

Andrzej SUROWIECKI

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa,
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
E-mail: andrzej.surowiecki@up.wroc.pl

Wojciech KOZŁOWSKI

Politechnika Opolska, Katedra Dróg i Mostów
ul. Ozimska 75A, 45 – 368 Opole
email: w.kozlowski@po.opole.pl

Fizyczne modele podłoża i budowli ziemnych w inżynierii kolejowej

1 Uwagi o badaniach symulacyjnych

Przedmiotem referatu są fizyczne modele symulacyjne funkcjonowania podłoża toru kolejowego i budowli ziemnych oraz metoda wykonywanych badań stanu odkształcenia. Rezultaty w ten sposób wykonywanych eksperymentów mogą być pomocne jako weryfikacja symulacji komputerowej. Omawiane modele mogą być konstruowane w skali laboratoryjnej (wśród nich występuje grupa modeli tzw. wielkowymiarowych) oraz w skali naturalnej, nazywane w niektórych przypadkach poligonowymi. Pomiary realizowane na modelach symulacyjnych wykazują szereg zalet [1-10]:

- umożliwiają przyjmowanie wybranych parametrów zmiennych o ustalonym jednoznacznie zakresie zmian wartości; w ten sposób kontrolowany jest przebieg zjawisk fizycznych poddany analizie,
- założone parametry zmienne dotyczą nie tylko modelu lecz także otoczenia (np. wpływ temperatury otoczenia, wpływ klimatu),
- na skutek możliwości ciągłej kontroli zachowania się modelowanego obiektu, poddanego działaniu czynników zewnętrznych (np. obciążenie eksploatacyjne), badania modelowe są bardziej wszechstronne i tańsze od badań w niekontrolowanych warunkach naturalnych (np. pomiary ugięć szyn toru będącego w stanie eksploatacji),
- w niektórych przypadkach jedynym właściwym rozwiązaniem badawczym pozostaje symulacja zjawiska (np. oszacowanie stanu naprężeń i odkształceń wkładki wzmacniającej podłoże konstrukcji toru kolejowego).

W referacie uwaga jest skupiona wokół trzech modeli symulacyjnych, dotyczących oszacowania:

- pionowych przemieszczeń odcinka toru kolejowego, poddanego działaniu pionowego nacisku, który odwzorowuje oddziaływanie dynamicznego obciążenia eksploatacyjnego;
- stanu odkształcenia i naprężenia w warstwie podłoża ze wzmocnieniem,

- charakterystyki stanu granicznego parcia czynnego (tzw. klin odłamu) w nasypie komunikacyjnym.

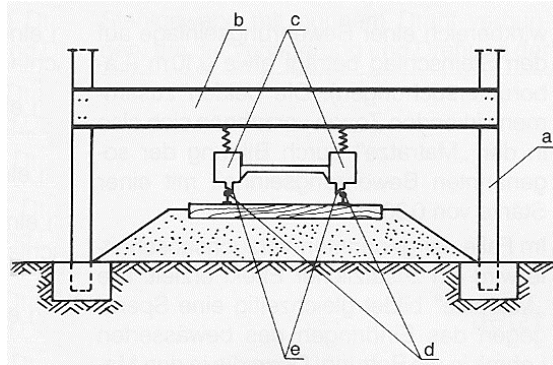
2 Poligonowe stanowisko badań pionowych przemieszczeń odcinków toru

Celem badań było określenie wielkości osiadań odcinków toru, pod wpływem długotrwałego obciążenia eksploatacyjnego. Żądane warunki pracy toru w przybliżeniu symuluje metoda dynamicznych obciążeń pulsacyjnych. Zastosowane urządzenie znajdujące się w Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa (CNTK) w Warszawie [2, 3] umożliwiło wprowadzenie w symulacyjny model odcinka toru dowolnego obciążenia dynamicznego, ekwiwalentnego obciążeniu brutto przewozami w określonym żądanym przedziale czasu.

Skonstruowano trzy modele symulacyjne odcinka toru wykonane z szyn typu 49 E1 na podkładach drewnianych o rozstawie osiowym 0,65 m:

- model nr 1: przęsło o długości 25 m (wzorcowe-dla celów porównawczych), na podsypce z piasku gruboziarnistego o grubości warstwy $h_p = 0,5$ m;
- model nr 2: odcinek toru o długości 1,5 m, skonstruowany na trzech podkładach i podsypce piaskowej (piasek gruboziarnisty) o grubości warstwy $h_p = 0,5$ m;
- model nr 3: odcinek toru o długości 1,5 m, skonstruowany identycznie jak model nr 2; w warstwie podsypki piaskowej zainstalowano na głębokości $z = 0,25$ m poziome zbrojenie w postaci siatki stalowej o średnicy prętów $d = 3,5$ mm i wymiarze oczek 12 x 12 mm.

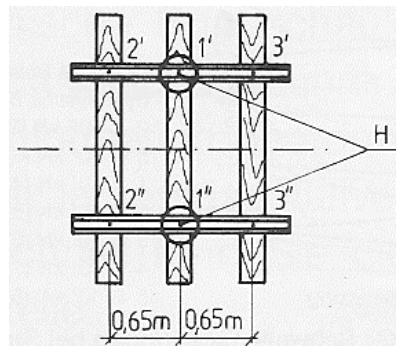
Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 1. Urządzenie w części roboczej składało się z konstrukcji ramowej, której słupy (*a*) w podłożu. Urządzenie robocze przekazujące naciski punktowe na oba toki szynowe jest przytwierdzone do belki poprzecznej (*b*) w sposób sprężysty, umożliwiając jednocześnie realizację nacisku pionowego centrycznie na osie pionowe szyn. Końcówki (*e*) cylindrów (*c*) o profilu obręczy koła pojazdu szynowego przekazują nacisk na szyny (*d*). Część sterująca jest wyposażona w zespół realizujący obciążenie statyczne i dynamiczne pulsacyjne. Możliwe jest zastosowanie nacisku statycznego w zakresie 0-200 kN na pojedynczą szynę oraz dynamicznego do 160 kN na szynę. W procesie badań wprowadzono naciski osiowe statyczne i dynamiczne siłą $Q = 200$ kN. Pulsator pracował na częstotliwości 4,17 Hz, co było odpowiednikiem jazdy pojazdu z prędkością 75 km/h przy rozstawie osi 5,0 m. Funkcjonowanie odcinka toru w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych odzwierciedlono wprowadzając długotrwały cykl obciążeń dynamicznych w zakresie 0-50 mln kN, systemem pulsacyjnym. W ciągu 1 godz. realizowano sumaryczne obciążenie toru o wartości 3 mln kN. Wobec tego, stan całkowitego obciążenia 50 mln kN osiągnięto po upływie 16,7 godz. Wszystkie modele obciążano wstępnie siłą statyczną, w celu zagęszczenia podsypki. Następnie realizowano obciążenie dynamiczne.



Rys. 1. Schemat poligonowego stanowiska badawczego, sporządzonego w CNTK [2, 3]:
a – słupy konstrukcji ramowej, b – poprzecznicą, c – cylindry generujące nacisk
pionowy na szynę, d – szynę, e – końcówki cylindrów obciążających szynę

Fig. 1. Schema traverse the test bench, done in CNTK [2, 3]: a - pillars of
framework structure, b - crossbar, c - cylinder-generating vertical load on
the rails, d - rail, e - aggravating the rail ends of cylinders

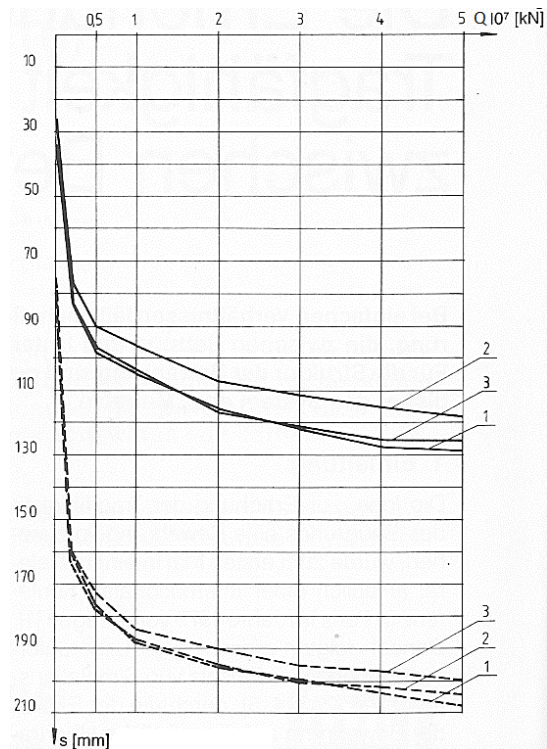
Rys. 2 ilustruje widok z góry modelu odcinka toru o długości 1,5 m złożonego z trzech podkładów. Wielkościami mierzonymi były osiadania trwałe punktów pomiarowych i amplituda drgań.



Rys. 2. Widok z góry modelu odcinka toru złożonego z trzech podkładów [2, 3]: H –
punkty nacisku hydraulicznych cylindrów generujących pionowe obciążenie szyn

Fig. 2. Top view of model track section, comprising three sleepers [2, 3]: H -
hydraulic cylinder pressure points that generate vertical load rails

Podsumowanie badań stanowi prezentacja przebiegu trwałych osiadań podkładów w zależności od kumulacji obciążenia dynamicznego (rys. 3). W przypadku modelu toru na zbrojonym podłożu, w odniesieniu do modelu na podłożu bez zbrojenia stwierdzono: redukcję wartości osiadania na poziomie 50 %, mniejsze przyrosty osiadań i ograniczenie tendencji wzrostu krzywej osiadań dla poziomu obciążenia w granicach $5 \cdot 10^7$ kN.



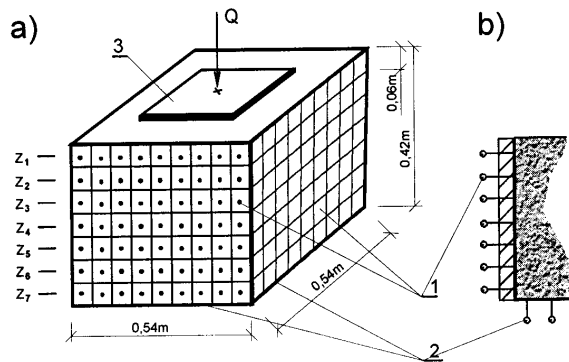
Rys. 3. Przebieg trwałych średnich osiadań podkładów w funkcji dynamicznego obciążenia [2, 3]: s – osiadanie [mm]; 1, 2, 3 – średnie osiadania punktów pomiarowych na trzech podkładach tworzących model odcinka toru; ---- podłoże zbrojone, - - - podłoże niezbrojone

Fig. 3. Course permanent average settlements of sleepers in the function of dynamic load [2, 3]: s - settlement [mm], 1, 2, 3 - average settlement measurement points on the three substrates forming a model of track section; ---- reinforced ground, - - - non- reinforced ground

3 Laboratoryjne modele fizyczne warstwy podłoża toru ze wzmocnieniem

Przedstawiono symulacyjne modele fizyczne, sporządzone na laboratoryjnym stanowisku badawczym (rys. 4) w celu oszacowania cech wytrzymałościowych warstwy podłoża toru ze wzmocnieniem. Prostopadłościenne modele o wymiarach w planie $0,54 \times 0,54$ m i wysokości $h = 0,42$ m skonstruowano w pojemniku, będącym zasadniczym elementem stanowiska badań (rys. 4) [1, 4-10]. Specjalna konstrukcja stalowych ścian i dna pojemnika umożliwiła oszacowanie trójwymiarowego stanu odkształcenia modeli, poddanych działaniu statycznego nacisku w zakresie $Q = 0-20$ kN,

realizowanego za pośrednictwem nieodkształcalnej poziomej kwadratowej płyty o wymiarze boku 0,32 m.



Rys. 4. Podstawowe parametry stanowiska badawczego [1, 4-10]: a - widok ogólny; b - przekrój pionowy przez ścianę; 1 - czujnik ciśnienia poziomych; 2 - czujnik ciśnienia pionowych; 3 - płyta przekazująca obciążenie na model; $z_1 = 0,03$ m; $z_2 = 0,09$ m; $z_3 = 0,15$ m; $z_4 = 0,21$ m; $z_5 = 0,27$ m; $z_6 = 0,33$ m; $z_7 = 0,39$ m - poziomy pomiarowe

Fig. 4. Basic parameters the test bench [1, 4-10]: a - general view; b - vertical section through the wall, 1 - horizontal pressure sensor, 2 - vertical pressure sensor, 3 - plate transmitting the load on the model; $z_1 = 0,03$ m; $z_2 = 0,09$ m; $z_3 = 0,15$ m; $z_4 = 0,21$ m; $z_5 = 0,27$ m; $z_6 = 0,33$ m; $z_7 = 0,39$ m - measuring levels

Matryce modeli wykonano z gruboziarnistego piasku o wilgotności 3 %, średnio zagęszczonego. Cechy wytrzymałościowe modeli określono w funkcji ilości zbrojenia. Wkładki zbrojenia w formie siatek z tworzyw sztucznych (geosiatki Fortrac) rozmieszczono poziomo, tzn. prostopadłe do płaszczyzny obciążenia badawczego, w celu otrzymania maksymalnego efektu anizotropowej spójności, wyrażonej zależnością [1]:

$$c = f_d \operatorname{tg}^2 (0,25 \pi + 0,5 \varphi) (2 \Delta z)^{-1} \quad (1)$$

gdzie: f_d – wytrzymałość obliczeniowa zbrojenia na rozciąganie, φ – kąt wewnętrzny tarcia ośrodka niespoistego ze zbrojeniem, Δz – odstęp pionowy warstw zbrojenia.

Zjawisko spójności w ośrodku niespoistym wzmocnionym prowadzi do zwiększenia wytrzymałości na ścinanie, obliczonej wg wzoru:

$$\tau_f = p_z \operatorname{tg} \varphi + c \quad (2)$$

gdzie wg [1]:

$$p_z = p_y \operatorname{tg}^2 (0,25 \pi + 0,5 \varphi) + p_0 \quad (3)$$

natomiast p_0 jest naprężeniem poziomym w stanie zniszczenia modelu gruntu wzmocnionego, wyrażonym zależnością:

$$p_0 = 2 c \operatorname{tg} (0,25 \pi + 0,5 \varphi) \quad (4)$$

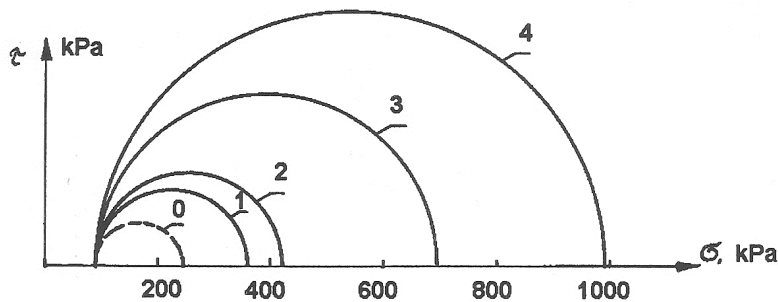
Jeżeli osiadanie (przemieszczenie pionowe) modelu ośrodka o wysokości h ze wzmocnieniem wynosi Δh i jest spowodowane naprężeniem pionowym ściskającym p_z , wtedy wskaźnik odkształcenia E_0 wynosi:

$$E_0 = p_z h (\Delta h)^{-1} \quad (5)$$

Ogół cech wytrzymałościowych może być ujęty charakterystyką nośności, czyli maksymalnym naprężeniem pionowym $\sigma_{I \max}$, które może wystąpić w obciążonym modelu, w momencie realizacji czynnego stanu granicznego naprężeń [1]. Różnica między tym naprężeniem $\sigma_{I \max}^*$ (będącym pochodną granicznego obciążenia modelu) w przypadku modelu ze zbrojeniem a jego odpowiednikiem w modelu niezbrojonym $\sigma_{I \max}$ stanowi efekt przyrostu nośności wskutek zbrojenia:

$$\Delta \sigma_I = \sigma_{I \max}^* - \sigma_{I \max} \quad (6)$$

Efekt przyrostu nośności modeli ośrodka wskutek zbrojenia pokazano na rysunku 5 wykorzystując konstrukcję tzw. kół Mohra, powszechnie stosowaną w geotechnice.

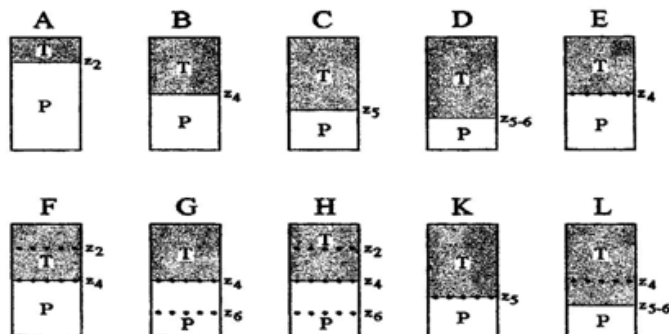


Rys. 5. Efekt przyrostu nośności modeli podłoża wskutek zbrojenia [1, 4-10]: 0 – model bez zbrojenia; 1 – model zbrojony pojedynczo na poziomie $z_4 = 0,21$ m; 2 – model zbrojony dwiema wkładkami na poziomach $z_3 = 0,15$ m i $z_5 = 0,27$ m; 3 – model zbrojony trzema wkładkami na poziomach $z_2 = 0,09$ m, $z_4 = 0,21$ m i $z_6 = 0,33$ m; 4 – model zbrojony siedmioma wkładkami na poziomach z_1 ; z_2 ; z_3 ; z_4 ; z_5 ; z_6 ; z_7

Fig. 5. The effect of growth bearing capacity ground models due to the reinforcement [1, 4-10]: 0 - model without reinforcement; 1 - model reinforced one at $z_4 = 0.21$ m, 2 - reinforced model inserts two levels $z_3 = 0.15$ m i $z_5 = 0.27$ m; 3 - model inserts reinforced with three levels $z_2 = 0.09$ m, $z_4 = 0.21$ m i $z_6 = 0.33$ m; 4 - model reinforced inserts seven levels z_1 ; z_2 ; z_3 ; z_4 ; z_5 ; z_6 ; z_7

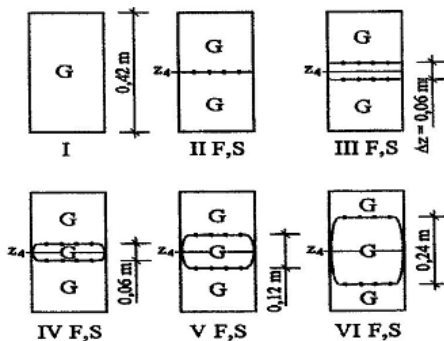
Na omówionym powyżej stanowisku możliwe jest również badanie stanu odkształcenia:

- modeli warstwowych (rys. 6), odwzorowujących powszechnie stosowany układ warstw podłoża toru kolejowego: podsypka + warstwa filtracyjna (wzmacniająca, separacyjna);
- modeli ze zbrojeniem przestrzennym w formie tzw. materaca (rys. 7).



Rys. 6. Schematy modeli ośrodka dwuwarstwowego [10]: A, B, C, D, E, F, G, H, K, L - modele; T - tłuczeń; P - piasek; $z_2, z_4, z_5, z_{5-6}, z_6$ - poziome pomiarowe; --- granica warstw ośrodka ziarnistego; ●●● wkładka zbrojenia

Fig. 6. Diagrams of models for the two-layer [10]: A, B, C, D, E, F, G, H, K, L - models, T - crushed, P - sand, $z_2, z_4, z_5, z_{5-6}, z_6$ - measuring levels; --- limit of layer granular medium; ●●● insert reinforcement



Rys. 7. Schematy modeli ośrodka ze zbrojeniem przestrzennym [10]: G - gryś bazaltowy; I - bez zbrojenia; II F, S - pojedyncze zbrojenie (F - folia PCV, S - siatka z tworzywa sztucznego); III F, S - dwie wkładki symetrycznie rozmieszczone względem wysokości pojemnika w odstępach pionowych $\Delta = 0,06$ m; IV F, S - materac zbrojeniowy o grubości $g_m = 0,06$ m na głębokości $z_4 = 0,21$ m; V F, S - materac zbrojeniowy o grubości $g_m = 0,12$ m na głębokości z_4 ; VI F, S - materac zbrojeniowy o grubości $g_m = 0,24$ m na głębokości z_4

Fig. 7. Diagrams of models for the spatial reinforcement [10]: G - basalt grit, I - without reinforcement; II F, S - single reinforcement (F - PVC foil, S - plastic mesh); III F, S - two symmetrically placed inserts the height of the container in a vertical interval $\Delta = 0.06$ m; IV F, S - mattress thickness reinforcement $g_m = 0.06$ m at a depth of $z_4 = 0.21$ m, V F, S - mattress at a depth of z_4 , g_m thickness = 0, 12 m VI F, S - mattress at a depth of z_4 , thickness $g_m = 0.24$ m

4 Symulacyjny model pionowej ściany nasypu komunikacyjnego z gruntu zbrojonego

Autorzy niniejszego referatu dysponują wielkowymiarowym fizycznym modelem funkcjonowania (w zakresie przemieszczeń poziomych) nasypu komunikacyjnego wykonanego z gruntu zbrojonego. Model umożliwi badania poziomego parcia oraz oszacowanie położenia powierzchni poślizgu w stanie granicznym czynnego parcia.

Model został skonstruowany w prostopadłościennym pojemniku, przedstawionym na rysunku 8 [9, 10]. Przedmiotem badań są poziome przemieszczenia obciążonego zewnętrznie masywu, mierzone w płaszczyźnie pionowej ściany modelu. Na podstawie pomierzonych przemieszczeń możliwe jest oszacowanie:

- jednostkowego poziomego parcia czynnego,
- lokalizacji powierzchni poślizgu w stanie granicznym czynnego parcia,
- rozmiarów bryły odłamu w stanie granicznym czynnego parcia gruntu.

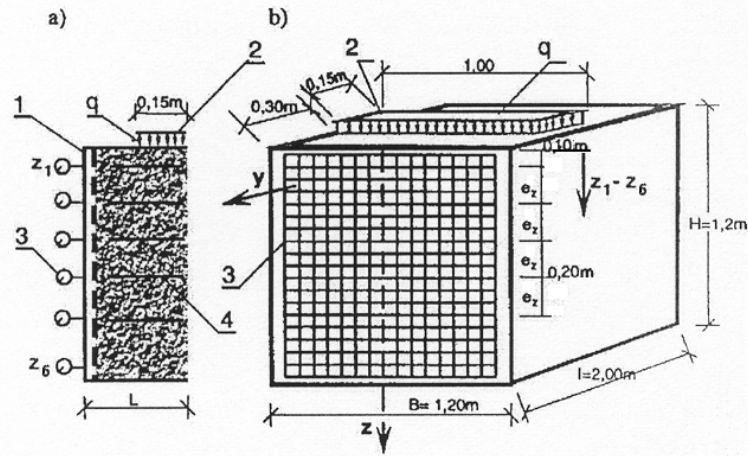
Ośrodkiem gruntowym tworzącym model jest piasek gruboziarnisty suchy. Wkładki zbrojenia w formie taśm lub krat (wariantowo) rozmieszczono poziomo w rozstawie pionowym $e_z = 0,195$ m. W każdej warstwie taśmy są zlokalizowane równoległe do osi podłużnej pojemnika, z zachowaniem jednakowych odstępów poziomych, które przyjęto kolejno (odstępy osiowe): $e_x = 0,11$; $0,17$ i $0,23$ m. Zastosowano następujące systemy zbrojenia taśmami (o powierzchni gładkiej lub ukształtowanej przestrzennie specjalnymi karbami) w poszczególnych testach:

- system A (5 warstw po 9 wkładek w warstwie; łącznie $n_{a,c} = 45$ wkładek; długość wkładek $l_a = 1,8$ m; rozstaw poziomy $e_x = 0,11$ m);
- B (5 warstw po 6 wkładek; łącznie $n_{a,c} = 30$ wkładek; $l_a = 1,8$ m; $e_x = 0,17$ m);
- C (5 warstw po 4 wkładki, razem $n_{a,c} = 20$ sztuk; $l_a = 1,8$ m; $e_x = 0,23$ m).

Zaprojektowane obciążenie masywu (naziomu) wynika z metody badawczej i jest głównie czynnikiem wymuszającym bryłę odłamu. W pewnym stopniu jednak obciążenie odwzorowuje pionowy nacisk osi nieruchomego pojazdu. Obciążenie statyczne, skierowane pionowo, o charakterze pasmowym realizowane jest prostokątnym sztywnym stemplem poprzecznie (na szerokość modelu), przyjmując minimalną odległość krawędzi od wewnętrznej powierzchni ściany czołowej $l_y = 0,30$ m. Wartość obciążenia (w zakresie 0-61,69 kPa) jest jednakowa dla wszystkich testów i minimalna lecz konieczna do wytworzenia bryły odłamu w modelu masywu gruntowego ze zbrojeniem. Realizowane są dwa stany zagęszczenia ośrodka ziarnistego budującego nasyp: luźno nasypany i wstępnie zagęszczony.

Wśród rezultatów badań wyróżnić należy:

- procentowy stopień zmniejszenia parcia masywu gruntowego wskutek zbrojenia,
- wskaźnik współpracy ośrodka gruntowego ze zbrojeniem.



Rys. 8. Schemat stanowiska badawczego [9, 10]: a - fragment przekroju pionowego; b - widok ogólny; 1 - ściana oporowa (pomiarowa) modelu; 2 - płyta 0,15 x 1,0 m obciążająca; 3 - czujniki przemieszczeń poziomych; 4 - wkładki zbrojenia; z_1 - z_6 - poziomy pomiarowe

Fig. 8. Schema the test bench [9, 10]: a - vertical cross section; b - general view; 1 - retaining wall (measurement) model, 2 - plate 0.15 x 1.0 m loading, 3 - sensors horizontal displacements; 4 - reinforcement inserts; z_1 - z_6 - measuring levels

Podsumowanie

Przedstawiono trzy rodzaje symulacyjnych fizycznych modeli, będących podstawowym narzędziem wykonywanych przez autorów referatu prac naukowo-badawczych w dyscyplinach: inżynieria drogowa i kolejowa. Podano zalety modeli, zakres ich stosowania oraz osiągnięte cele w procesie badań.

W uzupełnieniu wyszczególnionych zalet preferowanych modeli symulacyjnych należy podkreślić:

- możliwość wyeliminowania niekorzystnych wpływów towarzyszących badaniom na obiektach rzeczywistych (np. ruch pociągów po eksploatowanym torze kolejowym),
- umożliwienie sterowania zachowaniem się modeli (kontrolowanie procesu) w zakresie założonych wartości parametrów zmiennych.

Omówione modele nie stanowią rozwiązania docelowego. Na przykład w modelu warstwy podłoża toru, dno pojemnika odwzorowujące przestrzeń gruntową stanowi model jednoparametrowy typu Winklera. Jak wiadomo, w geotechnice funkcjonują modele dwu- i wieloparametrowe. Możliwa jest więc modyfikacja prezentowanych modeli i w konsekwencji dalszy rozwój badań w kierunku uszczegółowień i uzyskania kolejnych przybliżeń odnośnie wiarygodności w odwzorowywaniu rzeczywistych zjawisk fizycznych.

Literatura

1. Surowiecki A.; Arbeit der bewehrten Sandschicht unter Dauerbelastung, Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau, Nr 3, 1988, s. 130-132.
2. Mazur S., Surowiecki A.; Die Erhöhung der Oberbau-Tragfähigkeit durch eine Bewehrung zwischen Bettung und Unterbau. Eisenbahntechnische Rundschau, 38, H. 1/2, 1989, S. 85- 87.
3. Mazur S., Surowiecki A.; Anwendung bewehrter Erde zur Unterbauverstärkung, Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau, Nr 8, 1989, s. 458-464.
4. Surowiecki A.; Laborversuche zum Einfluss ausgewählter Parameter auf die Wirkung der Bewehrung in lockeren Böden, Bauingenieur, Springer-Verlag, 64, Nr 5, 1989, s. 215-217.
5. Surowiecki A., Wysocki L.; Verformungen und Druckfortleitung einer Schicht aus bewehrter Erde, Bautechnik, Nr 4, Jg. 67, 1990, s. 115-117.
6. Surowiecki A.; Mechanische Eigenschaften der mit Vliesstoff bewehrten Sandschicht, Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau, Nr 8, 1991, s. 596-598.
7. Surowiecki A.; Laboruntersuchungen von mechanischen Eigenschaften bewehrter lockerer Bodenschichten, Bautechnik, Jg.71, H.11, 1994, s. 707-711.
8. Surowiecki A.; Interaction between reinforced soil components, Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XX, No. 1/2, Wrocław, 1998, s. 43-61.
9. Surowiecki A.; Badania modelowe współpracy składników kompozytowych. Inżynieria i Budownictwo, Nr 10, 2004, s. 527-530.
10. Surowiecki A., Balawejder A., Kozłowski W.: Badanie możliwości wzmacniania nasypów kolejowych przy zastosowaniu zbrojenia gruntu, lekkich konstrukcji oporowych i maty komórkowej. Raport serii SPR nr 6, Projekt bad. MNiI nr 5 T07E 06024, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2006.

Streszczenie

Przedstawiono konstrukcję i funkcjonowanie wybranych typów fizycznych modeli symulacyjnych pracy podłoża toru kolejowego i komunikacyjnych budowli ziemnych. Omówiono istotę badań stanu odkształcenia tych modeli. Rezultaty tych badań mogą stanowić podstawę do projektowania wzmocnień podłoża modernizowanych dróg szynowych.

Physical models of ground and ground building in railway engineering

Summary

There were presented the design and operation of selected types of physical work the ground simulation models of railway track and communication earthworks. There were discussed the deformation of the essence test these models. The results of these studies may provide a basis for designing the ground reinforcements upgraded railways.