



URSZULA KOŁODZIEJCZYK¹⁾
MICHAŁ ĆWIAKAŁA²⁾

ANALIZA WYNIKÓW MODELOWYCH BADAŃ PODCIĄGANIA KAPILARNEGO WODY W NASYPACH DROGOWYCH³⁾

STRESZCZENIE. Trwałość obiektów inżynierskich, w tym dróg, zależy w dużym stopniu od właściwego rozpoznania procesów naturalnych zachodzących w podłożu gruntowym. Takim zjawiskiem - szczególnie istotnym dla drogownictwa - jest wysadzinowość gruntów. Okazuje się, że można ją skutecznie ograniczyć poprzez zmniejszenie wysokości podciągania kapilarnego wody gruntowej. W pracy przedstawiono wyniki modelowych badań kapilarności gruntów i dokonano ustalenia zależności pomiędzy wysokością podciągania kapilarnego i rodzajem gruntu zalegającego w nasypie drogowym, a także rodzajem i stężeniem roztworu migrującego w nasyp. Badania przeprowadzono na kruszywie naturalnym występującym w trzech złożach zlokalizowanych w okolicy Zielonej Góry, różniących się rodzajem kruszywa i jego genezą. Zbadano wysokość podciągania kapilarnego w kruszywach o naturalnym uziarnieniu oraz w poszczególnych frakcjach kruszyw, analizując zarówno podciągania kapilarny wody jak i roztworów różnych związków chemicznych stosowanych powszechnie w zimowym utrzymaniu dróg, tj.: chlorku sodu oraz chlorku wapnia, o stężeniach 5% i 10%. Analizę podciągania kapilarnego w poszczególnych gruntach w zależności od rodzaju kapilującego związku i jego stężenia przedstawiono w postaci analizy wariancji trójczynnikowej z interakcjami drugiego rzędu. Przeprowadzone badania wykazały, że największą (maksymalną) wysokość podciągania kapilarnego wykazuje woda gruntowa. Natomiast nasycenie wód gruntowych związkami chemicznymi stosowanymi w zimowym utrzymaniu dróg (NaCl i CaCl₂) oraz wzrost stężenia tych związków (od 5% do 10%) powoduje znaczne obniżenie podciągania kapilarnego i - tym samym - wysadzinowości gruntów. Otrzymane wyniki badań wskazują na możliwość ograniczenia negatywnych skutków wysadzinowości gruntów poprzez odpowiedni dobór rodzaju i stężenia środków stosowanych w zimowym utrzymaniu dróg.

¹⁾ dr hab. – profesor Uniwersytecie Zielonogórskiego, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

²⁾ mgr inż. – Wapeco Sp. z o.o., Warszawa

³⁾ niepublikowany referat wygłoszony na Konferencji ENVIROAD 2009

1. WPROWADZENIE

Nawierzchnia drogowa powinna spełniać odpowiednie warunki bezpieczeństwa, niezależnie od warunków atmosferycznych. Jest to szczególnie istotne w okresie zimowym, kiedy wskutek działania niekorzystnych czynników pogodowych konieczne staje się wykonanie efektywnych prac służących ograniczeniu zakłóceń w ruchu drogowym, spowodowanych m.in. śliskością jezdni. Jest to możliwe poprzez wprowadzanie nowoczesnych technik utrzymywania dróg, bardziej operatywnych i skuteczniejszych metod odśnieżania oraz usuwania śliskości zimowej na nawierzchniach drogowych, a także – wcześniejsze zapobieganie ujemnym wpływom zjawisk atmosferycznych na stan dróg i warunki ruchu.

Do najczęstszych zabiegów stosowanych podczas zimowego utrzymania dróg [1, 2] należą:

- a) odśnieżanie – usuwanie śniegu z jezdni i poboczy dróg oraz obiektów towarzyszących, jakimi są zatoki autobusowe, parkingi, miejsca obsługi podróżnych itp.,
- b) bierna osłona dróg – niedopuszczanie do nawiewania śniegu na korpus drogowy za pomocą siatek, płótków i zasłon naturalnych (żywoplitów, pasów zieleni) lub specjalnie formowanych wałów śnieżnych,
- c) przygotowanie, gromadzenie oraz przechowywanie materiałów zapobiegających i usuwających śliskość zimową,
- d) usuwanie śliskości zimowej, tj. zapobieganie powstawaniu i likwidowanie śliskości jezdni ulic, placów i chodników, oparte o stosowanie środków chemicznych oraz materiałów uszorstniających.

Stosowanie mechanicznych zabiegów podczas zimowego utrzymania dróg nie daje zadowalających rezultatów. Na nawierzchni pozostaje bowiem cienka i bardzo śliska warstwa śniegu. Całkowite usunięcie śliskości następuje dopiero po zastosowaniu materiałów uszorstniających [3], do których należą:

- piasek o uziarnieniu do 2 mm,
- kruszywo naturalne o uziarnieniu do 4 mm,
- kruszywo kamienne łamane o uziarnieniu 2 - 4 mm,
- żużel wielkopiecowy (kawałkowy),
- kruszywo niesortowane o uziarnieniu do 4 mm,
- żużel kotłowy (paleniskowy),
- kruszywo niesortowane o uziarnieniu do 8 mm,
- jednorodne mieszaniny kruszyw z solą o składzie wagowym 95% ÷ 97% kruszywa + 5% ÷ 3% soli.

Mimo, iż Polska jest krajem o dużych zasobach kruszyw [4], stosowanie wyłącznie kruszyw do likwidowania śliskości jezdni okazuje się niewystarczające. Przy dużym natężeniu ruchu i pod wpływem silnego wiatru są one bowiem zdmuchiwane z jezdni

lub układają się w nieregularne pryzmy [5, 6]. W związku z tym, oprócz kruszywa, powszechnie stosowane są dodatkowo różne związki chemiczne [7], które powodują wtapienie ziarenek kruszywa w lód, a tym samym zapobiegają ich zdmuchiowaniu z jezdni. Są to:

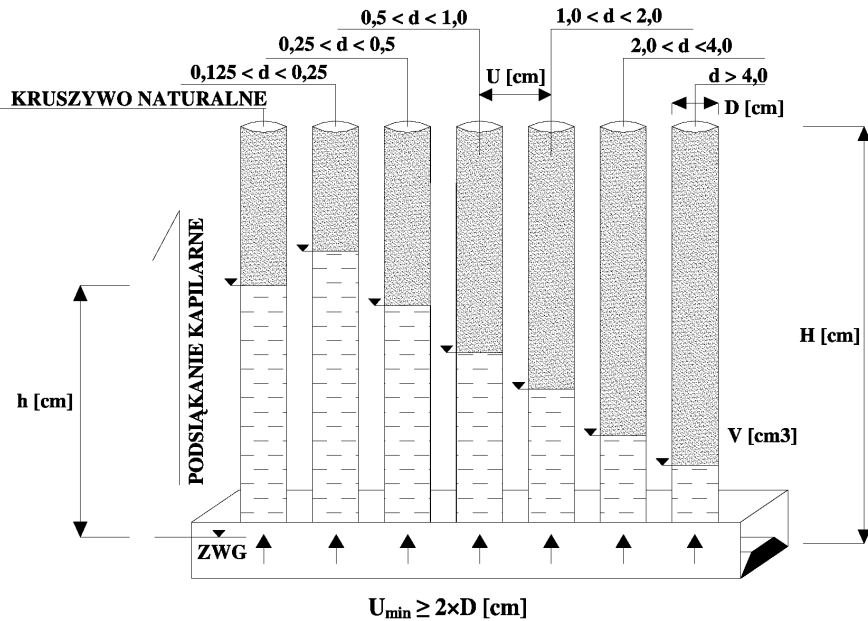
- chlorek sodu NaCl,
- sól drogowa, będąca mieszaniną ok. 97% chlorku sodu NaCl + 2,5% chlorku wapnia CaCl₂ + 0,2% heksacyjanożelazianu potasu K₄Fe(CN)₆,
- solanka – roztwór chlorku sodu NaCl lub chlorku wapnia CaCl₂ o stężeniu 20% ÷ 25%,
- nawilżona sól, będąca mieszaniną 30% solanki + 70% chlorku sodu NaCl,
- techniczny chlorek wapnia (77% ÷ 80% CaCl₂),
- chlorek magnezu MgCl₂,
- mieszanina chlorku sodu NaCl z chlorkiem wapnia CaCl₂,
- mieszanina chlorku sodu NaCl z chlorkiem magnezu MgCl₂,
- mrówczan potasu HCOOK i octan potasu CH₃COOK – w Finlandii,
- octan magnezu (CH₃COO)₂Mg, octan wapnia (CH₃COO)₂Ca, odpady z przetwórstwa buraków cukrowych i kukurydzy, mocznik H₂NCONH₂ oraz alkohole C_nH_{2n}OH – w USA.

Związki te migrują w podłoże gruntowe, powodując zmiany geochemiczne, przejawiające się m.in. w intensywności ruchu wód kapilarnych [8].

2. METODYKA BADAŃ

Badaniom kapilarności poddano grunty o naturalnym uziarnieniu oraz poszczególne frakcje kruszyw: $0,125 \leq d < 0,25$ mm; $0,25 \leq d < 0,5$ mm; $0,5 \leq d < 1,0$ mm; $1,0 \leq d < 2,0$ mm; $2,0 \leq d < 4,0$ mm i $d \geq 4,0$ mm. Jako substancji kapilującej użyto wody destylowanej oraz roztworu chlorku sodu (NaCl) i chlorku wapnia (CaCl₂) o stężeniu 5 i 10%. Stanowisko do badań kapilarności składało się z zestawu przezroczystych rur o średnicy $D = 5,6$ cm, wysokości $H = 50$ cm i objętości $V = 1231$ cm³, wypełnionych warstwami zagęszczonego kruszywa i umieszczonych w zbiorniku wypełnionym wodą lub roztworem danego związku chemicznego (rys. 1).

Ponieważ średnice rur zastosowanych w badaniach były mniejsze od średnic cylindrów normowych, uzyskanie podczas zagęszczania gruntu w rurach określonej normowo jednostkowej energii zagęszczania wg Proctora, równej 0,59 J/cm³ (PN-88/B-04481), wymagało ustalenia odpowiedniej metodyki zagęszczania. Wykonane obliczenia [9] wykazały, iż uzyskanie jednostkowej energii zagęszczania $E_{jedn} = 0,59$ J/cm³ w rurze o objętości $V = 1231$ cm³ wymaga następujących warunków zagęszczania: masa ubijaka $m = 2,75$ kg, wysokość opadania ubijaka $s = 30$ cm, całkowita ilość uderzeń ubijaka $n = 90$. Ze względu na wysokość rury $H = 50$ cm, materiał gruntowy zagęszczano w 5 warstwach o wysokości 10 cm, a na jedną warstwę przypadało 18 uderzeń.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Test stand diagram

Po odpowiednim zagęszczeniu gruntu w rurach przeprowadzono kolejne cykle badań kapilarności. W pierwszym cyklu badań do zbiornika wiano wodę destylowaną, utrzymując stały poziom cieczy przez cały cykl badawczy. Zasadnicze badanie polegało na pomiarze prędkości i wysokości podciągania kapilarnego w kruszywie naturalnym oraz poszczególnych jego frakcjach, przy czym odczyty wysokości podciągania kapilarnego wykonano w następujących odstępach czasu: 5 s, 10 s, 15 s, 30 s, 60 s, 2 min., 3 min., 4 min., 5 min., 10 min., 15 min., 30 min., 1 h, 2 h, 5 h, 8 h, 16 h, 24 h, 48 h i 72 h.

W drugim cyklu badań użyto 5% i 10% chlorku sodu NaCl, a w trzecim – chlorku wapnia CaCl₂, przy czym kolejne badania kapilarności przeprowadzono analogicznie jak w przypadku wody destylowanej.

Poszczególne cykle badań przeprowadzono równolegle dla kruszyw pobranych z trzech złóż zlokalizowanych w okolicy Zielonej Góry, różniących się genezą, wskaźnikiem różnoziarnistości oraz zawartością cząstek pyłowo-iłowych. Badaniom poddano:

- kruszywo ze złoża Chynów – piasek gliniasty pochodzenia fluwiogłacjalnego, o wysokiej zawartości cząstek pyłowo-iłowych ($f_{\pi} + f_i > 15\%$) i wskaźniku różnoziarnistości $U < 3$,
- kruszywo ze złoża Józefowo – pospółka gliniasta, pochodzenia fluwiogłacjalnego, o niskiej zawartości cząstek pyłowo-iłowych ($f_{\pi} + f_i < 15\%$) i wskaźniku różnoziarnistości $U > 5$,

- kruszywo ze złoża Nowogród Bobrzański – pospółka pochodzenia rzeczno-geologicznego, pozbawiona frakcji pyłowo-iłowych, o wskaźniku różnoziarnistości $U > 5$.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. ANALIZA MODELOWYCH BADAŃ PODCIĄGANIA KAPILARNEGO Z ZASTOSOWANIEM H_2O , $NaCl$ i $CaCl_2$

W celu sprawdzenia istotności wpływu czynników głównych (typ złoża, wielkość frakcji kruszywa, rodzaj i stężenie związku chemicznego) oraz ich kombinacji na zróżnicowanie wartości maksymalnego podciągania kapilarnego, przeprowadzono analizę wariancji w układzie trójczynnikiem z interakcjami drugiego rzędu. Za pomocą testu analizy wariancji sprawdzono hipotezę zerową, mówiącą o braku wpływu badanego czynnika lub interakcji czynników na wartość analizowanej cechy. Interakcje wskazywały na występowanie (lub brak) dodatkowego wpływu pewnej kombinacji czynników na badaną cechę statystyczną [10], jaką w tym przypadku jest maksymalna wysokość podciągania kapilarnego.

W celu ustalenia, który z badanych czynników istotnie (bądź bardzo istotnie) wpływa na zróżnicowanie badanej cechy obserwacyjnej (wysokości podsiąku kapilarnego), autorzy opracowania posłużyli się wartością poziomu istotności p .

Za graniczną (krytyczną) wartość poziomu istotności przyjęto następujące kryterium:

$p < 0,05$ – dany czynnik istotnie wpływa na badaną cechę statystyczną,

$p < 0,01$ – dany czynnik bardzo istotnie wpływa na badaną cechę statystyczną.

Do stwierdzenia istotności poszczególnych czynników oraz ewentualnych ich interakcji wykorzystano oprogramowanie STATISTICA. Porównanie istotności różnic między wartościami maksymalnego podciągania kapilarnego w odniesieniu do takich czynników jak: geneza złoża, frakcja kruszywa oraz stężenie danego związku chemicznego ($NaCl$, $CaCl_2$) zestawiono w tablicach 1 i 2. Natomiast porównanie istotności różnic między wartościami podsiąku kapilarnego wg genezy złoża i frakcji kruszywa, gdzie jako związek chemiczny zastosowano wodę destylowaną H_2O , przedstawiono w tablicy 3.

Z powyższej analizy statystycznej wynika, iż w każdym analizowanym przypadku ($NaCl$, $CaCl_2$ oraz H_2O) wpływ czynników głównych na zróżnicowanie wartości maksymalnego podciągania kapilarnego jest bardzo istotny ($p < 0,01$), czyli znacząco różnicuje wysokość podciągania kapilarnego. W przypadku chlorku wapnia $CaCl_2$ stwierdzono dodatkowo istotne statystycznie interakcje pomiędzy stężeniem roztworu kapilującego, a frakcją kruszywa ($p = 0,002 < 0,01$), czego nie stwierdzono przy zastosowaniu chlorku sodu ($p = 0,24 > 0,05$). Oznacza to, iż dobór odpowiedniego stężenia związku chemicznego (5% albo 10% $CaCl_2$) do odpowiedniej frakcji kruszywa (bez względu na typ złoża) różnicuje znacząco wartość maksymalnego podciągania kapilarnego.

Tablica 1. Wyniki trójczynnikowej analizy wariancji podciągania kapilarnego roztworu NaCl w zależności od stężenia roztworu NaCl, rodzaju złoża i wielkości frakcji kruszywa

Table 1. The results of three factor analysis of capillary rise variance of NaCl solution in accordance with the concentration of NaCl solution, a sort of deposit and a size of aggregate fraction

Źródło zmienności	Suma kwadratów odchyłeń <i>SS</i>	Liczba stopni swobody	Średnie kwadraty odchyłeń <i>MS</i>	Wartość statystyki F-Snedecora	Poziom istotności <i>p</i>
Czynniki główne:					
Stężenie	4526	1	4526	73,58	0,000
Złoże	54898	2	27449	446,24	0,000
Frakcja	400820	6	66803	1086,02	0,000
Interakcje:					
Złoże*Stężenie	137	2	69	1,12	0,36
Złoże*Frakcja	15412	12	1284	20,88	0,000
Stężenie*Frakcja	572	6	95	1,55	0,24
Współczynnik korelacji $R = 99,92\%$, $p < 0,001$					

Tablica 2. Wyniki trójczynnikowej analizy wariancji podciągania kapilarnego roztworu CaCl₂ w zależności od stężenia roztworu CaCl₂, rodzaju złoża i wielkości frakcji kruszywa

Table 2. The results of three factor analysis of capillary rise variance of CaCl₂ solution in accordance with the concentration of CaCl₂ solution, a sort of deposit and a size of aggregate fraction

Źródło zmienności	Suma kwadratów odchyłeń <i>SS</i>	Liczba stopni swobody	Średnie kwadraty odchyłeń <i>MS</i>	Wartość statystyki F-Snedecora	Poziom istotności <i>p</i>
Czynniki główne:					
Stężenie	3905	1	3905	157,01	0,000
Złoże	53587	2	26794	1077,22	0,000
Frakcja	238040	6	39673	1595,04	0,000
Interakcje:					
Złoże*Stężenie	50	2	25	1,00	0,40
Złoże*Frakcja	14955	12	1246	50,10	0,000
Stężenie*Frakcja	1071	6	178	7,18	0,002
Współczynnik korelacji $R = 99,95\%$, $p < 0,001$					

Tablica 3. Wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji dla H₂O w zależności od rodzaju złoża i wielkości frakcji kruszywa

Table 3. The results of two factor analysis of H₂O variance in accordance with a sort of deposit and a size of aggregate fraction

Źródło zmienności	Suma kwadratów odchyłeń SS	Liczba stopni swobody	Średnie kwadraty odchyłeń MS	Wartość statystyki F-Snedecora	Poziom istotności <i>p</i>
Czynniki główne:					
Złoże	34540	2	17270	21,17	0,000
Fracja	294280	6	49047	60,12	0,000
Współczynnik korelacji $R = 98,54\%$, $p < 0,001$					

Maksymalne wartości podsiąku kapilarnego uzyskane dla różnych stężeń kapi-lujących roztworów w danej frakcji kruszywa mogą być albo bardzo różne, albo bardzo zbliżone. Analizując na przykład zależność wysokości podciągania kapilarnego od konfiguracji stężenia związku chemicznego – frakcja kruszywa stwierdzono, iż najlepszy efekt doboru stężenia związku (5% albo 10%) dla zróżnicowania wysokości podsiąku kapilarnego uzyskujemy dla frakcji naturalnej (0) oraz dla frakcji najdrobniejszej ($d = 0,125$ mm). Natomiast przy grubszych frakcjach ($d > 0,25$ mm), efekt doboru odpowiedniego stężenia związku dla danej frakcji kruszywa nie daje już tak dużego zróżnicowania podsiąku kapilarnego.

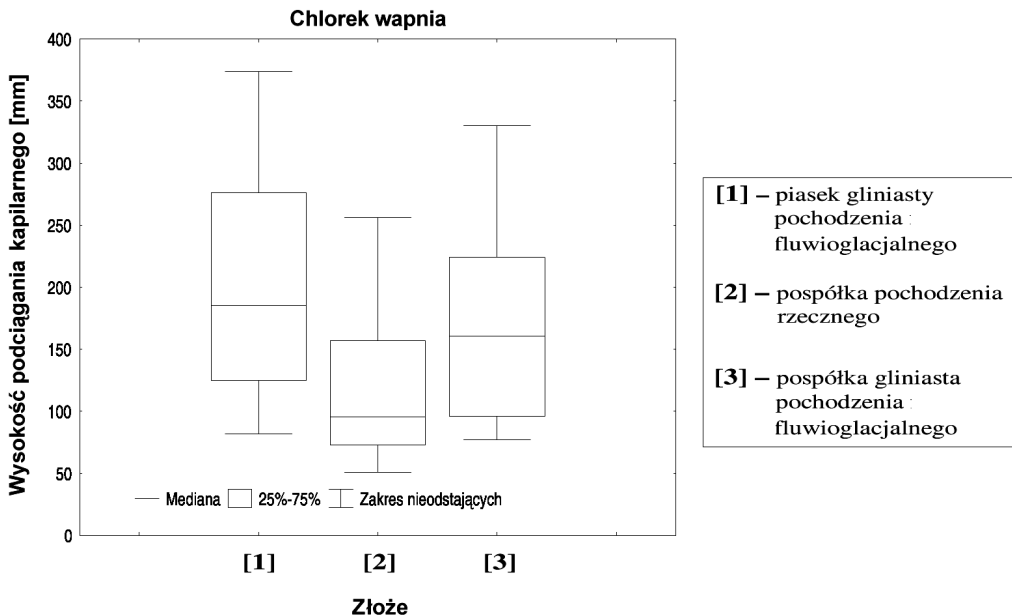
Pomimo występowania bądź niewystępowania współdziałania (interakcji) pomiędzy czynnikami głównymi, niezaprzeczalnym faktem jest to, iż uzyskanie najmniejszego podsiąku kapilarnego następuje przy zastosowaniu 10% związku chemicznego (bez względu na rodzaj związku) oraz przy zastosowaniu najgrubszej frakcji, $d > 4,0$ mm (bez względu na rodzaj złoża). Przedstawione pewne konfiguracje pomiędzy rodzajem złoża a stężeniem związku chemicznego pokazują, że bez względu na rodzaj stężenia związku, zawsze najmniejsze podsiąki kapilarne uzyskujemy dla złoża przemysłowego (Nowogród Bobrzański), a ponadto – bez względu na rodzaj złoża, zawsze najmniejsze podsiąki kapilarne uzyskujemy przy zastosowaniu wyższego stężenia (10%) związku chemicznego. W związku z tym, nie występuje tam żadna interakcja ($p > 0,05$ zarówno dla CaCl₂ jak i NaCl).

Reasumując powyższe rozważania można stwierdzić, że – z praktycznego punktu widzenia – wystarczy rozważyć jedynie czynniki główne, a niektóre interakcje, pomimo że są istotne statystycznie, nie wpływają tak naprawdę na zmianę doboru kombinacji tych czynników pod kątem wysokości podciągania kapilarnego. Ponadto, analiza wariancji w przypadku wody jest analizą dwuczynnikową (bez interakcji), ponieważ dla każdej konfiguracji złoża i frakcji dysponujemy jedynie pojedynczą obserwacją.

3.2. GRAFICZNA INTERPRETACJA WYNIKÓW

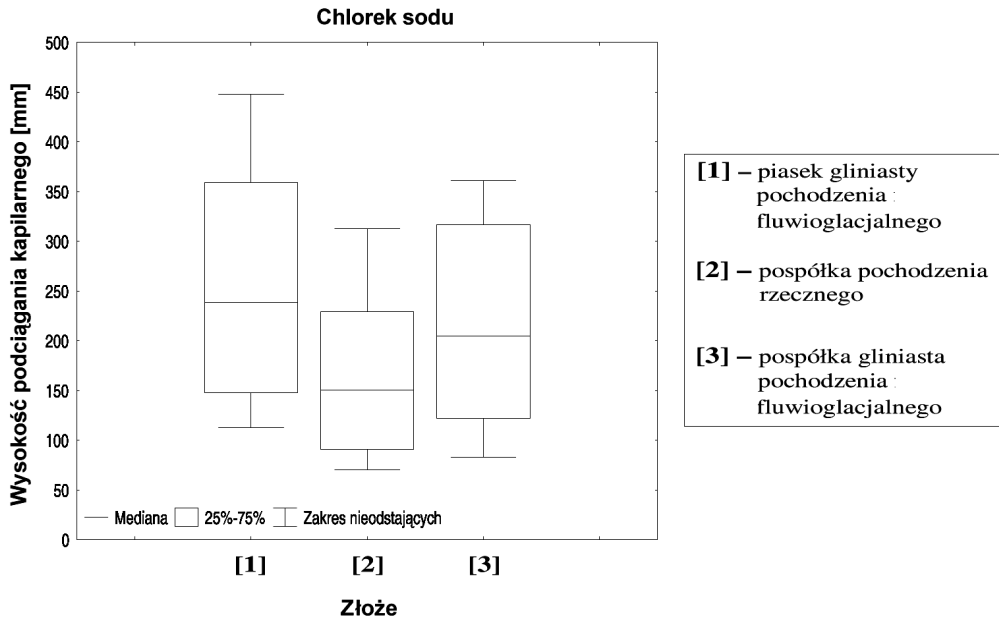
W celu przedstawienia zmienności kapilarności gruntu w zależności od rozważanych czynników opracowano wykresy pudełkowe (rys. 2 - 9) oraz liniowe (rys. 10 - 15). Dla zobrazowania wyłącznie wpływu czynników głównych, tj. rodzaju złoża, rodzaju uziarnienia gruntu i stężenia związku kapilującego w grunt na badaną cechę obserwacyjną, użyto wykresów pudełkowych. Natomiast wykresy liniowe zastosowano w celu określenia wpływu na wysokość podciągania kapilarnego odpowiedniej konfiguracji istniejącej w czynnikach głównych.

Na wykresach pudełkowych (rys. 2 - 9) długość pudełka pokazuje zmienność danej cechy obserwacyjnej (rozrzut wysokości podsiąku kapilarnego). Linia pozioma w pudełku przedstawia wartość mediany (drugi kwartyl), linia dolna – pierwszy kwartyl, a górna – trzeci kwartyl. Wysokość pudełka stanowi 50% obserwacji badań typowych, czyli najbardziej charakterystycznych wartości podciągania kapilarnego. Wszystko, co znajduje się powyżej trzeciego i poniżej pierwszego kwartyla stanowi zakres obserwacji nietypowych [11]. Informacje, jakie wynikają z wykresów, mogą posłużyć do wyciągnięcia dalszych merytorycznych wniosków, dotyczących badanej cechy statystycznej. Przykładowo, w przypadku obserwacji nietypowych, górna i dolna linia pozioma (połączona z pudełkiem za pomocą linii pionowej) informuje o maksymalnej i minimalnej wartości badanej cechy obserwacyjnej, czyli minimalnej i maksymalnej wartości podsiąku kapilarnego.



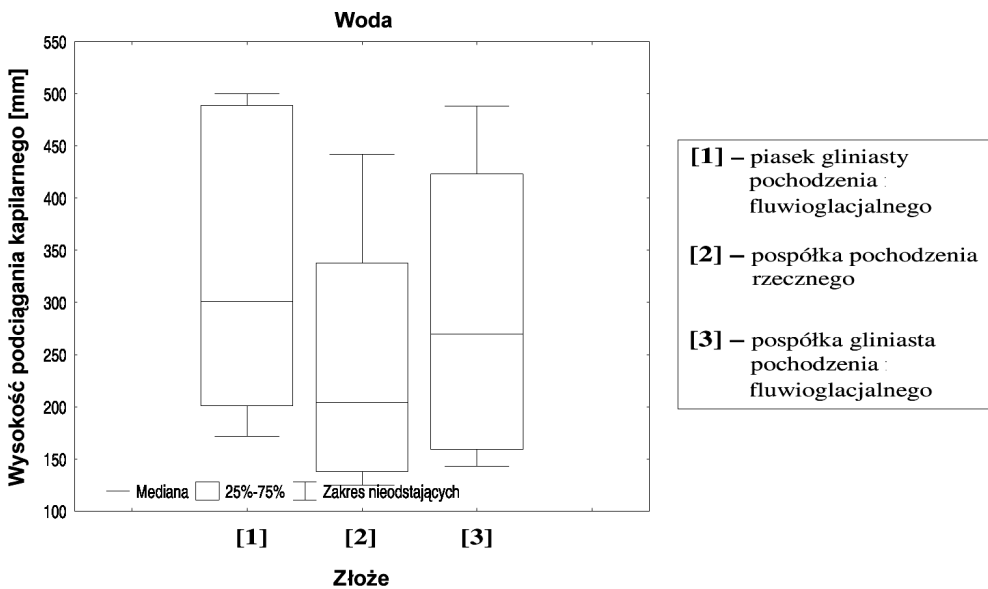
Rys. 2. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – rodzaju złoża

Fig. 2. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – a sort of deposit



Rys. 3. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – rodzaju złoża

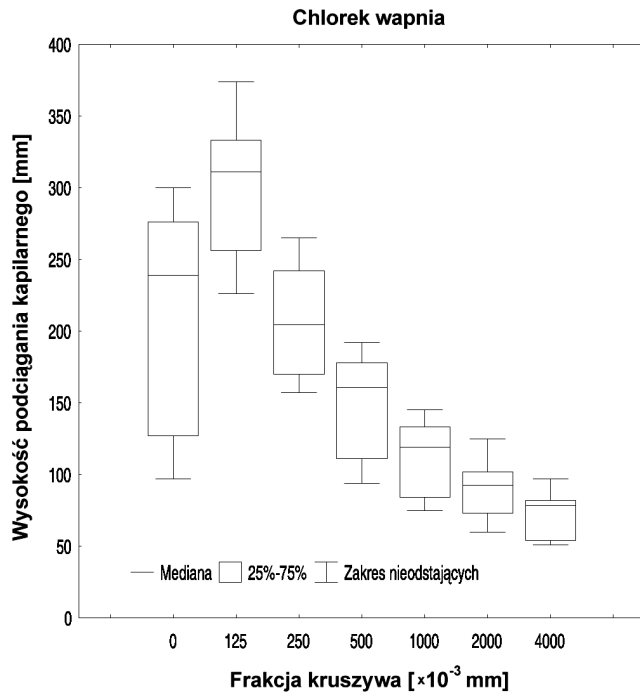
Fig. 3. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – a sort of deposit



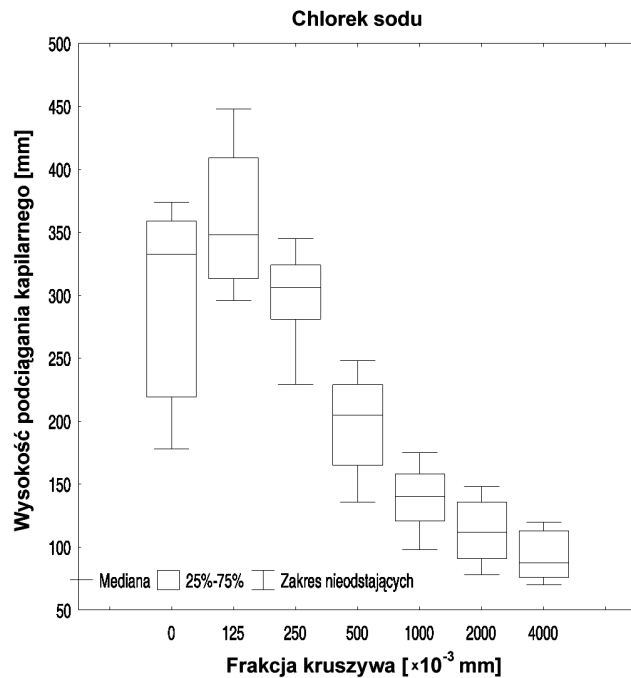
Rys. 4. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – rodzaju złoża

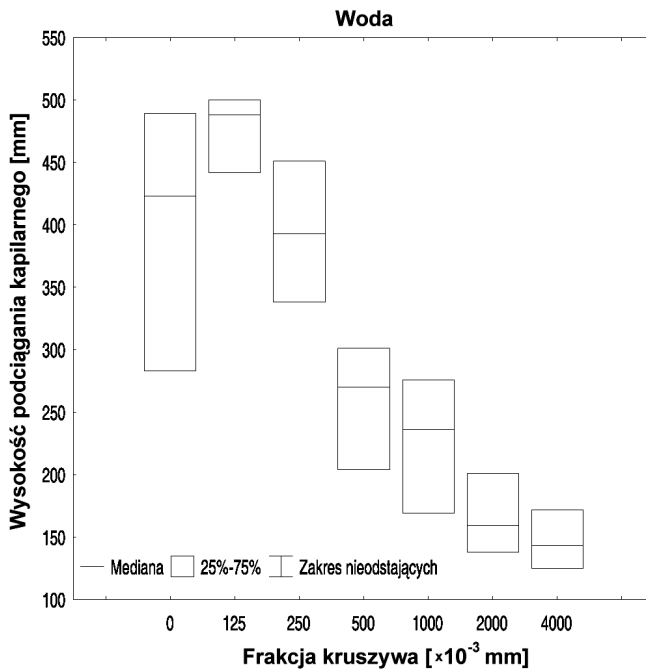
Fig. 4. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – a sort of deposit

Rys. 5. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – frakcji kruszywa
Fig. 5. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – aggregate fraction

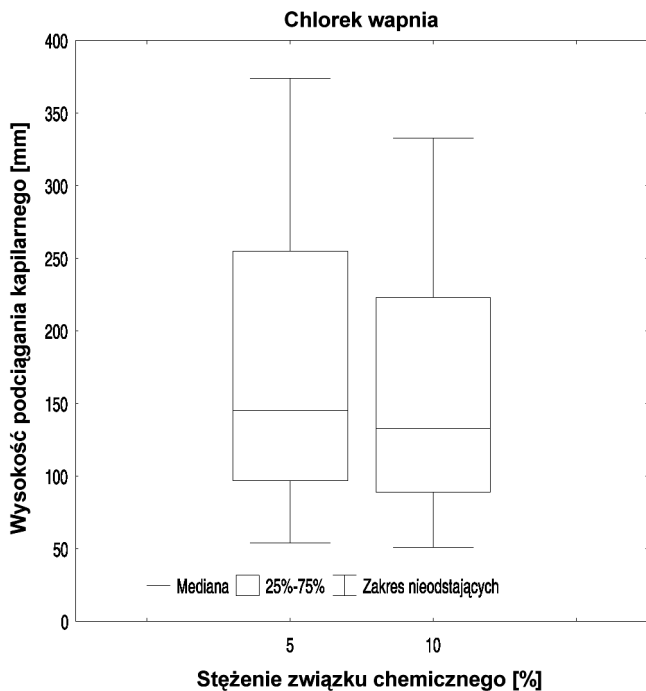


Rys. 6. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – frakcji kruszywa
Fig. 6. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – aggregate fraction



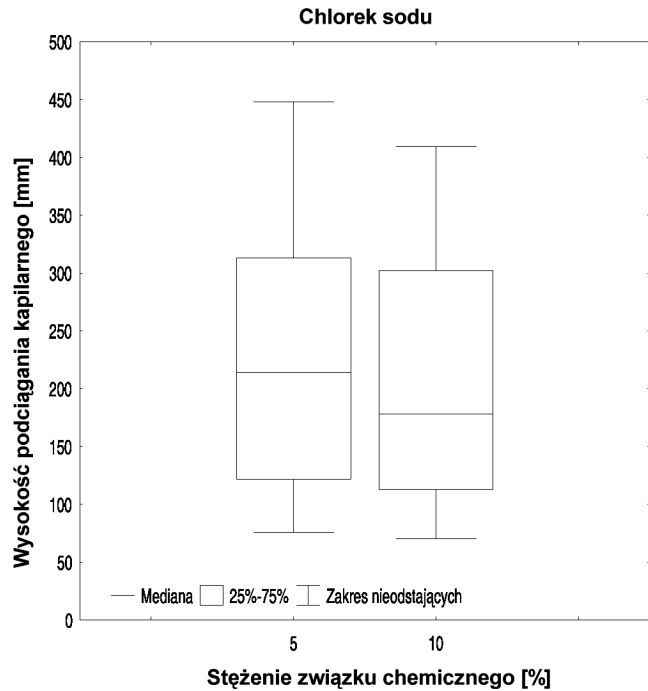


Rys. 7. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – frakcji kruszywa
Fig. 7. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – aggregate fraction

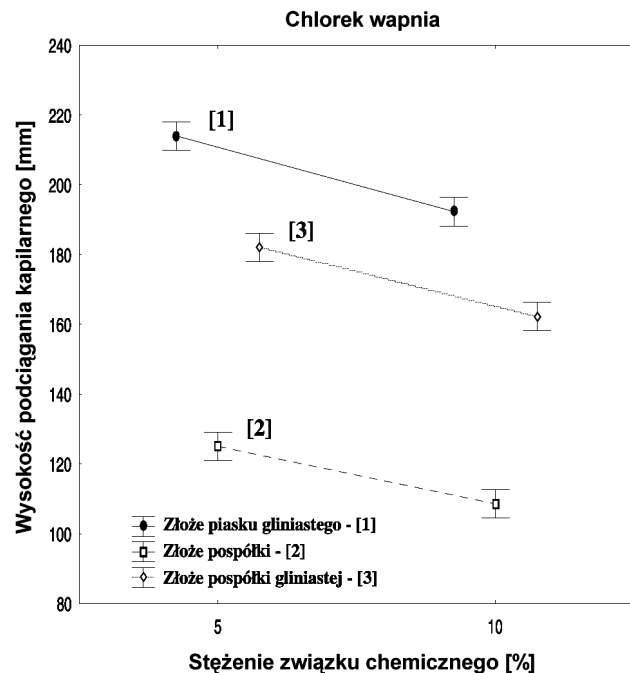


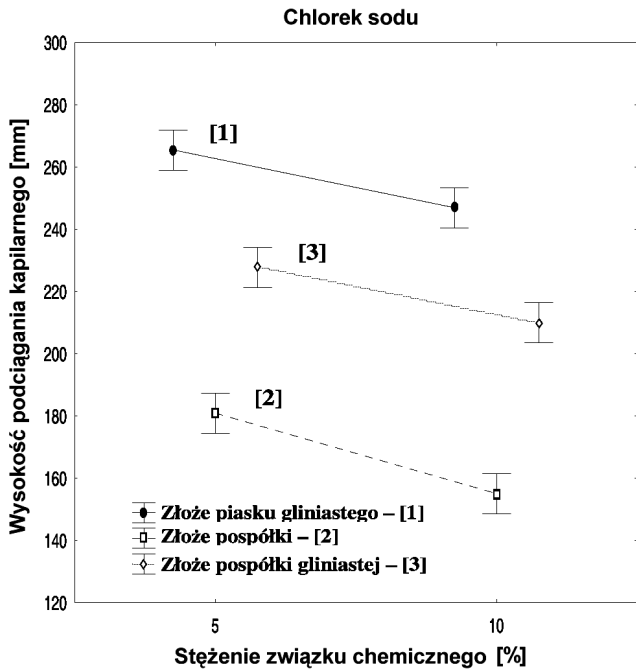
Rys. 8. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – stężenia związku chemicznego
Fig. 8. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – the concentration of a chemical solution

Rys. 9. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od wpływu czynnika głównego – stężenia związku chemicznego
 Fig. 9. The height of capillary rise in accordance with influence of the main factor – the concentration of a chemical solution

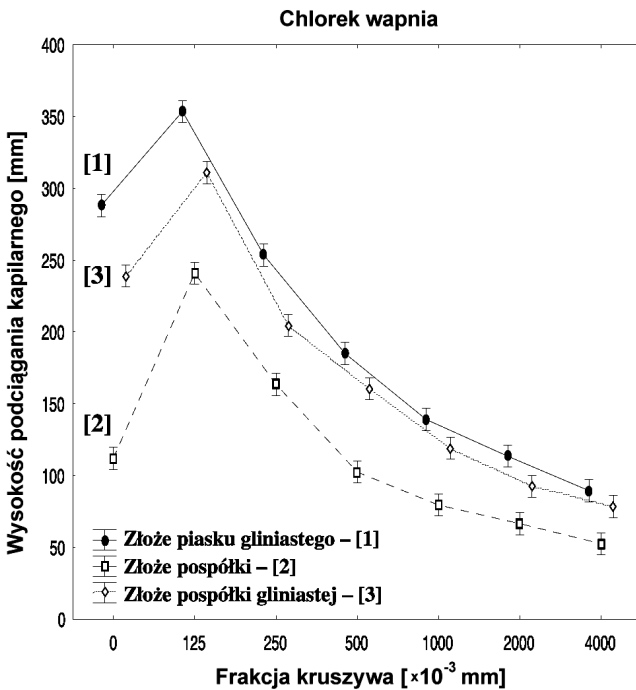


Rys. 10. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od konfiguracji rodzaju złoże i stężenia związku chemicznego
 Fig. 10. The height of capillary rise in accordance with configuration of a sort of deposit and the concentration of a chemical solution



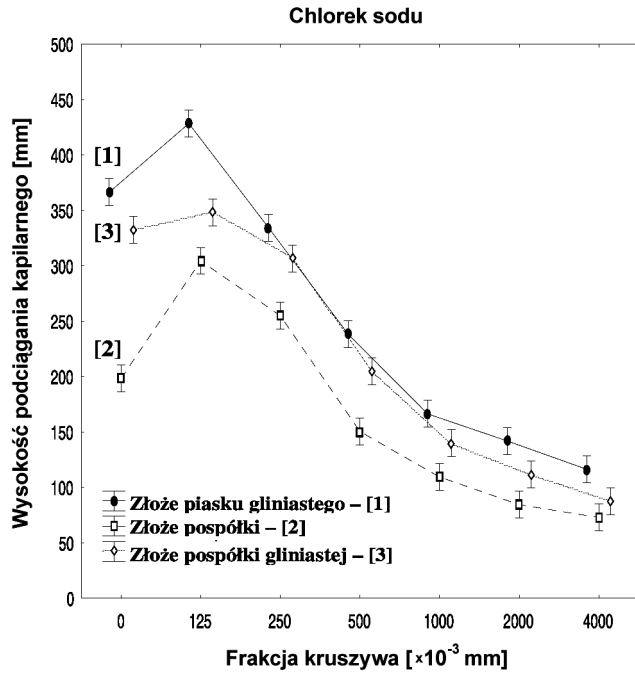


Rys. 11. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od konfiguracji rodzaju złoża i stężenia związku chemicznego
Fig. 11. The height of capillary rise in accordance with configuration of a sort of deposit and the concentration of a chemical solution

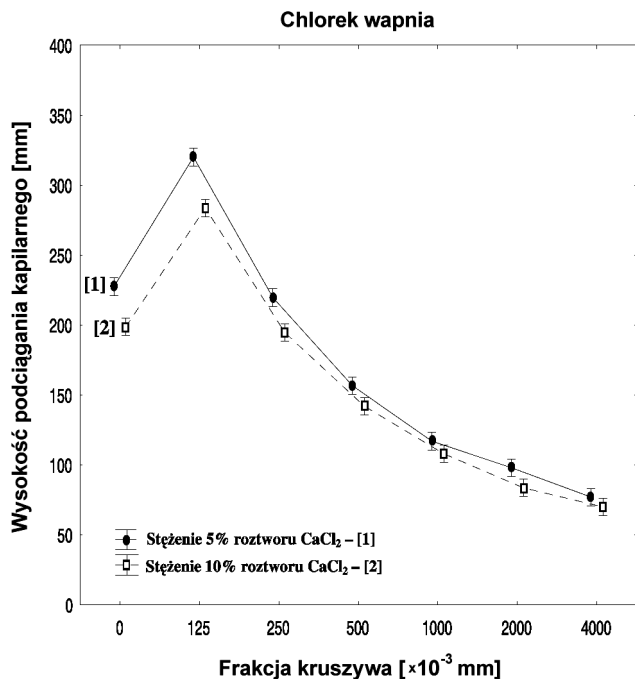


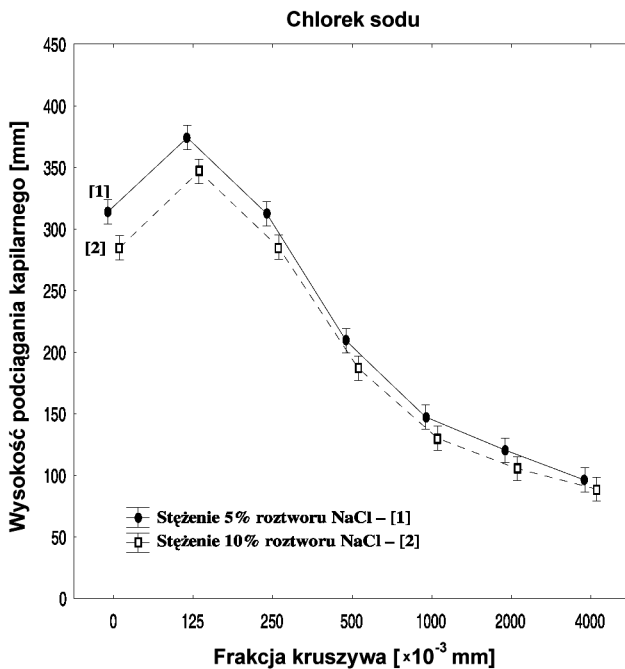
Rys. 12. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od konfiguracji rodzaju złoża i frakcji kruszywa
Fig. 12. The height of capillary rise in accordance with configuration of a sort of deposit and the aggregate fraction

Rys. 13. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od konfiguracji rodzaju złoża i frakcji kruszywa Fig. 13. The height of capillary rise in accordance with configuration of a sort of deposit and the aggregate fraction



Rys. 14. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od konfiguracji stężenia związku chemicznego i frakcji kruszywa Fig. 14. The height of capillary rise in accordance with configuration of the concentration of a chemical solution and the aggregate fraction





Rys. 15. Wysokość podciągania kapilarnego w zależności od konfiguracji stężenia związku chemicznego i frakcji kruszywa
Fig. 15. The height of capillary rise in accordance with configuration of the concentration of a chemical solution and the aggregate fraction

4. ANALIZA WYNIKÓW

W wyniku przeprowadzonych badań kapilarności zaobserwowano charakterystyczne właściwości podciągania kapilarnego, wskazujące na wyraźną jego zależność od:

- genezy i uziarnienia gruntu budującego nasyp drogowy,
- rodzaju związku kapilującego w nasyp (woda, NaCl, CaCl₂),
- stężenia migrującego roztworu.

Najwyższe wartości podciągania kapilarnego uzyskano w najdrobniejszych frakcjach zbadanych kruszyw ($0,125 \leq d < 0,25$ mm), natomiast najniższe – we frakcji kruszyw o największym uziarnieniu ($d \geq 4$ mm). Wynika to przede wszystkim z porowatości gruntu; w gruncie o większych wymiarach porów podciąg kapilarny zachodzi z większą prędkością, lecz osiąga ostatecznie niższy poziom, gdy tymczasem, w gruncie o mniejszych porach podciąg kapilarny zachodzi z mniejszą prędkością, lecz w konsekwencji osiąga większą wysokość. Grunty o niskim wskaźniku różnoziarnistości ($U < 3$) oraz dużej zawartości frakcji pyłowo-iłowej ($f_{\pi} + f_i > 15\%$) wykazują wyższe podciąganie kapilarne w porównaniu z gruntami o większych wskaźnikach różnoziarnistości ($U > 5$) i mniejszej zawartości najdrobniejszych cząstek ($f_{\pi} + f_i < 15\%$). Na tej podstawie można stwierdzić, iż proces kapilarności zależny jest zarówno od rodzaju, jak i genezy gruntu. Można to wyjaśnić genezą złoży. W gruntach o genezie rzecznej, czyli przemytych i pozbawionych frakcji pyłowo-iłowych (złóże Nowogród Bobrzański), migrujące kationy powodowały tylko częściowe zacieśnianie porów, które mimo wszystko pozostały drożne, natomiast w gruntach wykształconych

w facji fluwioglacjalnej, czyli zawierającej znaczne domieszki frakcji ilastej (złoża: Chynów, Józefowo), pod wpływem kationów mikropory uległy całkowitemu wypełnieniu wodą związaną, co z kolei spowodowało znaczny wzrost podciągania kapilarnego. Porównując maksymalne podciągania kapilarne w kruszywie naturalnym oraz poszczególnych jego frakcjach stwierdzono wyraźnie we wszystkich zbadanych złożach (Chynów, Józefowo, Nowogród Bobrzański), iż dodatek każdego związku chemicznego (NaCl, CaCl₂) spowodował obniżenie podciągania kapilarnego w stosunku do podciągania wody. Ponadto, wyższe stężenie migrującego związku spowodowało zmniejszenie podsiąku kapilarnego i – tym samym – ograniczenie wysadzinowości gruntów. Z przeprowadzonych badań wynika, że najniższe podciąganie kapilarne nastąpi przy zastosowaniu 10% chlorku wapnia CaCl₂ w kruszywach gruboziarnistych, pozbawionych domieszek pyłowo-iłowych.

Stosowanie środków chemicznych w zimowym utrzymaniu dróg, obok wielu zalet, takich jak szybkość i skuteczność działania oraz obniżenie kosztów akcji „zima”, wpływa niekorzystnie na stan środowiska naturalnego [12, 13]. Szkodliwemu oddziaływaniu poszczególnych związków użytych w zimowym utrzymaniu dróg ulegają zarówno grunty występujące w podłożu, jak również sąsiadujące z nimi gleby, wody (powierzchniowe i podziemne) oraz poszczególne gatunki flory i fauny.

5. PODSUMOWANIE

1. Badania przeprowadzone przez autorów artykułu wykazały, że związki chemiczne stosowane w zimowym utrzymaniu dróg determinują wysokość i intensywność podciągania kapilarnego wody gruntowej, a tym samym – tworzenie wysadzin w nawierzchni drogi.
2. Największą wysokość podciągania kapilarnego wykazuje woda gruntowa pozbawiona jakichkolwiek związków chemicznych. Nasylenie wód gruntowych związkami chemicznymi, jakie są stosowane najczęściej w zimowym utrzymaniu dróg (chlorek sodu NaCl lub chlorek wapnia CaCl₂) powoduje znaczne obniżenie podciągania kapilarnego i – tym samym – ograniczenie wysadzinowości gruntów.
3. Skutecznym rozwiązaniem w tym zakresie może być powszechne stosowanie grubszych frakcji kruszywa do budowy nasypów drogowych i chlorku wapnia do zimowego utrzymania dróg.
4. Odpowiedni dobór rodzaju i stężenia środków stosowanych w zimowym utrzymaniu dróg jest sposobem na ograniczenie wysadzinowości gruntów i awaryjności nawierzchni drogowych.
5. Przeprowadzone badania miały charakter rozpoznawczy, a uzyskane wyniki wskazują na celowość kontynuacji eksperymentu przy zastosowaniu innych związków chemicznych stosowanych podczas zimowego utrzymania dróg. Przebadanie kolejnych substancji chemicznych pod kątem kapilarności da możliwość oceny ich skuteczności w zimowym utrzymaniu dróg, zarówno w odniesieniu do zwalczania gołoledzi, jak i możliwości ograniczenia awarii dróg spowodowanych wysadzinowością gruntów.

6. Przy wyborze skutecznych środków stosowanych podczas zimowego utrzymania dróg nie można zapominać o ochronie środowiska naturalnego. Stosowanie wszelkich środków chemicznych musi być ściśle kontrolowane.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Stypulkowski B.*: Zagadnienia utrzymania i modernizacji dróg i ulic, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000
- [2] *Ząbczyk K.*: Meteorologia drogowa a bezpieczeństwo ruchu. SIGNALCO Ltd. Polska, 2006
- [3] Wytyczne Zimowego Utrzymania Dróg: Załącznik do Zarządzenia Nr 18 Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2006
- [4] Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2005
- [5] *Dębski W.*: Mały poradnik drogowca. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1974
- [6] *Fortuna E.*: Zwalczenie śliskości zimowej na drogach samochodowych w Polsce. Biblioteka drogownictwa - Zimowe utrzymanie dróg, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981
- [7] *Kołodziejczyk U.*: Wpływ uziarnienia gruntu na stan wód kapilarnych i migrację zanieczyszczeń w podłoże nasypów drogowych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ochrona wód powierzchniowych, podziemnych oraz gleb wzdłuż dróg i autostrad”, Krzyżowa 2004, GDDKiA Warszawa, 69 - 78
- [8] *Kowalski W.C.*: Geologia inżynierska. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1988
- [9] *Ćwiąkała M.*: Metodyka zagęszczania gruntu do badań kapilarności. IV Ogólnopolska Konferencja Młodych Geotechników „Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych”, Bydgoszcz 2009, 567 - 574
- [10] *Sobczyk M.*: Statystyka. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008
- [11] *Walesiak M., Gatnar E.*: Statystyczna analiza danych z wykorzystaniem programu R. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009
- [12] *Kołodziejczyk U.*: Zimowe utrzymanie dróg a ochrona środowiska. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych = Environmental Protection and Natural Resources, 37, 2008
- [13] *Pečenik A.*: Wpływ środków chemicznych na roślinność przydrożną i miejską, stosowanych do usuwania śliskości zimowej. Biblioteka Drogownictwa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981

WYKAZ POWOŁANYCH NORM

- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu

ANALYSIS OF THE RESULTS OF MODEL INVESTIGATION OF WATER CAPILLARY RISE IN ROAD EMBANKMENTS

Abstract

The durability of engineering objects, including roads, depends on proper recognition of natural reactions undergoing in soil. One of this kind of processes is soil swelling, which is very important for highway engineering. It was proven that it can be effectively limited by decrease in the height of ground water capillary rise. This paper aims not only at presenting the results of model research in ground capillarity and relations between the height of capillary rise and a kind of soil in a road embankment, but also examines a type and concentration of a solution migrating in a embankment. Natural aggregate, occurring in three deposits in the area of Zielona Góra of different origine, was tested. The research was focused in the height of capillary rise in naturally grained aggregate and in particular fractions of aggregates. At the same time water capillary rise and the solutions of different chemical compounds commonly used in winter roads maintaining i.e.: sodium chloride and calcium chloride, with concentration 5% and 10%, was analysed. The analysis of capillary rise in particular soils, depending on a type of a capillary compound and its concentration, was presented as analysis of triple factor variance with second order interaction. The conducted research proved that the ground water shows the maximum height of capillary rise. The saturation of ground water with chemical compounds used in winter roads maintenance (NaCl and CaCl₂) and increase in concentration of those compounds (from 5% to 10%) decreases the capillary rise considerably as well as swelling. The presented results show the possibilities of reduction of the negative effects of soil swelling by an appropriate selection and concentration of chemical compounds used in winter maintenance of roads.