

dr Sławomir Leciejewski\*  
dr inż. Marek Maj\*\*

# Komputery w badaniach doświadczalnych

## *Computer versus methodology in experimental investigation*

**W** badaniach mamy do czynienia z trzema wzajemnie na siebie oddziałującymi czynnikami: eksperymentatorem, czyli podmiotem stymulującym eksperyment i interpretującym jego wyniki, badanym obiektem, czyli przedmiotem badań oraz z systemem automatyzacji badań [1]. Współcześnie podsystem systemu automatyzacji badań zazwyczaj stanowi komputerowe wspomaganie. Jest to „ogół metod i środków służących usprawnieniu, zgodnie z ogólnymi założeniami eksperymentu (naukowego, technicznego, medycznego itp.), procesów pobierania informacji o badanym obiekcie i jej przetwarzania za pomocą środków techniki komputerowej” [1]. We współczesnych układach eksperymentalnych wspomaganym komputerowo można wyróżnić kilka elementów sprzętowych stanowiących jedną funkcjonalną całość (rysunek). Informacje z obiektu badań pobiera się za pomocą urządzeń pomiarowych (czujników). Następnie ta analogowa informacja ulega wstępnemu przetwarzaniu przy użyciu przetworników analogowo-cyfrowych. Zdigitalizowane dane przesyła się za pomocą interfejsów do komputera. Tam informacja, w wyniku działania różnorodnego oprogramowania, może być przetwarzana, przechowywana i udostępniana (np. w postaci wizualizacji). Komputer wraz ze stosownym oprogramowaniem może sterować przebiegiem eksperymentu (przez interfejsy, przetworniki cyfrowo-analogowe i urządzenia wykonawcze).

W wyniku zjawisk fizycznych (mechanicznych, termicznych itp.) w urządzeniach pomiarowych powstają sygnały elektryczne odpowiadające wielkościom takim, jak: temperatura, ciśnienie, przemieszczenie, natężenie promieniowania, potencjał elektrochemiczny itp. Te analogowe sygnały nie mogą być przekazane bezpośrednio do komputera i wyma-

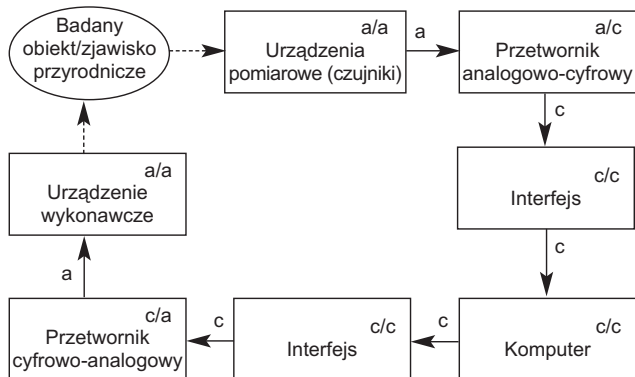
gają przetworzenia w przetwornikach analogowo-cyfrowych. Taki cyfrowy sygnał przekazywany jest do komputera przez interfejs. Również za pośrednictwem interfejsów oraz przetworników c/a komputer steruje urządzeniami wykonawczymi (np. zaworami dozującymi, silnikami, grzejnikami, regulatorami natężenia promieniowania itd.), które zapewniają kontrolę parametrów eksperymentu.

### Rola przetworników a/c w układzie eksperymentalnym

Szczególną rolę w eksperymencie odgrywają przetworniki a/c. Większość urządzeń pomiarowych reaguje na oddziaływanie fizyczne, takie jak: przemieszczenia, temperatura, napięcie elektryczne, prędkość przepływu cieczy itp., które w określonym zakresie zmieniają się w sposób ciągły. Są to sygnały analogowe, które aby mogły zostać poddane komputerowej obróbce, muszą zostać zmienione na sygnały cyfrowe. Zmianę tę umożliwiają przetworniki a/c, umieszczone pomiędzy analogową a cyfrową częścią układu eksperymentalnego (między urządzeniem pomiarowym a interfejsem i komputerem). Podobnie, jeśli sygnały cyfrowe z komputera mają być użyte do sterowania przebiegiem eksperymentu przez analogowe urządzenia wykonawcze, to muszą być one przetworzone w postaci analogową za pomocą przetwornika c/a.

Do bardzo ważnych parametrów przetworników a/c z rysunku należą rozdzielczość (najmniejsza wartość sygnału wejściowego rozróżnialna przez przetwornik), częstotliwość (maksymalna ilość przetworzeń sygnału wejściowego w jednostce czasu) oraz czas przetwarzania (czas upływający od podania na wejściu sygnału do pojawienia się na wyjściu zakodowanej wartości) [2]. Parametry te określają zatem dokładność i szybkość przetwarzania. Można stwierdzić, że każdy przetwornik ma określoną bezwładność (czas przetwarzania), który powoduje opóźnienia pomiędzy chwilą badanego zjawiska a możliwością rejestracji i przetwarzania cyfrowego sygnału w systemie komputerowym. Jeśli układ eksperymentalny składa się z wielu różnych urządzeń pomiarowych oraz wielu różnych przetworników analogowo-cyfrowych, pojawia się problem synchronizacji czasowej napływających do komputera danych. Każdy z przetworników a/c może mieć bowiem różne czasy przetwarzania i trzeba to uwzględnić przy planowaniu eksperymentu. Konsekwencją tego będzie spowolnienie pracy układu eksperymentalnego, z reguły do najdłuższego czasu przetwarzania jednego z przetworników a/c. Wszystkie pozostałe przetworniki będą musiały czekać na ten najwolniejszy, zanim zacznie się kolejny cykl zsynchronizowanych czasowo pomiarów ze wszystkich detektorów.

Czas przetwarzania przetworników a/c powoduje spowolnienie układu eksperymentalnego, ale znacznie poważniejsze



Schemat układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo (linią przerywaną zaznaczono sygnały nieelektryczne)

\* Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
\*\* Politechnika Wrocławska

konsekwencje metodologiczne powoduje ziarnistość przetworników (częstotliwość przetwarzania). Układ eksperymentalny wspomagany komputerowo może bowiem nie zauważyć szybkozmiennych procesów przebiegających pomiędzy skwantowanymi chwilami odczytu danych z urządzenia pomiarowego. Dobrac odpowiednio szybki przetwornik można tylko wtedy, gdy wie się, jak szybkie będą zmiany jakiegoś parametru w badanym zjawisku, co powinno być w eksperymencie ustalone. Nie da się dobrze zaprojektować układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo bez sporej wiedzy o badanym obiekcie. Trudno mówić o wspomaganym komputerowo eksperymentach przeprowadzanych bez teoretycznej wiedzy o oczekiwanych wynikach.

Ogromne znaczenie dla wierności i dokładności danych, które przesyłane są między urządzeniem pomiarowym a komputerem, ma także częstotliwość próbkowania. Bez wiedzy o badanym zjawisku, o tym, jakiego typu dane wejściowe dotrą do przetwornika analogowo-cyfrowego, nie sposób dobrać odpowiednio dokładnego przetwornika spełniającego twierdzenie Shannona-Kotelnikowa (częstotliwość próbkowania nie może być mniejsza, niż podwójna wartość największej częstotliwości występującej w sygnale) lub twierdzenie Nyquista (sygnał ciągły może być ponownie odtworzony z sygnału dyskretnego, jeśli był próbkowany z częstotliwością co najmniej dwa razy większą od granicznej częstotliwości swojego widma). Wzmacnia to jeszcze metodologiczną tezę dotyczącą niemożliwości prowadzenia ateoretycznych badań wspomaganym komputerowo. Samo wykorzystanie przetworników a/c we współczesnych badaniach eksperymentalnych sprawia, że powinno się posiadać wstępną wiedzę o sygnałach wejściowych tych przetworników. To z kolei zmusza do odwołania się do wiedzy teoretycznej dotyczącej badanego zjawiska, aby możliwe było dobranie odpowiedniego urządzenia pomiarowego oraz przetwornika a/c. Podobne wnioski sformułować można, gdy przeanalizuje się parametr rozdzielczości przetwornika a/c. Sygnał wejściowy może zmieniać się bowiem w tak małym zakresie, że przetwornik nie będzie mógł tych zmian rozróżnić. Jeśli nie ma się wiedzy, jakie potencjalnie zmiany mogą zachodzić, nie można będzie dobrać przetwornika z odpowiednią rozdzielczością.

Ponadto wiadomo, że przetworniki analogowo-cyfrowe generują sporo błędów podczas przetwarzania sygnału. Charakterystyka przetwornika może nie być liniowa, może pojawić się błąd wzmocnienia i błąd przesunięcia zera. Dwa ostatnie błędy mogą być co prawda wyeliminowane przez odpowiednią kalibrację, ale nie istnieje metoda zmniejszania błędów liniowości. Inne błędy (błędy nieliniowości, nieliniowość całkowita, całkowity błąd przetwarzania, nieliniowość różniczkowa, współczynnik nieliniowości różniczkowej, współczynniki termiczne zera i skali, współczynnik termiczny nieliniowości różniczkowej) często nakładają się na siebie i ich odseparowanie nie jest możliwe [2]. W wielu przypadkach bowiem kompensacja jednego błędu może powodować zwiększenie innego. Oznacza to, że zawsze pojawią się błędy przetwarzania, których nie można wyeliminować i o których często niewiele się wie. Konsekwencją tego jest pojawienie się różnego typu artefaktów (generowanych błędów) w przetwornikach a/c. Co więcej, nie istnieją proste metody demaskowania artefaktów pojawiających się w przetwornikach a/c, będących bardzo ważnym elementem na styku analogowej i cyfrowej części współczesnych

układów eksperymentalnych. Oprócz artefaktów, kolejną konsekwencją włączenia przetworników a/c do układu eksperymentalnego jest pojawienie się czegoś analogicznego do zasady nieoznaczoności Heisenberga dla mechaniki kwantowej. Ograniczenie możliwości poznawczych wynika z tego, że przetwornik a/c jest szybki z małą rozdzielczością i generuje błędy (przetwornik typu flash) lub bardzo dokładny, ale za to wolny. Tak więc w układach eksperymentalnych wspomaganym komputerowo, dzięki zastosowaniu przetworników a/c, w krótkiej chwili uzyskuje się albo dużo niedokładnych danych, albo otrzymuje się ich mało, ale bardzo precyzyjnych. Dokładność i szybkość pomiarów są odwrotnie skorelowane.

Wprowadzenie komputerowego wspomaganie badań powoduje oddalenie eksperymentatora od badanego obiektu oraz pojawienie się zupełnie nowych artefaktów, które nie mogły się pojawić w eksperymentach przeprowadzanych bez użycia komputerów. Wprowadzenie przetworników a/c, będących częścią układu eksperymentalnego powoduje pojawienie się jakościowo nowych błędów oraz wprowadza jakościowo nowe ograniczenie poznawcze (szybkość lub dokładność pomiarów). Ponadto używając przetworników a/c należy zdawać sobie sprawę, że aby dobrać odpowiedni przetwornik do zestawianego przez siebie układu eksperymentalnego, musi się nie tylko dobrze znać zasadę działania urządzenia pomiarowego, ale także posiadać sporo teoretycznej wiedzy dotyczącej badanego obiektu.

### Metodologiczne konsekwencje włączenia komputera do układu eksperymentalnego

Komputer będący częścią układu eksperymentalnego może pełnić w nim przynajmniej trzy role. Pierwszą z nich jest pobieranie danych empirycznych z urządzeń pomiarowych przez przetworniki a/c i interfejsy oraz sterowanie przebiegiem eksperymentu przez przetworniki c/a i urządzenia wykonawcze. Drugą jest tworzenie cyfrowych baz danych empirycznych. Trzecią stanowi porównywanie danych empirycznych z danymi teoretycznymi. Systemy komputerowego wspomaganie badań wymagają, aby komputer był bezpośrednio połączony z układem pomiarowym (składającym się z urządzenia pomiarowego, przetworników analogowo-cyfrowych i interfejsu) i służyć do gromadzenia i analizy danych empirycznych. Porównania danych empirycznych z wynikami obliczeń teoretycznych można dokonać, wykorzystując lub opracowując odpowiednie oprogramowanie. Interpretację wyników eksperymentów przeprowadzonych z komputerowym wspomaganie badań prześledzić można za pomocą urządzenia pomiarowego FT-IR (*Fourier Transform Infrared Spectrometer* [3]). Zastosowanie metod numerycznych w analizowanym przypadku umożliwia szybkie przedstawienie wyników w postaci widma IR, a także porównanie uzyskanych wyników empirycznych z teorią. Zastosowanie komputera do interpretacji wyników wprowadziło zmiany ilościowe – dokładniejsze i szybsze porównanie danych empirycznych z krzywymi teoretycznymi [3] oraz umożliwiło zastosowanie nowej metody interpretacji wyników eksperymentów (np. porównanie pól powierzchni pików) [3], a także w wielu przypadkach doprowadziło do znacznego zwiększenia możliwości pomiarowych. Komputer pozwala na prowadzenie pomiarów w sposób nieprzerwany przez dowolnie długi czas, analizę praktycznie dowolnej liczby danych doświadczalnych napływających z dużą szybko-

ścią i jednocześnie kontrolę wielu urządzeń laboratoryjnych. Dane empiryczne wprowadzone do pamięci komputera poddać można dowolnemu przetwarzaniu, m.in. cyfrowej redukcji szumu, filtracji czy uśrednianiu. Ułatwiony jest proces znajdowania widma sygnału (szybka transformata Fouriera), dopasowania rezultatów pomiarowych do przewidywań teoretycznych, analizy statystycznej. Analizę danych doświadczalnych można przeprowadzać w trakcie pomiaru i na bieżąco wpływać na warunki doświadczenia.

Użycie współczesnych technik informatycznych w naukach empirycznych otworzyło dla obserwatora nowe jakościowo sposoby badań. Wprowadziło jednak także nowe klasy błędów (błędy metod numerycznych, artefakty powstające w przetwornikach a/c), które musi on uwzględniać. Otwartą kwestią pozostaje statystyczna interpretacja powstających błędów. O ile można zachować twierdzenie o utrzymaniu wartości średniej mierzonego medium, o tyle rozkłady zmiennych losowych mogą mieć zmienione charak-

terystryki wyższych rzędów. Wymaga to projektowania procesów sprawdzających sprawność samego komputerowego sposobu pomiarów i przetwarzania wyników badań.

#### Abstract

The new problems and new quality of errors by new computer methods used in researches occurs. There is presented description of this phenomenon and probe of digest in this new experiment reality in this paper.

#### Literatura

- [1] Kulikowski J. P.: Komputery w badaniach doświadczalnych, PWN, Warszawa 1993.  
 [2] Wojtatowicz T. W.: Badania doświadczalne wspomaganie komputerowo, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010.  
 [3] Leciejewski S.: Status eksperymentatora w naukach empirycznych a współczesne techniki informatyczne, [w:] Sobczyńska D., Zedler P. (red.): Homo experimentator, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Filozofii UAM, Poznań 2003.

*dr hab. inż., prof. nzw. PŚI Jacek Gołaszewski\**  
*mgr inż. Grzegorz Cygan\**  
*mgr inż. Michał Drewniak\**

## Adaptacja Systemu TLS do oznaczania zmian skurczowych elementów betonowych

**S**kurcz materiałów kompozytowych o matrycy cementowej jest związany z kilkoma procesami, które mogą synergistycznie na siebie oddziaływać. Mechanizm skurczu zaczynu cementowego zachowuje słuszość w przypadku zapraw bądź betonów. Ze względu na to, że ziarna kruszywa wprowadzają więzy, które ograniczają skurcz, można się spodziewać jedynie ilościowych różnic w skurczu badanym na zaczynach, zaprawach czy betonach. Od momentu zmieszania składników zaczynu cementowego następuje skurcz autogeniczny, związany z tym, że objętość składników zaczynu jest mniejsza niż objętość produktów przebiegającej reakcji hydratacji. Skurcz chemiczny przebiega mniej więcej do momentu umownego czasu końca wiązania cementu. Postępująca reakcja hydratacji

powoduje zjawisko samoosuszania. Roztwór wypełniający pory kapilarne jest „zużywany” przez trwającą reakcję hydratacji, powodując powstawanie naprężeń rozciągających, a w rezultacie skurcz. Zjawiska kapilarne są odpowiedzialne również za skurcz przy wysychaniu, który jest nierozzerwalnie związany z kompozytem o matrycy cementowej. Część skurczu przy wysychaniu może ulec cofnięciu drogą ponownej resorpcji wody.

System TLS (Thin Layer Shrinkage – w wolnym tłumaczeniu urządzenie do pomiaru skurczu elementów cienkowarstwowych) wykazuje dobrą zdolność do pomiaru zmian liniowych kompozytów o matrycy cementowej w układzie zmiennych czynników technologicznych, takich jak skład mieszanki czy warunki klimatyczne. W pracy [1] przedstawiono wyniki badania wpływu domieszek zwiększających lepkość na skurcz wczesny zapraw. Zastoso-

wanie hydroksypropylometylocelulozy i domieszki na bazie kopolimerów syntetycznych pozwoliło na zmniejszenie skurczu w początkowej fazie wiązania i dojrzewania spoiwa, czyli w fazie, w której kompozyt nie ma jeszcze dostatecznej wytrzymałości, aby przeciwstawić się powstającym naprężeniom rozciągającym. Otrzymane wyniki badań są zgodne z zaprezentowanymi w pracy [2]. Zastosowanie domieszek zwiększających lepkość pozwoliło zmniejszyć skurcz, a tym samym wpłynęło pozytywnie na rysoodporność kompozytu.

W artykule przedstawiono propozycję adaptacji systemu Thin Layer Shrinkage bazującego na laserowym pomiarze odległości, do oznaczania skurczu elementów betonowych o wymiarach 10 x 10 x 500 mm od chwili zaformowania. Drogą relatywnie niewielkich modyfikacji uzyskano możliwość badania skurczu od chwili wykonania ele-

\* Politechnika Śląska

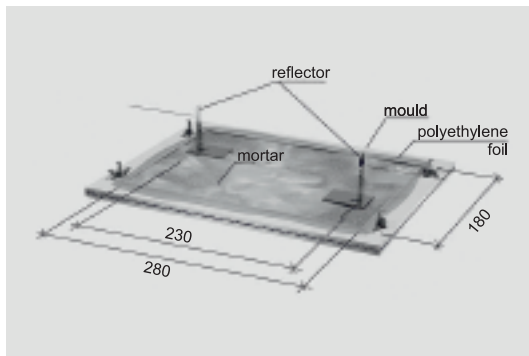


mentu, jakim jest normowa belka betonowa, która może być później wykorzystana do badania skurczu przy wysychaniu.

### Metodyka badań

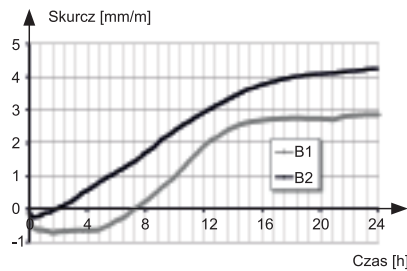
Adaptacja pozwalająca na określenie wielkości zmian liniowych betonowych belek 100 x 100 x 500 mm polega na wykonaniu formy o tych wymiarach, która zapewnia swobodę odkształceń skurczowych i pęcznienia. W tym celu ściany formy zostały wyłożone pianką polietylenową oraz dwiema warstwami folii polietylenowej, które zmniejszają wpływ tarcia na odkształcenia próbki. Na końcach formy umieszczone są metalowe elementy pełniące funkcje reflektorów odbijających światło dalmierzy laserowych. Zakotwione są one w badanym elemencie za pomocą metalowych wśawów (rysunek 1). Po badaniu skurczu w systemie TLS możliwe jest dalsze badanie skurczu za pomocą powszechnie znanego aparatu Amslera.

W celu weryfikacji zaproponowanej metodyki określono wielkość zmian liniowych belek wykonanych z mieszanki betonów samozagęszczalnych, o właściwościach i składzie podanych w tabeli. Spoiwem w mieszankach był ce-



Rys. 1. Forma i próbka do badania skurczu wg [1]

ment zawierający 50% mielonego popiołu lotnego wapiennego. W mieszance betonu B1 zastosowano powszechnie dostępną domieszkę zwiększającą lepkość na bazie kopolimerów syntetycznych o wysokiej masie cząsteczkowej. Na podstawie wyników badań przedstawionych na rysunku 2 stwierdzono, że tak przygotowane próbki mają swobodę odkształceń, co potwierdza słuszność przyjętych założeń konstrukcyjnych formy. Badane były mieszanki betonu samozagęszczalnego (skład i podstawowe właściwości w tabeli).



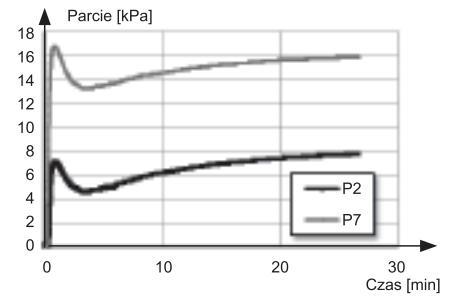
Rys. 2. Zmiany długości próbek mierzone w pierwszych 24 h dojrzewania

### Skład [kg/m<sup>3</sup>] i właściwości mieszanek

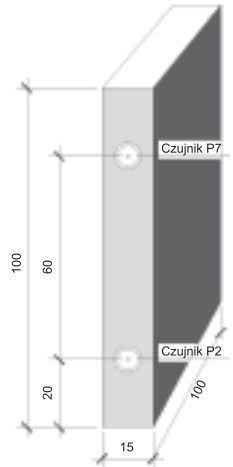
Skład mieszanki i właściwości	Mieszanka	
	B1	B2
Cement	425	
Woda	212,5	
W/C	0,50	
Superplastyfikator	8,50 (2% m.c.)	7,44 (1,75% m.c.)
Domieszka VEA	2,13 (0,5% m.c.)	–
Piasek 0 – 2	835	839
Kruszywa otoczkowe 2 – 8	835	839
Rozpiły [cm]	70	65
Czas rozpiływu T <sub>50</sub> [s]	4,0	3,7
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	43,6	45,7

W początkowym okresie (do ok. 30. minuty w przypadku mieszanki B1 i 60. minuty B2) obserwowana jest ekspansja mieszanki betonowej. Ma ona większą wartość w przypadku mieszanki z domieszką VEA. Zakres przeprowadzonych dotychczas badań nie pozwala na wyrażanie jednoznacznych opinii na temat zaobserwowanego zjawiska. Niemniej jednak jest ono zgodne z zachowa-

niem mieszanki betonowej badanej w aspekcie jej parcia na ściany deskowania. Badając wpływ czynników technologicznych na wielkość wywieranego parcia samozagęszczalnej mieszanki betonowej, zaobserwowaliśmy, że po zakończeniu betonowania elementu, jakim była tarcza o wymiarach 0,15 x 1,0 x 1,0 m, tensometryczne czujniki ciśnienia wykazywały wzrost parcia mieszanki betonowej (rysunek 3), który może mieć związek z ekspansją zaobserwowaną przy okazji badania skurczu.



Rys. 3. Parcie samozagęszczalnej mieszanki betonowej na ściany deskowania: P2 – czujnik umieszczony 80 cm od górnej powierzchni tarczy; P7 – czujnik umieszczony 20 cm od górnej powierzchni tarczy



Ponadto proponowana metoda wykazała, że element wykonany z mieszanki betonu samozagęszczalnego z domieszką zwiększającą lepkość ma mniejszy skurcz w porównaniu z elementem wykonanym z mieszanki BSZ bez tej domieszki. Jest to zgodne z wynikami przedstawionymi w pracy [1]. Domieszki zwiększające lepkość redukują skurcz zapraw czy betonów. Te spostrzeżenia pozwalają sądzić, że zaproponowana metodyka badania skurczu elementów betonowych jest słuszna. Pozwala zniwelować wpływ formy na skurcz i w sposób wystarczająco dokładny umożliwia określenie jego wartości oraz zmian w czasie, mierzonych już od chwili wykonania elementu.

*Badania finansowane z projektu nr 0842/B/T02/2011/40 ze środków Narodowego Centrum Nauki*

### Literatura

- [1] Gołaszewski J., Cygan G.: „Wpływ domieszek zwiększających lepkość na skurcz wczesny zapraw”. Budownictwo i Inżynieria Środowiska/Civil and Environmental 2011, vol. 2, No. 3.
- [2] Slovik V., Hubner T., Schmidt M., Villmann B., Simulation of capillary shrinkage cracking in cement – like materials. Cement & Concrete Research 2009, Vol. 32, No. 2, 289 – 296.