



Politechnika Śląska



Wydział Budownictwa

STRESZCZENIE PRACY DOKTORSKIEJ
„STUDIUM PŁASKICH STROPÓW
SPRĘŻONYCH KABLAMI
BEZ PRZYCZEPNOŚCI”

Opracowanej na
Katedrze Inżynierii Budowlanej
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

Autor: Mgr inż. Krzysztof Golonka
Promotor: Prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz

Gliwice 2014

Streszczenie

Podjęcie studium płaskich stropów sprężonych kablami bez przyczepności miało na celu zebranie danych i rozwinięcie metod postępowania w szerokiej grupie zagadnień związanych z tymi nowoczesnymi konstrukcjami. Przyświecał temu cel praktyczny, jakim jest dostarczenie projektantom spójnego materiału, pozwalającego przełamać bariery braku informacji, a co za tym idzie – oporów w stosowaniu takich konstrukcji. Postawiono sobie zatem w pracy dwa obszary celów.

Pierwszy obszar stanowiło studium możliwości wykorzystania dostępnych aktualnie środków technicznych, prowadzących do koncepcji konstrukcji płaskiego stropu o dużej rozpiętości, spełniającej wymagania przydatności, w zakresie nośności, użyteczności i trwałości, przy możliwie najmniejszej ciężarze stropu. Studium w tym zakresie stanowiło wytypowanie kierunków ograniczonej optymalizacji konstrukcji, w której funkcję celu stanowiła masa stropu, a kryteria stanowiły wymagania wskazane w przepisach projektowych. Elementy tego studium zawarto w początkowych rozdziałach, obejmujących rozwój historyczny płaskich stropów na tle innych nowoczesnych stropów z betonu, aktualny stan wiedzy dotyczący płaskich stropów sprężonych i zebrane informacje o możliwościach techniczno-technologicznych w projektowaniu i wykonawstwie.

Drugi obszar dotyczył przykładowego wykorzystania zebranych i przeanalizowanych możliwości technicznych i obliczeniowych w wariantowo rozważanym konkretnym projekcie stropu dużej rozpiętości, sprężonego w dwóch ortogonalnych kierunkach. Zgodnie z tematem rozprawy, głównym założeniem było wykorzystanie sprężenia kablami bez przyczepności, zarówno wewnętrznymi, jak i zewnętrznymi, przebiegającymi pod stropem. Dobór układu kabli i ich rozmieszczenia stanowił przedmiot analizy obliczeniowej, dotyczącej nośności w różnych sytuacjach obliczeniowych, jak również ugięć i zarysowania. Dalsze analizowane środki techniczne dotyczyły zastosowania odciążających wkładów w betonie płyty, obniżających masę stropu, ale rozmieszczonych w sposób dobrany z kryteriów nośności i wymagający uwzględnienia zmiany sztywności, zarówno w stanie niezarysowanym, jak i zarysowanym.

Na podstawie dokonanych obliczeń wielu stropów żelbetowych i sprężonych o zróżnicowanych rozpiętościach, „pracujących” dwukierunkowo, opartych na ścianach konstrukcyjnych bądź słupach oraz wielu wstępnie przeprowadzonych analiz obliczeniowych stropów płaskich, jak również doświadczeń nabytych podczas wieloletniej praktyki zawodowej w biurach projektowych, podjęto udaną próbę zdefiniowania zoptymalizowanego stropu. Strop ten spełnia oczekiwania architektów co do możliwości swobodnego kształtowania przestrzeni oraz urzeczywistnia zamierzenia inżynierów, przedstawiając interesującą konstrukcję stropu sprężonego, będącego przedstawicielem typu stropów opatrzonych symbolem AG.

Stropami typu AG określono płaskie stropy sprężone kablami bez przyczepności spełniające następujące założenia:

- kable sprężające przebiegają częściowo w obrębie przekroju płyty, a w niektórych obszarach poza jej przekrojem,
- stosuje się odciążające wkłady w betonie, obniżające ciężar własny konstrukcji,

- dobór rodzaju podpór gwarantuje na przestrzeni całego okresu eksploatacji optymalne wykorzystanie oddziaływania siły osiowej od sprężenia, zapewniające pracę przekrojów betonowych z wkładami w stanie niezarysowanym oraz umożliwiające uwzględnienie tej siły w wymiarowaniu,
- stopień sprężenia jest wystarczający, by sprawdzenie stanu pracy obszarów niezarysowanych ograniczyć do sprawdzenia przekrojów betonowych pełnych, znajdujących się pomiędzy wkładami w betonie,
- poprzez odpowiednie sprężenie zapewnia się zagwarantowanie pracy przekrojów w fazie „I” (stan niezarysowany) dla większości obszarów płyty,
- przewiduje się „swobodne trasowanie” kabli, redukujące niewspółmiernie nakłady pracy na budowie.

Przykład analizowanej konstrukcji stanowił wytypowany strop, opatrzony symbolem AG-25, obliczany za pomocą różnych modeli i zaprojektowany w aspektach nośności, użyteczności, odporności pożarowej i realności technologicznej. Wybrany do analizy strop miał wymiary 63 x 63 metry i był podparty na czterech słupach wewnętrznych oraz dwunastu słupach krawędziowych. Środkowe pole stropu miało wymiary 25 x 25 metrów. W pracy analizę stropu zawarto w oddzielnych rozdziałach, obejmujących kolejno obszerną analizę statyczną, a następnie analizę dynamiczną i studium odporności pożarowej wybranego stropu. Podstawy obliczeniowe i wyniki zawarto w pięciu załącznikach.

W obliczeniach wykorzystano komercyjne pakiety programów opracowane w Niemczech: MicroFe oraz Sofistik. W zakresie zaleceń technicznych i ograniczeń opierano się przede wszystkim na Eurokodzie 2 (Część 1-1 i 1-2). Parametry techniczne, dotyczące zwłaszcza cięgien sprężających i zakotwień, zaczerpnięto z katalogów dostawców lub aprobat europejskich oraz z aktualnej literatury.

Wybrany do analizy strop cechowała w środkowym polu 25 x 25 m, przy podstawowej grubości płyty 0,45 m, niespotykana dotąd smukłość $l/h = 25,0/0,45 \approx 55$. Tak ekstremalny przypadek przyjęto (po próbach), aby przedstawić wszystkie problemy, jakie mogą występować w zakresie pracy statycznej, dynamicznej oraz zachowania się w przypadku pożaru.

Uzyskanie tak dużej smukłości płyty było możliwe dzięki zastosowaniu następujących nowatorskich zabiegów konstrukcyjnych:

- realizacja sprężenia stropu płaskiego cięgnami częściowo przebiegającymi w obrębie przekroju stropu, a częściowo na zewnątrz, umożliwiającą uzyskanie dużych mimośrodków oraz z tym związanego optymalnego wykorzystania stali sprężającej,
- zastosowanie zmodyfikowanych przez autora elementów wypełniających (typ AG - półkula z walcem), umożliwiających większą redukcję ciężaru płyty niż przy zastosowaniu aktualnie proponowanych na rynku standardowych elementów,
- maksymalne wykorzystanie siły osiowej od sprężenia – również w obliczeniach SGN (czego nie przewiduje literatura fachowa) poprzez odpowiednie wyeliminowanie niekorzystnych wpływów redystrybucji tej siły w kierunku elementów stabilizujących konstrukcję.

Zasadniczej analizy statycznej stropu AG-25 dokonano przy użyciu programu MicroFe firmy mb AEC Software GmbH (bazującego na MES) do obliczania liniowo-sprężystych przestrzennych układów statycznych, z możliwością uwzględnienia sprężenia poprzez deklarację cięgien z określeniem ich trasy oraz siły sprężającej.

Posłużono się trzema modelami obliczeniowymi, różniącymi się wcześniej wyznaczonymi parametrami, dotyczącymi sztywności przekrojów w określonych obszarach płyty oraz stopniem sprężenia. Uwzględniono miarodajne kombinacje obciążeń dla każdego z przypadków.

Uzyskane wyniki obliczeń zweryfikowano za pomocą programu Sofistik (moduł ASE) do obliczeń struktur przestrzennych, metodą opisaną w tym opracowaniu, symulując sprężenie poprzez zewnętrzne siły zastępcze. Obliczenia te z dużą dokładnością potwierdziły wyniki wcześniejszych obliczeń programem MicroFe. Wymiarowanie przekrojów płyty przeprowadzono programem Inca2, Uniwersytetu w Hamburgu.

W analizie obok wspomnianych programów obliczeniowych, bazujących na teorii MES, wykorzystano uproszczone procedury obliczeniowe, zaproponowane przez autora, a zastępujące dokładniejsze, uciążliwe w stosowaniu obliczenia nieliniowe, przyrostowo-iteracyjne.

W tych uproszczonych obliczeniach wykorzystano fakt, iż poprzez odpowiednio dobrane dwukierunkowe sprężenie można w stropach płaskich zapewnić, że większość obszarów w czasie całego użytkowania (przykładowo założono 70 lat) pozostanie w fazie I, tj. w stanie niezarysowanym.

Po wstępnym oszacowaniu redukcji sztywności przekrojów płyty w obszarach zarysowanych, a następnie tylko jednej dodatkowej iteracji, można było wykazać, iż maksymalne ugięcia w SGU spełniają normowe wymogi wg Eurokodu 2. Tym niemniej istnieje możliwość przeprowadzenia dalszych iteracji, prowadzących do dokładniejszego rozpoznania stanu pracy rozpatrywanego stropu.

Dzięki wymiarowaniu dla dwóch przypadków: modelu płyty z pełną sztywnością oraz modelu ze zredukowaną sztywnością w obszarach zarysowanych można stwierdzić, że strop AG-25 posiada dodatkowe rezerwy nośności. Poprzez specjalne, zaproponowane przez autora zamocowanie stropu do elementów usztywniających w kierunku poziomym, umożliwiono wykorzystanie siły osiowej od sprężenia w wymiarowaniu.

Sprawdzenia założeń obliczeniowych, dotyczących stanu pracy przekrojów płyty stropowej, dokonano za pomocą opracowanej przez autora procedury w programie Excel w oparciu o liniowo-sprężysty model obliczeniowy przekroju betonowego ze zbrojeniem, przy uwzględnieniu wyznaczonych wcześniej maksymalnych strat siły sprężającej, wynoszących około 20%. W związku z redystrybucją sił wewnętrznych, związaną z efektem pełzania, w obliczeniach tych rozróżniono dwa skrajne przypadki w zależności od czasu użytkowania ($t=0$ oraz $t=70$ lat).

Przy sprawdzaniu założeń wykorzystano udowodnioną przez autora tezę, że dla funkcji dwóch zmiennych (siły osiowej oraz momentu zginającego), od pewnej założonej wielkości siły osiowej (w rozpatrywanym przypadku - od sprężenia), momenty rysujące pełnego prostokątnego przekroju betonowego są mniejsze od momentów rysujących przekrojów z wkładami w betonie, pozwalającą na szybkie sprawdzenie stanu pracy przekrojów płyty.

Zastosowane materiały: beton C30/35, stal zbrojeniowa zwykła B500A oraz stal sprężająca o charakterystycznej wytrzymałości $f_{pk}=1860$ MPa, odpowiadają typowym obecnie standardom technologicznym, a przyjęty w obliczeniach system sprężający kablami bez przyczepności firmy Suspa-DSI posiadający Aprobata Europejską jest jednym z wielu podobnych, aktualnie stosowanych na świecie systemów sprężania kablami bez przyczepności.

Ocena dynamicznej pracy stropu wykazała, że pomimo wyznaczonych częstości drgań własnych płyty dla pierwszych sześciu form drgań, oscylujących w granicach częstości sił wymuszających, strop nie wykazuje tendencji w kierunku rezonansu, ze względu na stosunkowo dużą masę modalną jego środkowego pola, jak też wystarczające własności tłumiące konstrukcji (ze stropem podwieszonym i instalacjami).

W analizie dynamicznej nie uwzględniono wkładu tłumienia związanego ze współpracą kabli ze stropem (przede wszystkim kabli zewnętrznych), które jako niespolone z płytą stropu (sprężenie bez przyczepności) w szczególnie silnym stopniu dysypują energię.

Biorąc pod uwagę powyższy fakt oraz dodatkowe efekty tłumiące warstw podłogowych, które dotąd zostały pominięte w rozważaniach, można stwierdzić, że strop AG-25 spełnia zalecenia EN ISO 10137 w odniesieniu do klasy użytkowania obiektu.

W stropach o dużych rozpiętościach, mimo zachowania warunków ugięć, występują stosunkowo duże bezwzględne przemieszczenia. W przypadku stropów sprężonych kablami bez przyczepności mogą w związku z tym wystąpić efekty drugiego rzędu, prowadzące do istotnego zwiększenia momentów zginających. Badając zachowanie stropu AG-25 sprawdzono pod tym kątem obszary środkowe stropu oraz pasma słupowe, w których występują największe ugięcia osiągające wartości rzędu 100 mm. Analiza obliczeniowa wykazała wprawdzie dość znaczny przyrost momentów zginających, jednakże ugięcia stropu wywołały dodatkowe siły, wynikające ze zmiany trasy kabli sprężających, przeciwstawiające się ww. efektom. Bardzo ważnym elementem było tu również rozpoznanie konieczności zastosowania dewiatorów środkowych.

W opracowaniu rozważono również problematykę ognioodporności rozpatrywanej konstrukcji dla przyjętej klasy ogniowej REI 90, przy założeniu rozprzestrzeniania się ognia w pomieszczeniach pod stropem. Przeanalizowano najpierw przypadek, w którym kable zewnętrzne osłonięte są okładzinami ognioodpornymi, a następnie przypadek drugi, gdzie zakłada się wyeliminowanie uszkodzonych pożarem kabli zewnętrznych z pracy statycznej stropu (z planowaną przyszłą wymianą).

W obydwu przypadkach nośność stropu podczas pożaru okazała się wystarczająca, przy czym w drugim przypadku konieczne było dobrojenie najbardziej wyjątkowych obszarów stropu, tj. jego środkowego pola oraz pasm słupowych na ich środkowych odcinkach. Zwrócono też uwagę na duże ugięcia stropu w rozpatrywanym drugim przypadku oraz na oczywistą konieczność wykonania ekspertyzy po pożarze, określającej stan zniszczenia konstrukcji, a w szczególności narażonych na ogień nieosłoniętych kabli zewnętrznych.

Problematyce przebicia, nośności na ścinanie oraz zarysowania nie poświęcono osobnych rozdziałów w niniejszej rozprawie. W związku z zastosowaniem pogrubionych fragmentów przysłupowych (tzw. drop panels) istnieje możliwość zastosowania odpowiedniego zbrojenia poprzecznego na przebicie lub wzmacniających wkładów stalowych.

Jak przyjęto w założeniach, przeważająca część płyty stropu AG-25 pracuje w stanie niezarysowanym. W obszarach stropu najbardziej narażonych na zarysowanie wyznaczono w ramach sprawdzania stanu granicznego zarysowania maksymalne naprężenia rozciągające w prętach zbrojeniowych dla kombinacji obciążeń quasi-stałych. Porównując je z odpowiednimi wartościami wg Tabel Eurokodu 2 – w uproszczonej metodzie sprawdzania rozwarcia rys - można stwierdzić, że szerokość rozwarcia rys w płycie stropu AG-25 nie przekracza $w_k=0,4\text{mm}$, tj. wielkości granicznej przyjmowanej w konstrukcjach sprężonych kablami bez przyczepności w środowisku klasy XC1.

Dzięki dogłębnej analizie statycznej i dynamicznej wytypowanego stropu AG-25 oraz zdobytemu przy tym doświadczeniu, możliwe było podanie wskazówek dla konstruktorów w odniesieniu do projektowania podobnych konstrukcji.

Podając wskazówki dla konstruktorów, które mogą być przydatne przy opracowywaniu projektów płaskich stropów sprężonych kablami bez przyczepności, zwrócono m.in. uwagę na:

- szczególne przypadki w wymiarowaniu przekrojów z wkładami w betonie,
- unikanie trasowania kabli (w rzucie) w obrębie przekroju słupa,

- stosowanie obustronnego naciągu kabli w stropach o stosunkowo dużych wymiarach w rzucie,
- sprzężenie równoważące nie tylko ugięcie płyty od obciążeń stałych, lecz również części obciążeń zmiennych (np. quasi - stałych), pozwalające na zredukowanie nakładów prac szalunkowych związanych z wykonaniem strzałki odwrotnej płyty,
- odpowiednie trasowanie kabli (w nawiązaniu do poprzedniej wskazówki), zapewniające ograniczenie nie tylko ugięć stropu w dół ale również ugięć w górę,
- stosowanie wczesnego (przeciwskurczowego) sprzężenia,
- zabiegi technologiczne związane z sukcesywnym wprowadzaniem sprzężenia do konstrukcji,
- możliwość wyeliminowania strat od poślizgu w zakotwieniu (szczególnie przydatne w przypadku stosowania krótkich kabli) poprzez zastosowanie specjalnych elementów kotwiących firmy Freyssinet,
- konieczność sprawdzenia wpływów efektów teorii drugiego rzędu w wymiarowaniu (w przypadku stropów o dużych rozpiętościach) oraz z tym związanego, ewentualnego zwiększenia przekroju zbrojenia zwykłego w najbardziej wyteżonych przekrojach płyty,
- unikanie nadmiernej koncentracji kabli przy swobodnym trasowaniu, w środkowych obszarach pól stropu,
- konieczność przeprowadzania monitoringu w fazach wykonawczych - w celu skonfrontowania wyników obliczeń ugięć z rzeczywistymi odkształceniami konstrukcji, jak również w czasie użytkowania - pozwalającego na wczesne rozpoznanie symptomów ewentualnej nieprawidłowej pracy stropu oraz podjęcie odpowiednich środków technicznych, zabezpieczających konstrukcję przed wystąpieniem szkód.

Starano się w rozprawie kompleksowo przeanalizować i przedstawić wnioski w odniesieniu do problemów projektowania i wykonywania stropów płaskich, sprzężonych kablami bez przyczepności, z ukierunkowaniem na zastosowania takich konstrukcji, przy wykorzystaniu aktualnych możliwości technicznych. Wskazano przy tym nowe możliwości obliczania tego rodzaju konstrukcji za pomocą standardowego oprogramowania do liniowo-sprężystych analiz statycznych, bazujących na metodzie elementów skończonych (MES) – otwiera to możliwości działania w tym zakresie przed niewielkimi jednostkami projektowymi, niedysponującymi kosztownym i niełatwym w obsłudze oprogramowaniem do prowadzenia obliczeń nieliniowych, bazujących na czasochłonnej procedurze iteracyjno-przyrostowej.