https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.130

УДК 625.7/.8

Терещенко Т. А., *канд. хім. наук, https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*
Цинка А. О., *канд. техн. наук., https://orcid.org/0000-0002-0357-2325*
Ілляш С. І., *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
Зеленовський В. А., *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна

МЕТОДИ ВИПРОБУВАННЯ З ВИЗНАЧАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ ДИСПЕРСНИХ СУМІШЕЙ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ

Анотація

Вступ. Окреслено вплив деформаційної поведінки неукріплених дисперсних сумішей (ДС) на конструкцію нежорсткого дорожнього одягу у разі застосування ДС у шарі неукріпленої основи.

Проблематика. Проблематика статті стосується вирішення питань, обумовлених нестабільною деформаційною поведінкою ДС в неукріплених шарах основи/додаткової основи, під час проєктування та експлуатації нежорсткого дорожнього одягу.

Мета. Основною метою статті є виконання аналітичного огляду методів випробування та моделювання деформаційної поведінки ДС. Результати аналітичного огляду призначені для застосування в процесі впровадження розроблюваного національного стандарту стосовно методу випробувань дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском, ідентичного відповідному європейському стандарту.

Результати. Виконання аналітичного огляду дозволило отримати наступні результати:

– показано, що за кожного встановленого рівня напруження найбільш стабільний стан ДС забезпечується після проходження періоду пост-ущільнення, коли накопичені пластичні деформації стають незначними, а залежність «пластична деформація/кількість циклів навантажування» набуває характеру асимптоти;

– визначено, що основна задача випробування ДС методом циклічного всебічного стиску повинна вирішуватися як оцінювання навантажень (напружень), які, з урахуванням вхідних даних, мають забезпечувати стабільний стан ДС у неукріпленому шарі запроєктованої конструкції нежорсткого дорожнього одягу; випробування полягає в утворенні в циліндричному зразку ДС циклічних напружень, значення яких відповідають очікуваним, та у вимірюванні осьових і радіальних деформацій зразка, спричинених такими напруженнями;

– показано, що ефективне прогнозування деформаційної поведінки ДС, а також їх класифікацію з метою співвіднесення категорії пластичної поведінки з очікуваним рівнем напружень може бути виконано за допомогою різних математичних моделей, побудованих на залежності пластичних деформацій від навантаження.

Висновки. Прогнозування деформаційної поведінки дисперсних сумішей за очікуваних умов експлуатації, за впливу кліматичних чи техногенних чинників потрібно розглядати як критичний аспект проєктування нежорстких дорожніх одягів. Стандартним методом випробування ДС для вивчення деформаційної поведінки є випробування циклічним всебічним стиском. Стандартні алгоритми випробування передбачають вивчення пружних і пластичних властивостей ДС та дозволяють вивчати ДС за умов, що моделюють фізичний стан і напружені

стани таких матеріалів у шарах дорожнього одягу за впливу рухомих навантажень. Прогнозування деформаційної поведінки ДС на підставі результатів випробувань базується на побудові та інтерпретації математичних моделей, що охоплюють фактори, характеристичні для кожної досліджуваної дисперсної суміші.

Ключові слова: деформаційні властивості, методи випробування, модуль пружності, неукріплена дисперсна суміш, пластичні деформації, циклічне всебічне стискання.

Вступ

Неукріплені дисперсні суміші на основі заповнювачів з кам'яних матеріалів (англомовний термін — *UGM*, *unbound granular mixture*) є одним з найбільш поширених дорожньо-будівельних матеріалів для влаштування шарів дорожніх одягів.

Особливо критичними є характеристики таких сумішей у разі їх застосування в нежорстких дорожніх одягах, де дисперсні суміші, застосовувані переважно в шарах основи та додаткової основи, розташовані безпосередньо на земляному полотні. Неукріплена основа забезпечує структурну цілісність розташованих вище асфальтобетонних шарів та захищає земляне полотно від деформації шляхом перерозподілу навантажень та зменшення напружень, тому властивості дисперсних сумішей є надзвичайно важливими для успішної роботи конструкції нежорсткого дорожнього одягу в цілому [1–3].

Найбільш важливою характеристикою дисперсних сумішей вказаного цільового призначення є деформаційні властивості. Деформаційна поведінка дисперсних сумішей під впливом повторюваних навантажень від руху транспорту в шарі неукріпленої основи нежорсткого дорожнього одягу характеризується як така, що містить пластичну (невідновлювальну) складову та пружну, або відновлювальну, складову. Пружні властивості основи з дисперсних сумішей впливають на утворення втомних тріщин асфальтобетонного покриття, в той час як пластичні деформації основи призводять до утворення колії [1]. У цілому, конструкція дорожнього одягу повинна бути запроєктована таким чином, щоб у кожному шарі (елементі конструкції) пластичні деформації не розвивалися або були незначними [2, 3], тому для дисперсних сумішей визначальною характеристикою є опір пластичному деформуванню. Також невід'ємною складовою проєктування нежорстких дорожніх одягів є прогнозування деформаційних характеристик дисперсних сумішей за впливу різних чинників, зокрема кліматичних (сезонних) або техногенних чинників.

У європейській практиці дорожнього будівництва методи випробування неукріплених дисперсних сумішей установлено в стандартах серії EN 13286. Вимоги до методів випробування з визначання деформаційних властивостей установлює частина 7 цього стандарту щодо випробування сумішей циклічним всебічним стиском [4]. У вітчизняній практиці дорожнього будівництва стандартні аналоги такого методу випробування відсутні.

Колективом ДП «ДерждорНДІ» виконується значний обсяг робіт з адаптації вимог європейських норм стосовно неукріплених сумішей та сумішей, укріплених гідравлічним в'яжучим, а також методів виготовлення зразків та випробування таких сумішей. У запропонованій статті, у продовження циклу публікацій за вказаною тематикою, з якими можна ознайомитися за переліком першоджерел [5, 6], викладено аналітичний огляд методів випробування дисперсних сумішей з вивчення їх деформаційних властивостей, розглянуто проблеми оцінювання результатів таких випробувань, а також розглянуто застосування результатів випробувань з метою прогнозування деформаційних властивостей дисперсних сумішей за впливу різних чинників.

Природа в'язко-пружної поведінки ущільнених дисперсних сумішей під впливом циклічних механічних навантажень

Ущільнені дисперсні суміші під впливом повторюваних механічних навантажень характеризуються в'язко-пружними властивостями. Феномен в'язко-пружних властивостей дисперсних сумішей проявляється в переході від пластичності, яка спостерігається з початковими циклами навантажування ущільненої суміші (пост-ущільнення) та супроводжується швидким накопиченням пластичних деформацій, до пружного відклику, який стало спостерігається до т. зв. границі пластичного осідання, де суміш характеризується асимптотичним характером залежності пластичних деформацій від кількості циклів навантажування (**рис. 1**).

Рисунок 1 — Характер залежності накопичених осьових (вертикальних) пластичних деформацій ущільненого шару дисперсної суміші від кількості циклів навантажування за встановленого рівня напруження; наведено згідно з [7]

За впливу циклічних навантажень від проходження транспортних засобів у неукріпленій основі нежорсткого дорожнього одягу утворюються напруження, відповідно до яких розвиваються зазначені вище види деформації — пружна (зворотна) та пластична (залишкова, незворотна). Частка пластичної деформації для кожного окремого циклу навантажування є незначною, проте критичною є здатність дисперсної суміші до накопичення суттєвих залишкових деформацій внаслідок великої кількості циклів навантажування або опір пластичному деформуванню [1].

Опір пластичному деформуванню дисперсних сумішей під впливом циклічних навантажень утворюється переважно за рахунок перекриття частинок заповнювача та сил тертя між частинками. Імпульси навантажування спричиняють зміщення частинок заповнювача, яке певною мірою є незворотним, та призводять до подальшого ущільнення суміші, деструкції частинок заповнювача або міграції частинок суміші. Наявність плівки води на поверхні заповнювача зменшує силу тертя між частинками та сприяє їх рухомості — тобто швидкість та характер процесу накопичення пластичних деформацій залежать від умісту води [3]. Підвищення вмісту води за інших рівних умов призводить до суттєвого зниження модуля пружності дисперсних сумішей і зниження опору пластичному деформуванню. Доведеним є також вплив характеристик заповнювачів. Наприклад, суміші на основі заповнювачів з міцних гірських порід округленої (без сколотої поверхні) форми у разі випробування за великої кількості циклів навантажування класифікуються більш високою категорією, ніж у разі використання заповнювачів зі сколотою поверхнею; у разі випробування за малої кількості циклів навантажування картина є діаметрально протилежною [7, 8].

Швидкість накопичення пластичних деформацій та рівень пластичного деформування залежить також від рівня напруження, яке утворюється в шарі ущільненої суміші під впливом навантаження, історії розвитку напружень, ступеня ущільнення, гранулометричного складу суміші та типу заповнювачів [1].

Аналіз положень стандартного методу випробування дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском

Випробування дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском дозволяє вивчати деформаційні властивості ущільнених сумішей за умов, які моделюють фізичний стан і режими роботи таких сумішей в ущільненому шарі дорожнього одягу в напруженому стані під впливом повторюваних навантажень від руху транспортних засобів.[1] Випробування полягає в циклічному утворенні в циліндричному зразку ущільненої суміші напружень, які відтворюють інтервал напружень у неукріпленому шарі дорожнього одягу, та у вимірюванні осьових і радіальних деформацій зразка, спричинених відповідним навантаженням [4].

Зразки для випробування виготовляють з застосуванням стандартних методів ущільнення: вібростисканням, ущільненням вібраційним молотком або за методом Проктора, згідно з положеннями відповідних стандартів серії EN 13286. Діаметр зразка має бути більшим, ніж 5*D* (*D* — максимальний розмір зерен дисперсної суміші), висота зразка дорівнює двом діаметрам.

У процесі випробування до зразка одночасно прикладають обмежувальний тиск (*confined pressure*) та вертикальний осьовий тиск. Стандартні випробування виконують одним з двох методів:

– метод А — метод перемінного обмежувального тиску, де обмежувальний тиск прикладається циклічно, разом з циклічним осьовим навантажуванням;

– метод В — метод постійного обмежувального тиску, де прикладаються циклічне осьове навантаження та постійний обмежувальний тиск.

Під час випробувань згідно з методом А (перемінний обмежувальний тиск) прикладають циклічне осьове навантаження з утворенням циклічного девіаторного напруження за циклічного (перемінного) обмежувального тиску середовища в камері; обидва навантаження варіюються в фазі. Також може бути прийнято метод В — спрощений режим утворення девіаторного напруження за циклічного осьового навантажування та постійного обмежувального тиску.[2]

Обмежувальний тиск забезпечують з допомогою низького вакууму в тілі зразка або шляхом утворення тиску на зразок середовища камери всебічного стискання (*triaxial pressure chamber*) — повітря, води або силіконового масла (див. **рис. 2**).

Випробування згідно з методом А виконують виключно в камері всебічного стискання; для виконання випробувань згідно з методом В застосування камери всебічного стискання не є обов'язковим.

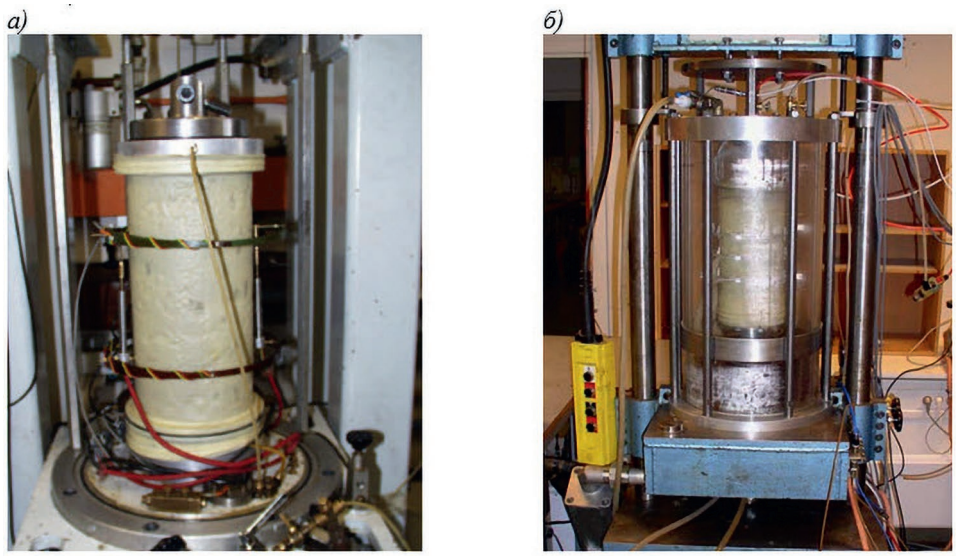
У разі забезпечення обмежувального стискання за допомогою низького вакууму в тілі зразка матеріал зразка знаходиться в мембрані, яка гарантує герметичність та підтримання потрібного вакууму в тілі зразка (**рис. 2, *а***). Конструкція камери всебічного стискання для методу випробувань, що розглядається (**рис. 2, *б***), принципово не відрізняється від інших моделей камер всебічного стискання, але розміри є дещо більшими для спрощення розміщення вимірювальних приладів у межах камери.

Розроблено три стандартні алгоритми випробування дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском: вивчення пружної поведінки, вивчення пластичної поведінки (одностадійна процедура) та швидке оцінювання залишкових деформацій за різних рівнів напруження (багатостадійна процедура) [4]. Останні дві стандартні процедури призначені для вивчення власне пластичної поведінки, проте, як свідчить аналіз літератури [1, 3], саме багатостадійна процедура (в англомовній науково-технічній літературі переважно позначається скороченням *MS RLT, Multi-*

[1] Стандартний метод випробувань [4] поширюється на стандартні дисперсні суміші згідно з [9].

[2] Девіаторне напруження σd у процесі таких випробувань визначається як різниця між тотальним осьовим напруженням σ_1 (яке є найбільшим значенням головного напруження під час випробування) та тотальним радіальним напруженням σ_3: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$.

Stage Repeated Load Triaxial [*Test*]) частіше застосовується для вивчення пластичної поведінки як така, що більш повно ураховує передісторію формування механічних напружень у зразку.



а) забезпечення обмежувального тиску з допомогою низького вакууму;
б) забезпечення обмежувального тиску з допомогою робочого середовища камери всебічного стискання

Рисунок 2 — Обладнання для випробування зразків дисперсних сумішей всебічним стиском

Випробування на пружність виконують з метою обчислення модуля пружності суміші за встановлених рівнів напруження, а також з метою отримання параметрів нелінійних пружних моделей у цілях проєктування конструкції дорожнього одягу.

Випробування виконують методом перемінного або постійного обмежувального тиску. Перед випробуванням на пружність здійснюють кондиціонування зразка для стабілізації залишкових деформацій та досягнення стабільної (не залежної від кількості циклів) пружної поведінки. Кондиціонування полягає в прикладанні великої кількості однакових циклічних навантажень. Під час саме випробування навантаження варіюються в фазі – прикладають цикли навантаження, де у разі переходу до кожної нової групи циклів відбувається зміна фазового рівняння.

Вивчення пластичної поведінки (за одностадійною або за багатостадійною процедурою) — пластична деформація, яка утворюється внаслідок прикладання навантаження за багатостадійною процедурою, може відрізнятися від такої, що утворюється за одностадийною процедурою.

Вивчення пластичної поведінки за одностадійною процедурою виконують з метою визначання залишкових деформацій за вибраного рівня напруження, або для встановлення параметрів моделей пластичного деформування. Випробування виконують без попереднього кондиціонування, методом перемінного або постійного обмежувального тиску. До зразка прикладають навантаження з забезпеченням однієї повторюваної комбінації ліній рівних напружень, до досягнення зразком певних граничних значень пластичних деформацій. Рекомендовано добирати групу циклів навантажування, які забезпечують максимальну амплітуду утворення напружень. До недоліків такого методу випробування потрібно віднести використання нового зразка для кожної нової групи циклів навантажування.

Вивчення пластичної поведінки за багатостадійною процедурою здійснюють з метою визначання максимального допустимого напруження — такого, що не призводить до

розвитку надлишкових залишкових деформацій. Випробування виконують без попереднього кондиціонування, методом постійного обмежувального тиску. Процедура полягає в прикладанні до одного зразка навантажень з забезпеченням різних комбінацій ліній рівних напружень, за зростаючих значень випробного напруження, допоки накопичена осьова пластична деформація не перевищить установлену границю; стандартною процедурою передбачено максимум п'ять стадій випробування.

Під час виконання випробувань циклічні навантаження — як за перемінного, так і за постійного обмежувального тиску — прикладають з частотою від 0,2 Гц до 10 Гц; точність прикладання навантаження (утворення девіаторного напруження, обмежувальний тиск) повинна становити ± 2 кПа або 1 % — залежно від того, що забезпечує більш високу точність. У разі випробування методом перемінного обмежувального тиску зсув фаз між циклічними коливаннями осьового та обмежувального тиску не повинен перевищувати 1 % від загальної тривалості циклу.

Рівень напруження під час випробувань встановлюють залежно від розташування шару дисперсних сумішей у конструкції нежорсткого дорожнього одягу, а також товщини шару асфальтобетону. Так, згідно з [4] «високий рівень напруження» відповідає напруженням, які зазвичай спостерігаються в верхній частині шару основи з дисперсних сумішей, розташованої під тонким бітумомінеральним шаром (менше ніж 80 мм). «Низький рівень напруження» відповідає напруженням, що спостерігаються під бітумомінеральними шарами більшої товщини або в додатковій основі (під першим шаром основи з дисперсних сумішей).

За результатами стандартних випробувань згідно з [4] визначають значення напруження, деформації та модуля пружності.[3]

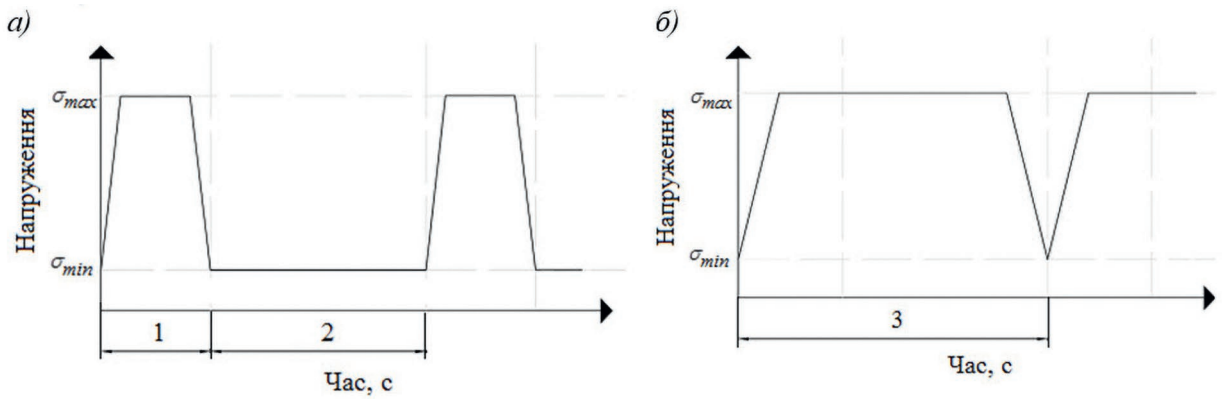
Загальний аналіз оцінювання результатів випробування дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском

Потрібно зазначити, що згідно з даними [10] у світовій практиці дорожнього будівництва існують різні протоколи випробування дисперсних сумішей методом циклічного всебічного стискання — як стандартні, так і в дослідницьких цілях.

Так, відомо, що на значення деформації та модуля пружності неукріплених дисперсних сумішей суттєво впливає загальна конфігурація навантажування, яка може передбачати або не передбачати період спокою (*rest period*) — наприклад, як наведено на **рис. 3** згідно з [10].

Автори [10] виконали дослідження двох дисперсних сумішей на основі кам'яних матеріалів виверженних порід методом всебічного стиску за постійного обмежувального тиску за двома протоколами, які є однаковими в частині частоти навантажування, величини обмежувального тиску, величини девіаторного напруження та кількості циклів навантажування; тривалість «періоду спокою» за одним протоколом становила 2 с, за іншим протоколом «період спокою» відсутній — за однакової у двох протоколах тривалості одного циклу (рис. 3). Як показали дослідження, накопичені пластичні деформації є більшими в разі прикладання циклів навантажування з «періодом спокою», що пояснюється можливістю перегрупування (або сегрегації, як вказують автори) частинок суміші впродовж такого періоду [10]. Модуль пружності є більшим у разі прикладання циклів навантажування без «періоду спокою», що узгоджується з висновком стосовно впливу такого періоду на розвиток пластичних деформацій.

[3] Ймовірно, потрібно з обережністю вдаватися до стандартних випробувань дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском за підвищеного вмісту води. Автори [11], труди яких взято за основу під час розроблення стандарту [4], виконували випробування циклічним всебічним стиском дисперсних сумішей на основі кам'яних матеріалів гранодіориту за відносного вмісту води 4 % (такий, що відповідав природному умісту води), 5 % (такий, що відповідав умісту води за умов відлиг), 6 % та 7 %. Зазначається [11], що за вмісту води 6 % та 7 % відбувався витік води з дрен, що автори визнали як неоднорідні умови випробування й результати не розглядалися.



а) з періодом спокою;

б) без періоду спокою

Рисунок 3 — Конфігурації навантажування дисперсних сумішей для випробування циклічним всебічним стиском [10]

Важливою задачею для лабораторій, що виконують випробування дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском, є належне добирання параметрів осьового імпульсного навантажування — так, щоб моделювати алгоритм утворення напружень у конструкції дорожнього одягу [10]. За проходження навантаження (колеса транспортного засобу) безпосередньо на певній точці покриття максимальні напруження в конструкції дорожнього одягу утворюються в проекції під цією точкою. При виїзді рухомого навантаження за межі цієї точки напруження зводяться до нульових значень. Таким чином тривалість «періоду спокою» в такій точці відповідає тривалості періоду між двома послідовними навантажуваннями [10].

Відповідно до цього ставлять питання відповідності конфігурації прикладання навантаження під час випробувань дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском умовам роботи матеріалу в конструкції дорожнього одягу.

Прогнозування деформаційних властивостей дисперсних сумішей за результатами випробування циклічним всебічним стиском

Підходи до прогнозування деформаційних властивостей дисперсних сумішей за результатами випробування циклічним всебічним стиском можуть бути умовно охарактеризовані як такі, що ґрунтуються на категоризації сумішей та такі, що забезпечують власне прогнозування деформаційних властивостей за впливу різних чинників переважно з допомогою математичних моделей.

У стандарті [4] запропоновано процедури категоризації дисперсних сумішей. Категоризацію може бути виконано як за результатами випробувань з пружності, так і за результатами вивчення пластичної поведінки.

За результатами випробувань з пружності запропоновано категоризацію дисперсних сумішей відповідно до **табл. 1**.

Згідно з **табл. 1** у стандарті [4] установлено три класи дисперсних сумішей за показниками деформаційних властивостей — від С1 до С3.

Категоризація дисперсних сумішей за результатами вивчення пластичної поведінки є складовою концепції осідання (*shakedown concept*), яка застосовується в положеннях з проєктування нежорстких дорожніх одягів, що доцільно розглянути окремим матеріалом.

Таблиця 1

Класифікація дисперсних сумішей на підставі значень показників характеристичного модуля пружності та характеристичної величини пластичної деформації

Клас	Характеристична величина модуля пружності E_c, МПа	Характеристична величина пластичної деформації ε_1^c
C1	$500 \le E_c$	$\varepsilon_1^c \le 2{,}5 \cdot 10^{-3}$
C2	$500 \le E_c$	$2{,}5 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_1^c \le 6 \cdot 10^{-3}$
	$250 \le E_c < 500$	$\varepsilon_1^c \le 6 \cdot 10^{-3}$
C3	$250 \le E_c$	$6 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_1^c$

Нижче проаналізовано результати наукових досліджень, спрямованих на прогнозування деформаційної поведінки дисперсних сумішей за різних впливів. Особливо критичним для дорожніх одягів нежорсткого типу є прогнозування деформаційної поведінки дисперсних сумішей за очікуваного максимального напруження під впливом навантажень від руху транспорту у періоди відлиг або інших погодно-кліматичних чи техногенних чинників, що суттєво впливають на вміст води в неукріплених шарах основи. Так, зазначається [12], що модуль пружності дисперсних сумішей, вологість яких перевищує оптимальне значення, зі збільшенням ступеня насичення зменшується критично.

Авторами [1] було показано, що залежність деформаційної поведінки дисперсної суміші від умісту води може бути проаналізовано шляхом виведення залежності між одним з параметрів обраної математичної моделі та вмістом води. Експериментальні дослідження виконували методом всебічного стискання з застосуванням багатостадійної процедури [4]. Для аналізу результатів випробування було застосовано математичну модель авторів — *the Rahman and Erlingsson model* (1):

$$\varepsilon_p(N) = aN^{bS_f} S_f, \tag{1}$$

де $\varepsilon_p(N)$ — накопичена пластична деформація;

N — сумарна кількість циклів навантажування;

a, b — параметри математичної регресії, які встановлюють для кожної досліджуваної суміші;

S_f — параметр, що ураховує вплив напруженого стану на накопичення пластичних деформацій; визначається за рівнянням:

$$S_f = \frac{\left(\frac{q}{p_a}\right)}{\left(\frac{p}{p_a}\right)^{\alpha}}, \tag{2}$$

де p — напруження гідростатичного тиску;

q — девіаторне напруження;

p_a — референтне значення напруження, прийняте як таке, що дорівнює атмосферному тиску 100 кПа;

α — параметр, який залежить від характеристик суміші та знаходиться методом регресійного аналізу.

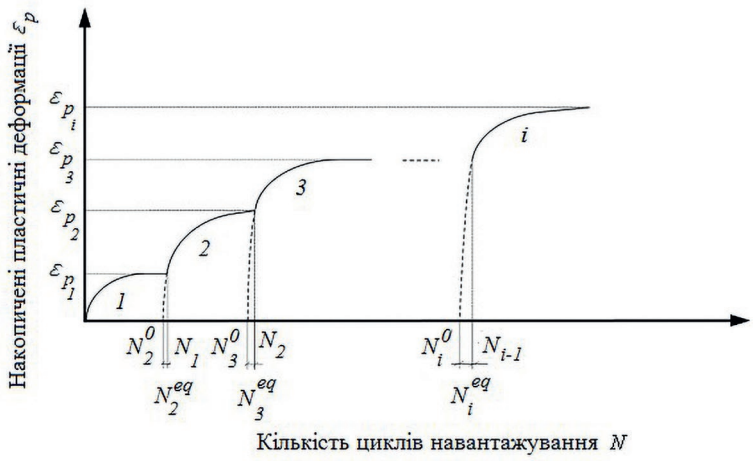
Автори [1] зазначають переваги застосованої математичної моделі:

– охоплює відносно малу кількість параметрів;
– не потребує застосування параметрів міцності на зсув;
– безпосередньо використовує забезпечені рівні напруження як параметри моделювання.

Стосовно критеріїв вибору математичних моделей потрібно зазначити, що в роботі [13] наведено окремі пояснення щодо доцільності застосування параметрів міцності на зсув для аналізу результатів вивчення деформаційної поведінки дисперсних сумішей випробуванням циклічним всебічним стиском. Попри те, що для таких параметрів, як кут внутрішнього тертя та когезія виведено роздільні достовірні залежності зміни цих параметрів для досліджуваних систем за умов випробування, застосування таких залежностей у моделюванні головного напруження (σ_1 та σ_{1f}, де σ_{1f} визначається під час руйнування зразка) не дозволяє отримувати його достовірні значення.

Проте для інших досліджуваних систем можуть бути й інші висновки стосовно застосування математичних моделей з параметрами міцності на зсув.

Вихідна модель (1) використовується для інтерпретації результатів одностадійних випробувань; для розбудови та адаптації цієї моделі до інтерпретації результатів багатостадійних випробувань автори застосовували т. зв *time-hardening conception* — концепцію усталення в часі пластичних деформацій за кожного встановленого рівня навантаження (див. **рис. 4**).



1, *2*, *3*, … *i* — етапи розвитку пластичних деформацій за різних рівнів напруження

Рисунок 4 — Залежність пластичних деформацій від кількості циклів навантажування відповідно до рівнів напруження під час багатостадійного випробування дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском (складова «*time-hardening*» — концепції)

Згідно з «*time-hardening*» — концепцією значення пластичних деформацій, накопичених за попереднього рівня напруження, використовують для обчислення кількості циклів навантажування, потрібних для забезпечення таких же сумарних пластичних деформацій за наступного рівня напруження (див. **рис. 3**). Така кількість циклів навантажування зазначається як еквівалентна (N_i^{eq}) та використовується, щоб коригувати загальну кількість циклів навантажування N шляхом обчислення ефективної кількості циклів навантажування ($N - N_{i-1} + N_i^{eq}$), де N_{i-1} — загальна кількість циклів навантажування наприкінці попередньої, *i-1*-стадії (для попереднього рівня напруження).

Розбудова математичної моделі (1) згідно з "*time-hardening*" — концепцією дозволяє застосовувати вихідну математичну модель для варійованого вмісту води з допомогою рівняння (3):

$$\varepsilon_p(N) = \left[a_1 + a_2(w)\right]\left(N - N_{i-1} + N_i^{eq}\right)^{b(S_f)_i}(S_f)_i, \quad (3)$$

де a_1 та a_2 — параметри математичної регресії, значення яких обчислюються за результатами виконання *MS RLT*.

Більш докладно з розбудовою математичної моделі читачі можуть ознайомитися в першоджерелах [1].

Для виведення залежності одного з параметрів математичної моделі (3) від умісту води — у вигляді лінійної залежності — автори застосовували спрощений підхід з обмеженням варіацій параметрів (що не призводить до погіршення результатів математичного аналізу, модельні та «реальні» системи характеризуються практично однаковими кривими залежностей). Було показано, що найбільш характеристичною є залежність між параметром *a* та вмістом води *w* — у випадку більш чутливих до вмісту води, з точки зору накопичення пластичних деформацій, характеристик заповнювача, залежність *a* від *w* характеризується більшим нахилом (**рис. 5**).

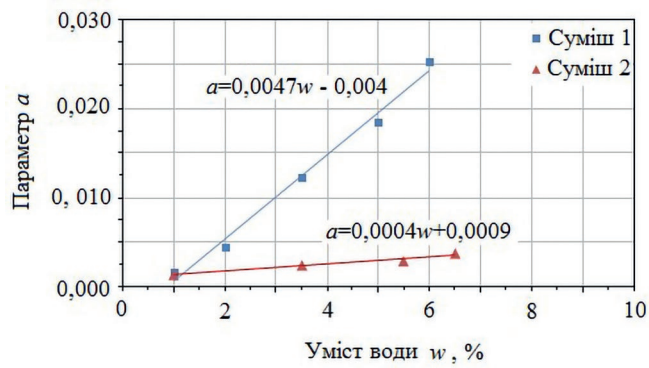


Рисунок 5 — Залежність характеристичного параметра *a* від умісту води *w*, виведена авторами [1] для досліджуваних сумішей

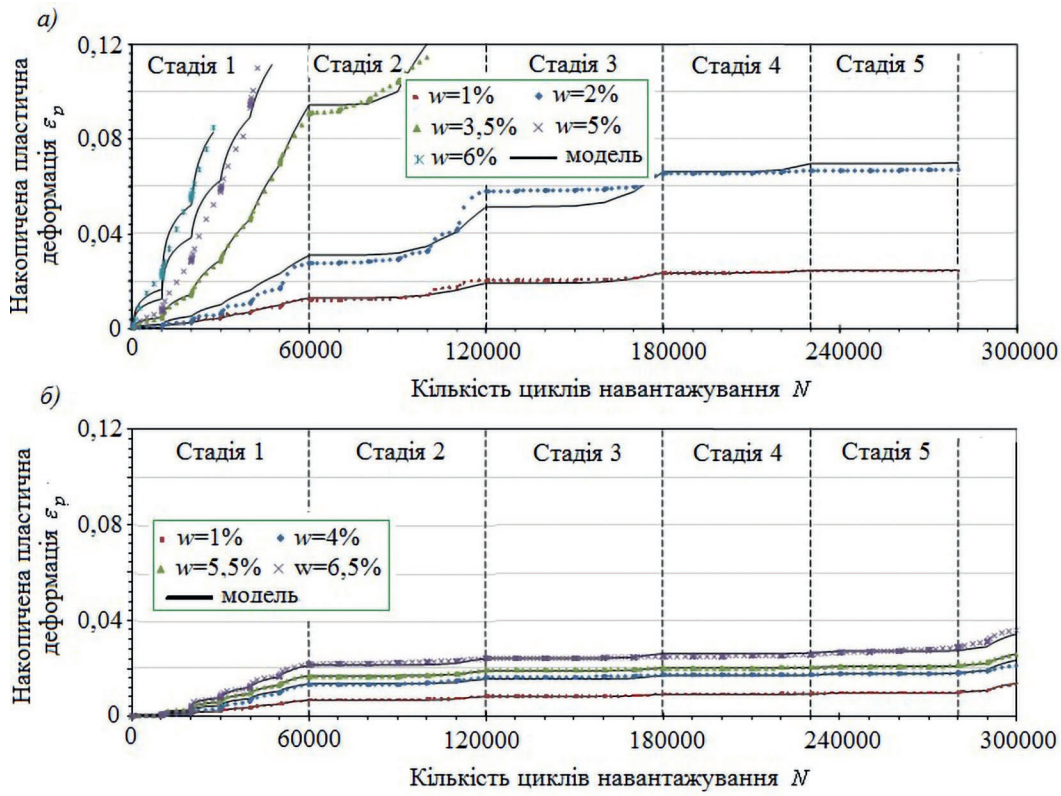
Автори [1] вказують, що суміш 1 є більш чутливою до вмісту води і, відповідно, здатною до накопичення пластичних деформацій внаслідок підвищеного відносного вмісту дрібнозернистих складових.

Якщо оперувати рівняннями, наведеними на **рис. 5**, з допомогою математичної моделі (3) можемо зробити висновок, що за однакових значень *w* для суміші 1 будуть спостерігатися більш високі значення накопичених пластичних деформацій, ніж для суміші 2.

Результати стандартних випробувань [1] методом *MS RLT*, щодо яких не застосовано інтерпретацію з використанням математичних моделей, наведено на **рис. 6**.

Наведені дані (**рис. 6**) свідчать, що пластичні деформації збільшуються з підвищенням *w*; дисперсна суміш 1 з більшим відносним умістом дрібнозернистих складових характеризується не тільки більшими значеннями накопичених пластичних деформацій, але й іншим, більш критичним характером залежності пластичних деформацій від умісту води — на окремих стадіях відбувається стрибкоподібне підвищення швидкості накопичення пластичних деформацій.

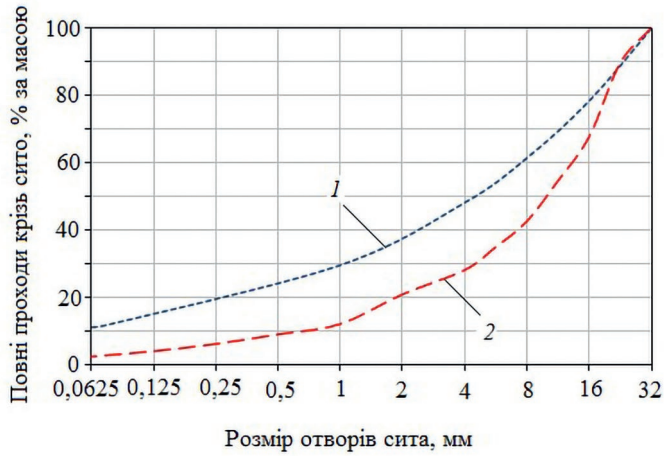
Шляхом співвіднесення даних щодо гранулометричного складу з результатами прогнозування деформаційних властивостей суміші 1 та суміші 2 можемо надати висновок стосовно значущості впливу відносного вмісту дрібнозернистих фракцій дисперсних сумішей на опір пластичному деформуванню, особливо за умов дії кліматичних або техногенних факторів з підвищенням умісту води в неукріплених шарах дорожнього одягу.



а) суміш 1;
б) суміш 2

Рисунок 6 — Залежність накопичених пластичних деформацій від умісту води за результатами стандартних багатостадійних випробувань згідно з даними [1]

Гранулометричні криві відповідних досліджених сумішей наведено на **рис. 7**.



1 — суміш 1;
2 — суміш 2

Рисунок 7 — Криві гранулометричного складу досліджуваних сумішей згідно з даними [1]

Висновки

1. Прогнозування деформаційної поведінки дисперсних сумішей за очікуваного максимального напруження (під впливом рухомих навантажень) у періоди відлиг або дії інших погодно-кліматичних чи техногенних чинників, що суттєво впливають на вміст води в неукріплених шарах основи, є особливо критичним під час проєктування нежорстких дорожніх одягів — недостатні пружні властивості та накопичення пластичних деформацій в неукріплених шарах призводять до утворення втомних тріщин асфальтобетонного покриття та утворення колії.

2. Вивчення деформаційних властивостей дисперсних сумішей ґрунтується на в'язко-пружній моделі поведінки ущільненої суміші під впливом циклічних механічних навантажень. Феномен в'язко-пружних властивостей дисперсних сумішей проявляється в переході від пластичності, яка спостерігається з початковими циклами навантажування ущільненої суміші (пост-ущільнення) та супроводжується швидким накопиченням пластичних деформацій, до пружного відклику, який спостерігається до границі пластичного осідання, де суміш характеризується асимптотичним характером залежності пластичних деформацій від кількості циклів навантажування. Теорію в'язко-пружних властивостей дисперсних сумішей реалізовано в концепції осідання ("*shakedown concept*").

3. Стандартний метод вивчення деформаційних властивостей дисперсних сумішей згідно з європейською практикою дорожнього будівництва передбачає випробування циклічним всебічним стиском та охоплює алгоритми випробування з вивченням пружної та пластичної поведінки окремо, із застосуванням різних алгоритмів навантажування. Умови випробування моделюють фізичний стан і напружені стани таких сумішей у шарах нежорсткого дорожнього одягу за впливу рухомих навантажень.

4. Стандартні випробування з пружності виконують з метою обчислення модуля пружності дисперсної суміші за встановлених рівнів напруження, а також для отримання параметрів нелінійних пружних моделей у цілях проєктування. Стандартні випробування з вивчення пластичної поведінки дисперсної суміші виконують з метою визначання залишкових деформацій за вибраного рівня напруження, для встановлення параметрів моделей пластичного деформування, а також для визначання максимального допустимого напруження — такого, що не приводить до розвитку надлишкових залишкових деформацій.

5. Прогнозування деформаційної поведінки дисперсних сумішей базується на побудові та інтерпретації математичних моделей, що охоплюють, зокрема, фактори, характеристичні для кожної досліджуваної дисперсної суміші, та які залежать від гранулометричного складу суміші, форми часток суміші, властивостей поверхні часток, умісту води тощо. Показано ефективність прогнозування деформаційної поведінки дисперсних сумішей за впливу різних чинників шляхом математичного моделювання.

Список літератури

1. Rahman, M. S., and Erlingsson, S. Modelling the moisture dependent permanent deformation behavior of unbound granular materials. *Procedia Engineering.* 2016. Vol. 143, P. 921–928. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 10.02.2022).

2. Werkmeister, S., Dawson, A. R., Wellner, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* Washington DC, USA. Vol. 1757, Issue 1. 2001. P. 75–81. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1757-09 (дата звернення: 13.12.2022).

3. Erlingsson, S., Rahman, S., Salour, F. Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi-stage RLT testing. *Transportation Geotechnics.* 2017, 13, P. 28–42. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 02.12.2022).

4. EN 13286-52:2004 Unbound and hydraulically bound mixtures — Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. European Committee for Standardization. 2004. Brussels, Belgium. 37 p.

5. Терещенко Т.А. Аналіз сучасних вітчизняних та закордонних вимог до матеріалів та процесів влаштування конструктивних шарів дорожнього одягу з сумішей, укріплених гідравлічним в'яжучим. *Дороги і мости*. 2018. Вип. 18. С. 159–170.

6. Терещенко Т.А., Ілляш С.І. Досвід проєктування та будівництва конструкцій дорожнього одягу з застосуванням положень європейських стандартів щодо матеріалів, укріплених гідравлічним в'яжучим. *Автошляховик України*. 2019. № 3. С. 42–50.

7. Werkmeister, S (2003). Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.). 2003. 189 p. URL: https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A24221/attachment/ATT-0/?L (дата звернення: 10.02.2022).

8. Dunlap, W. A. Deformational characteristics of granular materials subjected to rapid, repetitive loading. Research report No 24-7 on research project "Distribution of stress in layered systems composed of granular materials" No 2-8-62-27. Texas transportation institute; Texas A&M University, College Station. Texas, 1967. 220 p. URL: https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/27-4.pdf (дата звернення 10.02.2022).

9. ДСТУ EN 13285:2021 (EN 13285:2018, IDT) Суміші незв'язні. Технічні умови. Київ, 2021. 23 с. (Інформація та документація).

10. Alnedavi, A., Nepal, K. P., Al-Ameri, R., M. Alabdullah, M. Effect of vertical stress rest period on deformation behaviour of unbound granular materials: experimental and numerical investigations. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering.* 2019. 11. P. 172-180. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 02.12.2022).

11. Werkmeister, S., Numrich, R., Dawson, A. R., and Wellner, F. Design of granular pavement layers considering climatic conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* Washington DC, USA. Vol. 1837. Issue 1. 2003. P. 61–70. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1837-07 (дата звернення: 20.12.2022).

12. Rahman, M. S., and Erlingsson, S. Influence of post compaction on the moisture sensitive resilient modulus of unbound granular materials. Advances in transportation geotechnics 3. *The 3rd nternational Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). In: Procedia Engineering*. Vol. 143. 2016. P. 929–936.

13. Huurman, R., and Molenaar, A.A.A. Permanent deformation in flexible pavements with unbound base courses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington DC, USA. Vol. 1952, Issue 1. 2006. P. 30–38. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/0361198106195200104 (дата звернення: 20.12.2022).

References

1. Rahman, M. S., and Erlingsson, S. Modelling the moisture dependent permanent deformation behavior of unbound granular materials. *Procedia Engineering.* 2016. Vol. 143, P. 921–928. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 10.02.2022) [in English].

2. Werkmeister, S., Dawson, A. R., Wellner, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation*

Research Board. Washington DC, USA. Vol. 1757, Issue 1. 2001. P. 75–81. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1757-09 (Last accessed: 13.12.2022) [in English].

3. Erlingsson, S., Rahman, S., Salour, F. Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi-stage RLT testing. *Transportation Geotechnics.* 2017, 13, P. 28–42. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 02.12.2022) [in English].

4. EN 13286-52:2004 Unbound and hydraulically bound mixtures — Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. European Committee for Standardization. 2004. Brussels, Belgium. 37 p. (Information and documentation) [in English].

5. Tereshchenko T.A. Analiz suchasnykh vitchyznianykh ta zakordonnykh vymoh do materialiv ta protsesiv vlashtuvannia konstruktyvnykh shariv dorozhnoho odiahu z sumishei, ukriplenykh hidravlichnym viazhuchym [Analysis of current native and foreign requirements to the materials and processes for construction of road pavements lifts from hydraulically bound mixtures]. *Dorogi i mosti (Roads and bridges).* 2018. Issue 18. P. 159–170 [in Ukrainian].

6. Tereshchenko T.A, Illiash S.I. Dosvid proiektuvannia ta budivnytstva konstruktsii dorozhnoho odiahu z zastosuvanniam polozhen yevropeiskykh standartiv shchodo materialiv, ukriplenykh hidravlichnym viazhuchym [Experience on design and construction of road pavements using the clauses of European standards on hydraulically bound materials]. *Avtoshliakhovyk Ukrayiny*. 2019. № 3. P. 42–50 [in Ukrainian].

7. Werkmeister, S (2003). Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.). 2003. 189 p. URL: https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A24221/attachment/ATT-0/?L (Last accessed: 10.02.2022).

8. Dunlap, W. A. Deformational characteristics of granular materials subjected to rapid, repetitive loading. Research report No 24-7 on research project "Distribution of stress in layered systems composed of granular materials" No 2-8-62-27. Texas transportation institute; Texas A&M University, College Station. Texas, 1967. 220 p. URL: https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/27-4.pdf (Last accessed: 10.02.2022) [in English].

9. DSTU EN 13285:2021 (EN 13285:2018, IDT) Sumishi nezviazni. Tekhnichni umovy [State standard of Ukraine DSTU EN 13285:2021 (EN 13285:2018, IDT) Unbound mixtures. Specifications]. Kyiv, 2021. 23 p. (Information and documentation).

10. Alnedavi, A., Nepal, K. P., Al-Ameri, R., M. Alabdullah, M. Effect of vertical stress rest period on deformation behaviour of unbound granular materials: experimental and numerical investigations. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering.* 2019. 11. P. 172-180. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 02.12.2022) [in English].

11. Werkmeister, S., Numrich, R., Dawson, A. R., and Wellner, F. Design of granular pavement layers considering climatic conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* Washington DC, USA. Vol. 1837. Issue 1. 2003. P. 61–70. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1837-07 (Last accessed: 20.12.2022) [in English].

12. Rahman, M. S., and Erlingsson, S. Influence of post compaction on the moisture sensitive resilient modulus of unbound granular materials. Advances in transportation geotechnics 3. *The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). In: Procedia Engineering*. Vol. 143. 2016. P. 929–936 [in English].

13. Huurman, R., and Molenaar, A.A.A. Permanent deformation in flexible pavements with unbound base courses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington DC, USA. Vol. 1952, Issue 1. 2006. P. 30–38. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/0361198106195200104 (Last accessed: 20.12.2022) [in English].

Tetiana Tereshchenko, *Ph. D., https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*
Anatolii Tsynka, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-0357-2325*
Serhii Illiash, *Ph. D., https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
Volodymyr Zelenovskyi, *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*

M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

TESTING METHODS FOR DETERMINING THE DEFORMATION BEHAVIOR OF ROAD GRANULAR MIXTURES ACCORDING TO THE REQUIREMENTS OF EUROPEAN STANDARDS

Introduction. In the introduction to the paper, the effect of deformation behavior of unbound granular mixtures (UGMs), when used in an unbound base layer, on the construction of the flexible road pavement was outlined.

Problem statement. The issues of the paper concern the problems related to the unstable deformation behavior of UGMs in unbound base/subbase layers during flexible road pavement designing and maintenance.

Purpose. The main goal of the paper is to perform an analytical review of methods for testing and modeling of deformation behavior of UGMs. The results of the analytical review are intended to be used during implementation of a national standard concerning the method of testing of unbound granular mixtures by the triaxial cyclic loading identical to the related European standard.

Results. The analytical reviewing led to the following results:

– it was revealed that at each stress level the most stable conditions are ensured to each UGM in its post-compaction period when the rate of accumulated permanent strains becomes negligible and the plot of permanent strain versus the number of loading cycles takes an asymptotic form;

– it was concluded that the main task of the UGM testing by triaxial cyclic loading shall be resolved as the evaluation of the loads (stresses) that, accepting all the input data, ensure the stable condition of the mixture in an unbound layer of the designed flexible road pavement; the test consists of applying the cyclic stresses corresponding to their expected limits to the cylindrical specimen of UGM and of measuring the axial and radial strains of the specimen induced by these stresses;

– it was stated that the effective prediction of deformation behavior of UGMs and also their classification to relate the category of deformation behavior of UGM to the expected stress level can be performed through various mathematical models based on "permanent deformation/stress" dependency.

Conclusions. The prediction of deformation behavior of UGM under expected working conditions, under impact of adverse climatic and/or technogenic factors shall be considered as the critical point of the flexible road pavement designing. The standard method for UGM testing to study their deformation behavior is the cyclic load triaxial test. Standard test algorithms cover the testing of resilient and permanent behavior and allow the studying of UGMs under conditions that simulate the physical conditions and stress states of these materials in road pavement layers subjected to moving loads. The prediction of deformation behavior of UGM regarding the test results is based on construction of mathematical models which covers factors characteristic for each tested mixture.

Keywords: unbound granular mixture, methods of testing, cyclic load triaxial test, deformation behavior, resilient modulus, resilient strains, permanent strains.