

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Wpływ wybranych parametrów wytrzymałościowych betonu pochodzących ze znormalizowanych badań na wrażliwość modelu symulacyjnego MES

Krzysztof Kosiuczenko

¹Pion Rozwoju, Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej
email: krzysztof.kosiuczenko@witpis.eu

STRESZCZENIE: Niniejsza praca przedstawia wyniki analizy wrażliwości modeli symulacyjnych na dane pochodzące z eksperymentu, dla którego metodyka zawarta jest w obowiązujących dokumentach normalizacyjnych. Przedstawiona symulacja odwzorowywała eksperyment 3-punktowego zginania próbki betonu. Analizę przeprowadzono z użyciem modeli numerycznych o różnych modelach materiałowych betonu. Modele numeryczne opracowano zgodnie z zasadami metody elementów skończonych (MES), oraz wymaganiami programu LS-DYNA.

SŁOWA KLUCZOWE: beton, metoda elementów skończonych, model materiałowy, standaryzacja, wytrzymałość

1. Wstęp

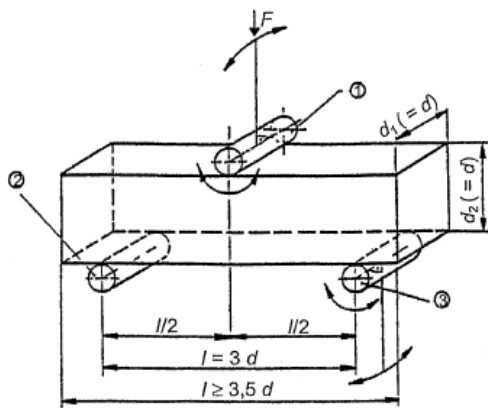
Badanie wytrzymałości betonu jest kluczowe dla zapewnienia wytrzymałości i trwałości betonowych konstrukcji budowlanych. Nowoczesne metody pomiaru i oceny wytrzymałości betonu łączą tradycyjne podejście nauki o wytrzymałości materiałów z nowoczesnymi osiągnięciami technologicznymi. Do tego celu wykorzystuje się tradycyjne testy, takie jak test wytrzymałości na ściskanie, na rozciąganie i na zginanie. Testy te uzupełnione są lub nawet zastępowane przez różne techniki nieniszczące, takie jak badania ultradźwiękowe (UPV) i testy młotkiem odbiciowym, dodatkowo wspomagane przez analizatory cyfrowe, które oferują wgląd w stan betonu bez jego uszkodzenia. Wszystko to pozwala nie tylko na ocenę wytrzymałości, ale także na obserwację rozwoju pęknięć i monitorowanie nośności całej konstrukcji. Sparametryzowane wyniki badań wytrzymałościowych wykorzystywane są powszechnie podczas projektowania obiektów budowlanych. Jednym z głównych narzędzi projektowania jest zastosowanie programów CAE, które umożliwiają kompleksową analizę wytrzymałościową projektów poprzez m.in. ocenę wyników symulacji numerycznych. Opracowanie modeli numerycznych wymagają jednak dostarczenia wiarygodnych danych materiałowych, pochodzących z omówionych wcześniej eksperymentów. Dane te obarczone są błędami zastosowanych metodyk badawczych. Ich istotność w modelowaniu można ocenić m.in. poprzez wykonanie tzw. analizy wrażliwości modelu symulacyjnego. Technika ta to jedna z najczęściej stosowanych metod walidacyjnych i weryfikacyjnych, a opiera się ona na zmianie wartości danych wejściowych w zakresie spodziewanego błędu w celu określenia wpływu tych zmian na zachowanie się całego modelu. Te z

parametrów, które są wrażliwe, tzn. ich nieznaczna zmiana (na ogół w granicach 10%) powoduje znaczne zmiany zachowania się modelu, powinny być stosowane z większą ostrożnością przed wykorzystaniem ich w modelu [1]. Głównym celem niniejszej pracy było zwrócenie uwagi projektantów na ryzyka związane z wykorzystaniem specyfikacji technicznych betonu opartych o normy.

2. Test zginania próbki betonu wykonanej zgodnie z PN

Test zginania próbki betonu określony jest przez Polską Normę [2], która definiuje metodologię oceny wytrzymałości na zginanie próbek betonu. Procedura badawcza obejmuje kilka kluczowych etapów (rys. 1).

Proces rozpoczyna się od przygotowania próbek. Następnie próbki umieszcza się w maszynie wytrzymałościowej na dwóch podporach o średnicy od 20 do 40 mm. Siłę zginającą przykłada się w środkowej części próbki, co stanowi jeden z dwóch możliwych wariantów procedury. W trakcie badania stopniowo zwiększa się siłę zginającą z prędkością odpowiadającą wzrostowi naprężenia w zakresie od 0,04 do 0,06 MPa/s. Jednocześnie rejestruje się wartość maksymalnej siły zginającej, która prowadzi do zniszczenia próbki. Wyniki badania pozwalają na określenie wytrzymałości na zginanie badanej próbki betonu, co umożliwia ocenę jej właściwości mechanicznych zgodnie z wymaganiami normy i przypisanie do odpowiedniej klasy (zgodnej z Polską Normą [3]). Wytrzymałość na ściskanie wynika wówczas z przeliczenia wytrzymałości na zginanie.



Rys. 1. Próba zginania próbki betonu wykonywana zgodnie z Polską Normą [2]

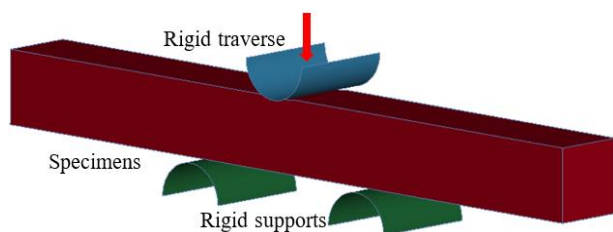
3. Modelowanie

Model numeryczny wykonano metodą elementów skończonych (MES) w programie LS-DYNA.

Do zamodelowania właściwości materiałowych próbki betonu (rys. 2) zastosowano dwa modele materiałowe: MAT_CSCM_CONCRETE (MAT159) i MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (MAT072R3) [5], wybrane ze względu na wykazaną w wielu pracach dokładność wyników obliczeniowych [6]. Oba modele oferują unikalne właściwości i różnią się w zastosowaniach symulacyjnych ze względu na swoje specyficzne cechy.

Model MAT159 umożliwia m.in. precyzyjne modelowanie propagacji pęknięcia i zjawisk kruszenia [6]. Jest szczególnie przydatny przy dużych deformacjach, takich jak kolizje, wybuchy lub inne scenariusze obejmujące znaczne odkształcenia. Ze względu na szczegółowe modelowanie pęknięć, MAT159 jest bardziej wymagający obliczeniowo. Materiał ten jest często uważany za bardziej wiarygodny w symulacjach obciążeń statycznych.

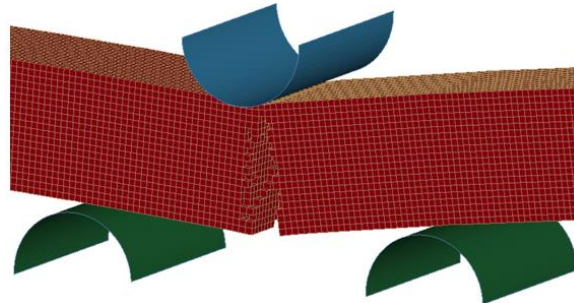
Model MAT072R3, oparty na teorii uszkodzeń, pozwala na modelowanie degradacji materiału pod obciążeniem poprzez reprezentowanie uszkodzeń jako zmian właściwości materiału [7]. Jest preferowany w symulacjach skoncentrowanych na ogólnej degradacji materiału, gdzie szczegółowe śledzenie poszczególnych pęknięć nie jest konieczne. Ten model jest mniej złożony obliczeniowo niż MAT159, co czyni go bardziej dostępnym dla symulacji wymagających szybszych czasów obliczeń [8].



Rys. 2. Model symulacyjny zginania wykonanego zgodnie z Polską Normą

Ponieważ opisane tu materiały wymagają określenia wielu wartości parametrów związanych z modelem uszkodzeń, równaniem stanu, pękaniem i tarciem, przyjęto domyślne wartości programu jako dobrze przetestowane i

udokumentowane. W celu przeanalizowania wrażliwości modelu opracowano kilka wariantów obliczeniowych, różniących wartościami wybranych parametrów materiałowych. W wyniku symulacji numerycznej modelu (rys. 3) otrzymano m.in. chwilowe mapy naprężeń oraz obraz narastania niszczenia na skutek wzrastania obciążenia, które były przedmiotem porównania i oceny.



Rys. 3. Model numeryczny MES (LS-DYNA)

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie w modelach materiałowych betonu parametrów pochodzących ze standaryzowanego eksperymentu jest w pełni akceptowalne, jednak należy być świadomym pewnych ograniczeń. Modele materiałowe w LS-DYNA są uproszczeniem rzeczywistości i mogą nie uwzględniać wszystkich aspektów zachowania betonu. Niedokładne parametry mogą te uproszczenia dodatkowo pogłębić. Nawet niewielkie niedokładności mogą prowadzić do znacznych odchyłeń w wynikach symulacji. Niniejsza analiza wrażliwości może wspomóc właściwą ocenę niepewności wyników obliczeń i lepsze zrozumienie ograniczeń modelu. W efekcie może to skutkować właściwym zaprojektowaniem konstrukcji i uniknięciem ryzyka awarii.

Badania zostały przeprowadzone przy wsparciu Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego (ICM UW).

Literatura

- [1] Porównanie wyników badań modułu sprężystości betonu przeprowadzonych według europejskiej normy PN-EN 12390-13:2013 i niemieckiej normy DIN 1048-5, Piotr Woyciechowski, Elżbieta Szmigiera, Joanna J. Sokołowska, Olga Zygnersk, Dni Betonu 2021.
- [2] Polish Committee of Standardization, PN-EN 12390-5:2019-08. Badanie betonu. Część 5. Wytrzymałość na zginanie próbek do badania.
- [3] Polish Committee of Standardization, PN-EN 206:2014-04 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [4] Borrvall T., Riedel W. The RHT concrete model in LS-DYNA. 8th European LS-DYNA Users Conference in Strasbourg. 2011.
- [5] LSTC. LS-DYNA Manual vol. II R.13.0. Livermore Software Technology Corporation. 2021.
- [6] Murray I. D. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159. US Department of Transportation. Federal Highway Administration. 2007.
- [7] Schwer L. E., Malvar L. Simplified concrete modeling with MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3. JRI LS-DYNA user week. 2005.
- [8] Jor Yi. T. Comparative FE Study between MAT159 and MAT072R3 for Concrete Behaviour Modelling under Quasi-static Loading in LS-DYNA. Dissertation Universiti Teknologi PETRONAS. Malaysia. 2016.