

Kablobetonowe belki podsuwnicowe po 50 latach eksploatacji

XXVI Konferencja Naukowo-techniczna awarie budowlane 2013

Dr inż. Wit Derkowski, mgr inż. Piotr Sokal, dr inż. Stanisław Kańka, dr inż. Teresa Stryszewska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach wiele przedsiębiorstw przemysłowych przeprowadza procesy modernizacyjne polegające na wprowadzaniu nowoczesnych technologii oraz nowych maszyn i urządzeń. Niejednokrotnie, w związku ze zmianą profilu produkcji pojawia się konieczność zwiększenia udźwigu suwnic zainstalowanych w halach.

Duża część istniejących w Polsce hal przemysłowych wybudowana została w technologii betonu prefabrykowanego w latach 60. ubiegłego stulecia. Biorąc pod uwagę dobiegający już końca okres projektowanej trwałości tych obiektów, powstaje pytanie o bezpieczeństwo dalszego użytkowania tych konstrukcji, a w szczególności ich elementów sprężonych, takich jak belki podsuwnicowe czy dźwigary dachowe. Określenie możliwości ewentualnego dociążenia konstrukcji bywa często dodatkowo utrudnione z uwagi na brak dokumentacji projektowej, zazwyczaj wynikający z licznych zmian organizacyjnych i własnościowych w ostatnich dziesięcioleciach.

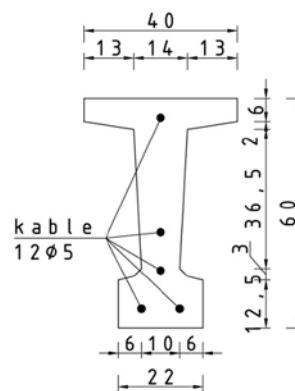
2. Opis badań

Badania czterech prefabrykowanych, kablobetonowych belek podsuwnicowych, zdemontowanych z hali przemysłowej, w której prowadzona jest obróbka węgla przeprowadzono w akredytowanym Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Wydziału Inżynierii Łądowej Politechniki Krakowskiej, na zlecenie Inwestora zainteresowanego zwiększeniem udźwigu większej z suwnic do 12,5 t. Pierwotnie w hali tej, w każdej z naw, znajdowały się dwie suwnice – jedna o udźwigu 3,5 t, druga – 5,0 t. W roku 2004 dopuszczono zwiększenie udźwigu suwnic, odpowiednio do 5,0 t i 8,0 t, a w 2008 roku kolejna ekspertyza wykazała możliwość montażu suwnic o udźwigu 8,0 t i 10,0 t. Dodać należy, że Inwestor nie posiada żadnej dokumentacji projektowej dla analizowanego budynku.

Przed przystąpieniem do zasadniczych badań belki poddano szczegółowym oględzinom. Na podstawie inwentaryzacji geometrycznej (przekrój poprzeczny belki przedstawiono na rysunku 1) stwierdzono, że od-

powiadają one elementom zaprojektowanym przez BISTYP i są najbliższe typowi KBP/60/6 [1]. Na górnej powierzchni półki górnej belek pozostały odcisnięte w betonie daty produkcji poszczególnych belek (od 1 VII 1962 r. do 13 VII 1963 r.).

Każda belka sprężona została pięcioma prostoliniowymi kablami 12 ϕ 5 mm. Stalowe bloki kotwiące kable sprężających (zakotwienia stożkowe ze stalowym stożkiem kotwiącym), usytuowane na czołach belek, nie posiadały żadnych zabezpieczeń antykorozyjnych i w całym okresie użytkowania pozostawały odsłonięte. Zakotwienia oraz wystające poza nie druty sprężające pokryte były od zewnątrz nalotem korozyjnym (fot. 1). Nie stwierdzono żadnych ubytków drutów sprężających w blokach kotwiących. We wszystkich zakotwieniach, przy stożkach kotwiących, widoczne były ślady stwardniałego zaczynu iniekcyjnego. W żadnej z belek, ani na ich długości, ani w strefach zakotwień kable sprężających, nie stwierdzono zarysowań, ani śladów lokalnego miażdżenia lub większych ubytków betonu.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny belki



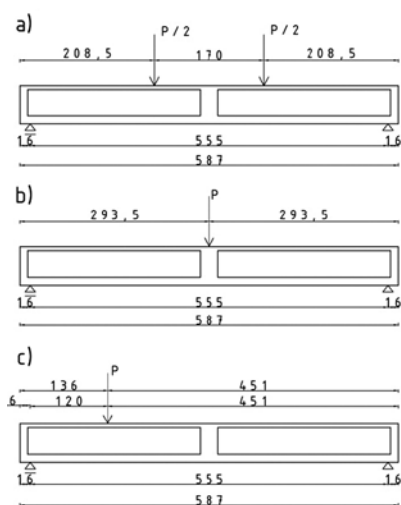
Fot. 1. Widok bloków kotwiących kable sprężających

Badania rysoodporności oraz nośności belek poddanych zginaniu i ścinaniu zrealizowano przy trzech różnych sposobach obciążenia (rys. 2). Dwie belki (BP-1, BP-2) badano w schemacie czteropunktowego zginania; belkę BP-3 w schemacie typowego trójpunktowego zginania (odpowiada sytuacji, gdy jedno z kół suwnicy znajduje się w środku rozpiętości belki, a drugie zlokalizowane jest już na sąsiedniej belce); belkę BP-4

w klasycznym schemacie ścinania, w którym siła skupiona znajdowała się w odległości 120 cm (dwie wysokości przekroju) od osi podpory. Badania te realizowano w dwóch etapach:

- I etap – stopniowe obciążanie belki do momentu pojawienia się widocznych zarysowań, po czym odciążenie i montaż czujników szerokości rozwarcia rys;
- II etap – monotoniczne, ciągłe obciążenie belki do zniszczenia elementu, przy stałej prędkości wysuwu tłoka siłownika.

W trakcie badań rejestrowane były w sposób ciągły następujące wielkości: czas obciążenia, siła obciążająca, odkształcenia betonu w wybranych miejscach, przemieszczenia oraz szerokości rozwarcia rys w wybranych miejscach.



Rys. 2.
Schematy obciążenia belek:
a) BP-1, BP-2,
b) BP-3, c) BP-4



Fot. 2.
Widok kanału kablowego wypełnionego iniekcją

Dokładne oględziny belek po zakończeniu badań niszczących wykazały, iż kanały kablowe nie posiadały osłonek, a stal sprężająca była szczelnie otulona zaczynem cementowym (fot. 2). W żadnym z odsłoniętych miejsc nie stwierdzono śladów korozji cięgien sprężających ani zbrojenia zwykłego belek.

W ramach badań dodatkowych określono wytrzymałości i moduły sprężystości poszczególnych materiałów oraz przeprowadzono analizę chemiczną betonu i zaczynu iniekcyjnego.

Na potrzeby badań wytrzymałościowych pobrano ze zniszczonych belek fragmenty prętów zbrojenio- wych i drutów sprężających. Ze środników belek pobierano odwierty o średnicy 100 mm techniką wiercenia koronowym wiertłem diamentowym – w ten sposób otrzymywano rdzenie betonowe, które przed badaniem docinano i szlifowano w celu uzyskania gładkich i równoległych płaszczyzn.

Do badań chemicznych, z badanych belek pobrano próbki betonu w postaci zwiercin z różnych warstw głębokości, tj. 0–0,5 cm, 0,5–1 cm, 1–2 cm i 2–3 cm, oraz próbki iniekcji cementowej kanałów kablowych. Zakres tych badań obejmował określanie odczynu (pH) oraz oznaczenie zawartości jonów siarczanowych i chlorkowych metodą spektrofotometryczną. Przeprowadzono również obserwację w mikroskopie skaningowym warstw wierzchnich, a także zidentyfikowano w badaniach rentgenostrukturalnych fazy krystaliczne obecne w przedmiotowym betonie.

3. Wyniki przeprowadzonych badań

Zniszczenie elementów BP-1, BP2 i BP-3 nastąpiło przez ścięcie ukośne belki, przebiegające od punktu przyłożenia obciążenia, w kierunku podpory. W przypadku belek BP-1 i BP-2 główna rysa ukośna nachylna była pod kątem 35–40°, a w belce BP-3 rysa, przez którą nastąpiło zniszczenie, miała nachylenie ok. 37°. Ścięcie środnika belek, połączone z zerwaniem najbardziej wyężonych strzemion powodowało znaczny przyrost ugięcia, wykruszanie się fragmentów półki dolnej i następnie stosunkowo nagłe zniszczenie półki górnej, natomiast w żadnym przypadku nie osiągnięto gwałtownego, niesygnalizowanego zniszczenia badanego elementu.

Zniszczenie elementu BP-4 nastąpiło przez zmiażdżenie (utrata wytrzymałości na ściskanie) betonu w wyodrębnionym krzyżulcu betonowym nachylonym do osi belki pod kątem ok. 35° i następnie miażdżenie betonu półki górnej, w punkcie przyłożenia obciążenia (fot. 3). Również ten model zniszczenia poprzedzony był wcześniejszym rozwojem zarysowań i widocznym przyrostem ugięć.



Fot. 3. Widok miażdżonego krzyżulca betonowego, tuż przed utratą nośności belki

Tabela 1. Obciążenia wywołujące zarysowanie belek podsuwnicowych

Oznaczenie belki	Obciążenie powodujące zarysowanie [kN]	Moment rysujący M_{cr} [kNm]
BP-1	265	255
BP-2	290	279
BP-3	190	264
BP-4	310	292 ($V_{cr} = 243$ kN)

W żadnej z przebadanych belek nie doprowadzono do zerwania cięgien sprężających, ani uszkodzenia zakotwienia któregośkolwiek z kabli.

W tabeli 1 zestawiono dla poszczególnych belek wielkości obciążeń wywołujących pierwsze zarysowanie i wynikające z nich wartości momentów rysujących (w przypadku belki BP-4 podano wielkość siły poprzecznej wywołującej zarysowanie). Wartości sił przekrojowych zostały określone obliczeniowo. Przy ich wyznaczaniu,

Tabela 2. Siły wewnętrzne wywołujące zarysowanie o średniej szerokości 0,2 mm, ugięcia przy zarysowaniu 0,2 mm oraz maksymalne ugięcia i średnie szerokości rozwarcia rysy w momencie osiągnięcia nośności badanych belek

Oznaczenie belki	Moment zginający wywołujący rysę o szer. 0,2 mm [kNm]	Ugięcie w chwili osiągnięcia rysy 0,2 mm [mm]	Maksymalne ugięcie przy obciążeniu niszcącym [mm]	Szerokość rysy przy obciążeniu niszcącym [mm]
BP-1	304	9,9	50,9	0,77
BP-2	355	11,5	62,5	1,22
BP-3	329	7,4	35,9	0,81
BP-4	311 ($V = 259$ kN)	3,4	35,5	0,81

Tabela 3. Siły wewnętrzne wywołujące zarysowanie o średniej szerokości 0,2 mm, maksymalne ugięcia i średnie szerokości rozwarcia rysy w momencie osiągnięcia nośności badanych belek

Oznaczenie belki	Obciążenie niszczące [kN]	M_{max} [kNm]	V_{max} [kN]
BP-1	631	607	315
BP-2	668	643	334
BP-3	410	569	205
BP-4	548	516	430

Tabela 4. Wyniki badań właściwości mechanicznych poszczególnych materiałów składowych belek

Badana właściwość mechaniczna	Wartości charakteryzujące badaną właściwość
wytrzymałość betonu na ściskanie próbki $\phi = h = 100$ mm ($n=8$) badanie wg PN-EN 12390-3	wartość minimalna: $f_{is} = 51,6$ MPa wartość średnia: $f_{m(8),is} = 56,7$ MPa wartość charakterystyczna: $f_{ck,is} = 50,7$ MPa (wg PN-EN 13791)
wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu próbki $\phi = h = 100$ mm ($n=4$) badanie wg PN-EN 12390-7	wartość minimalna: $f_{is} = 3,25$ MPa wartość średnia: $f_{m(4),is} = 4,13$ MPa
moduł sprężystości betonu przy ścisnieniu próbki $\phi = 100$, $h = 200$ mm ($n=4$) badanie wg Instrukcji ITB nr 194/98	wartość minimalna: $E = 29,6$ GPa wartość średnia: $E = 31,2$ GPa
statyczna próba rozciągania stali zbrojeniowej p próbki $\phi = 12$ mm, $l = 350$ mm ($n=8$) badanie wg PN-EN ISO 6892-1	granica plastyczności: $f_y = 271$ MPa wytrzymałość: $f_t = 360$ MPa odkształcenie: $\epsilon_u = 21,10\%$
statyczna próba rozciągania stali sprężającej próbki $\phi = 5$ mm, $l = 350$ mm ($n=12$) badanie wg PN-EN ISO 6892-1	umowna granica plastyczności: $f_{0,2} = 1468$ MPa wytrzymałość: $f_t = 1752$ MPa odkształcenie: $\epsilon_u = 2,73\%$

poza wielkością obciążenia zewnętrznego wytwarzanego przez siłownik, uwzględniono ciężar własny belki, a w przypadku belek BP-1 i BP-2 również ciężar własny stalowego trawersu. Niezbędne do obliczeń rozstawy podpór i odległości między osią podpory a miejscem przyłożenia zewnętrznej siły skupionej mierzono w każdej z belek tuż przed rozpoczęciem badania.

W tabeli 2 zestawiono wielkości momentów zginających (a dla belki BP-4 również siły poprzecznej), wywołujących w II etapie badania zarysowanie o średniej szerokości rozwarcia równej 0,2 mm (graniczna wartość zarysowania dla konstrukcji sprężonych, określona przez EC-2 [2]) i odpowiadające im ugięcia, a także wielkości maksymalnego ugięcia i średniej szerokości rozwarcia rysy w momencie osiągnięcia nośności elementu.

W tabeli 3 zestawiono wielkości obciążeń wywołujących zniszczenie elementu i wynikające z nich wartości momentów zginających i sił poprzecznych (nośności elementów).

Szczegółowa inwentaryzacja zbrojenia zwykłego belek, wykonana po badaniach nośności wykazała, że zarówno pręty podłużne, jak i strzemiona zostały wykonane ze stali gładkiej. Półki górne zbrojone były 4 prętami podłużnymi o średnicy $\phi 12$ mm, natomiast półki dolne – 4 prętami $\phi 8$ mm. Strzemiona wykonano z prętów $\phi 8$ mm (w środkach belek), $\phi 6$ mm (w półkach górnych) i $\phi 4,5$ mm (w półkach dolnych). W jednym miejscu stwierdzono strzemień z pręta o średnicy $\phi 12$ mm. Lokalizację strzemion, poza widocznymi odsłonięciami

prętami w miejscach zniszczenia, określono za pomocą femetru. Stwierdzono bardzo duże nieregularności w rozstawie strzemion, wahające się od 10 cm do nawet 45 cm. Określono następujące średnie rozstawy strzemion w poszczególnych belkach: 15, 25, 23 i 20 cm. Podstawowe charakterystyki badań właściwości mechanicznych poszczególnych materiałów pobranych z belek wraz z ich wynikami zestawiono w tabeli 4.

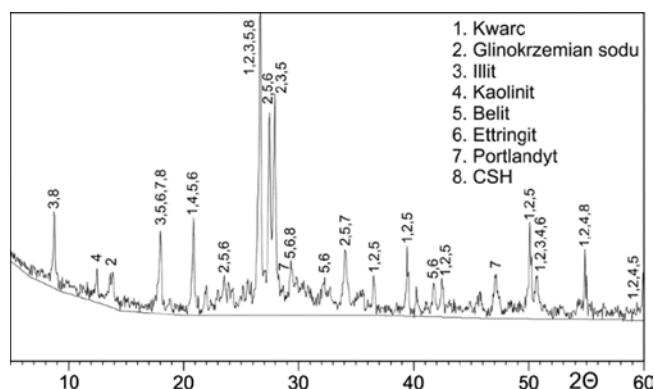
Na podstawie przeprowadzonych badań chemicznych wyznaczono pH zacyznu iniekcyjnego otaczającego cięgną sprężającą oraz betonu w warstwach zewnętrznych belek. Otrzymane wyniki wskazują na wysoko alkaliczny odczyn betonu, który we wszystkich próbkach niezależnie od głębokości pobrania materiału, kształtuje się na poziomie $12,3 \div 12,6$. Na nieco wyższym poziomie, tj. $12,5 \div 12,6$ kształtuje się odczyn zacyznu iniekcyjnego. Tak wysokie pH gwarantuje zarówno pasywację stali zbrojeniowej, jak i kabli sprężających, i efektywnie zabezpiecza te materiały konstrukcyjne przed korozją. Pomimo wieloletniego okresu eksploatacji beton nie uległ karbonatacji ze względu na obecność na jego powierzchni grubej (około kilkunastomilimetrowej) warstwy pyłów i zanieczyszczeń, która stanowiła barierę przed dostępem dwutlenku węgla obecnego w powietrzu. Drugim istotnym czynnikiem była mała wilgotność powietrza w miejscu użytkowania belek.

Wykonano również badania w mikroskopie skaningowym warstw wierzchnich. Obserwacje mikroskopowe wraz z analizą EDS (fot. 4) potwierdziły brak obecności węglanu wapnia i wodorowęglanu wapnia. Świadczy to o braku postępu karbonatacji.

Z betonu pobranego z warstwy 0–1 cm i 1–3 cm przygotowano próbki do badania rentgenostrukturalnego. Otrzymane wyniki nie wskazują na jakiegokolwiek różnicę występującą między próbkami betonu pobranego z różnych głębokości. Ujednolicony dyfraktogram dla obu próbek przedstawiono na rysunku 3.

W stwardniałym spoiwie cementowym przedmiotowego betonu obecne są takie fazy jak: portlandyt ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ziarna niezhydratyzowanego belitu, ettringit i krystaliczne formy fazy CSH. Należy zwrócić uwagę na fakt, że nie stwierdzono obecności węglanu wapnia, który jest głównym produktem karbonatacji betonu. Z kolei obecność

krystalicznych form, takich jak wodorotlenek wapnia i ettringit pierwotny świadczy o bardzo dobrym stanie betonu. Na szczególną uwagę zasługuje jednak obecność niezhydratyzowanych ziaren belitu. Są to tzw. relikty cementu, które są prekursorami samozaleczania betonu oraz stanowią źródło ciągłego przyrostu wytrzymałości spoiwa, w wyniku opóźnionej hydratacji [3].



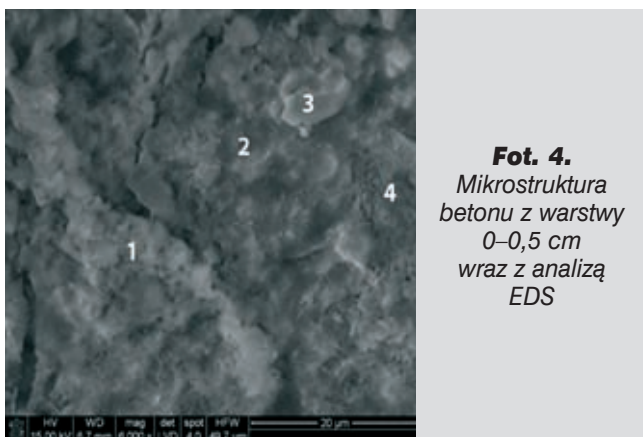
Rys. 3. Dyfraktogram badanych betonów wraz z opisem faz krystalicznych

Dla każdej wydzielonej warstwy betonu oraz próbek materiału iniekcyjnego wykonano analizę chemiczną metodą spektrofotometryczną, której celem było określenie zawartości jonów siarczanowych i chlorkowych. Wyniki analizy chemicznej wykluczyły również możliwość procesów korozji wywołanej działaniem jonów siarczanowych. Zawartość tych jonów w badanych próbkach betonu w zasadzie nie przekracza 3% masy spoiwa, która wynika ze składu cementu. Natomiast zawartość jonów chlorkowych w betonie w warstwach powierzchniowych stref przypodporowych belek BP-3 i BP-4 wynosi niepełna 0,2% masy spoiwa i jest ona dla betonu w konstrukcjach sprężonych dopuszczalna. Zawartość jonów chlorkowych w iniekcyjnym zacyznie cementowym wynosi średnio 0,08% masy spoiwa i nie przekracza wartości dopuszczalnej 0,15%. Obserwacje makroskopowe powierzchni stali zbrojeniowej oraz kabli sprężających wykonane przy użyciu mikroskopu optycznego nie wykazały korozji żadnego z tych materiałów.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych czterech kablobetonowych belek podsuwnicowych, eksploatowanych przez 50 lat w warunkach przemysłowych, oraz obliczeń statyczno-wytrzymałościowych wykonanych zgodnie z obecnie obowiązującymi w Polsce normami, można sformułować następujące wnioski:

– oględziny cięgien sprężających, odsłoniętych w miejscach zniszczenia belki wykazały, że choć kanały kablowe nie posiadały osłonek, to cięgną sprężające były szczelnie otulone zacyznie cementowym gwarantującym ochronę antykorozyjną stali sprężającej i jej przy-



Fot. 4. Mikrostruktura betonu z warstwy 0–0,5 cm wraz z analizą EDS

czepność do przekroju betonowego belki. Odstonięta stal sprężająca, jak i stal zwykła były czyste, bez żadnych śladów korozji;

- z punktu widzenia właściwości chemicznych, można stwierdzić, że zarówno w betonie, jak i w zaczynie iniekcyjnym nie stwierdzono śladów karbonatyzacji ani nie zaszły żadne procesy korozji chlorkowej lub siarczanowej, a materiały te nie utraciły pierwotnych, „zdrowych” właściwości;

- modele zniszczenia uzyskane w badaniach belek związane były z utratą nośności na ścinanie. W przypadku belki obciążonej jedną siłą skupioną, położoną blisko podpory, utrata nośności nastąpiła w wyniku zmiądzenia ściskanego krzyżulca betonowego. W pozostałych belkach zniszczenie nastąpiło w postaci zerwania najbardziej wyłożonych strzemion;

- w żadnej z badanych belek nie doprowadzono do zerwania cięgien sprężających ani uszkodzenia zakotwienia któregośkolwiek z kabli;

- we wszystkich badanych belkach utrata nośności nie następowała w sposób nagły, a była znacznie wcześniej sygnalizowana przez widoczny rozwój zarysowań i ugięć. Pierwsze rysy w belkach zginanych pojawiały się przy wielkościach momentów rysujących wahających się pomiędzy 255 kNm a 279 kNm, tj. przeszło dwukrotnie mniejszych niż nośność elementu. W przypadku belki ścinanej (BP-4) pierwsza rysa pojawiła się przy sile 243 kN, stanowiącej 56% siły niszczącej. Średnie pomierzone szerokości rozwarcia rys w momencie utraty nośności belek wynosiły od 0,77 mm do 1,22 mm, czyli były ok. czterokrotnie większe od wartości dopuszczal-

nej 0,2 mm. Wielkości ugięć zarejestrowanych przy osiągnięciu dopuszczalnej szerokości rysy nie przekraczały 11,5 mm, czyli stanowiły ok. 1/490 rozpiętości osiowej belki. Maksymalne ugięcie w momencie utraty nośności było co najmniej pięciokrotnie większe od ugięcia w momencie osiągnięcia dopuszczalnej szerokości rozwarcia rysy;

- w analizie obliczeniowej nie uwzględniano, typowego dla tego typu konstrukcji, zagadnienia zmęczenia materiałów, ponieważ w przypadku analizowanej hali ilość cykli obciążenia była stosunkowo niewielka – po kilka przejazdów suwnicy dziennie;

- zarówno wyniki badań, jak i obliczeń prowadzonych zgodnie z normą [2] wykazały, że istnieje możliwość kolejnego zwiększenia udźwigu większej z suwnic do 12,5 t, dla której badane belki stanowiły podtorze.

Podsumowując należy stwierdzić, że analizowane prefabrykowane belki kablobetonowe, pomimo już 50-letniej eksploatacji w normalnych warunkach pracy zakładu przemysłowego, mogą być nadal bezpiecznie użytkowane przez wiele kolejnych lat, pod warunkiem rzetelnego przeprowadzania okresowych kontroli ich stanu technicznego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Projekt typowych belek podsuwnicowych z betonu sprężonego nr 13079, Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego BISTYP, Warszawa 1957
- [2] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [3] Kurdowski W., Chemia Cementu, PWN Warszawa 2010
- [4] Drobiec L., Jasiński R., Piekarczyk A., Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych, PWN Warszawa 2010

ITB wydaje EOT

Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie został wyznaczony jako jednostka oceny technicznej upoważniona do wydawania nowych Europejskich Ocen Technicznych, które zastąpią dotychczasowe Europejskie Aprobaty Techniczne. Decyzję w tej sprawie podjął minister transportu, budownictwa i gospodarki wodnej.

Wyznaczenie ITB jednostką oceny technicznej (JOT) wiąże się m.in. z nowym Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011, które zaczęło obowiązywać w pełni po 1 lipca 2013 r. Ustanawia ono zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchyla wcześniejszą Dyrektywę Rady 89/106/EWG.

Zgodnie z nowym aktem prawnym producenci udostępniający na terenie UE wyroby objęte normami zharmonizowanymi muszą sporządzić tzw. deklarację własności użytkowych i oznaczyć wyroby znakiem CE. Z takiego samego rozwiązania mogą także sko-

rzystać (dobrowolnie) wytwórcy wyrobów nie objętych żadną normą zharmonizowaną lub gdy w odniesieniu do co najmniej jednej zasadniczej charakterystyki metoda oceny w normie nie jest właściwa lub norma nie przewiduje żadnej oceny co najmniej jednej zasadniczej charakterystyki.

Dokumentem odniesienia dla oznakowania CE będą od-tąd tzw. Europejskie Oceny Techniczne, które zastąpiły dotychczasowe Europejskie Aprobaty Techniczne. ITB udzielał ich od 2004 r. w ramach przynależności do Europejskiej Organizacji ds. Aprobát Technicznych (EOTA), funkcjonującej od 1 lipca 2013 r. pod zmienioną nazwą Europejska Organizacja ds. Oceny Technicznej.

Zakres właściwości ITB do wydawania Europejskich Ocen Technicznych obejmuje 33 grupy wyrobów budowlanych: od wyrobów prefabrykowanych z betonu, do wyrobów do zatrzymywania ognia.

Ich pełna lista znajduje się na stronie www.itb.pl (<http://www.itb.pl/aktualnosci/instytut-techniki-budowlanej-jednostka-oceny-technicznej-jot>)