

Analiza numeryczna wpływu zbrojenia poprzecznego na zachowanie mechaniczne słupa betonowego – streszczenie

Rozprawa przedstawia numeryczny model zjawiska skrępowania betonu służący oszacowaniu wartości granicznej siły osiowej, naprężeń poprzecznych i sztywności osiowej przekroju słupa betonowego ze stalowym zbrojeniem poprzecznym o dowolnym kształcie. W pracy wykorzystano dwuwymiarowy model oparty na założeniach uogólnionego płaskiego stanu odkształcenia, nieliniowe modele fizyczne materiałów, a rozwiązania poszukiwano przy użyciu przemieszczeniowego sformułowania metody elementów skończonych.

Dysertacja podzielona jest na 6 rozdziałów oraz stanowiący jej integralną część dodatek A. Na wstępie przedstawiono ogólne założenia pracy, przybliżono pojęcie skrępowania betonu i obszary, w których zjawisko jest żywo wykorzystywane. Ponadto znajduje się tu opis celów stawianych w pracy, które można streścić stwierdzeniem – „przedstawić prosty, wydajny i wiarygodny model badanego zjawiska”, oraz zaprezentowana jest teza badawcza zakładająca, że przyjęte rozwiązania pozwalają w pełni zrealizować te cele. Dalsza część przedstawia zjawisko skrępowania betonowych słupów w naukowej literaturze polskiej i światowej. Przegląd pozycji podzielony jest na trzy części, w których przedstawiono odpowiednio badania doświadczalne w tym zakresie, próby stworzenia procedur obliczeniowych w oparciu o materiał doświadczalny i teoretyczny, oraz różne podejścia do numerycznego modelowania betonu skrępowanego i plastyczności betonu w złożonym stanie naprężenia. W tym rozdziale przedstawiono także w ujednocnionej formie zestawienie 34 propozycji określania nośności przekrojów skrępowanych poddanych osiowemu ściskaniu. Dalszą część poświęcono zaprezentowaniu sformułowania zagadnienia. Przedstawiono przyjęte założenia takie jak odrzucenie w analizie otuliny, przyjęcie dwuwymiarowego modelu w płaskim stanie odkształcenia i bezpośrednio związane z tym przyjęcie zasady płaskiego przekroju oraz zasady rozmieszczenia zbrojenia poprzecznego wzdłuż wysokości słupa. Dodatkowo należy wymienić, że w pracy ograniczono się do rozwiązania zadania słupów wykonanych z betonów o normalnej wytrzymałości, gdyż dają one najlepsze rezultaty przy uzwajaniu. Zwrócono uwagę, że słupom wykonanym z betonów wysokich wytrzymałości mogą towarzyszyć dodatkowe zjawiska, które nie są ujęte w przedstawionym modelu. W dalszej części zaprezentowano równania składające się na sformułowane zagadnienie. W punkcie poświęconym kryteriom plastyczności betonu, poza wymienieniem zastosowanych w dalszej części dysertacji (Mohra–Coulomba, Druckera–Pragera, Willama–Warnkego), przedstawiono krótki przegląd klasycznych warunków plastyczności. Na końcu zamieszczono sformułowanie wariacyjne słabe, które rozwiązywano metodą elementów skończonych. Następnie przedstawiono opis rozwiązania. Rozpoczyna się od wyjaśnienia zastosowanych dyskretyzacji czasu i przestrzeni. Czas, a właściwie pseudo-czas wprowadzony jest w celu zastosowania metody przyrostowej, ze względu na nieliniowy charakter układu równań. W każdej chwili czasu poszukiwany jest stan równowagi po dodaniu kolejnego przyrostu obciążenia (skrócenia podłużnego słupa). Rozwiązanie uzyskiwane jest metodą niejawną (*wstecz*), a do tego celu wykorzystano metodę iteracyjną. Siła osiowa w rdzeniu słupa wyznaczana jest jako całka z naprężeń osiowych po całej powierzchni przekroju. Jej wartość graniczną odczytywano jako ekstremalną wartość w monotonicznej części relacji siła osiowa–skrócenie słupa. Następnie zamieszczono charakterystykę wykorzystywanych elementów skończonych – prętowych do modelowania zbrojenia poprzecznego i powierzchniowych trójkątnych do modelowania obszaru przekroju betonowego. Opisano także w rozprawie metody ustalania stałych materiałowych wykorzystywanych przy stosowaniu wybranych modeli fizycznych. Uzupełnieniem prezentacji metod rozwiązania jest charakterystyka wykorzystanego

oprogramowania komputerowego, które posłużyło przygotowaniu przykładów obliczeniowych zamieszczonych w dalszej części rozprawy. Rozdział poświęcony prezentacji zastosowania omawianego w pracy modelu zaczyna się od porównania rezultatów uzyskiwanych na drodze symulacji z jego wykorzystaniem i wyników badań doświadczalnych przedstawionych w artykułach: S. Y. L. Yin, J. C. Wang, and P. H. Wang. *Development of multi-spiral connemnts in rectangular columns for construction automation*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A, 2012. S. Y.-l. Yin, T.-l. Wu, T. C. Liu, S. A. Sheikh, and R. Wang. *Interlocking Spiral Connement for Rectangular Columns*. Concrete International, 33(Specimen C):3845, 2011. Rezultaty porównania wskazują na dobre odwzorowanie zachowania mechanicznego słupów wykonanych z betonów normalnej wytrzymałości. Następnie przedstawiono wyniki symulacji dla przekrojów betonowych o typowych kształtach (okrągłe, kwadratowe, prostokątne) przy różnym stopniu zbrojenia – i tu także wyniki uzyskiwane dzięki symulacjom nie odbiegały od znanych z literatury zależności. W kolejnym punkcie pokazano jakie efekty skrępowania można uzyskać w przekrojach prostokątnych o różnym stosunku długości boków. Następny prezentuje skuteczność stosowania w przekrojach kwadratowych zbrojenia o zróżnicowanym kształcie. Ustalono, że najefektywniejsze spośród przedstawionych propozycji jest stosowanie okrągłych wkładek obejmujących jak największy obszar przekroju. Wówczas przyrost nośności jest do około 20 % większy w porównaniu do najprostszych sposobów. Kolejny przedstawiony przykład pokazuje rozwiązanie w przekrojach rzadziej rozważanych w kontekście wykorzystania uzwojenia w celu poprawy ich nośności: przekrój wklęsły, w kształcie litery „L”, oraz przekrój pierścieniowy, ze swobodnym brzegiem wewnętrznym. Wnioski z tych obliczeń wskazują, że przekrój wklęsły jest porównywalnie efektywny jak prostokątny o zbliżonej proporcji boków zaś otwór wewnątrz przekroju przyczynia się do zauważalnego spadku średnich naprężeń poprzecznych i w efekcie niższych przyrostów nośności niż w przypadku przekrojów pełnych. W podsumowaniu rozdziału porównano jak zaprezentowany model (w trzech wariantach doboru funkcji plastyczności betonu) prezentuje się na tle różnych, znanych z literatury, sposobów szacowania nośności słupa uzwojonego na przykładzie kwartowego przekroju ze zbrojeniem poprzecznym na obwodzie. Można stwierdzić, że w przedstawionym, typowym zadaniu, rozwiązanie opisane w dysertacji nie odbiega od innych, zweryfikowanych metod. Dodatkowo w podsumowaniu rozdziału wymieniono poczynione obserwacje. Z najistotniejszych warto wymienić wpływ uzwojenia na sztywność osiową, który nie jest decydujący, ale niezależnie od kształtu przekroju zbliżony jest do wartości $\Delta E_c \approx 0,4 \rho_T E_c$, oraz to, że model wykorzystujący warunek Mohra–Coulomba nie sprawdza się dostatecznie dobrze w zadaniach o niejednorodnym rozkładzie naprężeń poprzecznych (wszystkich z wkładkami o długich, prostych odcinkach oraz w przekrojach z otworami). Zamieszczony dalej dodatek A zawiera elementy, które nie pasowały bezpośrednio do treści pracy, ale stanowią w kilku miejscach jej uzupełnienie. Przedstawiono tu definicje tensorów i ich niezmienników wykorzystywanych wcześniej, metodę jawną całkowania związków fizycznych – jako alternatywne podejście względem metody wykorzystanej w pracy. Podobnie zamieszczone dalej równania Prandtla–Reussa, które mogą być użyte do opisu zachowania stali zbrojenia poprzecznego. W ostatnim punkcie dodatku A pokazano wpływ stałych materiałowych na efekty skrępowania – ma on na celu być dodatkową weryfikacją poprawności działania przygotowanego modelu.

Robert