

**ПРИДАТНІСТЬ ЗАПОВНЮВАЧА, ПЕРЕРОБЛЕНОГО З БЕТОННИХ  
ПОКРИТТІВ ДЛЯ НЕУКРІПЛЕНИХ ШАРІВ ТА  
СУМІШЕЙ, УКРІПЛЕНИХ ЦЕМЕНТОМ**

*Статтю переклала з англійської на українську мову Волошина О.*

**Анотація.** У статті представлено дослідження щодо можливості використання матеріалів, перероблених із бетонних покриттів, шляхом їх подрібнення в дробарках та повторного включення їх у дорожні покриття. З економічної та технічної точки зору подрібнені бетонні відходи можуть бути альтернативним джерелом заповнювачів, замінюючи природні заповнювачі. Щебінь випробовували з урахуванням сучасних вимог, яким повинні відповідати заповнювачі, що застосовуються в неукріплених шарах та сумішах укріплених цементом. Показано, що бетонний щебінь є придатним матеріалом для повторного включення в поверхневі шари дорожнього покриття та вказані обмеження на використання таких матеріалів.

**Ключові слова:** стабілізовані цементом шари, бетонний щебінь, переробка, неукріплені шари.

## **1. ВСТУП**

Економічний розвиток та нові технології призводять до збільшення використання цементобетону як у закритих конструкціях, так і в лінійних конструкціях. Довговічність бетонних матеріалів висока, але обмежена. Коли бетонні конструкції наближаються до кінця терміну служби, виникає питання, що робити з матеріалами, що закінчуються. Тема переробки відпрацьованих матеріалів все частіше порушується в будівництві. Це стосується також цементобетонів. У світі постійно зростає переробка бетонних матеріалів. За підрахунками, світова бетонна промисловість використовує близько 10 мільярдів тонн будівельних відходів, 50-70% з яких - це бетонні відходи [1]. США - одна з країн, де відходи бетонних матеріалів значною мірою перероблюються. Повторне використання відходів істотно сприяє зменшенню

споживання природних ресурсів та зменшенню шкідливих викидів парникових газів. Отримані від цього економічні вигоди не можна переоцінити. Існує багато різних можливостей використання переробленого бетону. Одним з них є використання цього матеріалу як заповнювача в шарах дорожнього покриття. За підрахунками, велика частина (понад 75%) перероблених бетонів - це бетонні матеріали та заповнювачі, що використовуються у дорожньому будівництві [1]. Для того, щоб забезпечити належне використання перероблених матеріалів в польських умовах, слід запровадити відповідні процедури будівництва та контролю для таких шарів покриття та земляного полотна. В даний час у світі проводяться інтенсивні дослідження фізико-механічних властивостей переробленого бетонного заповнювача. Але дотепер він не дав однозначної відповіді, чи можна природний заповнювач (NA) замінити бетонним щебенем. Існує думка, що перероблений бетонний заповнювач (RCA) особливо підходить для нижніх шарів дорожнього покриття (нижній шар основи та стабілізоване земляне полотно). Випробування, проведені в аеропортах Італії, показали, що бетонний щебінь можна використовувати в стабілізованих шарах гідравлічного в'язучого [2]. У Лондонському Кінгстонському університеті було проведено дослідження [3] з метою оцінки можливостей використання RCA у неукріплених сумішах для шарів основи. Результати показали, що завдяки використанню вторинних бетонних заповнювачів збільшився оптимальний вміст води, тоді як максимальна об'ємна щільність кам'яного каркасу матеріалів шару основи зменшилась порівняно з природними заповнювачами. Встановлено, що значення CBR шарів основи з бетонного заповнювача нижчі, ніж для основи з природного щебеню. У Польщі були проведені комплексні дослідження фізико-механічних властивостей високоміцних (40-70 МПа) перероблених бетонних заповнювачів та проаналізовано їх потенційне повторне використання в бетонних сумішах.

Також випробовували суміші з переробленими заповнювачами, стабілізованими за допомогою гідравлічних в'язучих, та визначали залежності міцності від стиску та міцності на вигин у діапазоні 5-20 МПа [5]. Багато

публікацій, напр. [6], [7] та [8] вказують на те, що бетонний щебінь може бути використаний для виробництва нових бетонних сумішей. Розроблено моделі, які високоефективно прогнозують модулі пружності бетонів на основі перероблених заповнювачів [9]. Інші дослідження, проведені у світі, показують, що бетонний щебінь може бути використаний для виробництва холодних асфальтобетонних сумішей [10], ізоляційних бетонів [11], нахилених бетонних стін [12] та конструкційного бетону [13], що використовується при будівництві закритих будівель. В рамках цього дослідження були проведені випробування матеріалів, отриманих подрібненням відпрацьованих шарів бетонного покриття в дробарках, щоб визначити, чи можна їх використовувати в неукріплених шарах та сумішах укріплених цементом, для стабілізації земляного полотна та нижніх шарів основи. Потенційне використання бетонного щебеню при виробництві сумішей для дорожніх шарів основи та методи відновлення бетонних покриттів на місці є предметом досліджень, що проводяться в даний час авторами, і вони будуть представлені в наступних публікаціях, присвячених переробці бетонних покриттів.

## **2. ПЕРЕРОБЛЕНІ БЕТОННІ ЗАПОВНЮВАЧІ**

Бетонний щебінь для випробувань було придбано з ліквідації існуючих бетонних покриттів місцевих доріг, промислових під'їзних шляхів та дворів у районі міста Вроцлав, пов'язаних із зміною існуючих систем руху транспорту. Вік видалених поверхонь оцінювали у 35-40 років та приблизно в 20 років для збірних залізобетонних плит. Поверхні піддавалися дії транспортних навантажень та факторів навколишнього середовища та технічного обслуговування під час звичайної експлуатації.

Плити попередньо подрібнювали за допомогою молотка, прикріпленого до гусеничного екскаватора (рис. 1), а потім подрібнювали в дробарці на місці (рис. 2). Були отримані фракції розміру частинок, близькі до типових 0/31,5 та 0/63 сумішей, залежно від налаштувань дробарки (рис. 3).

Перед подрібненням, бетонні керни були висвердлені з плити для оцінки міцності (ступеня) бетону на стиск. Для порівняльного аналізу також були взяті керни у не дорожніх конструкційних елементів (смуги і та точкові опори) зі

значно меншою міцністю. На рис. 4 показані зразки бетонних кернів висвердлених з плит.

У літературі з цього питання можна знайти спроби оцінити властивості перероблених заповнювачів за допомогою неруйнівних випробувань (наприклад, за допомогою молотка Шмідта) бетону перед подрібненням [14], але було виявлено, що результати таких випробувань були недостатніми для цієї мети, і вони можуть ввести в оману у випадку бетону невідомого походження.



Рис. 1. Попереднє подрібнення бетонного покриття з використанням молотка для знесення

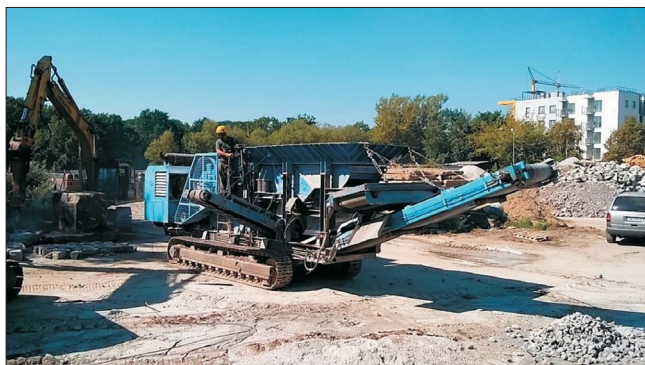


Рис. 2. Подрібнювач

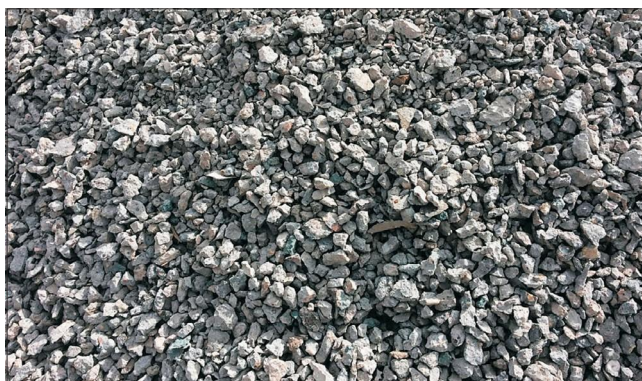


Рис. 3. Перероблений бетонний заповнювач, отриманий подрібненням плит  
Циліндричні зразки відбирали з кернів для визначення міцності,

водопоглинання та насипної щільності дорожньої бетонної плити (P1, P2) у порівнянні з конструкційним бетоном із будівельної смуги та точкової опори. Результати випробувань наведені в таблиці 1. Фізико-механічні характеристики елементів різного походження (P1 - збірні плити, P2 - плити, відлиті на місці, K3 - бетон із елементів фундаменту) визначали за 9 зразками для кожного типу елементу.

Міцність кернів оцінювали згідно з PN-EN 13791 [15] та PN-EN 13877-2 [16], як і для кернів 10 × 10 см, висвердлених із елементів, отриманих із конструкції. Результати представлені в таблиці 2 та таблиці 3.

Таблиця 1. Порівняння результатів випробувань для зразків, відібраних із висвердлених кернів

Характеристики	Стандарт	Одиниці вимірювання	Бетон		
			P1	P2	K3
Поглинання води	PN-88/B-06250	%	4.4	4.8	7.4
Насипна щільність (гідростатичний метод)	PN-EN 12390-7:2011	г/см <sup>3</sup>	2.244	2.275	2.153
Середня міцність на стиск	PN-EN 12504-1:2011	МПа	40	53	28.9
Середнє розщеплення міцності на розрив	PN-EN 12390-6:2011	МПа	2.75	2.79	1.77

Таблиця 2. Оцінка міцності на стиск елементів, отриманих із конструкцій

Бетон	Середня міцність на стиск бетону згідно з PN-EN 12504-1 $f_{cm}$ [МПа]	Характеристика міцності при стисненні бетону в конструкції згідно з PN-EN 13791 $f_{ck}$ [МПа]	Клас міцності на стиск бетону згідно з PN-EN 206	Клас міцності на стиск бетону згідно з PN-EN 13877-2
P1	40	34	C 30/37	CC30
P2	53	42	C 35/45	CC40
K3	29	23	C 20/25	CC20

Таблиця 3. Оцінка розщеплення міцності на розрив елементів, отриманих з конструкції

Бетон	Середнє розщеплення міцності на розрив бетону згідно з PN-EN 12390-6 $f_{tm}$ [MPa]	Характеристика розщеплення міцності на розрив бетону згідно з PN-EN 206 $f_{tk}$ [MPa]	Клас розщеплення міцності на розрив бетону згідно з PN-EN 13877-2
P1	2.75	2.25	SC2.0
P2	2.79	2.29	SC2.0
K3	1.77	1.27	< SC1.3

### 3. Придатність для неукріплених шарів

Фізико-механічні властивості отриманих бетонних заповнювачів були визначені за допомогою базових лабораторних випробувань.

Вивчено можливості включення неукріпленої бетонної суміші, отриманої подрібненням, у стабілізовані шари земляного полотна, шари дорожнього насипу та шари основи. Результати випробувань співвідносились із внутрішніми вимогами WT-4 [17] та порівнювались у таблиці 4.

Таблиця 4. Порівняння результатів випробувань переробленого бетонного заповнювача

Характеристика	Стандарт	Од. вим.	Бетон			Вимоги згідно з WT-4		
			P1	P2	K3	Нижній шар основи та стабілізоване земляне полотно	Основа	
Стійкість до фрагментації (10/14)	PN-EN 1097-2:2010	%	44.4	32.2	38.6	LA *)50	LA **)40	
Поглинання води	PN-EN 1097-6:2013 (пікнометричний метод)	%	0.063/4	5.1	8.2	9.6	WA <sub>24</sub> 2	WA <sub>24</sub> 2
			4/8	5.0	6.7	8.4		

8/16			4.5	5.3	7.5		
16/31.5			4.6	5.8	7.7		
Стійкість до заморожування та відтавання	PN-EN 1367-1:2007	%				Перероблені заповнювачі F10	Перероблені заповнювачі F10
4/8	***)		4.56	6.76	6.66		
8/16			4.47	3.90	9.16		
16/31.5			2.55	4.48	11.54		
*) НЕ застосовується до земляного полотна стабілізованого згідно з WT-4							
**) LA для r AG5 та вище, згідно з WT-4							
***) Тест на заморожування та відтавання необхідний лише для заповнювачів із водопоглинанням вище 2%							

На рис. 5 наведено зразок кривої класифікації заповнювачів для подрібненого (у стаціонарній дробарці) бетонного щебеню у порівнянні з рекомендованими кривими сита для суміші 0 / 31,5 для стабілізованих шарів земляного полотна та основи відповідно до WT4. Досвід авторів свідчить, що крива класифікації переробленого заповнювача залежить від типу дробарки та її налаштувань. Останнє повинно базуватися на випробуваннях перевірки кривої класифікації для певного переробленого матеріалу.

Випробування показали, що бетонний заповнювач не відповідає вимогам щодо водопоглинання для шарів основи, нижніх шарів основи та стабілізованого земляного полотна згідно з WT-4 [17]. Однак результати випробувань на заморожування-відтавання вказують на те, що такий заповнювач можна використовувати для всіх шарів без додавання його до природного заповнювача (вимога водопоглинання 2% може бути скасовано за умови, що 10% вимоги до заморожування-відтавання задовольняються для заповнювачів). У той же час очевидно, що стійкість до фрагментації, водопоглинання та стійкість до замерзання та відтавання бетонного заповнювача, отриманого подрібненням елементів закритих конструкцій, гірша, ніж заповнювача, отриманого подрібненням дорожньої плити. Це спостереження чітко корелює з нижніми значеннями міцності на стиск кернів, висвердлених із закритих елементів конструкції до подрібнення (табл. 1). Тому для попередньої оцінки властивостей подрібненого бетонного щебеню рекомендується провести



високим рівнем якості бетонного покриття, що підлягає вторинній переробці, порівняно з бетоном, використаним у роботі [3].

Таблиця 5. Результати випробування *CBR* відповідно до PN-EN 13286-47:2012

	<i>CBR</i> [%]					
	Результати випробування			Вимоги		
	Бетонний щебінь 0/31.5	1:1 природня бетонно кам'яна суміш 0/31.5	Гранітний заповнювач 0/31.5	Стабілізоване земляне полотно відповідно до WT-4	Нижній шар основи відповідно до WT-4	Основа відповідно до WT-4
Партія 1	126	141	186	> 40	> 60	> 80
Партія 2	90	110				

Результати випробувань коефіцієнта фільтрації (таблиця 6) вказують на те, що перероблений бетонний заповнювач характеризується вищою водопроникністю, ніж гранітний заповнювач. Але як для бетонного щебеню, так і для гранітного заповнювача, суміші (при безперервному сортуванням) однозначно не відповідають вимогам фільтрації для дренажних шарів відповідно до WT-4. Авторам вдалося отримати достатню проникність води для дренажного шару відповідно до WT-4, що становить 0,02-0,03 см / с, після відсіювання фракції мулу до 0,063 мм з бетонного щебеню 0 / 31,5.

Таблиця 6. Результати випробувань водопроникності згідно з PKN-CN ISO/TS 17892-11:2009

	Водопроникність [cm/s]					
	Результати випробування			Вимоги		
	Бетонний щебінь 0/31.5	1:1 природня бетонно кам'яна суміш 0/31.5	Гранітний заповнювач 0/31.5	Стабілізоване земляне полотно відповідно до WT-4	Нижній шар основи відповідно до WT-4	Основа відповідно до WT-4
Партія 1	0.00023	0.00015	0.00012			

Партія 2	0.00020	0.00014				
	Водопроникність (після відсіювання фракції до 0.063 mm) [cm/s]			> 0.0093	–	–
Партія 1	0.026	0.022	0.021			
Партія 2	0.030	0.024				

### 3. Придатність для шарів укріплених цементом

В даний час для укріплених цементом шарів застосовується декілька технічних документів. У Польщі настанову WT-5 [19] слід розглядати як основний документ у цій галузі, але польський стандарт PN-S-96012 [20] все ще діє і часто використовується. Останніми відповідними документами є європейські стандарти: PN-EN 14227-1: суміші укріплені цементом [21] та PN-EN 14227-15: Гідравлічно стабілізовані ґрунти [22]. Зокрема, стандарт PN-EN 14227-15: Гідравлічно стабілізовані ґрунти замінили на стандарт PN-EN 14227-10: ґрунт, оброблений цементом [23], на який посилаються Каталоги типових покриттів [24], [25].

Англійська версія стандарту PN-EN 14227-1 2013 року замінила польську версію стандарту 2007 року [26], представивши більш ширший асортимент сумішей, укріплених цементом, тобто від C 0,4 / 0,5 до C 36/48, порівняно з C 1.5 / 2-C 20/25 у польській версії. Тоді як вітчизняна настанова WT-5 посилається на польську версію 2007 року. Відповідно до стандартів PN-EN, оброблений цементом ґрунт відрізняється від стабілізованої цементом суміші на основі вмісту фракції до 0,0075 мм вище ніж 15%.

Таким чином стандарт PN-EN 14227-1 (укріплені цементом ...) та настанова WT-5 застосовуються до пісків, тоді як стандарт PN-EN 14227-15 (гідравлічно стабілізовані ...) застосовується до замулених пісків. Водночас пов'язаний польський стандарт PN-S-96012, не визначає верхньої межі класифікаційної кривої гранулометричного складу та застосовується до більшості відповідних матеріалів.

Можливість використання бетонного щебеню в укріплених цементом сумішах

розглядається нижче на основі результатів випробувань, представлених у Таблиці 2. Результати щодо вимог WT-5 [19], наведені в Таблиці 7.

Таблиця 7. Вимоги, яким повинні відповідати, заповнювачі у стабілізованих цементом шарах

Характеристика	Норма	Од. вимір у	Вимоги відповідно до WT-5	
			Нижній шар основи та стабілізоване земляне полотно	Основа
Опір фрагментації	PN-EN 1097-2:2010	%	LA60	LA50
Водопоглинання	PN-EN 1097-6:2013 (пікнометричний метод)	%	WA24 2	WA24 2
Стійкість до заморожування-відтавання	PN-EN 1367-1:2007 <sup>*)</sup>	%	F10 перероблених заповнювачів	F4 всіх заповнювачів
*) Тест на заморожування та відтавання необхідний лише для заповнювачів із водопоглинанням вище 2%				

Так само, як вимоги до неукріплених сумішей, також вимоги до водопоглинання відповідно до WT-5 [19] не задовільні. Але в цьому випадку результати випробувань на заморожування та відтавання не дозволяють включити бетонний щебінь в шари основи, виготовлені із укріплених цементом сумішей, без перемішування його із природним кам'яним заповнювачем. Стійкість до заморожування-відтавання 5,6%, прийнятна для шарів основи відповідно до WT-5 отримували для суміші гранітного заповнювача та бетонного щебеню у співвідношенні 1: 1. Стійкість до заморожування та відтавання бетонно-природних кам'яних сумішей та можливість використання останньої в шарах основи будуть в подальшому досліджуватися авторами. Нижче розглядаються можливості включення бетонного заповнювача в укріплені цементом суміші для стабілізованого земляного полотна та нижніх

шарів основи.

Було перевірено можливість використання бетонного щебеню, поєднаного на місці з матеріалом сумнівної придатності для стабілізації згідно до PN-S-96012: 1997 – шару основи та обробленого земляного полотна зі стабілізованого цементом ґрунту [20] як додавання / введення до сумішей, укріплених цементом. Метою досліджень було знайти можливі шляхи поліпшення матеріалу сумнівної придатності для стабілізації за допомогою цементу. Можливості використання матеріалів, які самостійно відповідають рекомендаціям стандарту PN-S-96012: 1997, добре відомі. Такі матеріали не потрібно вдосконалювати бетонним заповнювачем. Більше того, це не буде економічно ефективним (додаткова робоча сила та транспорт). Досліджено можливі шляхи поліпшення пісків із вмістом фракції менше 2 мм. Досліджено 135 зразків, що змінюються за вмістом цементу (від 4% до 8%) та вмістом бетонного заповнювача (0-60%) у 15 комбінаціях. Міцність на стиск через 7 і 28 днів та стійкість до замерзання та відтавання випробовували для кожної з комбінацій. Були відібрані зразки матеріалу, що підлягає стабілізації на місці у зв'язку з будівництвом промислових під'їзних шляхів, службових майданчиків та паркувальних майданчиків у межах міста Вроцлав (рис. 6). Результати випробувань, проведених на цьому матеріалі, представлені в таблиці 8. У дослідженнях стабілізації використовували бетонний щебінь, отриманий із збірних залізобетонних плит, попередньо подрібнених на дробильній установці до матеріалу з гранулометричним складом 0 / 31,5. Обрана гранична крива гранулометричного складу задовольняла як (менш жорсткі) вимоги стандарту PN-S-96012: 1997, так і (більш жорсткі) вимоги WT-5 та PN-EN 14227-1.

Випробовували компактність стабілізованих цементом сумішей. Результати наведені в таблиці 9. Зразки були виготовлені в лабораторії з раніше придбаного матеріалу (піску та цементу), який використовувався для стабілізації земляного полотна з перемішуванням на місці. Вміст бетонного щебеню в дослідних партіях коливався від 0% до 60%.

Результати лабораторних випробувань порівнювали з результатами випробувань, проведених на матеріалі, стабілізованому в умовах будівельного

майданчика. Було встановлено, що кількість цементу можна значно зменшити, додавши в суміш бетонний щебінь. При вмісті бетонного щебеню 60% вміст цементу в суміші зменшився наполовину (до 4%, а міцність на стиск через 28 днів була на рівні 3 МПа, що відповідало міцності, отриманій без бетонного щебеню при вмісті цементу в суміші близько 8%.

Таблиця 8. Результати випробувань матеріалу (піску), призначеного для стабілізації цементом відповідно до PN-S-96012: 1997

Характеристика	Норма	Од. виміру	Результати випробування	Рекомендовані значення відповідно до PN-S-96012:1997
Еквівалент піску	BN-64/8931-01	%	51	20 ÷ 50
Вміст фракції < 0.075 мм	PN-88/B-04481	%	10.2	< 15
Вміст фракції > 2 мм	PN-88/B-04481	%	16.7	> 30

Таблиця 9. Компактність стабілізованих цементом сумішей відповідно до PN-88/B-04481 р. 8

Склад суміші		Оптимальний вміст вологи [%]	Максимальна насипна щільність ґрунту [г/см <sup>3</sup> ]
Пісок [%]	Бетонний щебінь [%]		
100	0	12.7	1.911
85	15	12.5	1.906
70	30	11.8	1.902
55	45	11.3	1.896
40	60	11.0	1.893



Рис. 6. Ресайклер кладе шар суміші, укріпленої цементом на місці

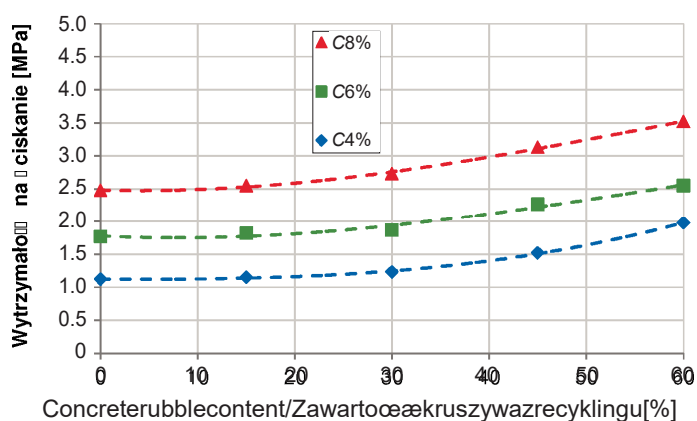


Рис. 7. Вплив вмісту бетонного щебеню в суміші на міцність на стиск через 7 днів залежно від вмісту цементу С

Попередні (7-денні) та 28-денні випробування на міцність на стиск аналізували залежно від вмісту цементу та вмісту бетонного щебеню. Результати випробувань на міцність представлені на рис. 7 і рис. 8. Існує чітке збільшення міцності при вмісті бетонного щебеню 40 відсотків як для ранньої (7-денної) міцності, так і для цільової (28-денної) міцності. Залежно від вмісту цементу та вмісту бетонного щебеню були отримані міцності (С1,5 / 2,0-С3 / 4), які відповідають вимогам WT-5 щодо стабілізованих цементом сумішей, що найчастіше використовуються для обробленого земляного полотна і нижніх шарів основи в дорожньому будівництві.

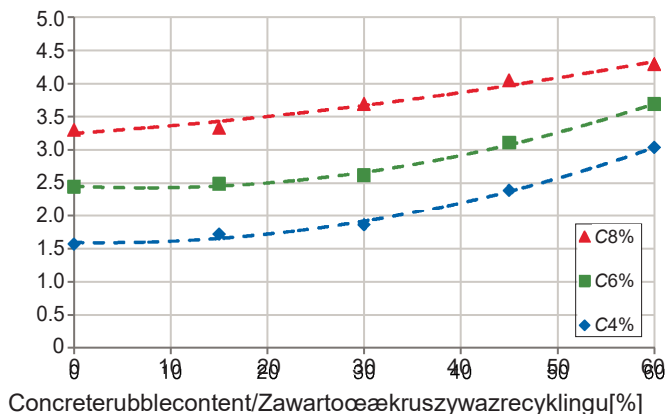


Рис. 8. Вплив вмісту бетонного щебеню в суміші на міцність на стиск після 28 днів в залежності від вмісту цементу  $C$

Також досліджували міцність при розморожуванні - відтаванні стабілізованих цементом сумішей залежно від вмісту цементу та вмісту бетонного щебеню. Результати випробувань на міцність на стиск після 28 днів витримки та 14 циклів заморожування-відтавання представлені на рис. 9. Показники заморожування-відтавання показані на рис. 10.

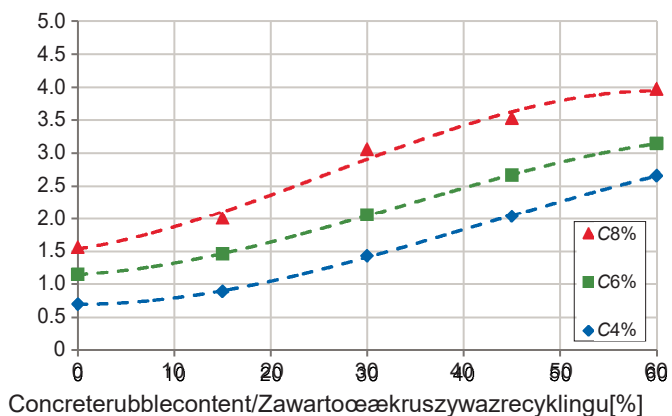


Рис. 9 Вплив вмісту бетонного щебеню в суміші на міцність на стиск після 28 днів витримки та 14 циклів заморожування-відтавання залежно від вмісту цементу  $C$

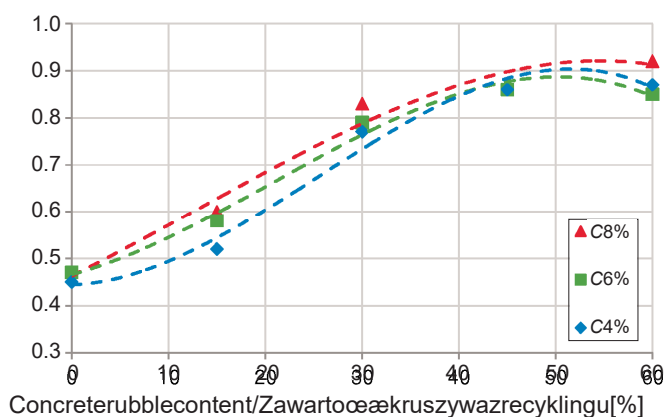


Рис. 10. Вплив вмісту бетонного щебеню в суміші на показник стійкості до

замерзання та відтавання стабілізованих цементом сумішей після 14 циклів заморожування-відтавання залежно від вмісту цементу С

Достатній показник стійкості до замерзання та відтавання 0,6 - 07 був отриманий при вмісті бетонного щебеню близько 30% (незважаючи на сумнівний матеріал, що використовувався в суміші). Тут слід зазначити, що при підвищенні вмісту цементу міцність суміші зростає, але не її індекс стійкості до замерзання та відтавання.

## **5. Висновки**

Попередні фізико-механічні випробування, проведені на заповнювачах, перероблених з цементного бетону, вказують на те, що такі заповнювачі можуть бути використані для неукріпленого шару як у стабілізованому земляному полотні, так і у нижньому шарі основи та шарі основи конструкції дорожнього покриття. Випробування також показують, що бетонний заповнювач можна вводити в нижні шари основи та земляне полотно, стабілізованого сумішами з укріплених цементом. Більше того, значення коефіцієнта фільтрації, необхідні для бетонного заповнювача, були отримані після відсіювання фракції мулу (до 0,063). Було вивчено вплив походження бетонного щебеню на результати випробувань. Випробовували заповнювачі, отримані подрібненням бетонних покриттів (збірні та литі плити на місці) та конструкційні бетони (точкові та смугові фундаменти). Встановлено, що бетонні покриття мають подібні фізико-механічні параметри незалежно від походження бетонного щебеню. Бетону з литих плит на місці було близько 35-40 років, а зі збірних плит - близько 20 років. Параметри (міцність, водопоглинання, показник стійкості до замерзання та відтавання) конструкційних бетонів, що використовуються при будівництві закритих будівель, виявились набагато гіршими. У випадку з бетонами невідомого походження рекомендується провести випробування на стиск на просвердлених з них кернах, щоб передбачити властивості подрібненого бетонного щебеню.

Що стосується досліджень використання бетонного щебеню в стабілізованих цементом бетонах, то результати як раннього (7-денного), так і цільового (28-денного) випробувань на міцність показують, що кількість в'язучого в суміші

можна значно зменшити, додавши бетонний щебінь. Вміст щебеню бетонного щебеню в сумішах, стабілізованих цементом, помітно впливає на їх міцність та стійкість до замерзання та відтавання. Залежно від вмісту бетонного щебеню та кількості цементу в суміші його міцність коливалась від C1,5 / 2,0 до C3 / 4, а його стійкість до замерзання та відтавання була задовільною при вмісті бетонного щебеню близько 30%. Відповідно до WT-5 цього достатньо для стабілізованих шарів земляного полотна для всіх класів дорожнього руху, для нижніх шарів основи для класів дорожнього руху KR1-KR4 та шарів основи лише для KR1-KR2.

Враховуючи досить низьку стійкість до замерзання та відтавання бетонного щебеню, останній міг би бути використаний для шарів основи із укріплених цементом сумішей у поєднанні з природним кам'яним матеріалом, що буде предметом подальших досліджень авторів.

### **Подяка**

Стаття була написана в рамках дослідницьких завдань, що виконуються в рамках проекту під назвою: «Утилізація перероблених матеріалів» у рамках спільного підприємства «Розвиток дорожніх інновацій» (RID), що співфінансується Національним центром досліджень та розробок та Головні управління національних доріг і автомагістралей (GDDKiA). В рамках подальших досліджень з утилізації бетонних покриттів найближчим часом будуть представлені результати досліджень щодо можливого використання бетонного щебеню в укріплених цементом сумішах для шарів основи та аналіз можливих шляхів відновлення бетонних покриттів на місці.



BARTŁOMIEJ KRAWCZYK<sup>1)</sup>  
 ANTONI SZYDŁO<sup>2)</sup>  
 PIOTR MACKIEWICZ<sup>3)</sup>  
 DARIUSZ DOBRUCKI<sup>4)</sup>

## SUITABILITY OF AGGREGATE RECYCLED FROM CONCRETE PAVEMENTS FOR LAYERS MADE OF UNBOUND AND CEMENT BOUND MIXTURES

### PRZYDATNOŚĆ KRUSZYW Z RECYKLINGU NAWIERZCHNI BETONOWYCH DO WARSTW Z MIESZANEK NIEZWIĄZANYCH I ZWIĄZANYCH CEMENTEM

**STRESZCZENIE.** W artykule opisano badania nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych w kruszarkach do ich powtórnego wbudowania w warstwy nawierzchni drogowych. Z ekonomicznego i technicznego punktu widzenia przekruszone odpady betonowe mogą stanowić alternatywne źródła kruszyw, zastępując kruszywa naturalne. Przeprowadzono badania przekruszonego destruktu betonowego w odniesieniu do obowiązujących wymagań stawianych kruszywom do wykorzystania w warstwach z mieszanek niezwiązanych i związanych cementem. Wykazano przydatność destruktu betonowego do ponownego wbudowania w warstwy nawierzchni drogowych i wskazano na ograniczenia w stosowaniu tego typu materiałów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** destruktu betonowy, recykling, warstwy niezwiązane, warstwy związane cementem.

**ABSTRACT.** The paper presents research on the possibility of utilizing materials recycled from concrete pavements through crushing them in crushers and re-incorporating into pavement courses. From the economic and technical points of view crushed concrete waste can be an alternative source of aggregates, replacing natural aggregates. Crushed concrete was tested with regard to the current requirements which aggregates applied in layers made of unbound and cement bound mixtures must meet. Concrete rubble is shown to be suitable a material for re-incorporation into pavement road surface courses and limitations on the use of such materials are indicated.

**KEYWORDS:** cement stabilized layers, concrete rubble, recycling, unbound layers.

DOI: 10.7409/rabdim.018.003

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; b.krawczyk@pwr.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; antoni.szydlo@pwr.edu.pl

<sup>3)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

<sup>4)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; dariusz.dobrucki@pwr.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Rozwój gospodarczy i nowe technologie powodują ciągle wzrost zastosowania betonu cementowego w konstrukcjach kubaturowych, jak i budowach liniowych. Trwałość materiałów betonowych jest duża, jednak ograniczona. W związku z kończącymi się okresami żywotności konstrukcji betonowych powstaje pytanie co zrobić z wyeksploatowanymi materiałami. Zagadnienie powtórnego wykorzystania materiałów odpadowych (recyklingu) jest tematem coraz częściej spotykanym w technice budowlanej. Dzieje się tak również z betonami cementowymi. Na świecie obserwowany jest systematyczny wzrost recyklingu materiałów betonowych. Szacuje się, że światowy przemysł betonowy zużywa około 10 miliardów ton piasku i naturalnego kruszywa rocznie oraz 11 miliardów ton odpadów pochodzących z konstrukcji, z czego 50 - 70% to odpady betonowe [1]. Jednym z krajów o wysokim stopniu odzysku betonowych materiałów odpadowych są Stany Zjednoczone. Powtórne wykorzystanie materiałów odpadowych w znaczący sposób przyczynia się do ograniczenia zużycia surowców naturalnych oraz ograniczenia emisji szkodliwych gazów cieplarnianych. Uzyskane w ten sposób korzyści ekonomiczne są nie do przecenienia. Istnieje wiele różnych możliwości zastosowania betonu z recyklingu. Jedną z nich jest zastosowanie tych materiałów jako kruszyw w warstwach nawierzchni drogowych. Szacuje się, że dużą część (ponad 75%) betonów recyklowanych stanowią materiały i kruszywa betonowe stosowane w drogownictwie [1]. Aby możliwe było właściwe zastosowanie kruszyw z recyklingu w warunkach polskich, należy wprowadzić odpowiednie procedury kontroli i wykonania takich warstw konstrukcji nawierzchni oraz podłoży. Obecnie na świecie prowadzone są intensywne badania nad właściwościami fizyko-mechanicznymi recyklowanego kruszywa betonowego. Dotychczas nie dają one jednak jednoznacznej odpowiedzi, co do możliwości zastąpienia kruszywa naturalnego NA (ang. natural aggregate) przez destruktu betonowy. Uważa się, że recyklowane kruszywa betonowe RCA (ang. *recycled concrete aggregates*) szczególnie przydatne są w niższych warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej (podbudowy pomocnicze, podłoże ulepszone). Przeprowadzone we Włoszech badania na obiektach lotniskowych wykazały możliwość wykorzystania destruktu betonowego do warstw stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi [2]. Na Uniwersytecie Kingston (Londyn) przeprowadzone zostały badania [3] mające ocenić możliwości użycia kruszywa RCA w mieszankach niezwiązanych warstw podbudowy. Wyniki tych badań pokazały, że użycie recyklowanych kruszyw betonowych zwiększyło optymalną wilgotność i zmniejszyło maksymalną gęstość objętościową szkieletu mineralnego

## 1. INTRODUCTION

The economic development and new technologies result in the increased use of cement concrete in enclosed structures as well as in right-of-way constructions. The durability of concrete materials is high, but limited. As concrete constructions approach the end of their service lifetime, the question arises what to do with the end-of-life materials. The subject of the recycling of spent materials increasingly often is raised in construction engineering. This applies also to cement concretes. The recycling of concrete materials consistently increases in the world. It is estimated that the world concrete industry uses about 10 billion tons of construction waste, 50-70% of which is a concrete waste [1]. The United States are one of the countries where waste concrete materials are reclaimed to a high degree. The reuse of waste materials significantly contributes to a reduction in the consumption of natural resources and to the abatement of harmful greenhouse gas emissions. The economic benefits derived from this cannot be overestimated. There are many different potential uses of recycled concrete. One of them is to use this material as aggregate in road pavement courses. It is estimated that a large part (over 75%) of the recycled concretes are concrete materials and aggregates used in road construction [1]. In order to ensure the proper use of recycled aggregates in the Polish conditions relevant construction and control procedures for such pavement courses and sub-grades should be introduced. Currently in the world intensive research into the physic-mechanical properties of recycled concrete aggregate is being conducted. But so far it has not provided a definite answer whether natural aggregate (NA) can be replaced with concrete rubble. It is thought that recycled concrete aggregates (RCA) are particularly suitable for the lower road pavement courses (sub-bases and stabilized sub-grades). Tests carried out at airports in Italy showed that concrete rubble could be used in hydraulic binder stabilized layers [2]. At the London Kingston University the research [3] was carried out to assess the possibilities of using RCA in unbound base course mixtures. The results showed that thanks to the use of recycled concrete aggregates the optimum moisture content increased while the maximum bulk density of the stone skeleton of the base course materials decreased in comparison with natural aggregates. The CBR values of the base courses made of concrete aggregate were found to be lower than for the base made of natural crushed stone aggregate. In Poland comprehensive studies of the physic-mechanical properties of high-strength (40-70 MPa) recycled concrete aggregates were carried out and their potential reuse in concrete

materiałów warstwy podbudowy, w porównaniu z kruszywami naturalnymi. Wartości CBR podbudów wykonanych z kruszywa betonowego okazały się niższe niż w przypadku podbudowy wykonanej z naturalnego kruszywa łamanego. W Polsce przeprowadzone zostały rozległe badania właściwości fizyko-mechanicznych kruszyw z recyklingu betonów o dużej wytrzymałości (40-70 MPa), wraz z analizą możliwości ich ponownego wykorzystania w mieszankach betonowych [4]. Przeprowadzone zostały również badania wytrzymałościowe mieszanek kruszyw z recyklingu stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi, w których ustalono zależności między wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu w zakresie 5-20 MPa [5]. Wiele publikacji, jak choćby [6], [7] i [8], wskazuje na możliwość wykorzystania destruktu betonowego przy produkcji nowych mieszanek betonowych. Opracowane zostały modele, pozwalające bardzo skutecznie przewidzieć moduły sprężystości betonów na bazie kruszyw z recyklingu [9]. Inne prowadzone na świecie badania wskazują również na możliwość wykorzystania destruktu betonowego do wytworzenia mieszanek mineralno-asfaltowych na zimno [10] oraz betonów termoizolacyjnych [11], prefabrykowanych płyt ściennych [12] i betonu konstrukcyjnego [13], wykorzystywanego w budownictwie kubaturowym.

W artykule przeprowadzono badania materiałów pochodzących z przekruszenia wyeksploatowanych warstw nawierzchni betonowych w kruszarkach, pod kątem przydatności do wykorzystania w warstwach niezwiązanych oraz mieszanek związanych cementem do warstw podłoża ulepszanego i podbudowy pomocniczej. Analiza możliwości wykorzystania destruktu betonowego do wytworzenia mieszanek do warstw podbudowy zasadniczej oraz metody rehabilitacji nawierzchni betonowych in situ są przedmiotem aktualnej pracy badawczej autorów i przedstawione zostaną w następnych publikacjach dotyczących recyklingu nawierzchni betonowych.

## 2. RECYKLOWANE KRUSZYWO BETONOWE

Destrukt betonowy do badań pozyskano w trakcie rozbiórek istniejących nawierzchni betonowych dróg lokalnych i zakładowych oraz placów na terenie Wrocławia, w związku z przebudową istniejących układów komunikacyjnych. Przybliżony wiek rozbieranych nawierzchni określono na 35-40 lat; w odniesieniu do płyt prefabrykowanych - około 20 lat. Nawierzchnie były narażone na oddziaływanie obciążenia ruchem pojazdów, czynników środowiskowych i utrzymaniowych podczas normalnej eksploatacji.

mixtures was analysed [4]. Also recycled aggregate mixtures stabilized with hydraulic binders were subjected to tests and the compressive strength-flexural strength dependences in a range of 5-20 MPa were determined [5]. Many publications, e.g. [6], [7], and [8] indicate that concrete rubble could be used in the production of new concrete mixtures. Models which highly effectively predict the elastic moduli of concretes based on recycled aggregates have been developed [9]. Other investigations conducted in the world show that concrete rubble could be used to produce cold asphalt-aggregate mixtures [10], insulating concretes [11], tilt-up concrete walls [12], and structural concrete [13] used in the construction of enclosed buildings.

As part of the present research materials obtained by crushing spent concrete pavement layers in crushers were tested to determine whether they could be used in unbound layers and in cement bound mixtures for stabilized sub-grade and sub-base courses. The potential uses of concrete rubble in the production of mixtures for road base courses and the methods of rehabilitating in situ concrete pavements are the subject of the research currently conducted by the authors and it will be presented in their next publications devoted to the recycling of concrete pavements.

## 2. RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

Concrete rubble for the tests was acquired from the removal of the existing concrete pavements of local roads, industrial driveways and yards within the Wrocław city area, connected with the alteration of the existing traffic circulation systems. The age of the removed surfaces was estimated at 35-40 years and at about 20 years for precast concrete slabs. The surfaces had been exposed to the action of traffic loading and environmental and maintenance factors in the course of their normal service.

The slabs were pre-crushed with the use of a demolition hammer attached to a crawler excavator (Fig. 1), and then crushed in a crusher on the site (Fig. 2). Particle size fractions close to typical 0/31.5, and 0/63 mixes, depending on the crusher settings, were obtained (Fig. 3).

Before crushing, concrete cores had been drilled from the slabs to evaluate the compressive strength (grade) of the concrete. For comparative analyses also cores had been taken from non-road structural members (strip and spot footings) with a much lower strength. Fig. 4 shows exemplary concrete cores drilled from the slabs. In the literature on the subject one can find attempts at evaluating the

Płyty wstępnie rozkruszono przy użyciu młota wyburzeniowego zamocowanego do koparki (Rys. 1), a następnie przekruszono w kruszarce na terenie budowy, uzyskując frakcje zbliżone do typowych mieszanek 0/31,5 i 0/63, w zależności od ustawień kruszarki (Rys. 2 i 3).

Przed kruszeniem wykonano w płytach odwierty i pozyskano rdzenie służące do oceny wytrzymałości na ściskanie (klasy betonu). Dla badań porównawczych pobrano również rdzenie i przekruszono niedrogowe elementy konstrukcyjne (ławy i stopy fundamentowe) o zdecydowanie niższej wytrzymałości. Przykładowy widok rdzeni betonowych z odwiertów przedstawia Rys. 4. Studia literaturowe podają próby oceny właściwości kruszyw z recyklingu na podstawie badań nieniszczących betonu przed rozkruszeniem (np. metodą młotka Schmidta) [14], stwierdzono jednak że wyniki takich badań nie są do tego celu wystarczające, a w przypadku betonu z kruszywem o nieznanym pochodzeniu, mogą być istotnie mylące.



Fig. 2. Crusher  
Rys. 2. Widok kruszarki



Fig. 4. Concrete cores bored out from slabs  
Rys. 4. Widok rdzeni betonowych odwierconych z płyt

Na próbkach walcowych z pobranych rdzeni określono parametry wytrzymałościowe oraz nasiąkliwość i gęstość objętościową betonów z płyt drogowych (P1, P2), w porównaniu z betonem konstrukcyjnym ze stóp i ław fundamentowych budynku (K3). Wyniki badań zestawiono w Tabl. 1. Przedstawione wyniki badań cech fizyko-mechanicznych dla elementów różnego pochodzenia (P1 - płyty prefabrykowane,

properties of recycled aggregates through non-destructive tests (e.g. using the Schmidt hammer) of the concrete prior to crushing [14], but it was found that the results of such tests were not sufficient for the purpose, and they could be misleading in the case of concrete of unknown origin.



Fig. 1. Pre-crushing of a concrete pavement with the use of a demolition hammer  
Rys. 1. Wstępne kruszenie nawierzchni betonowej przy użyciu młota wyburzeniowego

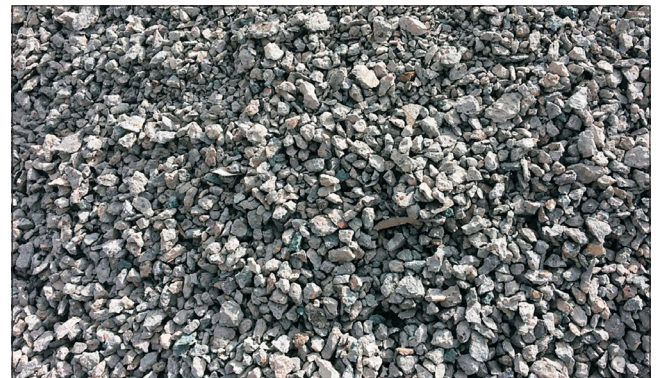


Fig. 3. Recycled concrete aggregate obtained by crushing slabs  
Rys. 3. Recyklowane kruszywo betonowe uzyskane po przekruszeniu płyt

Cylindrical samples were taken from the cores to determine the strength, water absorption and bulk density of the paving slab concretes (P1, P2) in comparison with the structural concrete from the building strip and spot footings. The test results are shown in Table 1. The physico-mechanical characteristics of the members of different origin (P1 - precast slabs, P2 - slabs cast in-situ, K3 - concrete from foundation members) were determined using 9 specimens for each member type.

The strength of cores was evaluated in accordance with PN-EN 13791 [15] and PN-EN 13877-2 [16], as for 10 × 10 cm cores drilled from members derived from a structure. The results are presented in Table 2 and Table 3.

P2 - płyty wylewane na mokro, K3 - beton z elementów fundamentowych) pochodzą z 9 próbek dla każdego typu elementu.

Oceny wytrzymałości odwiertów dokonano zgodnie z normami PN-EN 13791 [15] oraz PN-EN 13877-2 [16], podobnie jak dla rdzeni 10 × 10 cm pochodzących z konstrukcji. Wyniki przedstawiono w Tabl. 2 i 3.

Table 1. Comparison of test results for samples taken from drilled cores

Tablica 1. Zestawienie wyników badań próbek z odwiertów

Tested characteristic Badana cecha	Standard Norma	Unit Jednostka	Concrete / Beton		
			P1	P2	K3
Water absorption Nasiąkliwość	PN-88/B-06250	%	4.4	4.8	7.4
Bulk density (hydrostatic method) Gęstość objętościowa (metoda hydrostatyczna)	PN-EN 12390-7:2011	g/cm <sup>3</sup>	2.244	2.275	2.153
Mean compressive strength Średnia wytrzymałość na ściskanie	PN-EN 12504-1:2011	MPa	40	53	28.9
Mean split tensile strength Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	PN-EN 12390-6:2011	MPa	2.75	2.79	1.77

Table 2. Evaluation of compressive strength of members derived from structures

Tablica 2. Ocena wytrzymałości na ściskanie elementów pochodzących z konstrukcji

Concrete Beton	Mean compressive strength of concrete acc. to PN-EN 12504-1 Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie wg PN-EN 12504-1 $f_{cm}$ [MPa]	Characteristic compressive strength of concrete in a structure acc. to PN-EN 13791 Charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji wg PN-EN 13791 $f_{ck}$ [MPa]	Compressive strength class of concrete acc. to PN-EN 206 Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie wg PN-EN 206	Compressive strength class of concrete acc. to PN-EN 13877-2 Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie wg PN-EN 13877-2
P1	40	34	C 30/37	CC30
P2	53	42	C 35/45	CC40
K3	29	23	C 20/25	CC20

Table 3. Evaluation of split tensile strength of members derived from a structure

Tablica 3. Ocena wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu elementów pochodzących z konstrukcji

Concrete Beton	Mean split tensile strength of concrete acc. to PN-EN 12390-6 Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 12390-6 $f_{tm}$ [MPa]	Characteristic split tensile strength of concrete acc. to PN-EN 206 Charakterystyczna wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 206 $f_{tk}$ [MPa]	Split tensile strength class of concrete acc. to PN-EN 13877-2 Klasa wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 13877-2
P1	2.75	2.25	SC2.0
P2	2.79	2.29	SC2.0
K3	1.77	1.27	< SC1.3

### 3. PRZYDATNOŚĆ DO WARSTW NIEZWIĄZANYCH

Dla pozyskanego kruszywa betonowego określono właściwości fizyko-mechaniczne w podstawowych badaniach

### 3. SUITABILITY FOR UNBOUND LAYERS

The physico-mechanical properties of the acquired concrete aggregates were determined through basic laboratory tests. The possibilities of incorporating the unbound

laboratoryjnych. Przeanalizowano możliwości wbudowania uzyskanej po kruszeniu niezwiązanej mieszanki betonowej w warstwy podłoża ulepszanego i warstwy nasypu drogowego oraz w warstwy podbudów. Wyniki badań odniesiono do wymagań krajowych WT-4 [17] i zestawiono w Tabl. 4.

concrete mixture obtained by crushing into stabilized sub-grade courses, road embankment layers, and base courses were examined. The test results were correlated with domestic requirements WT-4 [17] and compared in Table 4.

Table 4. Comparison of results of tests on recycled concrete aggregate  
Tablica 4. Zestawienie wyników badań kruszywa betonowego z recyklingu

Tested characteristic Badana cecha	Standard Norma	Unit Jednostka	Concrete / Beton			Requirements acc. to WT-4 Wymagania wg WT-4	
			P1	P2	K3	Sub-base and stabilized sub-grade Podbudowa pomocnicza i podłoże	Base Podbudowa zasadnicza
Resistance to fragmentation Odporność na rozdrabnianie (10/14)	PN-EN 1097-2:2010	%	44.4	32.2	38.6	LA <sub>50</sub> <sup>*)</sup>	LA <sub>40</sub> <sup>**)</sup>
Water absorbability Nasiąkliwość  0.063/4 4/8 8/16 16/31.5	PN-EN 1097-6:2013 (pycnometric method) (met. piknometryczna)	%	5.1 5.0 4.5 4.6	8.2 6.7 5.3 5.8	9.6 8.4 7.5 7.7	WA <sub>24</sub> 2	WA <sub>24</sub> 2
Freeze-thaw resistance Mrozoodporność  4/8 8/16 16/31.5	PN-EN 1367-1:2007   ***)	%	4.56 4.47 2.55	6.76 3.90 4.48	6.66 9.16 11.54	Recycled aggregates Kruszywa z recyklingu F10	Recycled aggregates Kruszywa z recyklingu F10
<sup>*)</sup> Not applicable to a sub-grade stabilized acc. to WT-4 / Nie dotyczy podłoża ulepszanego wg WT-4 <sup>**) LA<sub>35</sub> for AG5 and higher, acc. to WT-4 / LA<sub>35</sub> dla KR5 i powyżej wg WT-4  <sup>***)</sup> The freeze-thaw test is required only for aggregates with water absorbability above 2% / Badanie mrozoodporności jest wymagane tylko dla kruszyw o nasiąkliwości powyżej 2% </sup>							

Przykładową krzywą uziarnienia destruktu po przekruszeniu w kruszarce stacjonarnej przedstawiono na Rys. 5, w odniesieniu do pól dobrego uziarnienia mieszanki 0/31,5 do warstwy podłoża ulepszanego oraz podbudowy zasadniczej wg WT-4. Doświadczenia autorów wskazują, że krzywa uziarnienia betonu recyklowanego zależy od typu oraz ustawień kruszarki, które powinny być dobierane na podstawie kontrolnych badań krzywej uziarnienia, dla konkretnego materiału poddanego recyklingowi.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że pozyskane kruszywo betonowe nie spełnia wymagań nasiąkliwości stawianym podbudowom zasadniczym, pomocniczym i podłożu ulepszonemu wg WT-4 [17]. Wyniki badań mrozoodporności wskazują jednak na możliwość wykorzystania takiego kruszywa do wszystkich warstw, bez doziarniania kruszywem kamiennym (rezygnacja z wymagania nasiąkliwości 2% pod warunkiem spełnienia wymagania mrozoodporności dla kruszyw z recyklingu na poziomie 10%). Jednocześnie

Fig. 5 shows an exemplary aggregate grading curve for the crushed (in a stationary crusher) concrete rubble in comparison with the recommended sieve curves for the 0/31.5 mix for the stabilized sub-grade course and the base acc. to WT4. The authors' experience suggests that the recycled aggregate grading curve depends on the crusher type and settings. The latter should be based on grading curve verification tests for a particular recycled material.

The tests showed that the concrete aggregate did not meet the water absorption requirements for base courses, sub-base courses and the stabilized sub-grade acc. to WT-4 [17]. However, the freeze-thaw test results indicate that such aggregate could be used for all the courses without admixing it with natural aggregate (the 2% water absorption requirement could be waived provided the freeze-thaw requirement of 10% is satisfied by the aggregates). At the same time it is clear that the resistance to fragmentation, water absorption and freeze-thaw durability of the concrete

widać wyraźnie, że kruszywo betonowe pozyskane z kruszenia elementów kubaturowych ma gorszą odporność na rozdrabnianie oraz nasiąkliwość i mrozoodporność, w stosunku do kruszywa pozyskanego z kruszenia płyt drogowych. Zależność ta wyraźnie koreluje z niższą wytrzymałością na ściskanie odwiertów z elementów kubaturowych przed kruszeniem (Tabl. 1). Zaleca się w związku z tym przeprowadzać badania wytrzymałości na ściskanie odwiertów do wstępnej oceny właściwości destruktu betonowego po przekruszeniu, zwłaszcza w przypadku betonów o nieznanym pochodzeniu. Na podstawie doświadczeń autorów można stwierdzić, że graniczną klasą wytrzymałości na ściskanie odwiertów z nawierzchni betonowych jest CC30, podobnie jak w [18], przy jednoczesnej wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu SC2,0, inaczej niż w PN-EN 13877-2 (CC20 i SC1,7).

aggregate obtained by crushing members of enclosed structures are worse than those of the aggregate obtained by crushing paving slabs. This observation clearly correlates with the lower compressive strength of the cores drilled from the enclosed structure members prior to crushing (Tabl. 1). Therefore in order to preliminarily evaluate the properties of crushed concrete rubble it is recommended to carry out compressive strength tests on drilled cores, especially in the case of concretes of unknown origin. The authors' experience suggests that the limit compressive strength class of cores drilled from concrete pavements is class CC30, as in [18], at split tensile strength SC2.0, as opposed to PN-EN 13877-2 (CC20 and SC1.7).

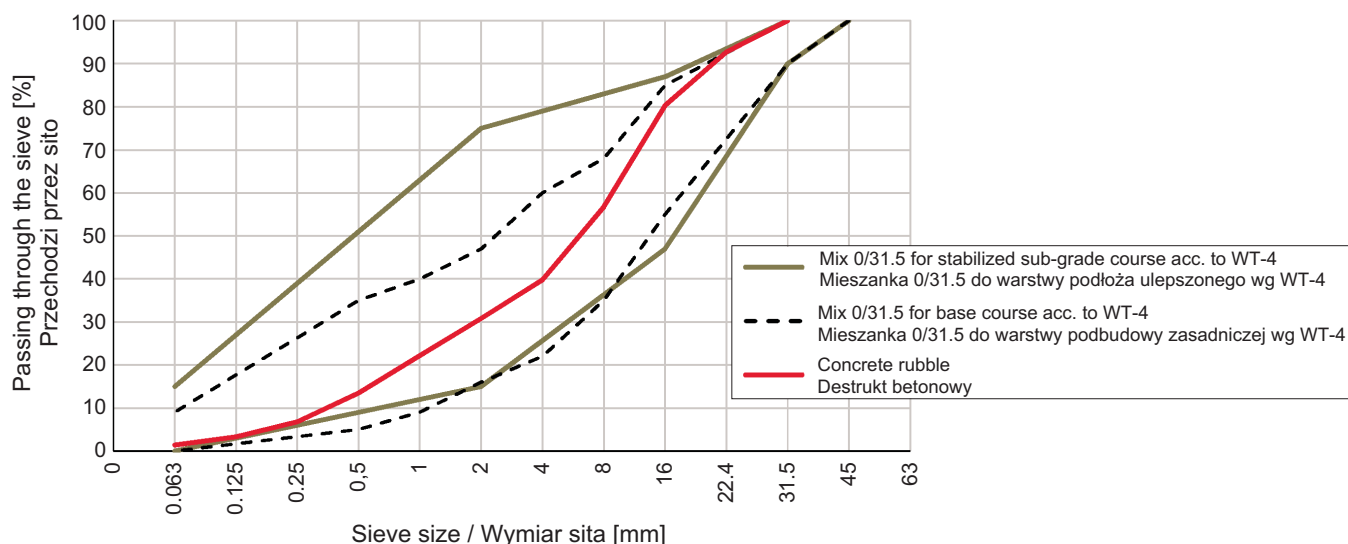


Fig. 5. Exemplary crushed concrete rubble grading curve in comparison with WT-4 requirements

Rys. 5. Przykładowa krzywa uziarnienia destruktu betonowego po przekruszeniu w odniesieniu do wymagań WT-4

Dodatkowo przeprowadzono badania wskaźnika nośności CBR oraz współczynnika filtracji na dwóch partiach destruktu betonowego pochodzącego z przekruszenia płyt wylewanych na mokro (P2). Wyniki tych badań, w odniesieniu do WT-4 zestawiono w Tabl. 5 i Tabl. 6. Porównano nośność i współczynnik filtracji destruktu betonowego z wynikami badań kruszywa granitowego 0/31,5 oraz mieszanki betono-kamiennej 1:1, także o uziarnieniu 0/31,5.

Wyniki badań nośności potwierdzają badania angielskie [3]. Istotnie wyższy wskaźnik nośności CBR uzyskują mieszanki z granitowego kruszywa łamanego, w stosunku do kruszywa betonowego. Widoczna jest różnica wyników uzyskanych na obu partiach destruktu. Taka niejednorodność jest charakterystyczna dla materiałów pochodzących z recyklingu, często

In addition, the California Bearing Ratio *CBR* and the filtration coefficient were experimentally determined for two batches of concrete rubble obtained by crushing in-situ cast slabs (P2). The test results, correlated with WT-4, are presented in Table 5 and Table 6. The bearing capacity and the filtration coefficient of the concrete rubble were compared with the experimental results for granite aggregate 0.31.5 and 1:1 concrete-natural stone mix also with grading 0/31.5.

The bearing capacity test results are confirmed by the results of tests carried out in the UK [3]. In comparison with the concrete aggregate, the granite crushed stone aggregate mixes achieved a significantly higher *CBR*. The results differ between the two batches. Such disparities are

o niesprecyzowanym wieku, pochodzeniu i różnym stopniu wyeksploatowania. Jest to problem często poruszany w literaturze światowej. W obu jednak przypadkach wymagania nośności stawiane mieszankom wg WT-4 zostały spełnione z nadadkiem. Należy zauważyć, że wysoki wskaźnik nośności destruktu wynika z wysokiej klasy betonu drogowego poddanego recyklingowi, w porównaniu do betonu zastosowanego w [3].

characteristic of recycled materials, often of unknown age and deteriorated to different degrees. This problem is often raised in the world literature. However, in both cases the bearing capacity requirements to be met by aggregate mixes acc. to WT-4 were more than satisfied. It should be noted that the high *CBR* of the concrete rubble is owing to the high grade of the pavement quality concrete subjected to recycling, in comparison with the concrete used in [3].

Table 5. *CBR* test results acc. to PN-EN 13286-47:2012Tablica 5. Wyniki badań wskaźnika nośności *CBR* wg PN-EN 13286-47:2012

	<i>CBR</i> [%]					
	Test results / Wyniki badań			Requirements / Wymagania		
	Concrete rubble Destrukt betonowy 0/31.5	1:1 concrete-natural stone mix Mieszanka betonowo-kamienna 1:1 0/31.5	Granite aggregate Kruszywo granitowe 0/31.5	Stabilized sub-grade acc. to WT-4 Podłoże ulepszone wg WT-4	Sub-base acc. to WT-4 Podbudowa pomocnicza wg WT-4	Base acc. to WT-4 Podbudowa zasadnicza wg WT-4
Batch 1 Partia 1	126	141	186	> 40	> 60	> 80
Batch 2 Partia 2	90	110				

Wyniki badań współczynnika filtracji (Tabl. 6) wskazują na większą zdolność do przepuszczania wody recyklowanego kruszywa betonowego w stosunku do kruszywa granitowego. Zarówno jednak w przypadku destruktu betonowego, jak i kruszywa granitowego, mieszanki te (o ciągłym uziarnieniu) zdecydowanie nie spełniają wymagań filtracji stawianym warstwom odsączającym wg WT-4. Autorzy uzyskali wystarczającą dla warstwy odsączającej wg WT-4 wodoprzepuszczalność na poziomie 0,02 - 0,03 cm/s po odsianiu z destruktu betonowego 0/31,5 frakcji pylastej do 0,063 mm.

The filtration coefficient test results (Table 6) indicate that the recycled concrete aggregate is characterized by higher water permeability than the granite aggregate. But in the case of both the concrete rubble and the granite aggregate, the mixes (with continuous grading) definitely do not meet the filtration requirements for drainage courses acc. to WT-4. The authors managed to obtain sufficient permeability to water for the drainage layer acc. to WT-4, amounting to 0.02-0.03 cm/s, after screening out the silt fraction up to 0.063 mm from the 0/31.5 concrete rubble.

Table 6. Results of water permeability tests acc. to PKN-CN ISO/TS 17892-11:2009

Tablica 6. Wyniki badań wodoprzepuszczalności wg PKN-CN ISO/TS 17892-11:2009

	Permeability to water / Wodoprzepuszczalność [cm/s]					
	Test results / Wyniki badań			Requirements / Wymagania		
	Concrete rubble Destrukt betonowy 0/31.5	1:1 concrete-natural stone mix Mieszanka betonowo-kamienna 1:1 0/31.5	Granite aggregate Kruszywo granitowe 0/31.5	Stabilized sub-grade acc. to WT-4 Podłoże ulepszone wg WT-4	Sub-base acc. to WT-4 Podbudowa pomocnicza wg WT-4	Base acc. to WT-4 Podbudowa zasadnicza wg WT-4
Batch 1 Partia 1	0.00023	0.00015	0.00012	> 0.0093	-	-
Batch 2 Partia 2	0.00020	0.00014				
	Permeability to water (after screening out fraction down to 0.063 mm) Wodoprzepuszczalność (po odsianiu frakcji do 0.063 mm) [cm/s]					
Batch 1 Partia 1	0.026	0.022	0.021			
Batch 2 Partia 2	0.030	0.024				

## 4. PRZYDATNOŚĆ DO WARSTW ZWIĄZANYCH CEMENTEM

Obecnie do warstw związanych cementem odnosi się kilka dokumentów technicznych. W kraju za podstawowe uznać należy wytyczne WT-5 [19], choć wciąż obowiązująca i często używana jest również polska norma PN-S-96012 [20]. Najnowszymi dokumentami odniesienia są normy europejskie PN-EN 14227-1: Mieszanki związane cementem [21] oraz PN-EN 14227-15: Grunty stabilizowane hydraulicznie [22]. Norma PN-EN 14227-15: Grunty stabilizowane hydraulicznie zastąpiła notabene normę PN-EN 14227-10: Grunty stabilizowane cementem [23], na którą powołują się Katalogi Typowych Nawierzchni [24], [25]. Norma PN-EN 14227-1 z 2013 r. w wersji angielskiej zastąpiła wersję polską [26] z 2007 r., wprowadzając szerszy zakres wytrzymałości mieszanek związanych cementem od C 0,4/0,5 do C 36/48, w porównaniu z zakresem C 1,5/2 - C 20/25 w wersji polskiej. Do wersji polskiej z 2007 r. odwołują się z kolei krajowe wytyczne WT-5. Rozróżnienie między gruntem i mieszanką stabilizowaną cementem wg norm PN-EN dokonuje się na podstawie zawartości frakcji do 0,075 mm > 15%. I tak na przykład do piasków odnosić się będzie norma PN-EN 14227-1 (Mieszanki ...) oraz bazujące na niej wytyczne WT-5, a do piasków pylistych norma PN-EN 14227-15 (Grunty ...). Jednocześnie obowiązująca polska norma PN-S-96012 nie określa górnej granicy krzywej uziarnienia i odnosi się do większości spotykanych materiałów.

Poniżej przeanalizowano możliwość wykorzystania destruktu betonowego do mieszanek związanych cementem. Wyniki badań przedstawione w Tabl. 2 odniesiono do wymagań WT-5 [19], zestawionych w Tabl. 7.

## 4. SUITABILITY FOR CEMENT STABILIZED LAYERS

Currently several technical documents apply to cement stabilized layers. In Poland guidelines WT-5 [19] should be regarded as the fundamental document in this field, but Polish standard PN-S-96012 [20] is still valid and often used. The latest relevant documents are the European standards: PN-EN 14227-1: Cement bound mixtures [21] and PN-EN 14227-15: Hydraulically stabilized soils [22]. Incidentally, standard PN-EN 14227-15: Hydraulically stabilized soils has replaced standard PN-EN 14227-10: Soil treated by cement [23] to which Catalogues of Typical Pavements refer [24], [25]. The English version of standard PN-EN 14227-1 of 2013 has replaced the Polish version of the standard of 2007 [26], introducing a wider range of cement bound mixtures, i.e. from C 0.4/0.5 to C 36/48, as compared with C 1.5/2-C 20/25 in the Polish version. Whereas domestic guidelines WT-5 refer to the Polish version of 2007. According to the PN-EN standards, cement-treated soil is distinguished from a cement stabilized mixture on the basis of the up to 0.0075 mm fraction content higher than 15%. And so standard PN-EN 14227-1 (Cement-bound...) and guidelines WT-5 based on it apply to sands while standard PN-EN 14227-15 (Hydraulically stabilized...) applies to silted sands. At the same time the binding Polish standard PN-S-96012 does not specify the upper limit of the grading curve and applies to most of the relevant materials.

The possibility of using concrete rubble in cement bound mixtures is examined below on the basis of the test results presented in Table 2. The results relating to requirements WT-5 [19] are listed in Table 7.

Table 7. Requirements for aggregates in cement stabilized layers that must be meet  
Tablica 7. Wymagania wobec kruszywa do warstw związanych cementem

Tested characteristics Badana cecha	Standard Norma	Unit Jednostka	Requirements acc. to WT-5 Wymagania wg WT-5	
			Sub-base and stabilized sub-grade Podbudowa pomocnicza i podłoże ulepszone	Base Podbudowa zasadnicza
Resistance to fragmentation Odporność na rozdrabnianie	PN-EN 1097-2:2010	%	LA <sub>60</sub>	LA <sub>50</sub>
Water absorption Nasiąkliwość	PN-EN 1097-6:2013 (pycnometric method) (met. piknometryczna)	%	WA <sub>24</sub> 2	WA <sub>24</sub> 2
Freeze-thaw durability Mrozoodporność	PN-EN 1367-1:2007*)	%	F10 recycled aggregates F10 kruszywa z recyklingu	F4 all aggregates F4 wszystkie kruszywa

\*) The freeze-thaw test is required for only aggregates with water absorption higher than 2% / Badanie mrozoodporności jest wymagane tylko dla kruszyw o nasiąkliwości powyżej 2%.

Analogicznie jak w przypadku wymagań do mieszanek niezwiązanych, nie są spełnione warunki nasiąkliwości według WT-5 [19]. W tym jednak przypadku wyniki badań mrozoodporności nie dopuszczają destruktu betonowego do wbudowania w warstwy podbudowy zasadniczej z mieszanek związanych cementem bez ewentualnego doziarnienia materiałem kamiennym. Autorzy uzyskali akceptowalną, dla podbudowy zasadniczej według WT-5, mrozoodporność na poziomie 5,6%, dla mieszanki kruszywa granitowego i destruktu betonowego w proporcjach 1:1. Szczegółowe badania nad mrozoodpornością mieszanek betonowo-kamiennych oraz możliwością wykorzystania w mieszankach do podbudów zasadniczych będą przedmiotem dalszych badań autorów. W dalszej części artykułu przeanalizowano możliwości wykorzystania kruszywa betonowego w mieszankach związanych cementem do warstw podłoża ulepszanego i podbudowy pomocniczej.

Zweryfikowano możliwości wykorzystania destruktu betonowego jako dodatku/wsadu do mieszanek związanych cementem, w połączeniu z materiałem o wątpliwej przydatności do stabilizacji wg PN-S-96012:1997 - podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem [20], w technologii mieszania na miejscu. Celem badania było sprawdzenie możliwości ulepszenia materiału o wątpliwej przydatności do stabilizacji cementem. Możliwości zastosowania do stabilizacji materiałów samodzielnie spełniających zalecenia PN-S-96012:1997 są znane. Materiały te nie wymagają ulepszenia kruszywem betonowym, a co więcej jest to ekonomicznie nieuzasadnione (dodatkowa robocizna i transport). Przeanalizowano możliwości ulepszenia destruktem betonowym piasków o małej zawartości frakcji  $> 2$  mm. Zbadano 135 próbek, przy różnej zawartości cementu (4-8%) i destruktu (0-60%), w 15 kombinacjach. Dla każdej kombinacji zbadano wytrzymałość na ścislenie po 7 dniach, 28 dniach oraz mrozoodporność. Pobrano materiał podlegający stabilizacji na miejscu, w związku z budową dróg zakładowych, placów manewrowych i miejsc postojowych na terenie Wrocławia (Rys. 6). Wyniki badań pobranego materiału zestawiono w Tabl. 8. Przy wykonaniu badań stabilizacji użyto destruktu pochodzącego z prefabrykowanych drogowych płyt betonowych, przekruszonych wstępnie w kruszarce stacjonarnej na materiał o uziarnieniu 0/31,5. Końcową krzywą uziarnienia dobrano tak, by jednocześnie spełniała (łagodniejsze) wymagania PN-S-96012:1997 oraz (ostrzejsze) wymagania WT-5 i PN-EN 14227-1.

Przeanalizowano zagęszczalność mieszanek stabilizowanych cementem. Wyniki zestawiono w Tabl. 9. Próbkę wykonano w laboratorium z pozyskanego wcześniej materiału (piasek i cement) użytego do stabilizacji podłoża w technologii

Similarly as the requirements for unbound mixtures, also the water absorption requirements acc. to WT-5 [19] are not satisfied. But in this case, the freeze-thaw test results do not allow the concrete rubble to be incorporated into base courses made of cement bound mixtures without admixing it with natural stone aggregate. Freeze-thaw durability of 5.6% acceptable for base courses acc. to WT-5 was obtained for a mix of granite aggregate and concrete rubble at a ratio of 1:1. The freeze-thaw durability of concrete-natural stone mixes and the possibility of using the latter in base courses will be further investigated by the authors. Below, the possibilities of incorporating concrete aggregate in cement bound mixtures for stabilized sub-grade and sub-bases courses are examined.

The possible use of concrete rubble combined in situ with a material of doubtful suitability for stabilization acc. to PN-S-96012:1997 - base course and treated sub-grade made of cement stabilized soil [20], as an addition/input to cement bound mixtures, was verified. The aim of the investigations was to find possible ways of improving a material of doubtful suitability for stabilization with cement. The possibilities of using materials satisfying on their own the recommendations of standard PN-S-96012:1997 are well known. Such materials need not be improved with concrete aggregate. Moreover, this would not be cost effective (additional labour and transport). Possible ways of improving sands with a fraction lower than 2 mm content were explored. 135 samples varying in their cement content (from 4% up to 8%) and concrete aggregate content (0-60%) in 15 combinations were investigated. Compressive strength after 7 and 28 days and freeze-thaw resistance were tested for each of the combinations. Samples of the material subject to on-site stabilization in connection with the construction of industrial driveways, service yards and parking bays within the Wrocław city area (Fig. 6) were taken. The results of the tests carried out on this material are presented in Table 8. Concrete rubble derived from precast concrete slabs pre-crushed in a crushing plant to a material with a grading of 0/31.5 was used in the stabilization studies. The selected ultimate grading curve satisfied both the (less stringent) requirements of standard PN-S-96012:1997 and the (more stringent) requirements of WT-5 and PN-EN 14227-1.

The compactibility of the cement stabilized mixtures was tested. The results are shown in Table 9. The specimens had been made in a laboratory, from the previously acquired material (sand and cement) used for sub-grade stabilization with on-site mixing. The concrete rubble content in the trial batches had ranged from 0% up to 60%.

mieszania na miejscu. Wykonano zaroby próbne o zawartości destruktu betonowego od 0% do 60%. Wyniki badań laboratoryjnych porównano z wynikami badań materiału stabilizowanego w warunkach budowy. Stwierdzono możliwość znacznego ograniczenia ilości cementu w przypadku dodania do mieszanki destruktu betonowego. Przy zawartości destruktu na poziomie 60% udało się ograniczyć o połowę (do 4%) zawartość cementu w mieszance, uzyskując wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach na poziomie 3 MPa, co odpowiada wytrzymałości uzyskanej bez udziału destruktu i zawartości cementu w mieszance około 8%.

The laboratory test results were compared with the results of tests carried out on the material stabilized in construction site conditions. It was found that the amount of cement could be considerably reduced by adding concrete rubble to the mixture. At the concrete rubble content of 60% the cement content in the mixture was reduced by half (down to 4% and the compressive strength after 28 days was at the level of 3 MPa, which corresponded to the strength obtained without the concrete rubble at the mixture cement content of circa 8%.

Table 8. Test results for material (sand) intended for stabilization with cement acc. to PN-S-96012:1997  
Tablica 8. Wyniki badań materiału (piasku) przeznaczonego do stabilizacji cementem wg PN-S-96012:1997

Tested characteristic Badana cecha	Standard Norma	Unit Jednostka	Test result Wynik badania	Recommended values acc. to PN-S-96012:1997 Zalecane wartości wg PN-S-96012:1997
Sand equivalent Wskaźnik piaskowy	BN-64/8931-01	%	51	20 ÷ 50
< 0.075 mm fraction content Zawartość frakcji < 0.075 mm	PN-88/B-04481	%	10.2	< 15
> 2 mm fraction content Zawartość frakcji > 2 mm	PN-88/B-04481	%	16.7	> 30

Table 9. Compactability of cement stabilized mixtures acc. to PN-88/B-04481 p. 8  
Tablica 9. Zagęszczalność mieszanek stabilizowanych cementem wg PN-88/B-04481 p. 8

Mixture composition Skład mieszanki		Optimum moisture content Wilgotność optymalna	Maximum bulk density of soil Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu
Sand Piasek [%]	Concrete rubble Destrukt [%]		
100	0	12.7	1.911
85	15	12.5	1.906
70	30	11.8	1.902
55	45	11.3	1.896
40	60	11.0	1.893

Przeanalizowano wstępne (7-dniowe) oraz 28-dniowe wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, w zależności od zawartości cementu i destruktu betonowego. Wyniki badań wytrzymałości zestawiono na Rys. 7 i 8. Widać wyraźny przyrost wytrzymałości przy zawartości destruktu betonowego na poziomie 40%, zarówno w przypadku wytrzymałości wczesnej (7-dniowej), jak i docelowej (28-dniowej). W zależności od zawartości cementu i destruktu betonowego uzyskano wytrzymałości na poziomie C1,5/2,0 - C3/4, co obejmuje wymagania wg WT-5 dla, najpowszechniej stosowanych w budownictwie drogowym, mieszanek stabilizowanych cementem na warstwy podłoża ulepszanego oraz podbudowy pomocniczej.



Fig. 6. Recycler executing cement bound mixture layer on site  
Rys. 6. Widok recyklera wykonującego warstwę mieszanki związanej cementowej w technologii na miejscu

The preliminary (7-day) and 28-day compressive strength tests were analysed depending on the cement content and the concrete rubble content. The strength test results are presented in Fig. 7 and Fig. 8. There is a clear increase in strength at the concrete rubble content of 40 per cent for both the early (7-day) strength and the target (28-day) strength. Depending on the cement content and the concrete rubble content, strengths of C1.5/2.0-C3/4) were obtained, which meet the WT-5 requirements for the cement stabilized mixtures most commonly used for treated sub-grade and sub-base layers in road constructions.

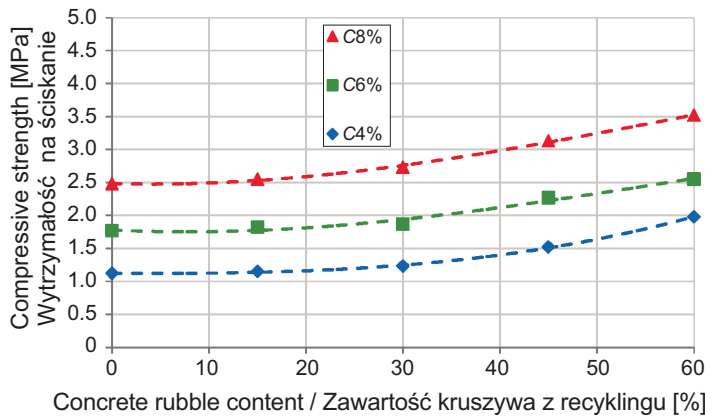


Fig. 7. Effect of concrete rubble content in a mixture on compressive strength after 7 days depending on cement content C

Rys. 7. Wpływ zawartości destruktu betonowego w mieszance na wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach w zależności od zawartości cementu C

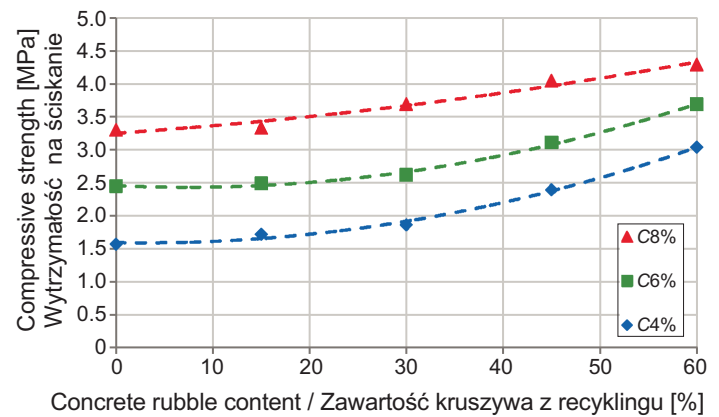


Fig. 8. Effect of concrete rubble content in a mixture on compressive strength after 28 days depending on cement content C

Rys. 8. Wpływ zawartości destruktu betonowego w mieszance na wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach w zależności od zawartości cementu C

Przeanalizowano również mrozoodporność mieszanek stabilizowanych cementem, w zależności od zawartości cementu i destruktu betonowego. Wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania i 14 cyklach zamrażania przedstawiono na Rys. 9. Wartości wskaźnika mrozoodporności przedstawiono na Rys. 10.

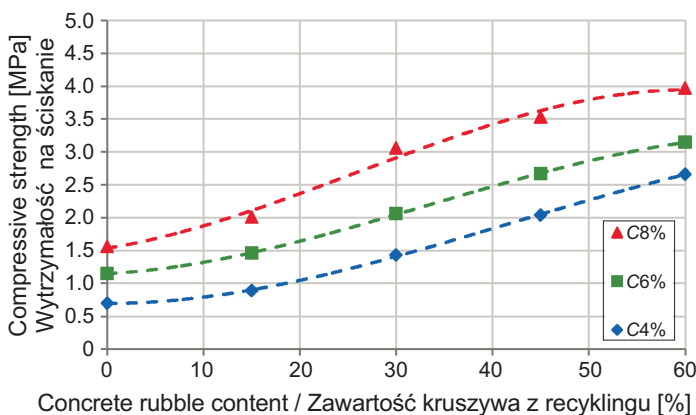


Fig. 9. Effect of concrete rubble content in a mixture on compressive strength after 28 days of ageing and 14 freeze-thaw cycles depending on cement content C

Rys. 9. Wpływ zawartości destruktu betonowego w mieszance na wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania i 14 cyklach zamrażania w zależności od zawartości cementu C

Wystarczającą mrozoodporność, na poziomie wskaźnika mrozoodporności 0,6 - 0,7, uzyskano już przy zawartości destruktu betonowego około 30% (mimo wątpliwego materiału użytego w mieszance). Warto przy tym zauważyć, że zwiększenie zawartości cementu podwyższa wytrzymałość mieszanki, ale nie wpływa na jej mrozoodporność.

Also the freeze-thaw durability of the cement stabilized mixtures was investigated depending on the cement content and the concrete rubble content. The results of compressive strength tests after 28 days of ageing and 14 freeze-thaw cycles are presented in Fig. 9. The freeze-thaw performance is shown in Fig. 10.

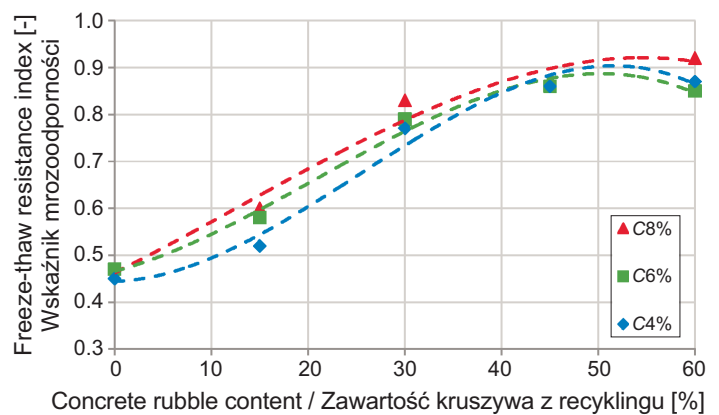


Fig. 10. Effect of concrete rubble content in mixture on freeze-thaw resistance index of cement stabilized mixtures after 14 freeze-thaw cycles depending on cement content C

Rys. 10. Wpływ zawartości destruktu betonowego w mieszance na wartość wskaźnika mrozoodporności mieszanek stabilizowanych cementem po 14 cyklach zamrażania w zależności od zawartości cementu C

A sufficient freeze-thaw resistance index of 0.6 - 0.7 was obtained at the concrete rubble content of about 30% (despite the dubious material used in the mixture). It should be noted here that when the cement content is increased, the strength of the mixture increases, but not its freeze-thaw resistance index.

## 5. WNIOSKI

Wstępne badania fizyko-mechaniczne recyklowanego kruszywa z betonu cementowego wskazują na możliwość wykorzystania go jako warstwy niezwiązanej zarówno w podłożu ulepszonym, jak i w warstwach podbudowy pomocniczej i zasadniczej konstrukcji nawierzchni drogowej. Badania wskazują również na możliwości wykorzystania kruszywa betonowego do wbudowania w warstwy podbudowy pomocniczej i podłoża ulepszanego z mieszanek związanych cementem. Uzyskano także wymagane wartości współczynnika filtracji kruszywa betonowego po odsianiu frakcji pyłowej (do 0,063). Przeanalizowano wpływ pochodzenia destruktu betonowego na uzyskiwane wyniki badań. Przebadano kruszywo uzyskane z rozkruszenia betonów drogowych (płyty prefabrykowane i wylewane in situ) oraz konstrukcyjnych (stopy, ławy fundamentowe). W przypadku betonów drogowych stwierdzono zbliżone parametry fizyko-mechaniczne, niezależnie od pochodzenia destruktu. Betony wylewane miały po około 35-40 lat, płyty prefabrykowane około 20 lat. Stwierdzono jednocześnie zdecydowanie gorsze parametry (wytrzymałość, nasiąkliwość, mrozoodporność) betonów konstrukcyjnych używanych w budownictwie obiektów kubaturowych. W przypadku betonów nieznanego pochodzenia zaleca się badania wytrzymałości na ściskanie odwiertów jako prognozowaną ocenę właściwości destruktu betonowego po przekruszeniu.

W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betonowego do mieszanek stabilizowanych cementem zarówno wczesne (7-dniowe), jak i docelowe (28-dniowe) badania wytrzymałościowe wskazują na możliwość istotnego zmniejszenia ilości spoiwa w mieszance po dodaniu destruktu betonowego. Zawartość destruktu betonowego w mieszankach stabilizowanych cementem ma duży wpływ na wytrzymałość i mrozoodporność mieszanek. W zależności od zawartości destruktu betonowego i ilości cementu w mieszance uzyskano wytrzymałości w zakresie od C1,5/2,0 do C3/4, przy jednoczesnej wystarczającej mrozoodporności, przy zawartości destruktu betonowego w mieszance na poziomie 30%. Są to wymagania wystarczające wg WT-5 dla warstw podłoża ulepszanego wszystkich kategorii ruchu, warstw podbudowy pomocniczej KR1-KR4 oraz warstw podbudowy zasadniczej wyłącznie dla KR1-KR2.

Z uwagi na dość niską mrozoodporność destruktu betonowego wykorzystanie go do podbudów zasadniczych z mieszanek związanych cementem jest możliwe, po ewentualnym doziarnieniu materiałem kamiennym, co będzie przedmiotem dalszych badań autorów.

## 5. CONCLUSIONS

The preliminary physico-mechanical tests carried out on aggregates recycled from cement concrete indicate that such aggregates could be used for an unbound layer in both the stabilized sub-grade and the sub-base and base courses of the pavement structure. The tests also show that concrete aggregate could be incorporated into the courses of the sub-base and the sub-grade stabilized with cement bound mixtures. Moreover, the filtration coefficient values required of concrete aggregate were obtained after screening out the silt fraction (up 0.063). The effect of the origin of concrete rubble on the test results was examined. Aggregates obtained by crushing pavement concretes (precast and cast in-situ slabs) and structural concretes (spot and strip footings) were tested. The pavement concretes were found to have similar physico-mechanical parameters regardless of the origin of the concrete rubble. Concretes of cast in-situ slabs were about 35-40 years old while the precast slabs were about 20 years old. The parameters (strength, water absorption, freeze-thaw resistance index) of the structural concretes used in the construction of enclosed buildings were found to be much worse. In the case of concretes of unknown origin it is recommended to carry out compressive tests on cores drilled from them to predict the properties of the crushed concrete rubble.

As regards the investigations into the utilization of concrete rubble in cement stabilized concretes, the results of both the early (7-day long) and target (28-day long) strength tests indicate that the amount of the binder in the mixture could be significantly reduced by adding concrete rubble. The concrete rubble content in cement stabilized mixtures has a marked effect on their strength and freeze-thaw resistance. Depending on the concrete rubble content and the amount of cement in the mixture, its strength ranged from C1.5/2.0 to C3/4 and its freeze-thaw resistance was satisfactory at the concrete rubble content of circa 30%. According to WT-5 this is sufficient for stabilized sub-grade layers for all traffic classes, for sub-base courses for traffic classes KR1-KR4 and base courses for only KR1-KR2.

Considering the rather low freeze-thaw durability of concrete rubble, the latter could be used for base courses made of cement bound mixtures if admixed with natural stone material, which will be the subject of further research by the authors.

## INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł powstał w związku z realizacją zadań badawczych w projekcie pt. „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID) współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad. W dalszym etapie prac nad recyklingiem nawierzchni betonowych przedstawione zostaną wyniki badań możliwości wykorzystania destruktu betonowego do mieszanek związanych cementem w warstwach podbudowy zasadniczej oraz analiza możliwości rehabilitacji nawierzchni betonowych *in situ*.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Jin R., Chen Q.*: Investigation of concrete recycling in the U.S. construction industry. *Procedia Engineering*, **118**, 2015, 894-901
- [2] *Magnoni M., Toraldo E., Giustozzi F., Crispino M.*: Recycling practices for airport pavement construction: Valorisation of on-site materials. *Construction and Building Materials*, **112**, 2016, 59-68
- [3] *Ayan V., Limbachiya M.C., Omer J.R., Azadani S.M.N.*: Compaction assessment of recycled aggregates for use in unbound sub-base application. *Journal of Civil Engineering and Management*, **20**, 2, 2014, 169-174
- [4] *Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.*: Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, **24**, 2, 2002, 269-279
- [5] *Kraszewski C.*: Strength characteristics of hydraulically bound aggregate mixtures in road construction. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **8**, 3, 2009, 31-54
- [6] *Safiuddin M., Alengaram U.J., Rahman M.M., Salam M.A., Jumaat M.Z.*: Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, **19**, 6, 2013, 796-810
- [7] *Surya M., Kanta Rao W.L., Lakshmy P.*: Recycled aggregate concrete for transportation infrastructure. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **104**, 2013, 1158-1167
- [8] *Kubissa J., Koper M., Koper W., Kubissa W., Koper A.*: Water demand of concrete recycled aggregates. 7<sup>th</sup> Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015). *Procedia Engineering*, **108**, 2015, 63-71
- [9] *Behnooda A., Olek J., Glinicki M.A.*: Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M5' model tree algorithm. *Construction and Building Materials*, **94**, 2015, 137-147

## ACKNOWLEDGEMENT

The paper was written as part of the research tasks performed within the project entitled: “The utilization of recycled materials” under the joint venture: Road Innovations Development (RID) co-funded by the National Centre for Research and Development and the General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA). As part of the further research on the recycling of concrete pavements the results of investigations into the potential utilization of concrete rubble in cement bound mixtures for base courses and an analysis of the possible ways of rehabilitating *in situ* concrete pavements will be soon presented.

- [10] *Zhesheng G., Li H., Zhetai H., Zhang Q.*: Properties of cold mix asphalt mixtures with reclaimed granular aggregate from crushed PCC pavement. *Construction and Building Materials*, **77**, 2015, 404-408
- [11] *Wang W., Zhao L., Liu Y., Li Z.*: Mix design for recycled aggregate thermal insulation concrete with mineral admixtures. *Magazine of Concrete Research*, **66**, 10, 2014, 492-504
- [12] *Banjad Pečur I., Štirmer N., Milovanović B.*: Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 11, 2015, 575-584
- [13] *Ho N.Y., Lee Y.P.K., Lim W.F., Chew K.C., Low G.L., Ting S.K.*: Evaluation of RCA concrete for the construction of Samwoh Eco-Green Building. *Magazine of Concrete Research*, **67**, 12, 2015, 633-644
- [14] *Süleyman Gökçe H., Şimşek O.*: The effects of waste concrete properties on recycled aggregate concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, **65**, 14, 2013, 844-854
- [15] PN-EN 13791 Ocena wytrzymałości na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych
- [16] PN-EN 13877-2 Nawierzchnie betonowe. Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych
- [17] WT 4 Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. GDDKiA, Warszawa 2010
- [18] Ogólne Specyfikacje Techniczne. Rozdział III. Dział 06. Nawierzchnia z betonu cementowego
- [19] WT 5 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. GDDKiA, Warszawa 2010
- [20] PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe - podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem
- [21] PN-EN 14227-1:2013-10 - wersja angielska. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Wymagania - Część 1: Mieszanki związane cementem

- 
- [22] PN-EN 14227-15: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Część 15: Grunty stabilizowane hydraulicznie
- [23] PN-EN 14227-10: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Część 15: Grunty stabilizowane cementem
- [24] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [25] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [26] PN-EN 14227-1:2007 - wersja polska. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Wymagania - Część 1: Mieszanki związane cementem