$, (2)

$$\xi = \frac{x}{r}, \tag{3}$$

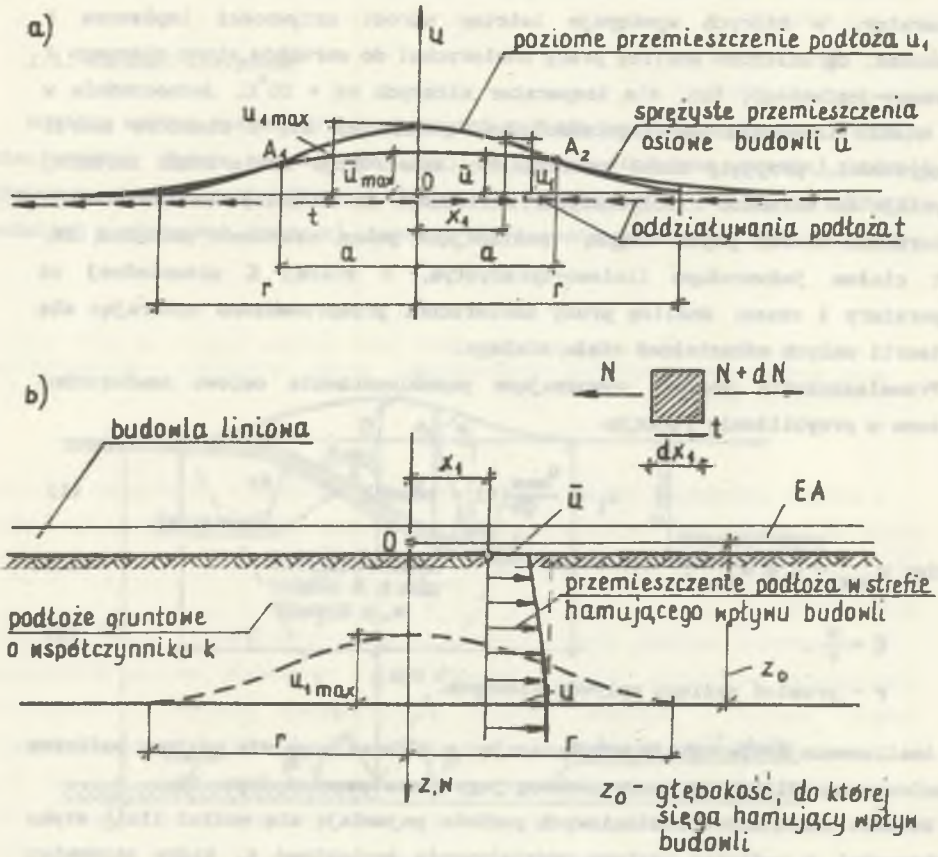
r - promień zasięgu wpływów głównych.

Analizowana nawierzchnia współpracując z deformującym się poziomo podłożem gruntowym ogranicza tym samym swobodę jego przemieszczeń (rys. 2).

Wskutek odkształceń postaciowych podłoża pojawiają się wzdłuż linii styku nawierzchni z podłożem poziome oddziaływania kontaktowe t, które stanowiąc obciążenie zewnętrzne w stosunku do konstrukcji nawierzchni - wywołują w niej siły wewnętrzne podłużne N i odpowiadające im naprężenia osiowe σ oraz sprężyste przemieszczenia osiowe $\bar{u}$ przekrojów nawierzchni, zgodne co do kierunku i zwrotu z przemieszczeniami podłoża u_1.

Przyjęte powyżej założenia prowadzą do opracowania uproszczonej (inżynierskiej) teorii, umożliwiającej przybliżone ujęcie zjawiska mechaniki współdziałania nawierzchni z odkształcającym się podłożem górniczym. W ścisłym analitycznym ujęciu teoria ta bowiem prowadzi do poważnych trudności rachunkowych.

Wykres wymuszonych przemieszczeń $\bar{u}$ przekrojów nawierzchni, odwzorowujący w przybliżeniu rzeczywisty ich rozkład wzdłuż prostej osi podłużnej trasy, przedstawiono schematycznie na rys. 2. Wielkość oddziaływań t (rys. 3) zależy wprost od wartości przemieszczeń podłoża względem nawierzchni oraz od właściwości fizyko-mechanicznych gruntu podłoża i nie może przekroczyć pewnej wartości granicznej t_g, którą oblicza się z warunku wytrzymałości gruntu na ścinanie:



Rys. 2. Stan poziomych przemieszczeń u_1 podłoża i sprężystych przemieszczeń osiowych $\bar{u}$ przekrojów budowli liniowej

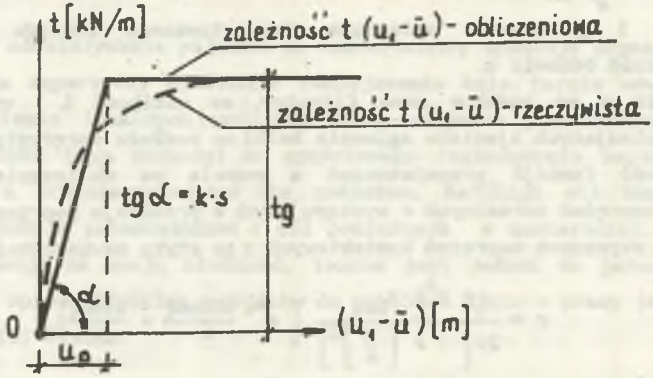
Fig. 2. Distribution of horizontal subsoil displacements u_1 and the elastic axial displacements $\bar{u}$ of cross-section of a linear object

$$t = ks(u_1 - \bar{u}), \text{ dla } u_1 - \bar{u} \le u_p \tag{4}$$

gdzie:

$$u_p = \frac{t_g}{ks} \tag{5}$$

u_p - wartość względnego przemieszczenia, sygnalizująca stan graniczny pracy podłoża,



Rys. 3. Oddziaływania t

Fig. 3. Reactions t

$$t = t_g, \text{ dla } u_1 - \bar{u} \geq u_p \tag{6}$$

k - współczynnik podatności sprężystej podłoża,

s - część obwodu przekroju nawierzchni kontaktująca się z podłożem.

Analizę przeprowadza się na podstawie wspólnego schematu statycznego (modelu), w którym jest reprezentowana zarówno nawierzchnia, jak i jej podłoże (rys. 2).

Uwzględniając stronę statyczną (warunek równowagi), geometryczną (związek przemieszczeń i odkształceń) i fizyczną (związek odkształceń i naprężeń) rozpatrywanego zagadnienia, dla zadanych wymuszeń podłoża od wpływu jednej krawędzi wyrobiska określono [5] funkcję opisującą sprężyste przemieszczenia osiowe $\bar{u}$ budowli liniowej:

$$\bar{u} = \frac{u_{max}}{2}\left[-e^{-\kappa}\cdot\frac{\left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2}{1+\left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2}\cdot\cosh\kappa\xi + \frac{\cos\pi\xi}{1+\left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2} + 1\right], \tag{7}$$

dla $0 \leq \xi \leq 1$

$$\bar{u} = \frac{u_{max}}{2}\cdot\frac{\left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2}{1+\left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2}\cdot\sinh\kappa\cdot e^{-\kappa\xi}, \tag{8}$$

dla $1 \leq \xi < \infty$

gdzie: $\kappa = r\sqrt{\frac{ks}{EA}}$ (9), charakteryzuje wpływ podłoża, nawierzchni, rodzaju górotworu i głębokości zalegania eksploatowanego pokładu na wielkość przemieszczeń budowli $\bar{u}$.

Parametr κ ma podobny sens fizyczny, co wielkość L^{-1} występująca we wzorach opisujących zjawisko zginania belki na podłożu sprężystym.

Znajomość funkcji przemieszczeń $\bar{u}$ pozwala na obliczenie dodatkowych osiowych naprężeń normalnych σ występujących w przekroju poprzecznym nawierzchni oraz stycznych naprężeń kontaktowych τ na styku nawierzchni z podłożem

$$\sigma = \frac{-\pi^2 E\, u_{max}}{2r\left[1 + \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2\right]}\left(e^{-\kappa}\frac{\sinh\kappa\xi}{\kappa} + \frac{\sin\pi\xi}{\pi}\right), \tag{10}$$

$$\tau = \frac{-\pi^2 EAu_{max}}{2sr^2\left[1 + \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2\right]}\left(e^{-\kappa}\cosh\kappa\xi + \cos\pi\xi\right), \tag{11}$$

dla $0 \le \xi \le 1$

$$\sigma = \frac{-\pi Eu_{max}}{2r\left[1 + \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2\right]}\cdot\frac{\sinh\kappa}{\kappa}\cdot e^{-\kappa\xi}, \tag{12}$$

$$\tau = \frac{\pi^2 EAu_{max}}{2sr^2\left[1 + \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2\right]}\sin\kappa\cdot e^{-\kappa\xi} \tag{13}$$

dla $1 \le \xi < \infty$.

Podane wzory (7 i 8) dotyczą tylko stadium sprężystej pracy odkształconego postaciowo podłoża gruntowego (niezmienność relacji styku nawierzchni z podłożem w każdym punkcie) i obowiązują dla $u_{max} \le u^g_{max}$,

gdzie:
$$u^g_{max} = \frac{2u_p\left[1 + \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2\right]}{\left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2(1 + e^{-\kappa})} \tag{14}$$

Dla $u_{max} > u^g_{max}$ zachodzi stadium sprężysto-plastycznej pracy podłoża. Między odkształconym postaciowo podłożem gruntowym a nawierzchnią dochodzi wówczas lokalnie do pokonania sił tarcia i przyczepności. Towarzyszy temu poślizg podłoża względem nawierzchni (lub na odwrót), którego zasięg powiększa się wraz ze wzrostem przemieszczeń górniczych terenu. Występowanie różnych stref oddziaływań (sprężystych i plastycznych) podłoża wzdłuż osi podłużnej nawierzchni prowadzi do związków nieliniowych między naprężeniami a poziomymi przemieszczeniami podłoża górniczego, co w efekcie stwarza znaczne komplikacje natury matematycznej w ujęciu i opisie tego problemu. Szczegółową analizę statyczną tego zagadnienia podają prace [4, 5].

1.2. Warunki dynamiczne

Dynamiczne oddziaływanie pojazdów na nawierzchnię wywołuje drganie ziaren podłoża, czemu towarzyszy niewielkie zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego [3] i wystąpienie lokalnych poślizgów oraz wzajemne przemieszczanie się ziaren. W wyniku tego dochodzi do częściowego rozładowania napięć między nawierzchnią a przemieszczającym się podłożem. Redukcji sił kontaktowych towarzyszy redukcja przemieszczeń i sił podłużnych w nawierzchni. Omówione zjawisko, z uwagi na swoją złożoność, trudne jest jednak do jednoznacznego analitycznego opisu. Globalne podejście do problemu ujęto w pracy [6].

Ze wzoru (10) wynika:

$$\sigma = \frac{-\kappa^2 E}{2r} f(\kappa,\xi) u_{max}. \tag{15}$$

Przyrost naprężeń statycznych, wywołanych przyrostem przemieszczeń podłoża, wynosi:

$$d\sigma = \frac{-\kappa^2 E}{2r} f(\kappa,\xi) du_{max} \tag{16}$$

Składowa przemieszczeń u_{max} jest funkcją czasu i specjaliści mechaniki górotworu opisują ją wzorem:

$$u_{max} = u^k_{max}(1 - e^{-ct}) \tag{17}$$

gdzie: u^k_{max} - największe poziome przemieszczenie podłoża po wygaśnięciu wpływów,

c [rok^{-1}] - współczynnik czasu zależny od rodzaju górotworu, przy czym c w górnośląskiej niecce węglowej waha się od 0,5 - 5,0. Mniejsze wartości przyjmuje się dla górotworu o przewadze piaskowca, gdzie mamy powolne obniżanie terenu.

Załóżmy, że przyrost du_{max}, wywołujący przyrost naprężeń $d\sigma$, wystąpił w pewnym momencie przeszłości t_*. Rozpatrując chwilę bieżącą t i uwzględniając procesy relaksacyjne zachodzące w podłożu pod wpływem oddziaływań dynamicznych pojazdów, prowadzące do redukcji tych naprężeń, otrzymujemy zależność:

$$d\sigma_d = d\sigma f_1(t - t_*), \tag{18}$$

gdzie: σ_d - naprężenie odpowiadające dynamicznym warunkom pracy nawierzchni, zaś f_1 - funkcja monotonicznie malejąca, przyjmująca dla $t = t_*$ wartość $f(0) = 1$.

Właściwościom tym czyni zadość funkcja:

$$f_1(t - t_o) = e^{-\alpha(t-t_o)}, \tag{19}$$

w której współczynnik α uwzględnia wpływy wibropełzania w nawierzchni.

Stosując do elementarnych efektów wyrażonych wzorem (18) zasadę superpozycji oraz uwzględniając wyrażenie (17) otrzymujemy

$$\sigma_d = \sigma^k \cdot c \cdot \int_0^t e^{-\alpha(t-t_o)} e^{-ct_o} dt_o, \tag{20}$$

gdzie σ^k oblicza się ze wzoru (15) po podstawieniu $u_{max} = u^k_{max}$.

Po scałkowaniu (20) uzyskujemy

$$\sigma_d = \delta\sigma^k, \tag{21}$$

gdzie:

$$\delta = \frac{\frac{c}{\alpha}}{1 - \frac{c}{\alpha}} (e^{-ct} - e^{-\alpha t}). \tag{22}$$

Funkcyjna postać współczynnika redukcji δ opisana wzorem (22) określa przebieg zmian wielkości naprężeń w nawierzchni w rzeczywistych warunkach dynamicznego oddziaływania pojazdów.

Z warunku

$$\frac{d\,\delta}{d(dt)} = 0, \tag{23}$$

otrzymujemy zależność na obliczenie czasu wystąpienia ekstremalnej wartości σ_d, którą przyjmuje się za podstawę do analizy pracy nawierzchni:

$$t_k = \frac{\ln\frac{c}{\alpha}}{c - \alpha}, \tag{24}$$

podstawiając $t = t_k$ do wzoru (22) otrzymujemy

$$\delta_{max} = \frac{\frac{c}{\alpha}}{1 - \frac{c}{\alpha}} \left[\left(\frac{c}{\alpha}\right)^{\frac{\frac{c}{\alpha}}{1 - \frac{c}{\alpha}}} - \left(\frac{c}{\alpha}\right)^{\frac{1}{1 - \frac{c}{\alpha}}} \right] \tag{25}$$

2. OSZACOWANIE WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELU NA PODSTAWIE POMIARÓW RZECZYWISTYCH PRZEMIESZCZEŃ OSIOWYCH NAWIERZCHNI

W celu oszacowania parametrów modelu przedstawionego w punkcie 1 wykonano sieć obserwacyjną [6] długości 300 m na drodze krajowej Gliwice-Mikołów w obszarze wpływów eksploatacji górniczej prowadzonej przez KWK Sośnica. Pomiary przemieszczeń osi jezdni i wybranych punktów terenowych zostały wykonane przez Zakład Geodezji Instytutu Budowy Dróg Politechniki Śląskiej w okresie maj 1988 - listopad 1990 r.

Dla stadium sprężystej pracy podłoża wymuszone przemieszczenia osiowe nawierzchni na zboczu niecki opisuje funkcja:

$$\bar{u}_{ij}^{t} = \delta_j \bar{u}_i = \frac{u_{max}}{2} \frac{\frac{c}{\alpha}}{1 - \frac{c}{\alpha}} \left(e^{-ct_j} - e^{-\alpha t_j}\right) \left[-e^{-\kappa} \frac{\left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2}{1 + \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2} \cosh\kappa\xi_i + \right.$$

$$\left. + \frac{\cos\pi\xi_i}{1 + \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^2} + 1\right]. \tag{26}$$

gdzie: i - wskaźnik odciętej wyróżnionego przekroju,

j - wskaźnik cyklu pomiarowego, przy czym przedział czasu liczony jest od momentu rozpoczęcia eksploatacji górniczej.

Wyrażenie (26) jest zależne od trzech niezależnych parametrów: α, c, κ, których sposób oszacowania oparty na metodzie najmniejszych kwadratów przedstawiono poniżej. Pozwala ona na takie ukształtowanie - poprzez dobór odpowiednich wartości parametrów - funkcji przybliżenia, w naszym przypadku $\bar{u}_{ij}^{t}$, aby różnice między wartościami tej funkcji i wartościami $\bar{u}_{ij}^{p}$ zmierzonymi w terenie spełniały warunek:

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (\bar{u}_{ij}^{t} - \bar{u}_{ij}^{p})^2 = F(\alpha, c, \kappa, \xi) = \min. \tag{27}$$

Parametry modelu wyznacza się z układu trzech równań nieliniowych:

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial c} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial \kappa} = 0. \tag{28}$$

Równania (28) rozwiązujemy przy wykorzystaniu EMC metodą Monte Carlo lub metodą systematycznego przeszukiwania.

Przykład obliczenia:

$r = 322$ m, $u_{max} = 0{,}5065$ m, $n = 7$, $m = 3$

$\xi_i = (-0{,}27;\ -0{,}17;\ -0{,}08;\ 0{,}0;\ 0{,}10;\ 0{,}19;\ 0{,}38)$

$t_j = (0,92;\ 1,17;\ 1,5)$ [rok]

$$[\bar{u}_{ij}^{p}] = \begin{vmatrix} 17,01 & 27,30 & 34,85 & 38,46 & 36,29 & 27,56 & 7,55 \\ 25,09 & 35,68 & 42,89 & 48,19 & 45,31 & 34,61 & 13,14 \\ 26,50 & 36,56 & 44,17 & 49,41 & 46,69 & 36,79 & 13,42 \end{vmatrix}$$

Dla przyjętych danych z układu równań (28) otrzymujemy:

$\alpha = 0,2748$ rok^{-1}, $c = 4,7944$ rok^{-1}, $\kappa = 39,4153$,

pozostałe wyniki:

$t_k = 0,63$ rok, $\delta_{max} = 0,84$, $\sigma^k = 1,88$ MPa, $\sigma_{dmax} = 1,58$ MPa

3. PODSUMOWANIE

Jak z powyższych obliczeń wynika, wpływ przemieszczeń poziomych podłoża górniczego, występujących w obrębie zbocza niecki, na stan naprężeń w nawierzchni podatnej jest istotny i wymaga uwzględnienia w ogólnym bilansie naprężeń. Przyrosty dodatkowych naprężeń od wpływów górniczych dość szybko stabilizują się wraz ze wzrostem przemieszczeń podłoża, gdyż drogowe nawierzchnie podatne, ze względu na stosunkowo małą sztywność podłużną EA, praktycznie nadążają za odkształceniami podłoża górniczego.

Przeprowadzone dotychczas rozważania teoretyczne i badania eksperymentalne prowadzą do wniosku, że odkształcenia podłoża górniczego, obok wpływów atmosferycznych, wodno-gruntowych i obciążeń użytkowych, są dodatkowym czynnikiem destrukcyjnie oddziałującym na konstrukcję nawierzchni drogowej, obniżającym jej trwałość eksploatacyjną.

LITERATURA

[1] Cieśliński J. i in.: Zasady projektowania i budowy dróg głównych i autostrad na terenach szkód górniczych w świetle doświadczeń ekspertów RFN i brytyjskich. Zarząd Autostrad Warszawa 1980.

[2] Fieweger H.W.: Projektowanie, budowa i utrzymanie autostrad na terenach szkód górniczych. Raport eksperta UNDP. BPRSD Warszawa 1975.

[3] Glinko H.: Wpływ poziomych odkształceń na wytrzymałość gruntów niespoistych na terenach górniczych. Archiwum Hydrotechniki z. 1-2/87.

[4] Szumierz W.: Wpływ poziomych deformacji górniczych podłoża na pracę budowli liniowych. Archiwum Inż. Lądowej z. 4/76.

[5] Szumierz W.: Statyka budowli liniowych poddanych działaniu sił poziomych od pełzania podłoża górniczego. GIG Seria dodatkowa, Katowice 1980.

[6] Szumierz W., Żak A., Chlipalski K., Laska W.: Wstępne zasady utrzymania i eksploatacji dróg samochodowych w warunkach szkód górniczych na podstawie obserwacji wybranych ciągów drogowych Praca NB-120/RB-3/88.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Łucjan Siewczyński

Wpłynęło do Redakcji 26. 05. 1991 r.

INFLUENCE OF HORIZONTAL DISPLACEMENTS IN MINING SUBSOIL ON THE BEHAVIOUR OF ROAD SURFACE

Summary: the paper deals with an analytical approach to the evaluation of influence of horizontal displacements in mining subsoil on the static behaviour of deformable road surface.

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩНИЙ ГОРНОГО ОСНОВАНИЯ НА РАБОТУ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Р е з ю м е

В работе представлен аналитический подход к влияниям горизонтальных перемещений горного основания на статическую работу деформируемого дорожного покрытия.