Aktualny stan technologii sprężania i podwieszania konstrukcji

Instytucją o największym, ogólnoświatowym zasięgu w zakresie budownictwa betonowego jest Międzynarodowa Federacja Betonu (*fib*), a jedna z działających w jej ramach Komisji zajmuje się technologiami zbrojenia, sprężania, a także podwieszania konstrukcji (*fib* Commission 9 „Reinforcing and prestressing materials and systems”).

Wstęp

Technologia sprężania monolitycznego betonu ewoluuje nieprzerwanie od czasu, kiedy uważany powszechnie za jej twórcę Eugene Freyssinet zaproponował sposób kotwienia wiązki drutów z wysokowytrzymałej stali wciskanym w korpus zakotwienia betonowym stożkiem. Istniało wiele pomysłów wprowadzania siły sprężającej do konstrukcji betonowych, które z czasem ustępowały miejsca innym, skuteczniejszym. Po latach w praktycznym zastosowaniu pozostały w zasadzie jedynie trzy rodzaje cięgien. Dwa z nich mają charakter raczej niszowy do zastosowań specjalnych. Są to kable z wiązki równoległych drutów średnicy 7 mm spęczonych na końcach i cięgna prętowe kotwione gwintowanymi nakrętkami. Dominującą technologią i powszechnym standardem sprężania konstrukcji są obecnie cięgna składające się z wiązki siedmiodrutowych splotów (w szczególnym przypadku jednosplotu – tzw. monostrand) kotwionych trójdzielnymi klinowymi szczękami. To rozwiązanie podlega kolejnym udoskonaleniom, które jednak nie są już łatwo zauważalne dla użytkowników. Wprowadzane przez specjalistyczne firmy optymalizacje są oceniane przez niezależne instytucje badawczo-kontrolne, które decydują o ich przydatności do sprężania nowoczesnych konstrukcji.

Systemy sprężania nie są objęte przepisami normowymi. W Unii Europejskiej obowiązują dla nich Aprobaty Techniczne (ETA). Wydawanie aprobat jest częścią realizacji dyrektywy Rady EWG (z 1988 r.) w sprawie zbliżenia ustaw i aktów wykonawczych państw członkowskich. Aprobaty są udzielane na podstawie wytycznych ETAG 013 (Guideline for European Technical Approval) z 2002 roku. Dokument ETA zawiera informacje, które mogą być potrzebne użytkownikom na każdym etapie procesu powstawania budowli – od projektu do ostatecznego odbioru. Wymogi obowiązujących obecnie aprobat oparte są na założonym 100-letnim okresie użytkowania cięgien. Aprobaty zawierają wytyczne zarówno do projektowania jak i instalowania systemów sprężania. Stanowią pomoc merytoryczną nie tylko dla projektantów i wykonawców, ale także dla organizacji nadzoru i kontroli procesu budowlanego. Broszury informacyjno-techniczne

wydawane przez specjalistyczne firmy zawierają zwykle najważniejsze informacje zawarte w aprobatach i, co istotne, nie mogą być z nimi sprzeczne ani zmieniać ich zapisów. Aprobaty definiują wymagania dotyczące każdego z zastosowanych w systemie materiałów. Finalny produkt, którym jest cięgno sprężające oceniany jest pod kątem zgodności z aprobatą, którą poświadcza oznaczenie znakiem CE. Poszczególne elementy systemu mają jedynie promesę tego oznaczenia, które jest wydawane po zakończeniu wszystkich czynności związanych ze sprężeniem konstrukcji i dopełnieniu wszystkich wymaganych procedur. Wynika z tego, że stosowanie systemu sprężania wymaga odpowiednich poświadczonych kwalifikacji i nie może być wykonane przez podmioty nieuprawnione. Wytyczne europejskie wymagają odpowiedniego certyfikatu „Post Tensioning Specialist Company", który wystawia właściciel systemu uprawnionemu wykonawcy na podstawie załącznika D.1 ETAG 013 oraz przepisu CWA 14646. W Polsce nie wdrożono dotychczas jednoznacznych przepisów regulujących uprawnienia do wykonywania prac sprężalniczych.

Kable sprężające do sprężania wewnętrznego z przyczepnością

Przez sprężenie wewnętrzne rozumie się rozwiązanie, w którym kable przebiegają wewnątrz przekroju betonowego, który je otacza. Kable mogą osiągać wysoką nośność, co czyni je szczególnie użytecznymi w budownictwie mostowym i w innych wielkogabarytowych konstrukcjach inżynierskich.
Podstawowy system kabli tego typu oferowany przez wiodące firmy obejmuje zwykle typoszereg kabli od 4 do nie mniej niż 31 splotów – nośność największego z nich przekracza 8 500 kN.
Niektóre firmy oferują kable większe, złożone nawet z 61 splotów (nośność blisko 15 000 kN) przeznaczone do zastosowań specjalnych. Tak duże kable do zastosowań np. w energetyce jądrowej wymagają przeprowadzenia odpowiednich wszechstronnych testów. Odpowiedni program badawczy można zrealizować jedynie w nielicznych wyspecjalizowanych laboratoriach dysponujących odpowiednim sprzętem.

Na system kabli składają się następujące jego komponenty:

- cięgno składające się z od 4 do 31 lub więcej splotów 7-drutowych o nominalnej średnicy od 15,3 do 15,7 mm i wytrzymałości na rozciąganie 1860 N/mm^2
- zakotwienie ze szczękami kotwiącymi; mogą to być zakotwienia końcowe lub łączniki stałe bądź ruchome
- płyta oporowa
- spirale i dodatkowe zbrojenie ze stali miękkiej w obszarze zakotwienia
- środki ochrony antykorozyjnej dla cięgien i zakotwień.

Zbrojenie miękkie strefy zakotwienia zdefiniowane w aprobacie należy rozumieć jako wymóg minimalny. Projektant może je określić inaczej z zachowaniem zasady ekwiwalentności. Specyfikację zabezpieczenia antykorozyjnego uszczegółowia norma EN 447. Ważne elementy jakimi są osłonki kabli nie są wg ETA komponentem systemu. W przypadku osłonek metalowych aprobata odsyła do normy EN 523, a osłon z tworzyw sztucznych do załącznika C.3. ETAG 013.
Kable wewnętrzne umieszczane są zwykle ciasno w przekroju sprężanej konstrukcji. Ważnym zagadnieniem jest więc określenie minimalnych odstępów osiowych pomiędzy zakotwieniami kabli oraz ich minimalnego odstępu od krawędzi konstrukcji. To właśnie tu najlepiej widać stały postęp techniczny. Optymalizacja zakotwień powiązana jest z wytrzymałością sprężanego betonu. W toku badań aprobacyjnych testowane są próbki wykonane z różnych klas betonu. W wyniku tych badań określone są minimalne wymiary zakotwień i otaczającego je betonu konstrukcji w funkcji jego wytrzymałości.

Kable koncentryczne do sprężania zewnętrznego

Kable zewnętrzne wg definicji ETAG to cięgna, które prowadzone są poza przekrojem poprzecznym, ale wewnątrz obrysu konstrukcji, np. przekroju skrzynkowego konstrukcji mostowej. Mogą być prowadzone wzdłuż środników belek, ale również w obrysie sprężanej konstrukcji. Program testów, jakimi kable zewnętrzne są poddane w procesie aprobacyjnym nie przewiduje bowiem badań pod obciążeniami takimi jak wiatr, deszcz i inne czynniki zewnętrzne, na jakie są narażone kable prowadzone poza konstrukcją. ETAG 013 wyklucza możliwość stosowania kabli zewnętrznych w rozumieniu definicji cytowanej wyżej do celów podwieszenia. Komisja 9 *fib* powołała grupę roboczą TG 9.14, która opracowuje dokument pod nazwą

„Kable zewnętrzne dla mostów”. Prace nad dokumentem, który podsumowuje najnowsze doświadczenia i określa wytyczne w tej dziedzinie, są na ukończeniu.
W przypadku kabli zewnętrznych standardowy typoszereg obejmuje na ogół cięgna od 4 do 31 splotów. Nie przewidziano przyjmowania kabli większych, gdyż ich użyteczność byłaby ograniczona, a niektóre przepisy krajowe np. w Niemczech wręcz nie dopuszczają ich do stosowania. Zestaw komponentów systemowych jest podobny jak w przypadku kabli wewnętrznych (nie zawiera łączników ruchomych), różne są jednak rury osłonowe, najczęściej z tworzyw sztucznych zgodnie z EN 12201 lub stali.
Specyficzną cechą sprężenia zewnętrznego jest konieczność stosowania dewiatorów odchylających projektowaną trasę kabli. Zadaniem dewiatorów jest przeniesienie sił poprzecznych i podłużnych (stycznych) z cięgna na konstrukcję. Prawidłowo zaprojektowany musi zapewnić minimalny promień gięcia kabla i ukształtowanie zapobiegające załamaniu cięgna na jego krawędzi. Dewiator może być wykonany z betonu, stali lub innego materiału. Może być pojedynczy, jeśli stanowi część osłony kabla, lub podwójny, kiedy jest od niej niezależny. Podstawową ochronę antykorozyjną stanowi zaczyn cementowy, ale można także stosować trwale plastyczne woski lub smary.
Przepisy przewidują możliwość doprężania kabli zewnętrznych związane ze zwolnieniem i ponownym zaciśnięciem szczęk kotwiących. W takim przypadku szczęki muszą być wciśnięte w nienaruszoną powierzchnię splotu na odcinku przynajmniej 15 mm. Niedopuszczalne jest pozostawienie odcisków szczęk na wolnej długości splotu pomiędzy zakotwieniami.

Systemy podwieszeń

Współczesne cięgna służące do podwieszania mostów i innych budowli są konstruowane z wykorzystaniem doświadczeń zdobytych w technologii sprężania.
Mimo, że podstawowa zasada konstrukcyjna najczęściej stosowanych systemów jest taka sama jak w przypadku systemów sprężania, stosowanie lin do podwieszeń jest regulowane innymi przepisami. Inny, znacznie bardziej skomplikowany jest charakter ich pracy i odpowiednie szczegółowe rozwiązania konstrukcyjne.
Systemy nie podlegają normom, a także postępowaniu aprobacyjnemu w rozumieniu przepisów europejskich, ani innych wiodących krajów (USA, Japonia). W Komisji Europejskiej jest wprawdzie planowane opracowanie wytycznych (ETAG) niezbędnych do wprowadzenia Europejskich Aprobat, jednak nie nastąpi to prawdopodobnie jeszcze w najbliższej przyszłości. Podstawowym dokumentem odniesienia o zasięgu ogólnoświatowym dla systemów kabli podwieszających jest Biuletyn 30 *fib* z roku 2005 definiujący kryteria ich akceptacji.
Z formalnego punktu widzenia Biuletyn 30 (podobnie jak zbliżone merytorycznie amerykańskie rekomendacje PTI czy francuskie Setra) stanowi jedynie rekomendację dla inwestorów, projektantów i wykonawców systemów podwieszania. Jednak spełnienie określonych w nim kryteriów kwalifikacyjnych systemów decyduje o ich dopuszczeniu do stosowania w większości projektów na całym świecie. W szczególności dotyczy to testów poszczególnych komponentów oraz kompletnych kabli.

Wstępne badania kwalifikacyjne systemu podwieszenia wg Biuletynu 30 obejmują:

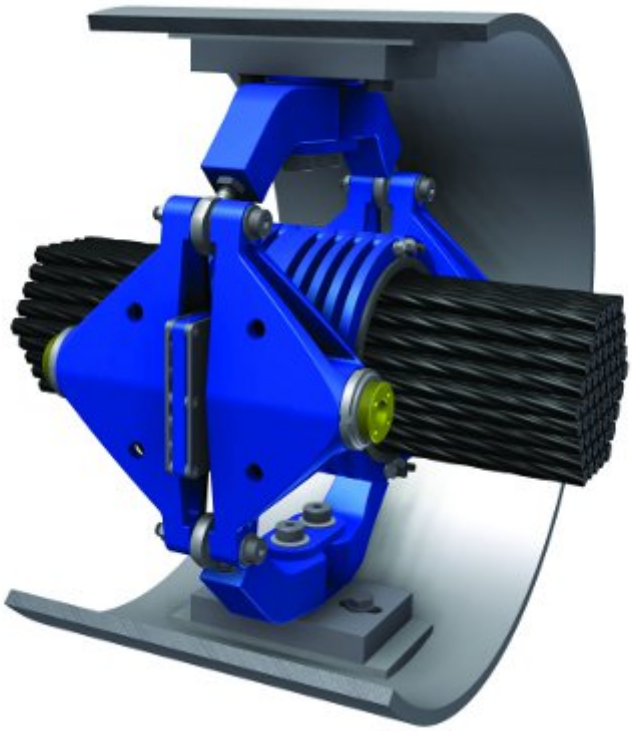
- statyczną i dynamiczną próbę rozciągania kompletnych wyposażonych w systemowe zakotwienia kabli typowych wielkości (najmniejszego, średniego i największego w systemie)
- statyczny i dynamiczny test siodła, jeśli system przewiduje takie rozwiązanie
- test szczelności kabla
- testy zabezpieczeń antykorozyjnych.

Fot. 1. Warianty zakotwień wantowych z dewiatorem w obudowie

Fot. 2. Warianty zakotwień wantowych z dewiatorem na wolnej długości liny

Fot. 3. Warianty zakotwień wantowych z tłumikiem drgań

Kable potrzebne do podwieszenia współczesnych mostów o spektakularnych rozpiętościach przęseł muszą być projektowane na nośność znacznie większą niż kable do sprężania. W niektórych systemach osiągają nośność rzędu 60 000 kN, co wymaga zastosowania wiązki zawierającej nawet powyżej 200 splotów. Tak duża liczba splotów wymaga budowy zakotwień o odpowiednio dużej średnicy, a w konsekwencji konieczność stosowania specjalnych dewiatorów redukujących średnicę wiązki na wolnej długości kabla. Dewiatory mogą być umieszczone w obudowie zakotwienia lub poza nią. Poza redukcją średnicy wiązki splotów wychodzących z zakotwienia dewiatory pełnią w pewnym zakresie funkcję tłumienia drgań. W przypadku szczególnie dużych obciążeń dynamicznych na wiązkę splotów nakładane są dodatkowe elementy tłumiące. Do tego celu stosuje się tłumiki o różnej konstrukcji, hydrauliczne, tarciowe lub wizkotyczne (lepkościowe). Tłumiki muszą zapewniać efektywność (logarytmiczny dekrement tłumienia) nie mniejszą niż wynikająca z charakterystyki możliwych wibracji określonej w projekcie mostu. Ze względu na często grożący dużym mostom podwieszonym fenomen wzbudzenia wiatrowo-deszczowego (tzw. galoping), rury osłonowe długich kabli wyposaża się w spiralne żeberka skutecznie redukujące to zagrożenie.



Fot. 4. Przykład rozwiązania tłumika drgań

Coraz większą popularnością cieszą się w ostatnich latach konstrukcje mostów extradosed, charakteryzujące się większą sztywnością pomostu i niższymi pylonami niż typowe mosty podwieszone. Stosowane w nich liny są obciążone dynamicznie w mniejszym stopniu niż w dużo bardziej wiotkich konstrukcjach podwieszonych. Granica pomiędzy konstrukcjami podwieszonymi i extradosed bywa trudna do zdefiniowania dlatego zdecydowano nie rozróżniać kryteriów kwalifikacji systemów podwieszeń dla obydwu typów konstrukcji.

W pracach Komisji 9 *fib* zmierzających do uaktualnienia Biuletynu 30, przyjęto odpowiednio następujące założenia:

- cięgnom do podwieszania mostów stawia się najwyższe wymagania według dzisiejszego stanu techniki tak, by zapewniały bezpieczeństwo każdego typu konstrukcji
- jeżeli parametry techniczne cięgien podwieszających przewyższają wymagania dla innych konstrukcji np. extradosed, można zwiększyć dopuszczalny obliczeniowy poziom wykorzystania naprężeń.

Odpowiednio nowe wytyczne *fib* będą odnosić się do systemów lin stosowanych dla szerokiej kategorii mostów, określanych w proponowanej terminologii angielskiej łącznie „cable supported bridges” czyli mosty podtrzymywane linami.

mgr inż. Jan Piekarski
Polska Grupa *fib*

Literatura

1. ETA – 06/0147 Bonded Post-tensioning System
2. ETA – 07/0168 External Post-tensioning System with Flat Anchorages
3. ETA – 06/0165 Unbonded Tensioning System
4. ETA – 10/0065 Unbonded Band Post-Tensioning System
5. Acceptance of stay cable systems using prestressing steels, Recommendations *fib* Bulletin 30, January 2005