



JULIUSZ CIEŚLA<sup>1)</sup>  
MIROŚLAW BISKUP<sup>2)</sup>  
MARIAN SKAWIŃSKI<sup>3)</sup>

## EKSPERYMENTALNA ANALIZA SZTYWNOŚCI STRUNOBETONOWYCH DŹWIGARÓW MOSTOWYCH

**STRESZCZENIE.** Podstawowym tematem artykułu jest eksperymentalna analiza sztywności strunobetonowych belek prefabrykowanych. Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie, na stanowisku badawczym badano same belki prefabrykowane do zarysowania. W drugim etapie badano dźwigary zespolone złożone z tych samych belek oraz żelbetowych płyt lub nadbetonu układanych „in situ” na prefabrykacjach. W etapie tym badania prowadzono aż do zniszczenia dźwigarów. W ocenie wyników uwzględniono rzeczywiste właściwości betonu w belkach i nadbetonie. W analizie wykorzystano zależności obciążenie – ugięcie, moment – krzywizna oraz zastępczy współczynnik sprężystości  $E_z$ .

Na podstawie analizy porównawczej ustalono, że zastępczy współczynnik sprężystości może być przydatnym narzędziem do oceny wartości momentu dekompresji i momentu rysującego jeszcze przed ukazaniem się rys w badanym elemencie, jak również oceny stopnia uplastycznienia materiałów w belce w stanie poprzedzającym zniszczenie. Zastępczy współczynnik sprężystości może być również wykorzystany do oceny stopnia sprężenia dźwigara z betonu sprężonego.

<sup>1)</sup> doc. dr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

<sup>2)</sup> mgr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Filia w Kielcach

<sup>3)</sup> mgr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Filia w Kielcach

## 1. WPROWADZENIE

Ocena sztywności przęsla lub jego elementów jest jednym z najważniejszych źródeł informacji o zachowaniu się konstrukcji pod obciążeniem i zwykle stanowi pierwszy etap porównania pomiędzy rzeczywistą konstrukcją i jej modelem obliczeniowym. Takie porównanie w zakresie sprężystym należy do normalnej procedury analizy po każdym badaniu konstrukcji pod obciążeniem.

Problem znacznie się komplikuje, jeżeli weźmiemy pod uwagę fakt, że nawet w zakresie obciążeń użytkowych konstrukcja betonowa pracuje poza zakresem sprężystym z powodu dającej się zauważyć nieliniowości w zachowaniu się materiałów, naprężeń rezydualnych oraz defektów strukturalnych.

Analiza zależności pomiędzy momentem zginającym i krzywizną lub obciążeniem i ugięciem elementu belkowego stanowi podstawę do oceny sztywności belki i może również być źródłem informacji o stanie jej sprężenia, w tym i o zbliżaniu się do stanu zarysowania.

Niniejszy artykuł porównuje metody służące do analizy zmiany sztywności elementu belkowego, przy wzrastającym obciążeniu, na przykładzie badanych mostowych belek strunobetonowych. W artykule wykorzystano badania strunobetonowych belek prototypowych, prowadzone w Ośrodku Badań Mostów IBDiM w Kielcach, przed wprowadzeniem ich do budownictwa mostowego.

Przy porównaniu metod wykorzystano: analizę zależności krzywizny elementu i momentu zginającego lub bezpośrednią analizę wykresu zależności ugięć od przyrastających obciążeń  $z(F)$ . Wykorzystano również, stosowany już w praktyce badawczej, zastępczy współczynnik sprężystości  $E_z$ , elementu, który polega na odpowiedniej transformacji wykresu  $z(F)$  [1].

Wobec panujących kontrowersji na temat przydatności pojęcia zastępczego współczynnika sprężystości do oceny sztywności belki temat należy uznać za ważny.

## 2. CHARAKTERYSTYKA SZTYWNOŚCI BELEK POD OBCIĄŻENIEM

Zależność pomiędzy obciążeniem  $F$ , a ugięciem  $z$  może być opisany przez funkcję  $z(F)$ . Przy stałym schemacie obciążenia w trakcie badania, zależność ta jest równoważna zależności pomiędzy momentem zginającym  $M$ , a ugięciem belki  $z(M)$  w danym jej przekroju. W czasie obciążania belki relacja pomiędzy obciążeniem, a ugięciem lub obciążeniem a krzywizną w przekroju jest zależna od jej sztywności.

Bezpośrednia analiza krzywej  $z(F)$  jest dość niewygodna i trudna do interpretacji. W praktyce często używa się do tego celu znanej zależności pomiędzy momentem, a krzywizną zginanej belki, którą dla modelu statycznie wyznaczalnej belki sprężonej można określić ze związku:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{-(M - P_v e_v)}{EI}, \quad (1)$$

w którym:

$M$  – moment zginający w przekroju,

$P_v$  – siła sprężająca,

$e_v$  – mimośród siły sprężającej,

$EI$  – sztywność belki.

Ze wzoru (1) wynika, że wartość iloczynu  $P_v e_v$  w istotny sposób wpływa na wartość krzywizny belki sprężonej w porównaniu z belką żelbetową, zwłaszcza w początkowej fazie jej pracy.

Krzywiznę belki można określić korzystając z metody różnic skończonych, zastosowaną przez *W. Wierzbickiego* przy obliczeniach płyt [2] i związek ten przyjmie postać:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta^2 z}{\Delta x^2} = \frac{2z_4 - z_3 - z_5}{\Delta x^2}, \quad (2)$$

w którym:

$z_3, z_4, z_5$  – ugięcia belki w kolejnych punktach 3, 4, 5, położonych w odległości  $\Delta x$  między sobą.

Oczywiście, aby określić krzywiznę w przekroju wartości  $\Delta x$  powinny być bardzo małe. Jeżeli wartości te są stosunkowo duże, tak jak w przypadku badanej belki T27, równe 2,50 m, czyli odpowiadają one 1,87-krotnej wysokości belki, wzór ten określa średnią wartość krzywizny na odcinku belki o długości 5,00 m, pomiędzy przyłożonymi siłami. Na odcinku tym wartość momentu zginającego jest stała o ile pominie się wpływ ciężaru własnego i dlatego na krzywiznę mogą mieć istotny wpływ jedynie miejscowe defekty w postaci rozwijających się rys w trakcie obciążania. Uzasadnia to dodatkowo prawidłowość zastosowania wzoru (2) i przyjętych warunków do określania krzywizny.

Krzywiznę belki można określić również na podstawie pomiarów odkształceń betonu belki w przekroju – w tym przypadku korzystamy ze znanego wzoru:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_g - \varepsilon_d}{h}, \quad (3)$$

w którym:

$\varepsilon_g, \varepsilon_d$  – odpowiednio, zmierzone odkształcenia na górnej i dolnej krawędzi przekroju belki,

$h$  – odległość pomiędzy punktami pomiarowymi w przekroju belki.

Przy długości bazy pomiarowej tensometru, wynoszącej 50 mm, tak określana krzywizna najbardziej zbliżona jest do wartości teoretycznej, którą można interpretować jako „krzywiznę przekroju”. W przypadku betonowej belki strunobetonowej, tak określana krzywizna może być jednak w najwyższym stopniu obciążona wpływem efektów miejscowych, np. pod wpływem rysy, powstającej w sąsiedztwie tensometru.

Do oceny zachowania się sprężonej belki betonowej pod obciążeniem można również posługiwać się pojęciem zastępczego współczynnika sprężystości  $E_z$  i  $E'_z$  [1, 3]. Wartość tego współczynnika można wyrazić następująco:

$$E_z = \alpha \frac{F}{z_m} \quad \text{lub} \quad E'_z = \alpha \frac{\Delta F}{\Delta z_m} \quad [\text{MPa lub GPa}] , \quad (4)$$

gdzie:

- $F$  – wartość obciążenia,
- $z_m$  – wartość ugięcia w rozpatrywanym przekroju belki,
- $\alpha$  – wartość zależna od warunków brzegowych dla elementu, rozpiętości, charakterystyki geometrycznej i sposobu obciążenia, np. dla belki swobodnie podpartej obciążonej pojedynczą siłą w środku rozpiętości  $\alpha = L^3 / 48I$ , gdzie  $L$  - rozpiętość belki, a  $I$  - moment bezwładności przekroju,

$\Delta F, \Delta z_m$  – odpowiednio, skończone przyrosty obciążenia i ugięcia belki.

Wzory (4) wynikają z przekształcenia wzoru na ugięcie belki przy przyjętym schemacie jej obciążenia. W przypadku belki obciążonej pojedynczą siłą w środku rozpiętości ugięcie opisuje zależność:

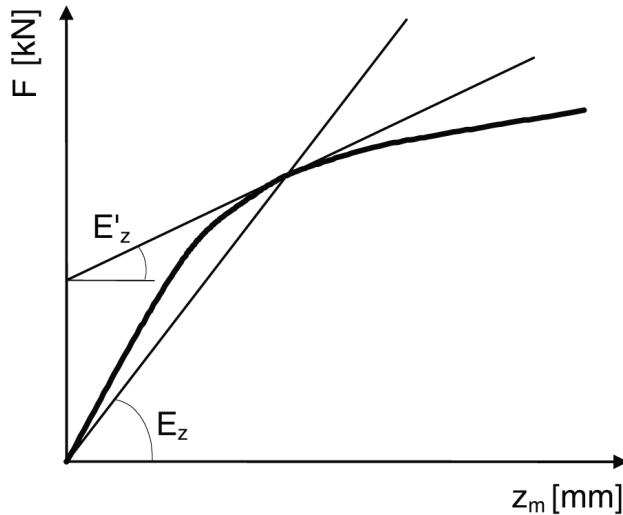
$$z = \frac{FL^3}{48EI} , \quad \text{a stąd} \quad E = \frac{FL^3}{48Iz} = \alpha \frac{F}{z} ,$$

czyli otrzymujemy pierwszy ze wzorów (4).

Oczywiście we wzorach (4) zamiast wartości sił  $F$  i ich przyrostów  $\Delta F$  można wprowadzić odpowiednie wartości momentów zginających  $M$  i ich przyrostów  $\Delta M$  bez zmiany ich istoty.

Wartości  $E_z$  i  $E'_z$  należy traktować umownie, bo gdyby sztywność belki w trakcie zginania nie ulegała zmianom, to wartości te odpowiadałyby średniemu modułowi sprężystości materiałów, z których wykonana jest belka. Ponieważ jednak w pierwszym etapie zginania do momentu zarysowania sztywność belki ulega zmianom w wyniku nieliniowości fizycznej materiałów, a w drugim etapie po pojawieniu się rys sztywność ulega dalszej redukcji, traktując moment bezwładności przekroju jako wartość stałą, przyjmujemy umownie, że powodem zmiany sztywności jest zmiana wartości  $E_z$ . Dlatego wartość  $E_z$  można traktować jako względną miarę sztywności belki w określonym stanie obciążenia.

Zaletą pojęcia zastępczego współczynnika sprężystości  $E_z$  jest to, że sztywność belki może być oceniana w stosunku do wartości modułu sprężystości betonu i dlatego może łatwiej przemawiać do wyobraźni oceniającego pracę belki. Należy zauważyć, że wartości  $E_z$  są tutaj substytutem siecznego współczynnika, a  $E'_z$  – stycznego współczynnika sprężystości (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczny wykres wartości  $E_z$  i  $E'_z$   
Fig. 1. Diagram of  $E_z$  and  $E'_z$

Sztywność belki w trakcie jej obciążania można oceniać również poprzez bezpośrednie badanie reakcji belki na obciążenia. Oceny takiej można dokonać poprzez określenie relacji pomiędzy obciążeniem  $F$ , a ugięciem  $z$ , wyrażającej się zależnościami:

$$k = \frac{F}{z_m} \quad \text{lub} \quad k' = \frac{\Delta F}{\Delta z_m} \quad [\text{kN/mm}] \quad . \quad (5)$$

Łatwo zauważyć, że wartości  $E_z$  i  $E'_z$  są proporcjonalne do  $k$  i  $k'$ , a współczynnikiem proporcjonalności jest wartość  $\alpha$ . Wartości  $k$  i  $k'$  można nazwać współczynnikami sztywności, ponieważ są one proporcjonalne do sztywności belki, podobnie jak wartości  $E_z$ . Wynika stąd wniosek, że przy analizie sztywności belki, wykorzystywanie wykresów zastępczych współczynników sprężystości  $E_z$  jak i zależności współczynników  $k$  powinno dawać identyczne rezultaty.

Dodatkową zaletą współczynników sprężystości  $E_z$  i współczynników sztywności  $k$  jest fakt, że do określenia ich wartości wystarczy znać jedynie obciążenie  $F$  i ugięcie rozpatrywanego przekroju  $z_m$ , co jest szczególnie istotne przy badaniu obiektów mostowych ze względu na ograniczenie liczby punktów pomiarowych.

W praktyce badawczej Instytutu Badawczego Dróg i Mostów wartość siły obciążającej dźwigar określa się za pomocą eksperymentalnie wyznaczonej powierzchni wpływu [4], a ugięcia dźwigara wynikają z bezpośrednich pomiarów.

O przydatności metody analizy sztywności sprężonego elementu zginanego powinny decydować względy praktyczne, tj. przyjęta metoda powinna informować o wszelkich zmianach, zachodzących w reakcji konstrukcji na przyrastające momenty zginające lub obciążenia, a pośrednio informować o zmianach w układzie naprężeń wewnętrznych i zbliżaniu się do momentu rysującego.

### 3. OGÓLNY OPIS BADANYCH BELEK

Do badań użyto dwóch strunobetonowych belek prefabrykowanych: typu „*T*”, o przekroju poprzecznym w kształcie litery *T* i o długości 26,50 m, w wersji pierwotnej, oznaczonej symbolem *T27* i w wersji zmodernizowanej o zmniejszonej liczbie cięgien sprężających większej wytrzymałości, oznaczonej symbolem *T27z* oraz dwóch typów belek Kujan, o przekroju w kształcie odwróconej litery *T* i długościach 12,00 i 15,00 m. Wszystkie belki przeznaczone są do współpracy z nadbetonem w układzie zespolonym (rys. 2).

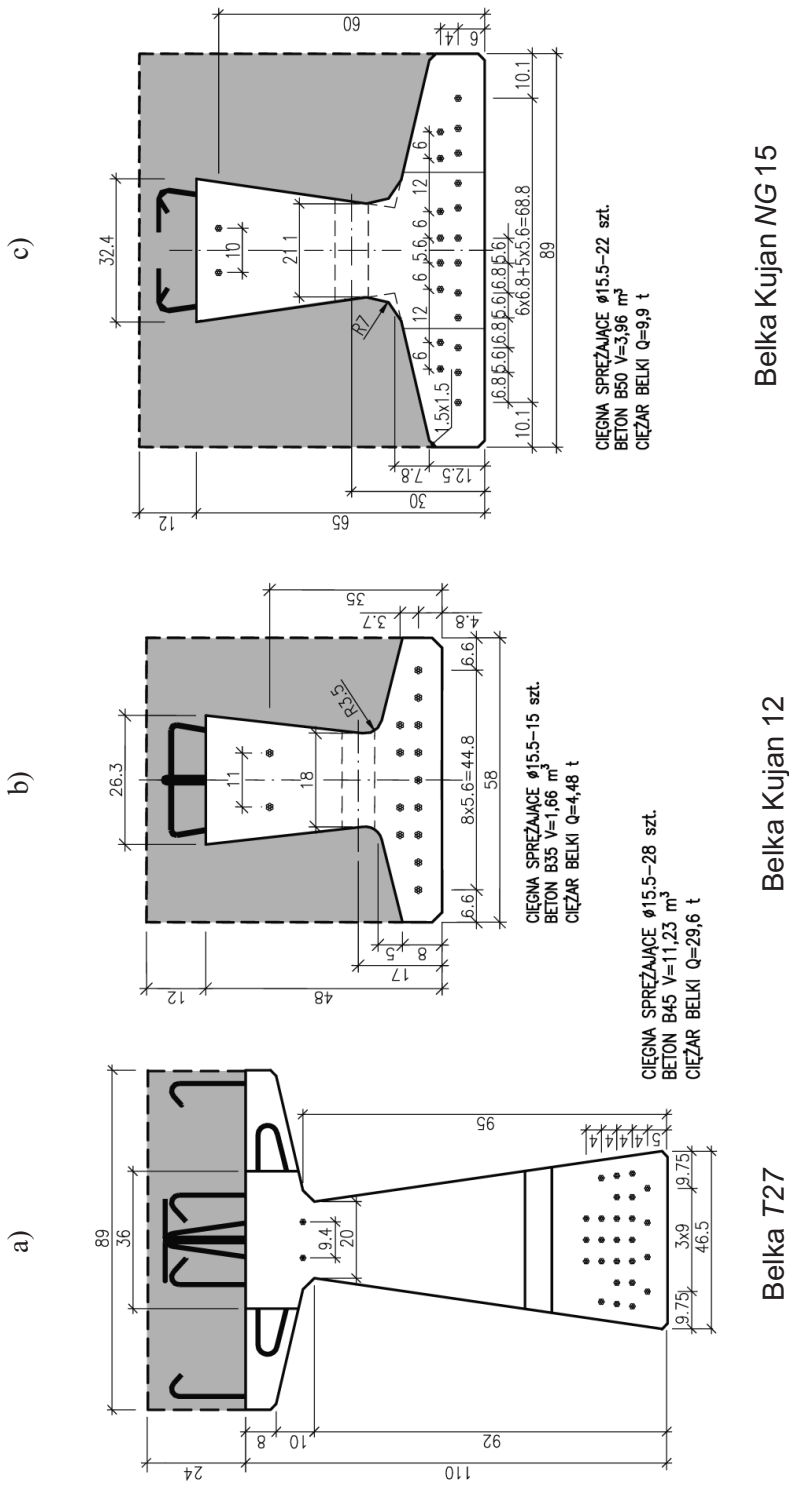
Prefabrykowane belki strunobetonowe typu „*T*” o długości 26,50 m, zostały zaprojektowane w Przedsiębiorstwie Robót Mostowych Mosty - Łódź S.A. w Łodzi w 2001 roku jako nowy typ prefabrykatu dla prześel mostów drogowych.

Belki Kujan o długości 12,00 m zostały zaprojektowane przez Gdańskie Biuro Projektów Dróg i Mostów w 2005 roku, a belki Kujan o długości 14,70 m, z dodatkowym oznaczeniem *NG*, zaprojektowano w Warszawskim Biurze Projektów Dróg i Mostów, również w 2005 roku.

Belki „*T*” zaprojektowano z betonu B45, a płytę współpracującą z betonu B35. Belkę Kujan o długości 12,00 m zaprojektowano z betonu B40 z nadbetonem z betonu B30. Belkę Kujan *NG* o długości 14,70 m zaprojektowano z betonu B50, a nadbeton z betonu B35.

Wszystkie belki są sprężone prostoliniowymi cięgnami z lin  $\phi 15,5$  mm, z których część w strefach przy podporowych ma wyłączaną przyczepność.

Badane belki zaprojektowano zgodnie z normą PN-91/S-10042 oraz przystosowano do budowy prześel pracujących pod obciążeniem klasy A według normy obciążeń PN-85/S-10030.



Rys. 2. Przekroje poprzeczne badanych belek  
 Fig. 2. Cross – sections of tested beams: a) T27 beam, b) Kujan 12 beam c) Kujan NG 15 beam

## 4. OGÓLNY PROGRAM BADAŃ BELEK

Chociaż podstawowym celem badań było doświadczalne zweryfikowanie belek pod względem zgodności podstawowych parametrów z założeniami projektowymi, szczególną uwagę poświęcono zmianom krzywizny i sztywności belek przy wzrastających obciążeniach.

Podstawowy zakres badań obejmował:

- a) wymiary geometryczne belek i właściwości betonu:
  - wytrzymałość i jednorodność betonu w belce i w płycie lub nadbetonie,
  - wymiary gabarytowe belki,
  - strzałki belki,
- b) badania wytrzymałościowe belek pod obciążeniem:
  - badanie belki bez płyty lub nadbetonu do zarysowania (etap I, zakres 1),
  - badanie belki z płytą lub nadbetonem do zarysowania (etap II, zakres 1) oraz do zniszczenia (etap II, zakres 2).

Belki *T27*, *T27z* i Kujan *NG* badane były pod obciążeniem dwukrotnie – pierwszy raz bez płyty lub nadbetonu do zarysowania, drugi raz z nadbetonem, do zarysowania i zniszczenia. Dwie belki Kujan  $L = 12,00$  m badane były jednokrotnie, jedną z nich badano bez nadbetonu do zarysowania, drugą badano z nadbetonem do zarysowania i zniszczenia.

## 5. WYNIKI BADAŃ BETONU

Wytrzymałość betonu w belkach określano po 28 dniach dojrzewania na podstawie badania próbek normowych, wykonanych z mieszanki przy betonowaniu danej belki oraz badań sklerometrycznych samej belki.

Wytrzymałość gwarantowaną betonu  $R_b^G$  w każdej belce określano biorąc pod uwagę oba rodzaje badań. W podobny sposób badano właściwości betonu w płycie lub nadbetonie współpracującym z belkami, nazwanym tutaj nadbetonem.

Bezpośrednio przed badaniami wytrzymałościowymi w każdej z belek określano średnią wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość gwarantowaną betonu. W belkach z nadbetonem podobne badania przeprowadzano zarówno dla belki, jak i nadbetonu. Na podstawie porównania wyników z wytrzymałością betonu po 28 dniach dojrzewania określano przyrosty wytrzymałości betonu w czasie. Rzeczywisty współczynnik sprężystości betonu  $E_b$  przyjęto wg normy PN-91/S-10042, uwzględniając wytrzymałość gwarantowaną betonu i rodzaj użytego kruszywa [5]. Właściwości betonu bezpośrednio przed badaniami belek pod obciążeniem przyjmowano jako rzeczywiste, mające bezpośredni wpływ na zachowanie się badanej belki pod obciążeniem (tabl. 1).



Tablica 1. Właściwości betonu w belkach i w nadbetonie  
 Table 1. Property of concrete in beams and placed „in situ” concrete

| Typ belki                          | $R_b^G$ [MPa] |          |             |          | $E_b$ [GPa]  |          |                           |          |
|------------------------------------|---------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|---------------------------|----------|
|                                    | Projektowane  |          | Rzeczywiste |          | Projektowane |          | Rzeczywiste <sup>*)</sup> |          |
|                                    | belka         | nadbeton | belka       | nadbeton | belka        | nadbeton | belka                     | nadbeton |
| Belka T27<br>wersja A              | B45           | B35      | 63,52       | 40,71    | 37,8         | 34,6     | 41,2                      | 36,6     |
| Belka T27z<br>wersja A             | B45           | B35      | 54,94       | 34,66    | 37,8         | 34,6     | 40,2                      | 34,4     |
| Belki Kujan<br>$L = 12$ m kl. A    | B40           | –        | 65,35       | –        | 36,4         | –        | 41,3                      | –        |
|                                    | B40           | B30      | 62,15       | 23,27    | 36,4         | 32,6     | 41,1                      | 29,0     |
| Belka Kujan NG 15<br>$L = 14,70$ m | B50           | B35      | 55,78       | 43,29    | 39,0         | 34,6     | 40,3                      | 37,5     |

<sup>\*)</sup>  $E_b$  określone na podstawie badań wytrzymałości na ściskanie betonu, zgodnie z PN-91/S-10042

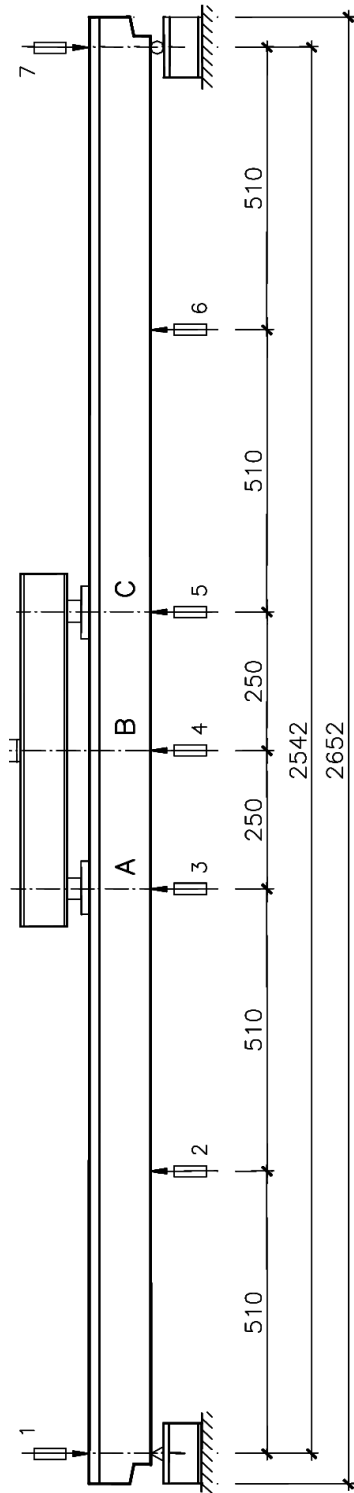
W celach porównawczych wykonywano również pomiary ciężaru objętościowego betonu. W belkach zastosowano beton z kruszywem granitowym i bazaltowym. Ciężar objętościowy betonu z kruszywem granitowym wynosił średnio  $2,36 \text{ g/cm}^3$ , a betonu z kruszywem bazaltowym –  $2,52 \text{ g/cm}^3$ . W nadbetonie zastosowano beton z kruszywem bazaltowym lub kwarcytowym, o ciężarze objętościowym betonu  $2,43 \text{ g/cm}^3$  – dla bazaltu i  $2,29 \text{ g/cm}^3$  – dla kwarcytu.

## 6. BADANIA BELEK POD OBCIĄŻENIEM

Badania belek pod obciążeniem prowadzono na stanowisku badawczym. Schemat stanowiska badawczego oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych pokazano na rysunku 3, na przykładzie belki typu „T”. Badania belek Kujan o długości 12,00 m i Kujan NG 15 prowadzono przy takim samym schemacie obciążenia i podobnym rozmieszczeniu punktów pomiarowych przy rozpiętościach teoretycznych, odpowiednio:  $L = 11,30$  m i  $14,30$  m i rozstawie sił obciążających, odpowiednio:  $3,76$  m i  $4,76$  m.

Schemat obciążenia belek przyjęto zgodnie z normą PN-S-10040:1999, która zaleca obciążanie badanych belek dwoma siłami, położonymi symetrycznie względem środka rozpiętości w rozstawie równym  $1/3$  rozpiętości lub w przypadku belek o rozpiętości większej od  $15,00$  m – w rozstawie  $5,00$  m.

Program badań belek w obu etapach tj. w etapie I – bez nadbetonu do zarysowania i w etapie II – z nadbetonem do zarysowania i zniszczenia, przewidywał obciążanie ich w trzech cyklach dla każdej procedury obciążania.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego w trakcie badania belki T27

Fig. 3. T27 beam on the test bed

Obciążenie belki realizowano siłownikiem hydraulicznym 1000 kN, a wartość siły określano siłomierzem tensometrycznym CT-50 (etap I badania) lub FT-5108/1600kN (etap II badania). Nominalna dokładność pomiarowa siłomierzy wynosiła 1 %.

Jak podano w tablicy 2, belki 1, 2 i 5 były badane dwukrotnie, raz w ramach etapu I – bez nadbetonu, a drugi raz w ramach etapu II – z nadbetonem. Jedynie belki 3 i 4 badane były jednokrotnie, belka 3 bez nadbetonu – do zarysowania, a belka 4 z nadbetonem – do zniszczenia.

Tablica 2. Etapy i zakresy obciążeń w trakcie badań belek  
Table 2. Stages and scopes of loading during tests of beams

| Belka            |    | Etapy badań       | Zakres obciążeń                          |
|------------------|----|-------------------|--|
| Typ              | Nr |                   |  |
| T27              | 1  | I – bez płyty     | 1 – do zarysowania                       |
|                  |    | II – z płytą      | 1 – do zarysowania<br>2 – do zniszczenia |
| T27z             | 2  | I – bez płyty     | 1 – do zarysowania                       |
|                  |    | II – z płytą      | 1 – do zarysowania<br>2 – do zniszczenia |
| Kujan $L = 12$ m | 3  | I – bez nadbetonu | 1 – do zarysowania                       |
|                  | 4  | II – z nadbetonem | 1 – do zarysowania<br>2 – do zniszczenia |
| Kujan NG 15      | 5  | I – bez nadbetonu | 1 – do zarysowania                       |
|                  |    | II – z nadbetonem | 1 – do zarysowania<br>2 – do zniszczenia |

Podczas badania mierzono przemieszczenia pionowe oraz odkształcenia w wybranych przekrojach belki. Rozmieszczenie czujników oraz przekrojów pomiaru odkształceń przedstawiono na rysunku 3. W punktach od 1 do 7 (rys. 3), prowadzono pomiary przemieszczeń pionowych za pomocą czujników indukcyjnych ZEPWN CL-70-100 o zakresie 50 mm i możliwości pomiaru 0,01 mm. Użyto mostków HBM SPIDER 8 i komputera z programem HBM catman V 2.0. Na podstawie wyników pomiarów przemieszczeń obliczono ugięcia belek.

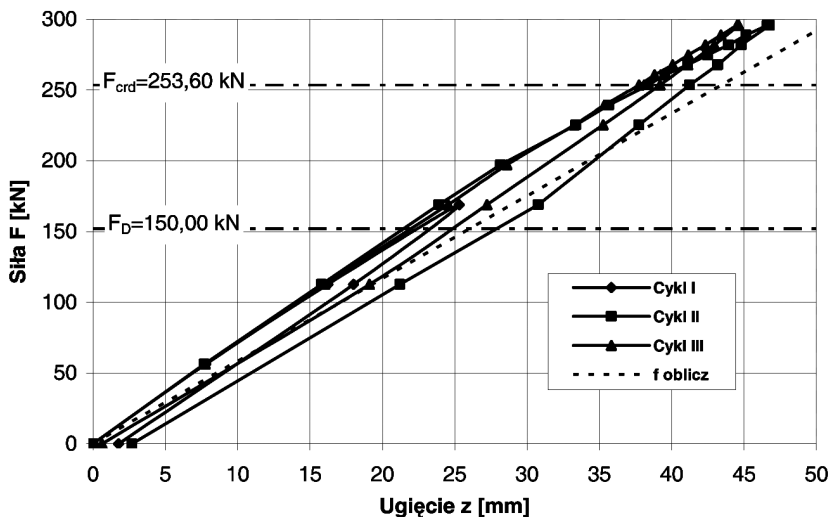
Odształcenia betonu mierzono na górnych i dolnych krawędziach przekroju, w trzech przekrojach: A, B i C (rys. 3), za pomocą dostosowanych do tego celu i sprawdzonych w praktyce badawczej Instytutu, tensometrów elektrooporowych RL-300/50 podłączonych do mostka tensometrycznego IT1.

W tablicy 2 zestawiono etapy badań i zakresy obciążeń przy badaniach belek pod obciążeniem.

## 7. PORÓWNANIE METOD ANALIZY SZTYWNOŚCI BELEK W I ETAPIE BADAŃ

W I etapie badań uwzględniono analizę sztywności wszystkich belek bez nadbetonu, obciążanych na stanowisku badawczym, zestawionych w tabelicy 2. Ponieważ badania obejmują aż pięć belek, w artykule podano jedynie wyniki badań bardziej charakterystycznych i typowych dla innych, podobnych, nie prezentowanych tu wyników badań.

Na rysunku 4 przedstawiono wykres zależności ugięcia  $z$  od siły obciążającej  $F$  dla belki T27. Na rysunku zaznaczono wartości obciążeń odpowiadające dekompresji naprężeń ściskających na dolnej krawędzi belki  $F_D$  i pojawienia się pierwszych rys  $F_{cr}$ . W ten sposób zwrócono uwagę na ewentualne zmiany charakteru wykresów po przekroczeniu przez obciążenie tych wartości.

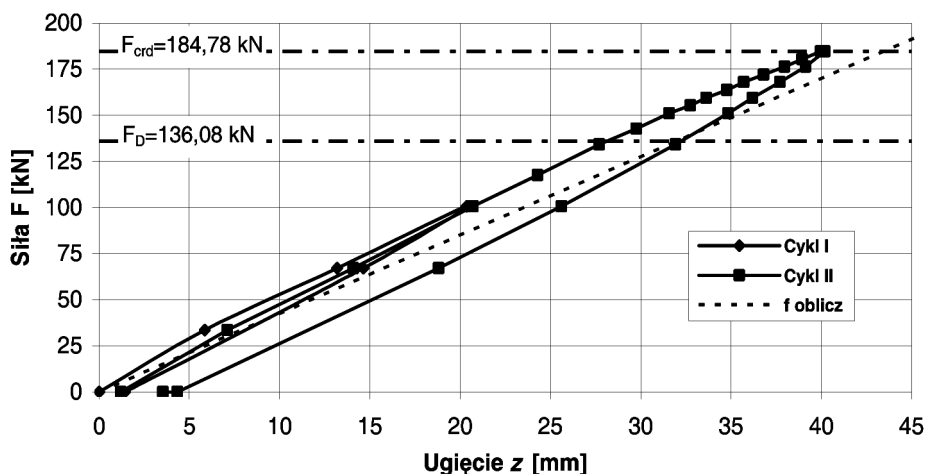


Rys. 4. Wykres zależności ugięcia  $z$  od siły obciążającej  $F$  dla belki T27 bez płyty w czasie badania do zarysowania

Fig. 4. Experimental load – deflection curves for the T27 beam without slab from test up to cracking

Ponieważ w czasie badania zachowany jest niezmienny schemat obciążenia belki, zależność ta jest równoznaczna z zależnością  $z(M)$ , czyli ugięcia od momentu zginającego w wybranym jej przekroju. Na rysunku tym widoczne są odchyłki od liniowej zależności pomiędzy obciążeniem a ugięciem, pomimo stosunkowo niewielkiego zakresu obciążeń od zera do  $1,17 \cdot F_{crd}$  ( $F_{crd}$  – obliczeniowa wartość obciążenia wywołującego rysy).

Podobnie wygląda wykres zależności ugięcia i siły obciążającej dla belki Kujan  $L = 12$  m, belki o zupełnie innej geometrii i ograniczonej strefie ściskania w porównaniu do belki T27 (rys. 5).



Rys. 5. Wykres zależności ugięcia  $z$  od siły obciążającej  $F$  dla belki Kujan  $L = 12$  m kl. A bez nadbetonu w czasie badania do zarysowania  
 Fig. 5. Experimental load – deflection curves for the Kujan  $L12$  beam without slab from test up to cracking

Na podkreślenie zasługuje fakt, że odchyłki od liniowości zależności  $z(F)$  dla obu belek dają się zauważyć już po przekroczeniu obciążenia  $F_D$ , wywołującego dekompresję na ich dolnej krawędzi. Pokazane na rysunkach wartości  $F_D$  zostały zweryfikowane doświadczalnie na podstawie rzeczywistych wartości obciążeń rysujących  $F_{cr}$  belek z nadbetonem. Podobne odchyłki od liniowej zależności pomiędzy momentem a ugięciem, jeszcze przed osiągnięciem momentu rysującego, zaobserwować można w referacie [6], w którym prezentowano wyniki badań strunobetonowych płyt otworowych.

Chociaż bezpośrednia analiza zmiany sztywności na podstawie krzywej  $z(F)$  jest trudna do interpretacji, to krzywa ta opisuje w całości cały cykl obciążania i odciążania belki. Na jej podstawie określić można wartości ugięć trwałych po odciążeniu belki, a w konsekwencji daje to podstawy do oceny pracy belki i zachodzących efektów poza sprężystych. W tabelicy 3 zestawiono wartości ugięć trwałych po II cyklu obciążeń badanych belek bez i z nadbetonem. Należy podkreślić, że maksymalne obciążenie w II cyklu obciążenia jest większe co najmniej o 20 % od obciążenia mogącego wystąpić w trakcie eksploatacji.

Tablica 3. Wartości ugięć trwałych w czasie badania belek do zarysowania  
 Table 3. Values of residual deflections for the beams after test till cracking

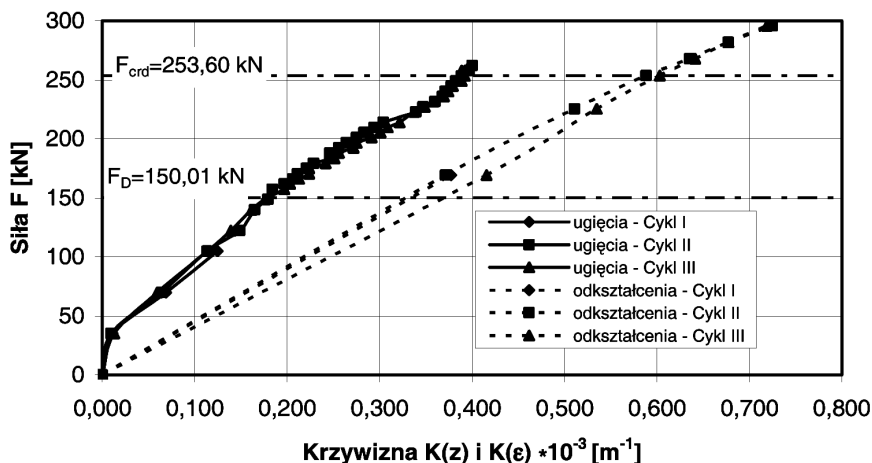
| Typ belki                          | Rodzaj belki       | II cykl obciążenia                    |                          |      |
|------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------|------|
|                                    |                    | ugięcie maksymalne<br>$z_{\max}$ [mm] | ugięcie trwałe $z_{trw}$ |      |
|                                    |                    |                                       | [mm]                     | [%]  |
| Belka T27<br>wersja A              | belka              | 46,66                                 | 2,61                     | 5,59 |
|                                    | belka z płytą      | 19,77                                 | 1,11                     | 5,61 |
| Belka T27z<br>wersja A             | belka              | 56,15                                 | 3,19                     | 5,68 |
|                                    | belka z płytą      | 25,01                                 | 1,43                     | 5,72 |
| Belka Kujan<br>$L = 12$ m kl. A    | belka              | 39,01                                 | 2,34                     | 6,00 |
|                                    | belka z nadbetonem | 18,39                                 | 0,80                     | 4,35 |
| Belka Kujan NG 15<br>$L = 14,70$ m | belka              | 34,19                                 | 2,61                     | 7,63 |
|                                    | belka z nadbetonem | 18,28                                 | 1,19                     | 6,51 |

Na podstawie zestawionych wartości można stwierdzić, że:

- wartości ugięć trwałych wahają się od około 4 do 8 % wartości poprzedzającego maksymalnego ugięcia i nie przekraczają maksymalnej wartości dopuszczanej przez normę PN-S-10040: 1999, wynoszącą 10 %,
- wartości ugięć trwałych dla samych belek są zawsze większe od ugięć trwałych dla belek z płytą lub z nadbetonem,
- względne (procentowe) wartości ugięć trwałych dla belek typu „T” bez płyty i z płytą są bardzo zbliżone do siebie, natomiast dla belek typu Kujan bez nadbetonu są większe niż w belkach z nadbetonem.

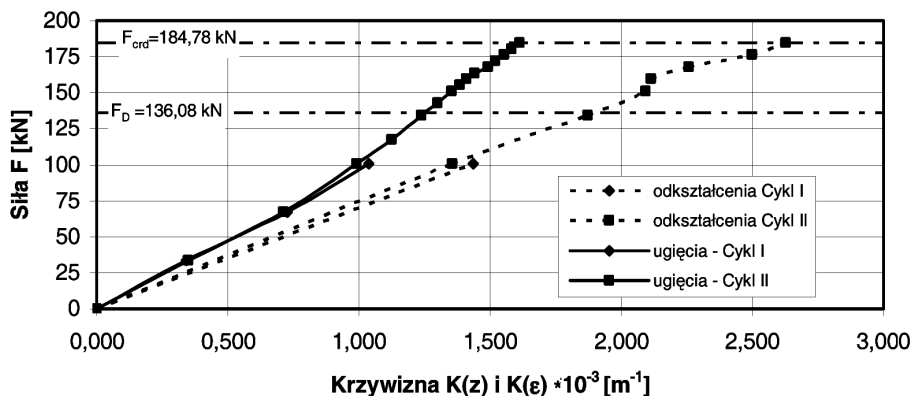
Wy tłumaczyć to można tym, że same belki Kujan nie posiadają rozbudowanej półki górnej, mogącej przenosić znaczne siły ściskające, powstające w trakcie zginania, co jest powodem dużych odkształceń rezydualnych w tym obszarze, a tym samym większych ugięć trwałych.

Wykresy zależności krzywizny belki od obciążenia, określone za pomocą wzorów (2) i (3) na podstawie ugięć i odkształceń dla środkowej strefy belki T27 bez nadbetonu, w czasie badania do zarysowania, pokazano na rysunku 6. Na podstawie tych wykresów można stwierdzić, podobnie jak na podstawie zależności  $z(F)$ , że po przekroczeniu obciążenia wywołującego dekompresję daje się zauważyć nieliniowy charakter tych zależności, chociaż podobnie jak w przypadku zależności  $z(F)$  trudno tu wyznaczyć odpowiednią granicę. Wprawdzie krzywizna belki określona na podstawie ugięć, wykazuje pewne anomalie w początkowym stadium obciążania, to w dalszym ciągu cechują ją podobne tendencje, a niewielkie zmniejszanie się przyrostów krzywizny przy zbliżaniu się do zarysowania, przypisać można efektom lokalnym.



Rys. 6. Wykresy zależności krzywizny od obciążenia określone na podstawie ugięć i odkształceń dla belki T27 bez płyty w czasie badania do zarysowania  
 Fig. 6. Experimental load – curvature relationship, calculated from deflection and strains, for T27 beam without slab from test up to cracking

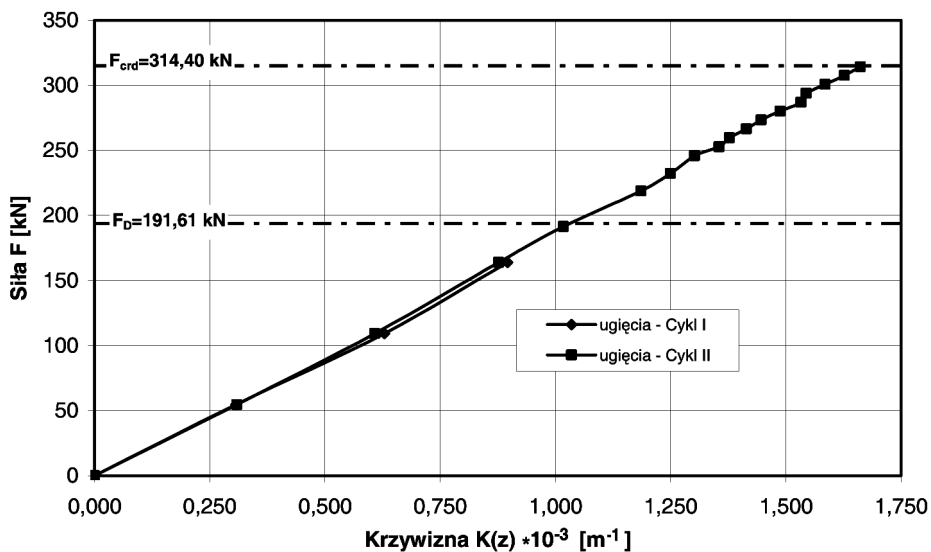
Na rysunku 7 pokazano wykresy zależności krzywizny od obciążenia określone podobnie, jak dla belki T27 na podstawie ugięć i odkształceń, w przekroju środkowym belki Kujan 12 (etap I). W odróżnieniu od belki T27 można tu stwierdzić liniową zależność krzywizny od obciążenia bez jakichkolwiek tendencji wkraczania w zakres nieliniowy przy przekraczaniu obciążeń wywołujących dekompresję lub zarysowanie. Potwierdzeniem tego jest brak zauważalnego zwiększania się przyrostów krzywizny w stosunku do odpowiadających im przyrostów obciążenia w rozpatrywanym zakresie.



Rys. 7. Wykresy zależności krzywizny od obciążenia określone na podstawie ugięć i odkształceń dla belki Kujan L = 12 m kl. A bez nadbetonu w czasie badania do zarysowania  
 Fig. 7. Experimental load – curvature relationship, calculated from deflection and strains, for Kujan L12 beam without slab from test up to cracking

Interesujące jest natomiast zjawisko wolniejszego przyrostu krzywizny, określonej na podstawie ugięć, które dotyczy obu belek i tłumaczy się wpływem efektów lokalnych w przypadku krzywizny określonej w przekroju na podstawie odkształceń.

Pokazany na rysunku 8 wykres zależności krzywizny od obciążenia, określony na podstawie ugięć dla belki Kujan NG 15 bez nadbetonu, jest w całym zakresie od zera do obliczeniowego obciążenia wywołującego rysy  $F_{crd}$ , prawie idealnie prostoliniowy, bez zakłóceń przy przekraczaniu obciążenia wywołującego dekompresję. Wynika stąd wniosek, że zależność moment - krzywizna dla obu belek była bliska liniowej, podobnie jak to wykazał J. Pawlikowski [7] dla przypadku belki żelbetowej, obciążonej momentem i siłą podłużną, dla zakresu obciążeń od zera do momentu rysującego.



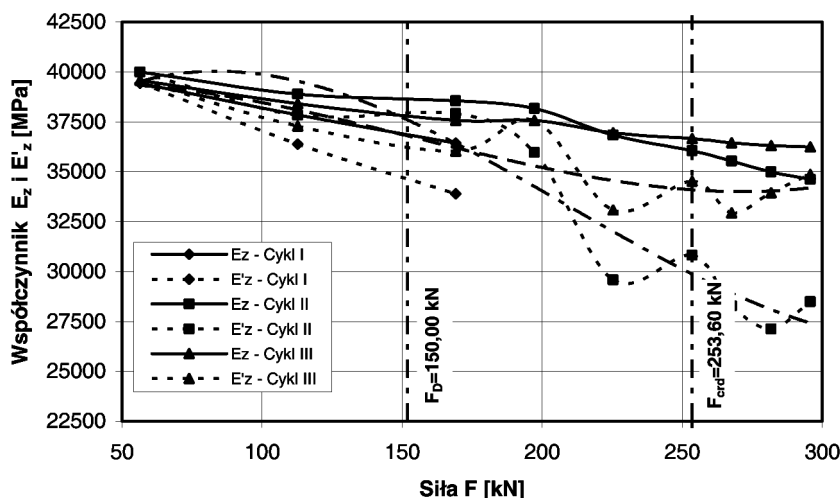
Rys. 8. Wykres zależności krzywizny od obciążenia określony na podstawie ugięć dla belki Kujan NG 15 bez nadbetonu w czasie badania do zarysowania  
 Fig. 8. Experimental load – curvature relationship, calculated from deflection, for Kujan NG 15 beam without slab from test up to cracking

Pewnym utrudnieniem przy wykorzystywaniu krzywizny jest konieczność korzystania aż z trzech punktów pomiarowych dla jednego przekroju belki, przy stosowaniu metody różnic skończonych lub z dwóch punktów pomiarowych odkształceń przy metodzie alternatywnej. Poza tym, w przypadku korzystania z pomiarów odkształceń w konstrukcjach mostowych, dostęp do górnej powierzchni dźwigarów poprzez istniejącą nawierzchnię jest na ogół bardzo utrudniony.

Na rysunku 9 pokazano, określone ze wzoru (4) wykresy zastępczych współczynników sztywności  $E_z$  i  $E'_z$  dla belki T27 bez płyty w I etapie badania pod obciążeniem od zera do  $1,17 \cdot F_{crd}$ . Interesujący jest kształt linii  $E_z$  i  $E'_z$  dla obu cykli obciążenia.



Przy zakresie obciążeń od zera do około 200 kN, czyli wartości większej od obciążenia odpowiadającego dekompresji, widoczny jest niewielki, stały ubytek sztywności. Po przekroczeniu tej wartości obciążenia następuje dalszy wyraźny spadek wartości  $E_z$ . Natomiast zmiany wartości  $E'_z$  dają się zauważyć dużo wcześniej, już po przekroczeniu przez obciążenie wartości 170 kN. Zmiany te są dosyć znaczne i zaskakujące. Po początkowym spadku wartości zastępczego współczynnika sprężystości  $E'_z$  następuje chwilowy wzrost i następnie dalszy spadek itd., z utrzymywaniem się wyraźnej tendencji zmniejszania się jego wartości podobnie jak  $E_z$ .



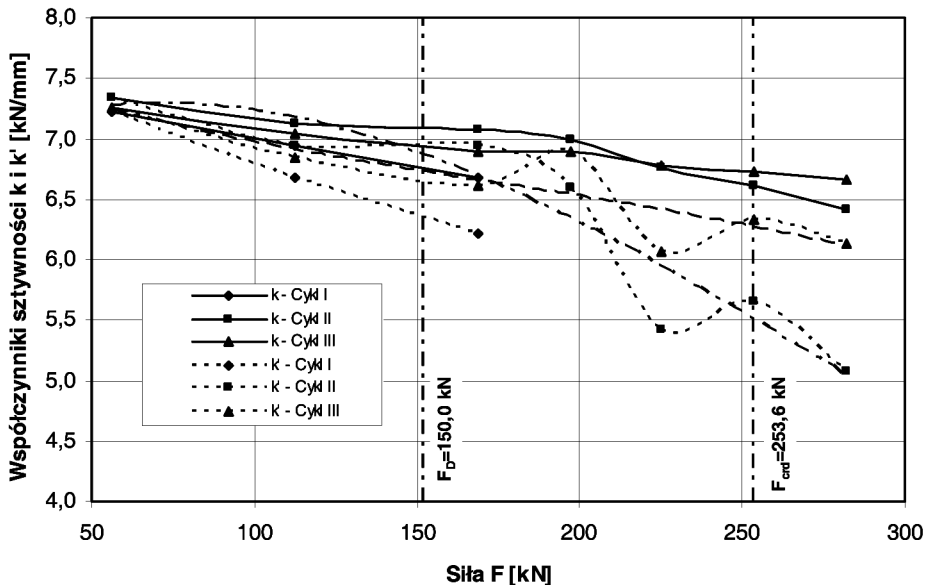
Rys. 9. Wykresy zastępczego współczynnika sprężystości  $E_z$  i  $E'_z$  dla belki T27 bez płyty w czasie badania do zarysowania  
 Fig. 9. Reduced modulus of elasticity  $E_z$  and  $E'_z$  curves for T27 beam without slab from test up to cracking

Wyjaśnienie przyczyny wahan się wartości  $E'_z$ , a co za tym idzie wahan stycznej wartości sztywności belki (rys. 1) jest nie tylko zaskakujące ale i trudne do wytłumaczenia, występuje jednak niezależnie w wielu badanych belkach.

Występujące tu, tak jak w przypadku omówionym w referacie [8], zakłócenia przebiegu wykresu  $E'_z$ , przy zbliżaniu się do lub po przekroczeniu obciążenia  $F_D$ , wywołującego dekompresję, świadczy o pewnego rodzaju prawidłowości i tłumaczy się zarówno efektem „wrażliwości” wzoru na  $E'_z$  na niedokładności pomiarów wartości przyrostów obciążenia  $\Delta F$  i przemieszczeń  $\Delta z$ , a także skutkami rozwoju mikrorys przy nagłej zmianie stanu naprężeń, polegającej na odprężeniu dotychczas silnie ścisanej strefy betonu w otoczeniu cięgien sprężających. Efekt ten może być potęgowany przez lokalną, skokową utratę przyczepności betonu do cięgien w obszarze uplastyczniającego się betonu w warunkach znacznych przyrostów odkształceń przy zginaniu belki.

Należy podkreślić, że wartości  $E_z$  i  $E'_z$  po ustabilizowaniu się nachylenia wykresów, przed osiągnięciem przez obciążenie wartości  $F_D$ , są zbliżone do wartości współczynnika sprężystości betonu w belce T27 (tabl. 1).

Na rysunku 10 pokazano, określone ze wzoru (5) wykresy współczynników sztywności  $k$  i  $k'$  dla tej samej belki T27 bez płyty, również w I etapie badania pod obciążeniem od zera do  $1,17 \cdot F_{crd}$ . Jak widać kształty obu wykresów są identyczne, co zresztą wynika z podobieństwa wzorów (4) i (5).

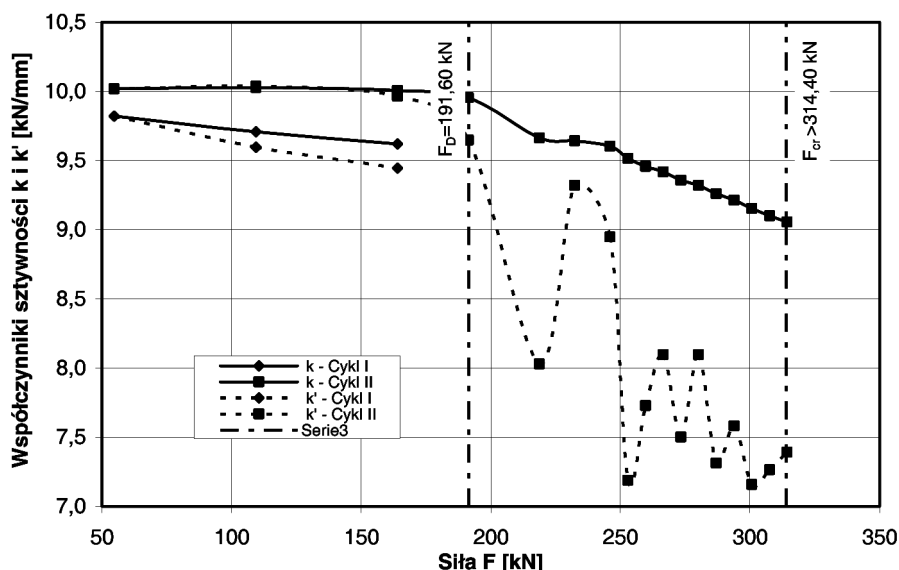


Rys. 10. Wykresy współczynników sztywności  $k$  i  $k'$  dla belki T27 bez płyty w czasie badania do zarysowania

Fig. 10. The coefficient of stiffness  $k$  and  $k'$  curves for T27 beam without slab from test up to cracking

Wykresy współczynników sztywności  $k$  i  $k'$  dla belki Kujan NG 15 bez nadbetonu w czasie badania do zarysowania pokazano na rysunku 11. Przy I cyklu obciążenia wykres współczynnika  $k$  wskazuje na pewien spadek sztywności nawet przy obciążeniach poniżej obciążenia wywołującego dekompresję, co należy uznać za efekt nieliniowości fizycznej materiałów.

W czasie II cyklu obciążenia, w początkowym stadium sztywność belki jest stała i dopiero przy zbliżaniu się wartości obciążenia do  $F_D$  sztywność zaczyna maleć, a po przekroczeniu tej wartości wyraźnie się zmniejsza. Po przekroczeniu wartości obciążenia  $F_D$ , wartości współczynnika  $k'$  zaczynają gwałtownie spadać i wzrastać, przy ogólnej tendencji do zmniejszania się jego wartości, która odpowiada chwilowej sztywności belki.



Rys. 11. Wykres współczynników sztywności  $k$  i  $k'$  dla belki Kujan NG 15 bez nadbetonu w czasie badania do zarysowania  
 Fig. 11. The coefficient of stiffness  $k$  and  $k'$  curves for Kujan NG 15 beam without slab from test up to cracking

Przy badaniach weryfikacyjnych sprężonych belek mostowych wykresy  $E_z$  i  $E'_z$  wykorzystuje się do określania momentu lub obciążenia wywołującego dekompresję, co umożliwi ustalenie rzeczywistej wartości siły sprężającej. Temat ten był prezentowany między innymi na Konferencji Krynickiej w odniesieniu do belek T27 i T27z [3, 9].

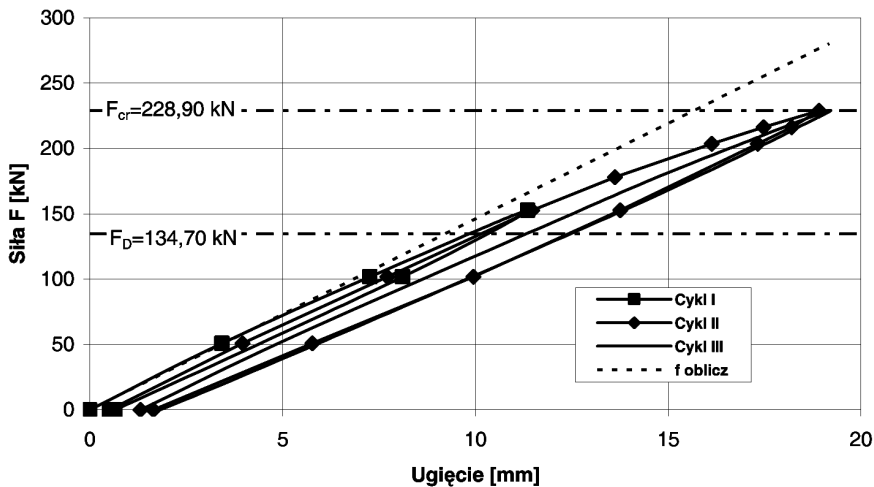
## 8. PORÓWNANIE METOD ANALIZY SZTYWNOŚCI BELEK W II ETAPIE BADAŃ

### 8.1. BADANIE DO ZARYSOWANIA

W II etapie badano mostowe belki strunobetonowe z wykonanym na nich nadbetonem (rozd. 6). W rozdziale tym zaprezentowano analizę sztywności tych belek, obciążanych na stanowisku badawczym, przy zakresie obciążeń od zera do obciążenia rysującego  $F_{cr}$ . Także i w tym rozdziale poprzestaje się na podawaniu wyników badań bardziej charakterystycznych i typowych dla innych, podobnych, nie prezentowanych tu wyników badań.

Schemat obciążenia belki z nadbetonem oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych przyjęto identyczny jak dla belki bez nadbetonu (rys. 3). Na rysunku 12 pokazano wykres zależności ugięcia  $z$  i siły obciążającej  $F$  dla belki Kujan 12. Na rysunku zaznaczono wartości obciążeń odpowiadające dekompresji na dolnej krawędzi belki  $F_D$  i pojawienia się pierwszych rys  $F_{cr}$ .

Charakter wykresu na rysunku 12 nie odbiega od wykresów  $z(F)$  dla belek T27 i Kujan 12 bez nadbetonu (rys. 4 i 5). Podobnie dają się zauważyć odchyłki od liniowości zależności  $z(F)$  po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$ , chociaż określenie na podstawie tych wykresów wartości  $F_D$  jest dosyć trudne.



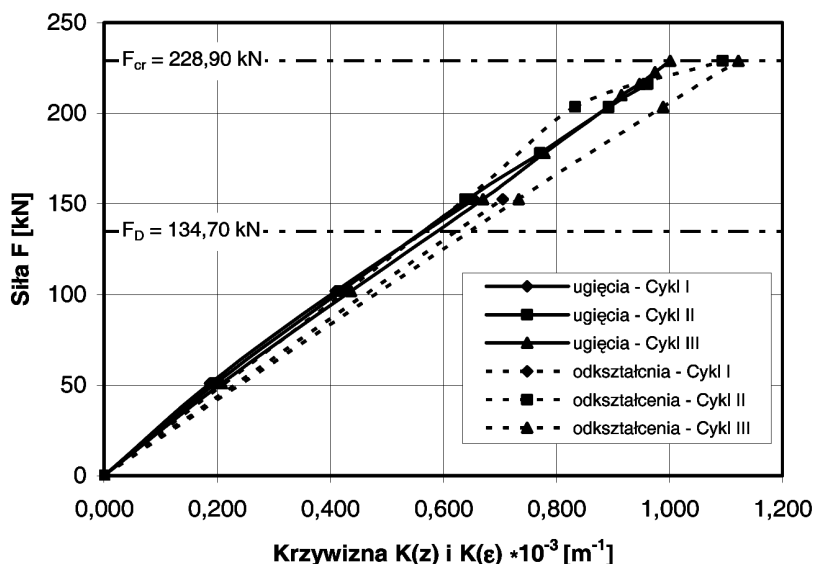
Rys. 12.. Wykres zależności ugięcia  $z$  od siły obciążającej  $F$  dla belki Kujan  $L = 12$  m z nadbetonem w czasie badania do zarysowania

Fig. 12. Experimental load – deflection curves for the Kujan L12 beam with top slab from test up to cracking

Wykresy zależności krzywizny belki od obciążenia, określone za pomocą wzorów (2) i (3) na podstawie ugięć i odkształceń dla środkowej strefie belki Kujan 12, w czasie badania do zarysowania, pokazano na rysunku 13. Na podstawie tych wykresów można stwierdzić liniowy charakter pracy belki bez zmiany charakteru wykresów po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$ . Wprawdzie określona na podstawie odkształceń krzywizna belki, wykazuje pewne anomalie, to przypisuje się to efektom lokalnym.

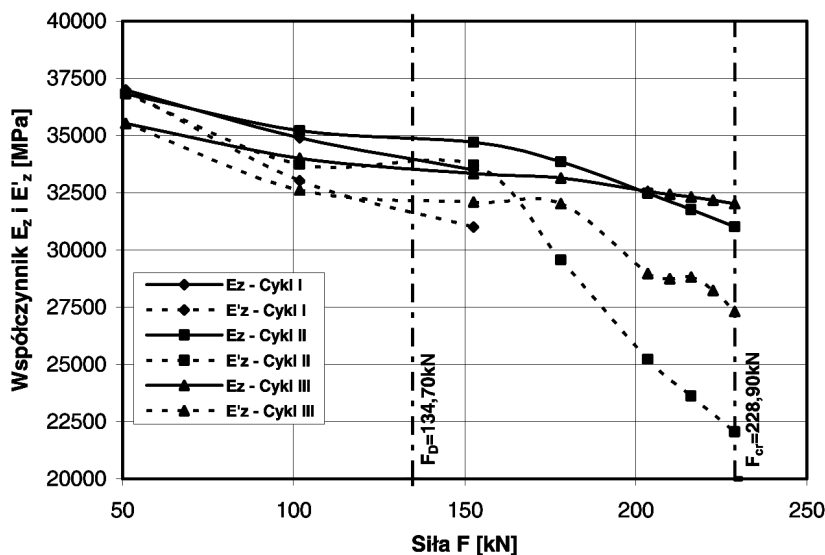
Zdaniem autorów zasadnicza trudność wykorzystywania krzywizny wynika z faktu, że określana doświadczalnie krzywizna belki jest efektem miejscowym i może nie uwzględniać przekrojów najbardziej wyężonych.

Na rysunku 14 pokazano, określone ze wzorów (4) wykresy zastępczych współczynników sztywności  $E_z$  i  $E'_z$  dla belki Kujan 12 z nadbetonem w II etapie badania pod obciążeniem od zera do  $F_{cr}$ . Interesujący jest kształt linii  $E_z$  i  $E'_z$  dla obu cykli obciążenia. Przy zakresie obciążeń od 50 do około 100 kN, widoczny jest niewielki, stały ubytek sztywności. Po przekroczeniu tej wartości obciążenia następuje pewna stabilizacja, polegająca na zmniejszeniu się ubytku  $E_z$ , po czym po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$ , następuje dalszy wyraźny spadek wartości  $E_z$ . Natomiast zmiany wartości  $E'_z$  dają się zauważyć dużo wyraźniej. Również na wykresie tym na odcinku pomiędzy wartościami obciążeń od 100 do 150 kN można zaobserwować chwilową stabilizację, po czym przyspieszony spadek  $E'_z$ .



Rys. 13. Wykresy zależności krzywizny od obciążenia określone na podstawie ugięć i odkształceń dla belki Kujan  $L = 12$  m z nadbetonem w czasie badania do zarysowania

Fig. 13. Experimental load – curvature curves, calculated from deflection and strains, for Kujan  $L12$  beam with top slab from test up to cracking



Rys. 14. Wykresy zastępczego współczynnika sprężystości  $E_z$  i  $E'_z$  dla belki Kujan  $L = 12$  m z nadbetonem w czasie badania do zarysowania

Fig. 14. Reduced modulus of elasticity  $E_z$  and  $E'_z$  curves for Kujan  $L12$  beam with top slab from test up to cracking

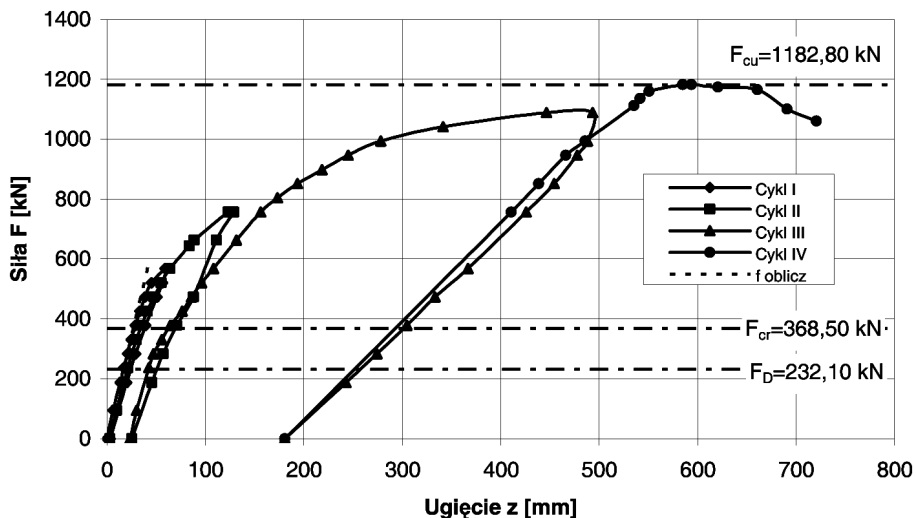
W przypadku belki Kujan 12 z nadbetonem nie obserwujemy tak znacznych wahań na wykresach  $E'_z$ , jak to miało miejsce na wykresach dla belek T27 (rys. 10) i NG 15 (rys. 11).

Na podstawie przebiegu wykresów  $E'_z$  można stwierdzić, że zmiana sztywności w zakresie od 50 do 100 kN, spowodowana jest głównie nieliniowością fizyczną betonu, a na odcinku, na którym następuje stabilizacja, belka pracuje w zakresie sprężystym. Sztywność maleje po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$ , na skutek powiększenia się obszaru, w którym beton pracuje w stanie rozciągania.

## 8.2. BADANIE DO ZNISZCZENIA

W rozdziale tym zaprezentowano analizę sztywności belek uprzednio zbadanych do zarysowania (punkt 8.1), przy zakresie obciążeń od zera do obciążenia niszczącego  $F_{cu}$ . Także i w tym rozdziale, poprzestaje się na podawaniu wyników badań bardziej charakterystycznych i typowych. Również i w tym przypadku schemat obciążenia belki z nadbetonem oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych przyjęto identycznie jak dla belek bez nadbetonu (rys. 3).

Na rysunku 15 pokazano wykres zależności ugięcia  $z$  i siły obciążającej  $F$  dla belki T27z. Na rysunku, tak jak poprzednio, zaznaczono wartości obciążeń odpowiadające dekompresji na dolnej krawędzi belki  $F_D$ , pojawienia się pierwszych rys  $F_{cr}$  oraz zniszczeniu belki  $F_{cu}$ .



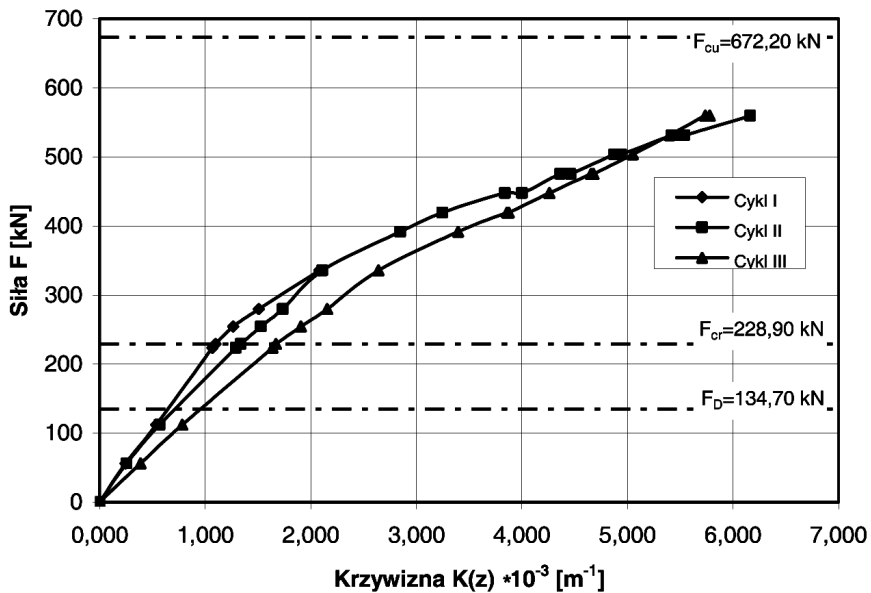
Rys. 15. Wykres zależności ugięcia  $z$  od siły obciążającej  $F$  dla belki T27z z płytą w czasie badania do zniszczenia

Fig. 15. Experimental load – deflection curves for the T27 beam with top slab from test up to failure

Swoim charakterem wykres na rysunku 15 odbiega od wykresów  $z(F)$  dla belek T27 i Kujan 12 bez nadbetonu (rys. 4 i 5), ponieważ obejmuje on cały zakres pracy belki pod obciążeniem. Podobnie dają się zauważyć odchyłki od liniowości zależności  $z(F)$  po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$  i  $F_{cr}$ , chociaż określenie tych wartości na podstawie prezentowanego wykresu byłoby trudne.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że zależność  $z(F)$  dla belki T27z w czasie odciążania w III cyklu i obciążania w IV cyklu, zakresie od 0 do 1000 kN jest liniowa. Niewątpliwie jest to skutkiem dużych ugięć rezydualnych po obciążeniu w cyklu III, które wyniosły około 180 mm.

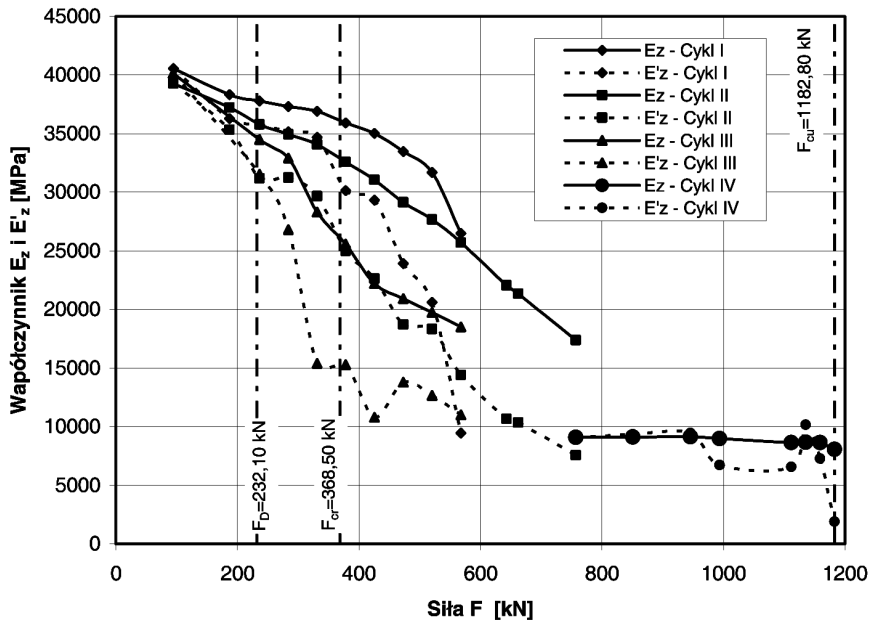
Wykresy zależności krzywizny belki od obciążenia, określone za pomocą wzoru (2), na podstawie ugięć, w środkowej strefie belki Kujan 12 z nadbetonem, w czasie badania do zniszczenia, pokazano na rysunku 16. Na podstawie tych wykresów można stwierdzić liniowy charakter pracy belki do zarysowania, bez zmiany charakteru wykresów po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$ . Określone tak wykresy krzywizny są dosyć regularne i wynika z nich, że po przekroczeniu momentu rysującego belka w sposób płynny wchodzi w obszar nieliniowy.



Rys. 16. Wykres zależności krzywizny od obciążenia określone na podstawie ugięć dla belki Kujan  $L = 12$  m z nadbetonem w czasie badania do zniszczenia  
 Fig. 16. Experimental load – curvature relationship, calculated from deflection, for Kujan L12 beam with top slab from test up to failure

Na rysunku 17 pokazano, określone ze wzorów (4), wykresy zastępczych współczynników sprężystości  $E_z$  i  $E'_z$  dla belki T27z z nadbetonem w II etapie badania pod obciążeniem od zera do  $F_{cu}$ . Szczególnie interesujący jest kształt linii  $E_z$  i  $E'_z$  dla

wszystkich cykli obciążenia. Przy zakresie obciążeń od około 95 do 800 kN na wykresach  $E_z$  widoczny jest stały ubytek sztywności. Jedynie w III cyklu obciążenia po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$  widoczny jest przyspieszony ubytek sztywności. Natomiast wykresy  $E'_z$ , będące obrazem chwilowej sztywności pod danym obciążeniem, wykazują przyspieszone ubytki sztywności tuż po przekroczeniu przez obciążenie wartości  $F_D$  lub w obszarze pomiędzy  $F_D$  a  $F_{cr}$ , z widocznymi punktami osobliwymi w miejscach załamania się tych wykresów.



Rys. 17. Wykresy zastępczego współczynnika sprężystości  $E_z$  i  $E'_z$  dla belki T27z z płytą w czasie badania do zniszczenia

Fig. 17. Reduced modulus of elasticity  $E_z$  and  $E'_z$  curves for T27z beam with top slab from test up to failure

Na wykresach  $E'_z$  obserwujemy również chwilowe wahania ich wartości, tak jak w przypadku belek T27 bez płyty w I etapie badań.

Na rysunku 17 na uwagę zasługują wykresy  $E_z$  i  $E'_z$  w IV cyklu obciążania, w stanie poprzedzającym zniszczenie. W stanie tym wartości  $E_z$  są praktycznie stałe, co świadczy o chwilowym zrównoważeniu sił wewnętrznych i liniowym przyroście ugięć przy wzrastającym obciążeniu.

Bardziej dokładne informacje znajdujemy na wykresie  $E'_z$ , na którym przy obciążeniu około 950 kN widoczne jest zmniejszenie sztywności, a następnie ponowny wzrost i spadek towarzyszący zniszczeniu.

Interesująco wypada zestawienie wartości zastępczych współczynników sprężystości w tabelicy 4. Porównano tu maksymalne wartości  $E'_z$ , odpowiadające I cyklowi



obciążenia belek z płytą lub nadbetonem z wartościami minimalnymi, poprzedzającymi zniszczenie belki.

Tablica 4. Porównanie wartości zastępczego modułu sprężystości  $E'_z$  w czasie badania belek do zniszczenia

Table 4. Comparison of reduced modulus of elasticity  $E'_z$  for test of beams up to failure

| Typ belki                    | Rodzaj belki       | $E'_{z \max}$     | $E'_{z \min}$           | $\frac{E'_{z \min}}{E'_{z \max}}$ |
|------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|
|                              |                    | I cykl obciążenia | ostatni cykl obciążenia |                                   |
|                              |                    | [MPa]             | [MPa]                   |                                   |
| Belka T27 wersja A           | belka z płytą      | 40 625,8          | 3 044,5                 | 0,075                             |
| Belka T27z wersja A          | belka z płytą      | 40 563,1          | 1 897,0                 | 0,047                             |
| Belki Kujan $L = 12$ m kl. A | belka z nadbetonem | 32 705,3          | 3 640,7                 | 0,111                             |
| Belka Kujan NG 15            | belka z nadbetonem | 40 961,6          | 3 995,9                 | 0,098                             |

Z porównania tego można wyciągnąć następujące wnioski:

- wartości zastępczych współczynników sprężystości dla belek „T” i Kujan NG zbliżone są do modułów sprężystości betonu w belkach, natomiast w belce Kujan 12, są zbliżone do modułu sprężystości nadbetonu, najprawdopodobniej ze względu na duży udział nadbetonu w przekroju dźwigara zespolonego (tabl. 1),
- różnice pomiędzy wartościami zastępczych współczynników sprężystości, a wartościami modułów sprężystości betonu belki i nadbetonu są spowodowane obecnością stali zbrojeniowej oraz różnicami właściwości betonu,
- wartości zastępczych współczynników sprężystości, poprzedzających zniszczenie są znacznie niższe od wartości maksymalnych, towarzyszących początkowi obciążania belek,
- stosunek  $E'_{z \min} / E'_{z \max}$  świadczy o stopniu uplastycznienia materiałów w belce w stanie poprzedzającym zniszczenie; jest on blisko dwukrotnie mniejszy dla belek z płytą w porównaniu do belek z nadbetonem.

## 9. WNIOSKI

Na podstawie przebiegu badań i analizy wyników można sformułować następujące wnioski:

- Wszystkie badane belki, zarówno z nadbetonem, jak i bez, w prezentowanym zakresie obciążeń zachowywały się bardzo podobnie i przytoczone wykresy zależności można traktować jako reprezentatywne.

- Chociaż bezpośrednia analiza zmiany sztywności na podstawie krzywej  $z(F)$  jest trudna do interpretacji ze względu na brak punktów nieciągłości, to krzywa ta opisuje w całości cały cykl obciążania i odciążania belki i na jej podstawie ocenić można wartości ugięć trwałych po odciążeniu belki, a w konsekwencji daje to podstawy do oceny pracy belki i zachodzących efektów poza sprężystych.
- W czasie badań do zarysowania nie udało się ustalić jakichkolwiek prawidłowości pomiędzy krzywizną, a zachodzącymi zmianami w sposobie pracy belek, ponieważ wynikające zależności praktycznie miały przebieg prostoliniowy, Zdaniem autorów trudność ta wynika z faktu, że określana doświadczalnie krzywizna belki jest efektem miejscowym i może nie uwzględniać przekrojów najbardziej wyężonych oraz nie jest efektem odkształceń całej belki.
- Wprawdzie wykresy  $E_z$  i  $E'_z$  są określane na podstawie pomiarów ugięcia tylko w jednym, najczęściej najbardziej wyężonym przekroju belki, to są one wynikiem odkształceń całej belki, a nawet całej konstrukcji.
- Stwierdzone prawidłowości w kształcie wykresów  $E_z$  i  $E'_z$  pozwalają w praktyce na oszacowanie wartości momentu lub obciążenia wywołującego dekompresję naprężeń ściskających na dolnej krawędzi belki i określenia stanu poprzedzającego zarysowanie, co z kolei pozwala na oszacowanie stanu sprężenia belki. Ułatwia to badania weryfikacyjne konstrukcji mostowych bez konieczności doprowadzania ich do zarysowania. Dodatkowym ułatwieniem jest fakt, że przy stosowaniu  $E_z$  potrzebny jest tylko pomiar ugięcia w pojedynczym przekroju dźwigara. Przy określaniu, przypadającego na rozpatrywany w przeszłe dźwigar obciążenia, wykorzystuje się najczęściej określoną doświadczalnie powierzchnię wpływu.
- Wprowadzenie pojęcia zastępczego współczynnika sprężystości umożliwia określenie stopnia uplastycznienia materiałów w belce w stanie poprzedzającym zniszczenie poprzez obliczenie stosunku  $E'_{z \min} / E'_{z \max}$ .

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Cieśla J.*: Assessment of the safety of post-tensioned concrete bridges by comparative analysis. FIP Symposium on post-tensioned structures, London 1996
- [2] *Wierzbicki W.*: Mechanika budowli. Akademska Spółdzielnia Wydawnicza w Warszawie, 1949
- [3] *Cieśla J., Skawiński M., Biskup M.*: Badania weryfikacyjne strunobetonowej belki mostowej T27. LI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2005
- [4] *Cieśla J., Lagoda M., Olaszek P.*: Special tests of two post-tensioned concrete viaducts. International Conference IABMAS, Seul 2008
- [5] *Ajdukiewicz A., Mames J.*: Konstrukcje z betonu sprężonego. Polski Cement, Kraków 2004
- [6] *Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Węglorz M.*: Badania strunobetonowych płyt otworowych. LII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2006

- [7] *Pawlikowski J.*: Związki konstytutywne w analizie prętowych konstrukcji żelbetonowych. Wydawnictwa ITB, Warszawa 1991
- [8] *Cieśla J., Skawiński M., Biskup M.*: Ocena stanu sprężenia eksploatowanych przęseł mostów betonowych na podstawie próbnego obciążenia. XLIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2003
- [9] *Cieśla J., Skawiński M., Biskup M.*: Eksperymentalna ocena sztywności strunobetonowych dźwigarów mostowych przed zarysowaniem. PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Problemy Naukowo - Badawcze Budownictwa; Tom VI – Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2008

## WYKAZ POWOŁANYCH NORM

PN-91/S-10042 Obiekty mostowe – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Projektowanie

PN-85/S-10030 Obiekty mostowe – Obciążenia

PN-S-10040: 1999 Obiekty mostowe – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Wymagania i badania

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF STIFFNESS OF PRE-TENSIONED CONCRETE BRIDGE BEAMS

### Abstract

Experimental analysis of stiffness of the pre-tensioned concrete bridge beams is a main object of the paper. The tests have been performed in two stages. In the first stage, on the test bed the concrete pre-tensioned beams have been tested up to cracking moment, and in the second stage - composite girders, with the same beams and reinforced concrete on the top, have been tested up to failure. It has been taken into account the real property of concrete in pre-tensioned beams and in placed in situ reinforced concrete. In the analysis the load - deflection curves, load - curvature relation and the reduced modulus of elasticity have been used.

As a result of comparative analysis it has been established, that the reduced modulus of elasticity is a good tool for assessment of moment of decompression and prediction cracks in prestressed concrete beam before conformation of cracks, as well as evaluation of degree of plasticity of materials in tested girders in the state just before failure. We may also use the reduced modulus of elasticity for the assessment of prestressing force in prestressed concrete beams.

