

# Płyta wagi samochodowej 30-tonowej z betonu sprężonego cięgnami bez przyczepności

Dr inż. Rafał Szydłowski, mgr. inż. Łukasz Ślaga Politechnika Krakowska,  
mgr inż. Barbara Łabuzek TCE Structural Design & Consulting

## 1. Wprowadzenie

Wagi samochodowe wykorzystywane są głównie do legalizowanego, handlowego oraz inspekcyjnego ważenia pojazdów samochodowych. Na rynku krajowym producenci oferują wagi samochodowe o nośności do 80 ton. Głównym elementem konstrukcyjnym wagi jest jej pomost, za pośrednictwem którego przekazywane są obciążenia z pojazdu na fundamenty, poprzez czujniki pomiarowe. Podstawowymi wymaganiami stawianymi pomostom jest ich trwałość, sztywność oraz lekkość. Ze względu na typ konstrukcji najpopularniejsze są wagi o pomostach: stalowych, żelbetowych lub żelbetowo-stalowych. W obrębie tych trzech rozwiązań podane wymagania często wzajemnie się wykluczają. Wagi z pomostami stalowymi mają najmniejszą masę, jednak są najbardziej podatne na korozję i wymagają znacznych nakładów w trakcie eksploatacji. Wagi żelbetowe i żelbetowo-stalowe (stalowe belki nośne i żelbetowa płyta wypełniająca) charakteryzują się niższymi kosztami eksploatacji i wyższą trwałością w stosunku do wag stalowych. Zasadniczym mankamentem pomostów z żelbetu jest ich masa utrudniająca i podwyższająca koszt transportu pełnego zestawu pomostów. Rozwiązaniem konstrukcyjnym spełniającym w najlepszym stopniu wszystkie trzy stawiane wymagania jest beton sprężony. Technologia ta pozwala projektować płyty smukłe (a tym samym lekkie), sztywne i trwałe. Z tego względu, w latach 2012–2014, autorzy pracy opracowali i wdrożyli na rynku polskim sprężone płyty pomostu wagi samochodowej 60-tonowej o całkowitej długości 18,0 m [1, 2]. Obecnie zaprojektowano płytę dla wagi 30-tonowej o wymiarach 8,00×3,00×0,24 m. Ze względu na charakterystykę obciążenia takich konstrukcji (obciążenie samochodem generuje kilkukrotnie większy moment zginający niż ciężar płyty) utrudniającą projektowanie płyt niezarysowanych zastosowano podobne rozwiązanie. Opracowano płytę częściowo sprężoną cięgnami bez przyczepności pracującą w stanie zarysowanym.

Problem projektowania elementów częściowo sprężonych był przedmiotem zainteresowań wielu badaczy. Od lat 60. ubiegłego stulecia opublikowano w tym zakresie wiele prac i raportów z badań prowadzonych głównie w USA, a w mniejszym stopniu w Europie, np. [3], [4], [5]. W znacznie mniejszym stopniu analizowane było zachowanie elementów częściowo sprężonych pod obciążeniem cyklicznym [6]. Niewątpliwie najmniej rozpoznany zagadnieniem jest zachowanie elementów sprężonych cięgnami bez przyczepności pod obciążeniem cyklicznym.

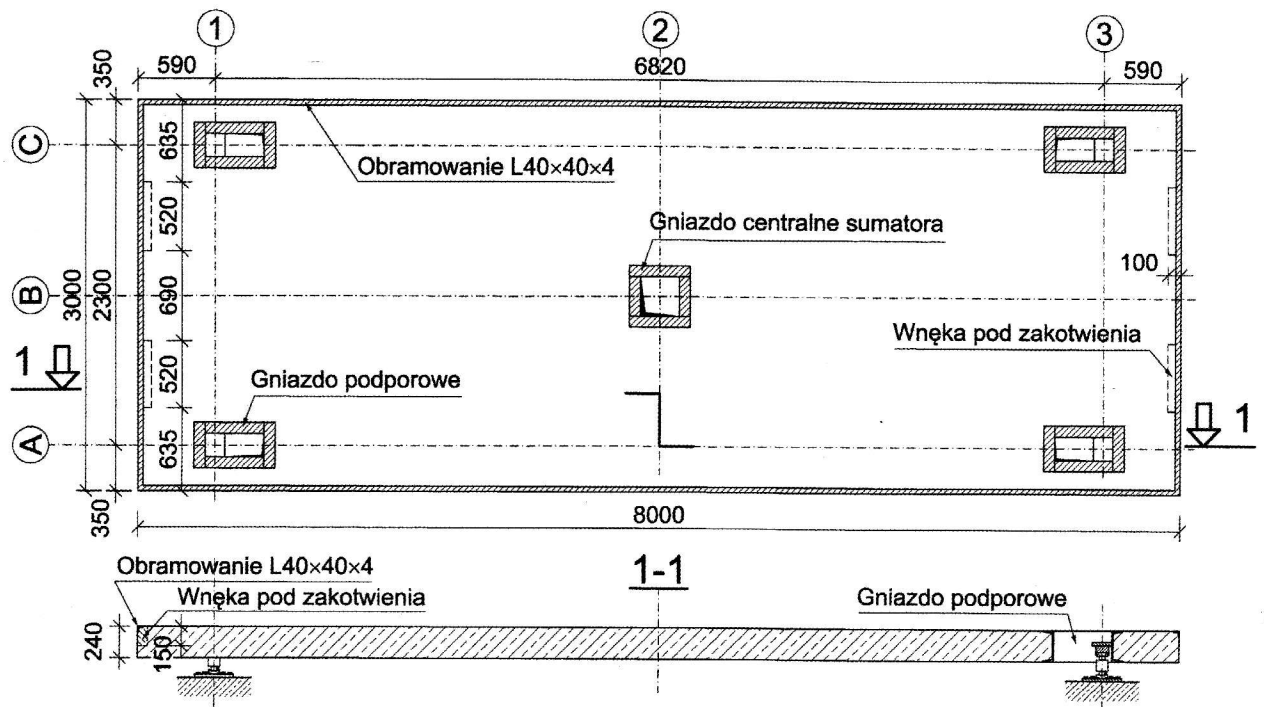
Wobec trudności obliczeniowej oceny zachowania płyt w trakcie okresu użytkowania w Laboratorium Badawczym Politechniki Krakowskiej wykonano prototyp płyty, który poddano badaniom pod obciążeniem cyklicznie zmiennym, symulującym historię i charakter obciążenia w trakcie eksploatacji.

## 2. Ogólna charakterystyka pomostu

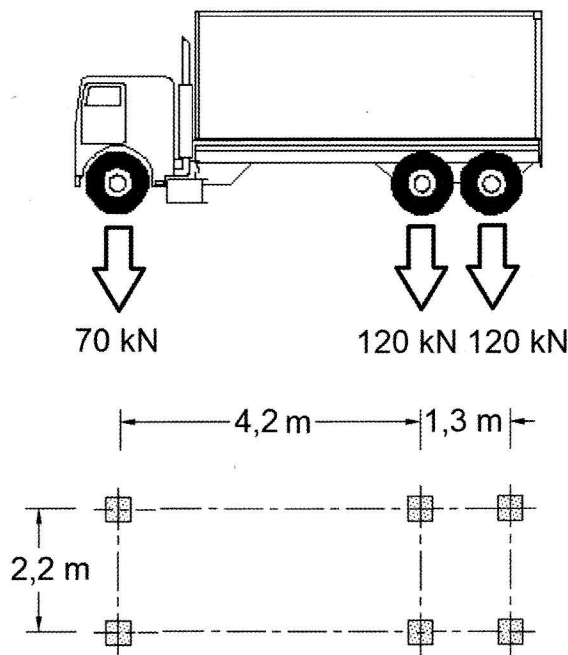
Geometrię zaprojektowanej płyty o wymiarach 8,00 × 3,00 × 0,24 m przedstawiono na rysunku 1. W płycie ukształtowano 5 otworów wykonanych z zesparanych ceowników stalowych C240. Cztery otwory narożne służą do montażu przetworników tensometrycznych, otwór środkowy natomiast do montażu systemu pomiarowego.

Jako miarodajne obciążenie płyty pomostu o nośności 30 ton przyjęto dwie tylne osie umownego, trójosiowego samochodu ciężarowego o sylwetce i obciążeniu przedstawionym na rysunku 2. Przyjęto obciążenie w postaci dwóch tylnych osi o nacisku 120 kN każda, w rozstawie 1,3 m. Ze względu na możliwość przeciążenia wartość nacisku osi zwiększono o 10% (do 132 kN).

W płycie zastosowano sprężenie 10 cięgnami bez przyczepności 7ø5 ze stali Y1860S7. Rzut i profil sprężenia na planie ćwiartki płyty pokazano na rysunku 3. Cięgna ukształtowano w dwóch wiązkach biegnących po 5, rozmieszczone co 100 mm. Przyjęto paraboliczną trasę cięgna o maksymalnym zwisie w środku przęsła wynoszącym 90 mm. W strefach czołowych przewidziano wnęki



Rys. 1. Geometria pomostu



Rys. 2. Schemat przyjętego obciążenia płyty od samochodu

kotwiące służące do montażu zakotwień. Programowana siła naciągu ciągną to 220 kN. Ze względu na fakt, że płyta będzie pracować w stanie zarysowanym, zastosowano podłużne zbrojenie dolne niezbędne do utrzymania szerokości rysy w bezpiecznych granicach, gwarantujących utrzymanie wymaganej trwałości płyty.

Zbrojenie stanowią 22 pręty  $\varnothing 16$  mm w rozstawie co 20 cm. Prócz tego wzmocniono strefy podporowe zbrojeniem górnym podłużnym i dolnym poprzecznym z prętów  $\varnothing 12$  mm. Górne zbrojenie podłużne stanowi 16 prętów  $\varnothing 8$  mm co 20 cm. Zbrojenie poprzeczne to pręty  $\varnothing 8$  mm dołem i  $\varnothing 6$  mm góra co 20 cm. Całkowita ilość stali zbrojeniowej w płycie wynosi 510 kg, natomiast stali profilowej 435 kg.

Dla przyjętego układu obciążenia (2 osie po 132 kN), sprężenia i zbrojenia zwykłego, dla przekroju środkowego, otrzymano:

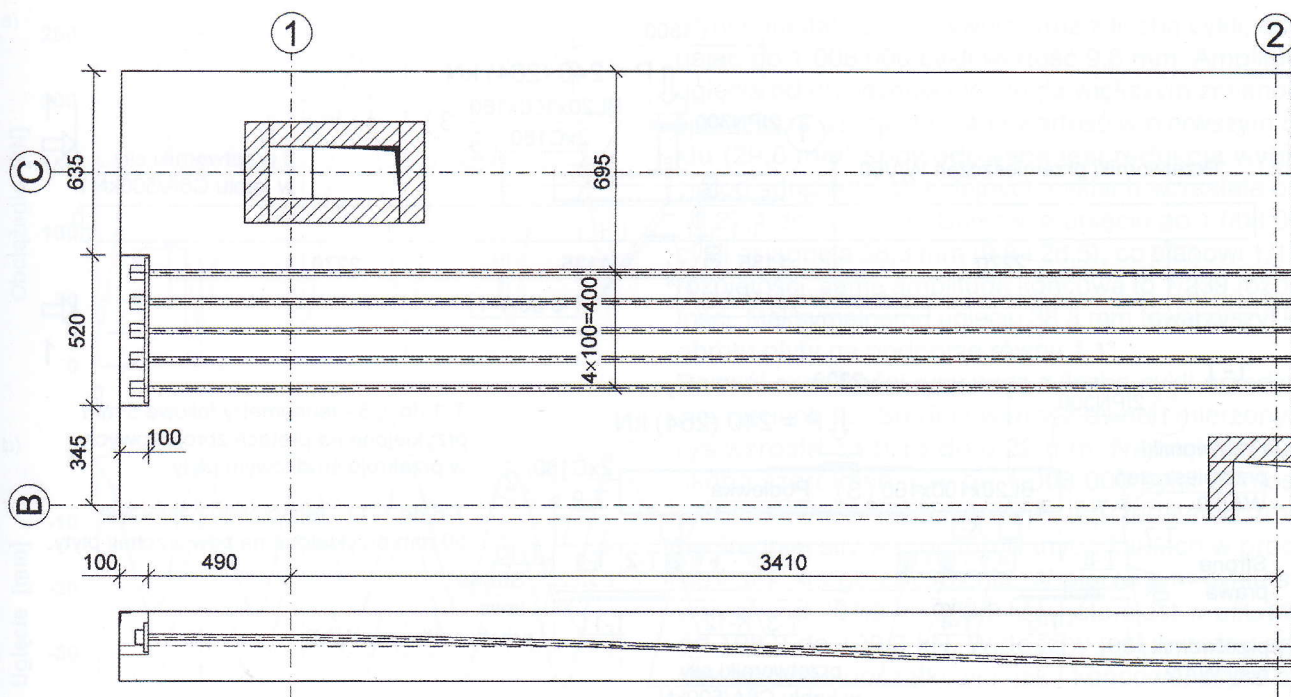
- momenty zginające: 102,2 kNm od ciężaru własnego; 363,0 kNm od obciążenia samochodem,
- naprężenia w przekroju płyty po sprężeniu (sytuacja początkowa): 2,2 MPa na górnej krawędzi (ściskanie); 10,3 MPa na dolnej krawędzi (ściskanie),
- naprężenia w sytuacji użytkowej (siła sprężająca po stratach opóźnionych): 9,9 MPa na górnej krawędzi; -10,3 MPa (rozciąganie) na dolnej krawędzi,
- naprężenia w stali zwykłej i szerokość rysy: 258 MPa i 0,17 mm,
- ugięcie: 28,7 mm.

### 3. Badania płyty

#### 3.1. Prototyp płyty i stanowisko badawcze

Prototyp płyty wykonano w hali laboratorium zgodnie z przygotowanym projektem wykonawczym. Zrealizowano wszystkie elementy stalowego wyposażenia (gniazda podporowe oraz centralne, obramowanie obwodowe z kątownika – rysunek 4). Ponieważ wykonana płyta





Rys. 3. Układ sprężenia



Rys. 4. Układ zbrojenia i sprężenia przed zabetonowaniem (a), płyta po zabetonowaniu (b)

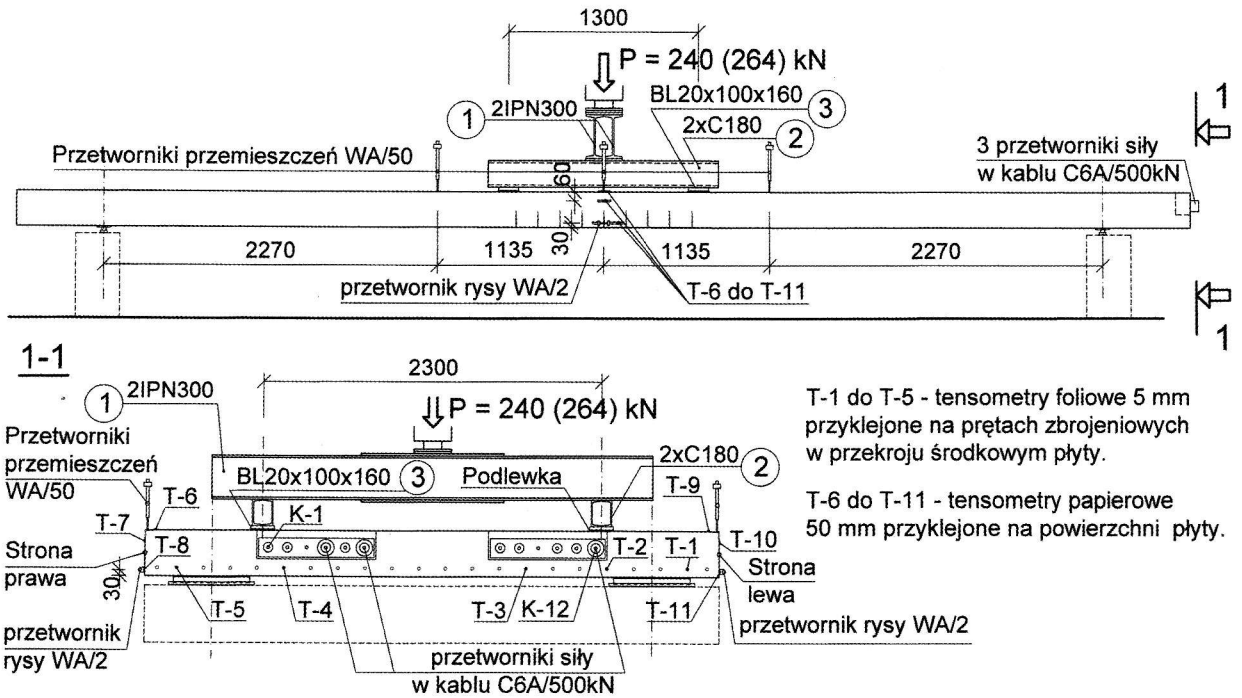
miała charakter prototypowy, a ugięcia i rysy w zarysowanych elementach sprężonych są trudne do precyzyjnego oszacowania drogą obliczeniową, zastosowano w niej dwa awaryjne ciągną z zamiarem ich napięcia, gdyby ugięcia okazały się większe niż przewidywane.

Do zabetonowania płyty użyto betonu klasy C40/50 wykonanego na cemencie portlandzkim CEM I 42,5R ( $w/c = 0,45$ ) i kruszywie bazaltowym o maksymalnym uziarnieniu do 16 mm. Po 19 dniach od zabetonowania płyta została rozformowana oraz ustawiona na podporach docelowych. Na potrzeby badań skonstruowano podpory przegubowe, w tym dwie z możliwością przesuwu. Sprężenie zrealizowano 27 dni po zabetonowaniu, naciągając 10 z 12 ciągną siłą 220 kN.

W celu przekazania obciążenia z prasy tłoka na cztery punkty obciążenia (koła samochodowe) zaprojektowano stalowy układ trawersów. Schemat stanowiska badawczego oraz rozmieszczenie zastosowanych przetworników pomiarowych przedstawiono na rysunku 5. W trakcie badań monitorowano następujące wielkości:

- ugięcie w 6 punktach: w 1/3, 1/2 i 2/3 rozpiętości po obu stronach płyty,
- szerokość wybranej rysy na każdej powierzchni bocznej płyty,
- odkształcenia betonu na trzech wysokościach płyty (po 3 tensometry z każdej strony płyty),
- odkształcenia 5 prętów zbrojeniowych tensometrami naklejonymi w przekroju środkowym płyty,
- siłę w ciągnach sprężających w trzech wybranych kablach.





Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego wraz z lokalizacją przetworników pomiarowych

### 3.2. Program badań

W projektowaniu programu obciążenia założono średnią liczbę cykli obciążeniowych 250 w ciągu doby i żywotność płyty 10 lat (łącznie 912 500 cykli). Ostatecznie zdecydowano obciążyć płytę 1 000 000 razy z częstotliwością 1 Hz. Górna wartość obciążenia cyklicznego wynosiła 240 kN, natomiast dolna 30 kN. Oczywiście jest, że cykliczne obciążenie wpływa destrukcyjnie na kondycję elementu żelbetonowego jak również sprężonego. Element taki wraz z liczbą cykli obciążenia odpowiadał będzie coraz większym ugięciem i rysami. Z tego względu zdecydowano przerywać obciążenie cykliczne co ok. 80 tys. cykli, pozwalając odpocząć płycie przez ok. 30 min, po czym obciążyć ją w jednym cyklu obciążeniem statycznym o wartości 264 kN. Jest to wartość uwzględniająca 10% przeciążenie samochodu, na którą zaprojektowano płytę. W trakcie takiego cyklu (nazwanego dalej obciążeniem kontrolnym) zapisywano w sposób ciągły wszystkie monitorowane wielkości zarówno przy obciążaniu, jak i odciążaniu. Po wykonaniu łącznie 1 008 000 cykli obciążeniowych płyta została poddana próbie zniszczenia w celu określenia jej rzeczywistej nośności oraz jej stanu przy jej osiągnięciu.

### 3.3. Wyniki badań

W trakcie betonowania płyty pobrano próbki betonu, na których badano jego cechy wytrzymałościowe. Wytrzymałość na ściskanie oraz moduł sprężystości określono na próbkach walcowych  $\varnothing 150 \times 300$  mm po 28 dniach od zabetonowania. Wynosiły one odpowiednio 52,5 MPa i 35,0 GPa (średnia z 3 próbek). Wytrzymałość

na rozciąganie przy rozłupywaniu walców  $\varnothing 150 \times 300$  mm wynosiła 4,6 MPa natomiast wytrzymałość na zginanie (belek  $150 \times 150 \times 600$  mm) 7,5 MPa.

W tabeli 1 podano wartości sił w monitorowanych splotach sprężających. Średnia siła naciągu wyniosła 222,8 kN, a wartość po napięciu wszystkich kabli to 199,2 kN. Straty siły od poślizgu cięgna w zakotwieniu i odkształcenia sprężystego betonu to 10,6% siły początkowej. Po napięciu wszystkich 10 splotów płyta doznała wygięcia o 4,6 mm. Naprężenia ściskające w prętach zbrojenia zwykłego w przekroju środkowym płyty, wyznaczone na podstawie średniego odkształcenia 5 tensometrów oraz modułu sprężystości stali 200 GPa, wyniosły 44 MPa.

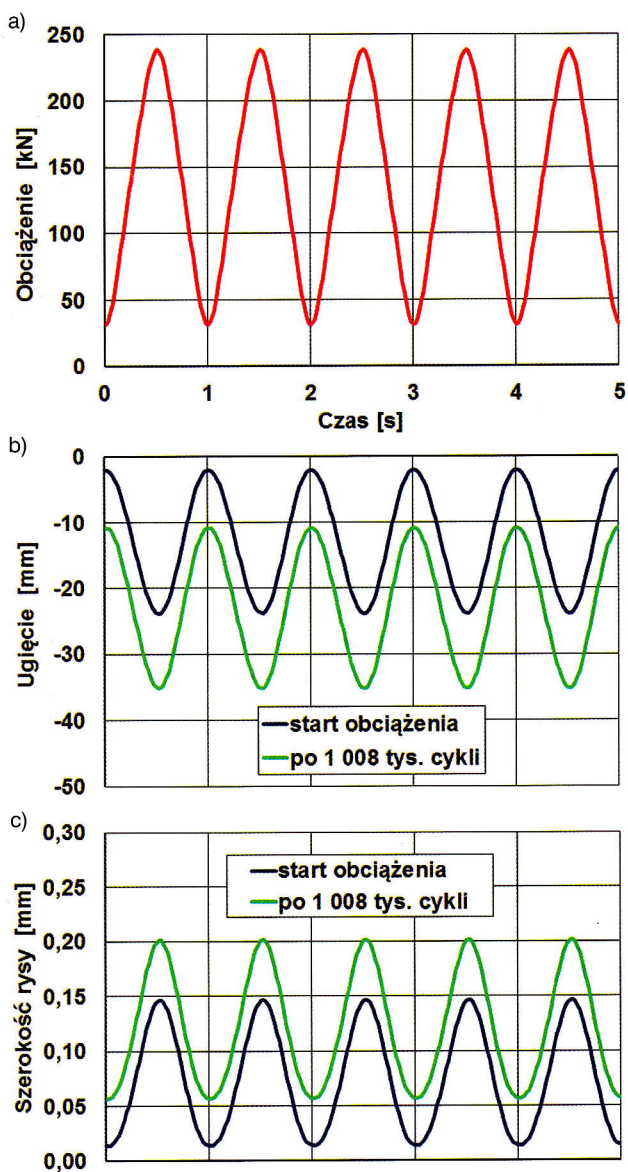
Przebieg ugięcia w środku rozpiętości i średniej rozwartości monitorowanych rys w 5 cyklach obciążenia przedstawiono na rysunku 6. Na wykresach zestawiono przebiegi zarejestrowane na samym początku oraz po 1008 tys. cykli obciążeniowych. Przy sile zmieniającej się od 30 do 240 kN, ugięcie oscylowało pomiędzy 2,1 a 23,8 mm na początku oraz pomiędzy 10,9 a 35,1 mm na końcu obciążania. Amplituda ugięcia przyrosła z 21,7

Tabela 1. Wartości sił w monitorowanych kablach sprężających

Kabel	Siła po naciągu [kN]	Siła po zakotwieniu [kN]	Siła po 1 godz. [kN]
K-6	224,1	209	197,4
K-4	220,5	203	204,2
K-12	223,8	203	199,1
Średnia	222,8	205	199,2

ARTYKUŁY PROBLEMOWE





**Rys. 6.** Zmiana ugięcia (b) oraz szerokości rysy (c) w próbie cyklicznego obciążenia

do 24,2 mm. Przyrost ugięcia wraz z liczbą cykli jest zatem wywołany narastającym ugięciem początkowym, a nie amplitudą.

Szerokość rysy zmieniała się od 0,01 do 0,15 mm na początku oraz od 0,06 do 0,20 mm na końcu obciążania. Również w przypadku rysy jej przyrost wywołany jest przyrostem dolnej wartości czyli trwałej rysy, a nie amplitudy.

Wybrane wielkości zarejestrowane podczas próby przykładania kontrolnego obciążenia 264 kN, które przedstawiono na rysunku 7. Na pierwszym z wykresów (7a) zamieszczono ugięcie trwałe pozostałe po odciążeniu (kolor niebieski) oraz przyrost ugięcia od obciążenia kontrolnego (kolor czerwony). Wygięcie od sprężenia zostało niemal całkowicie zredukowane już po pierwszym cyklu obciążenia (z 4,6 do 0,4 mm). Trwałe ugięcie

plyty narastało sukcesywnie wraz z liczbą cykli, osiągając po 1 008 000 cykli wartość 9,8 mm. Amplituda ugięcia od obciążenia nie uległa większym zmianom. Największa, zarejestrowana wartość w pierwszym cyklu (29,6 mm) spowodowana jest redukcją wygięcia od sprężenia. W kolejnych cyklach wzrastała ona od 27,4 do 28,5 mm. Całkowite ugięcie po 1 008 000 cykli osiągnęła 38,3 mm (9,8+28,5), co stanowi 1/178 rozpiętości, sama amplituda końcowa to 1/239 rozpiętości. Maksimalnemu ugięciu 38,3 mm towarzyszył kąt obrotu płyty na podporze równy  $1,1^\circ$ .

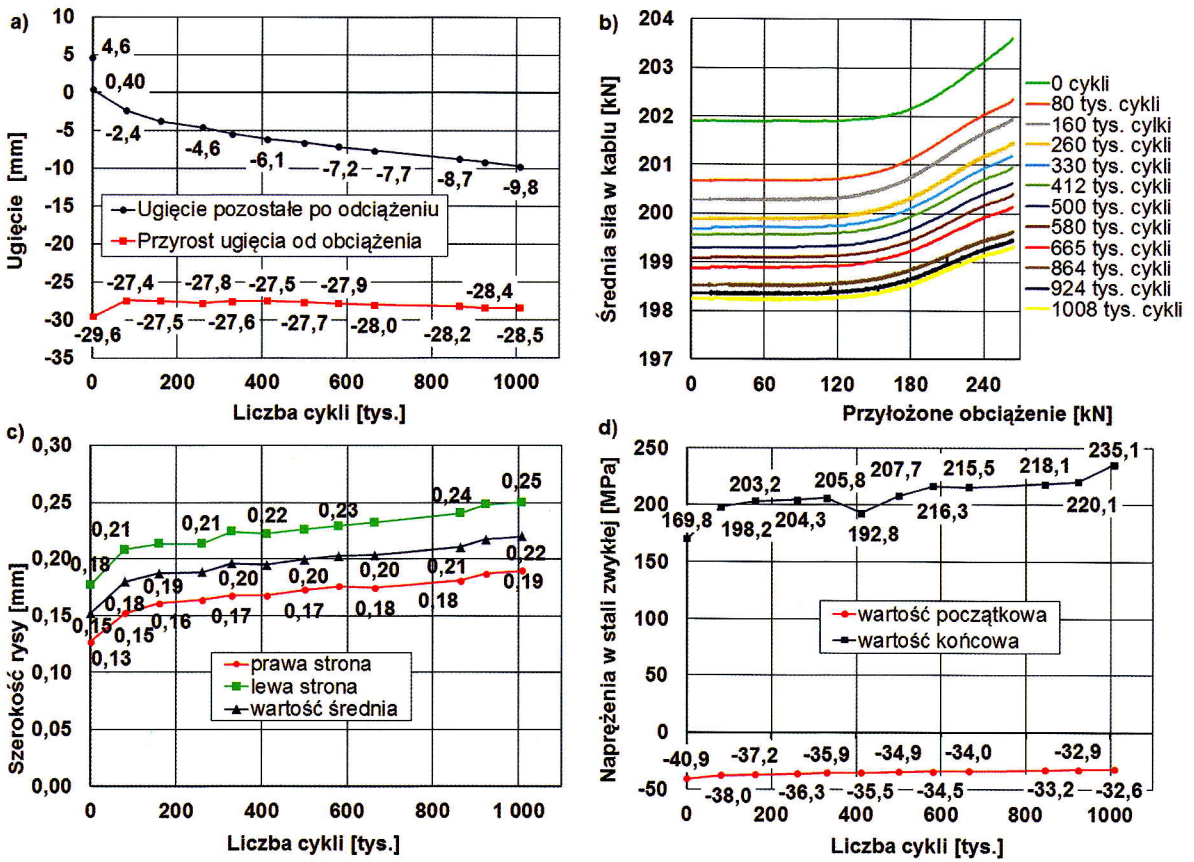
Rozwój szerokości rysy wraz z liczbą cykli przedstawia rysunek 7c. Średnia wartość dwóch mierzonych rys wzrosła od 0,15 do 0,22 mm. Największa uzyskana szerokość rysy po 1 008 000 cykli wyniosła 0,25 mm. Wykres na rysunku 7b przedstawia zmianę średniej siły w monitorowanych kablach w procesie kontrolnego obciążania. W pierwszym cyklu siła wzrosła od 201,9 do 203,9 kN, natomiast w ostatnim od 198,2 do 199,3 kN. Widoczny jest wyraźny spadek zarówno początkowej, jak i końcowej siły w ciągnach wraz ze wzrostem liczby cykli obciążeniowych. Zjawisko to zostało potwierdzone wzrostem naprężeń w stali zwykłej pokazanym na rysunku 7d. Naprężenia te wzrosły od 169,8 do 235,1 MPa, czyli w dużo większym stopniu niż zmalała siła sprężająca. Prócz malejącej roli sprężenia przyczyniła się do tego z pewnością narastająca deformacja płyty.

Po zakończeniu obciążenia cyklicznego podjęto próbę zniszczenia płyty. Obciążenie przykładano ze stałym przyrostem wysuwu tłoka wynoszącym 10 mm/min. Zależność siły zarejestrowanej na prasie od ugięcia pokazuje rysunek 8a. Największą nośność wynoszącą 525,0 kN zarejestrowano przy ugięciu 168 mm. Sytuacji tej towarzyszyły znaczne rysy o szerokości sięgającej 2 mm. Zarejestrowane szerokości rys wyniosły 1,5 mm przy lewej i 0,46 mm przy prawej powierzchni (rys. 8c).

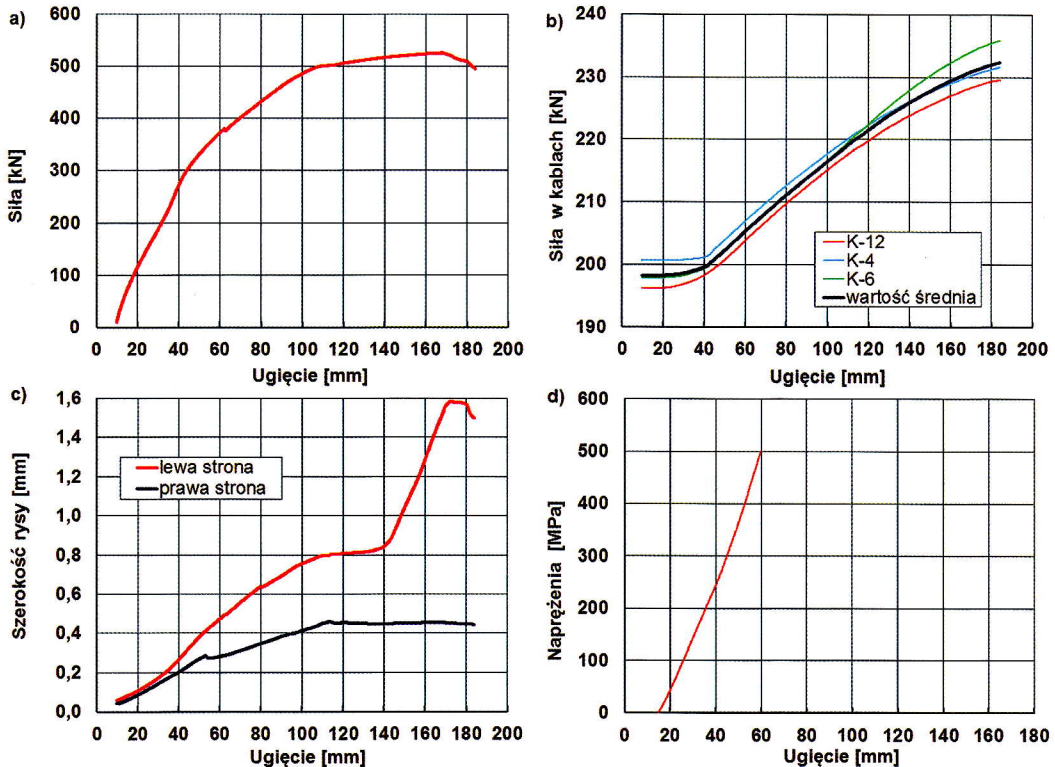
Wartość średniej monitorowanej siły sprężającej przy osiągnięciu największej nośności wzrosła od 198,2 do 230,5 kN, natomiast przyrost naprężeń w stali sprężającej wyniósł 215,3 MPa. Należy zwrócić uwagę, iż jest to ponad dwukrotnie więcej niż sugerowana w normie [10] wartość 100 MPa. Podobnie wysokie przyrosty naprężeń w ciągnach bez przyczepności w stanie zniszczenia rejestrowano również w badaniach publikowanych w pracach [7, 8, 9]. Naprężenia w stali zwykłej, na podstawie zmierzonych odkształceń prętów, oszacowano tylko do wartości 500 MPa, czyli do poziomu pozwalającego na stosowanie liniowej zależności  $\sigma$ - $\epsilon$ . Wartość ta została osiągnięta przy ugięciu wynoszącym 60 mm.

Po osiągnięciu największej nośności 525 kN przy ugięciu 168 mm płytę obciążano dalej ze stałym przyrostem wysuwu tłoka, aż do osiągnięcia ugięcia w środku rozpiętości równego 185 mm. Rejestrowana siła w prasie (nośność) zaczęła jednak gwałtownie spadać (rys. 8a).



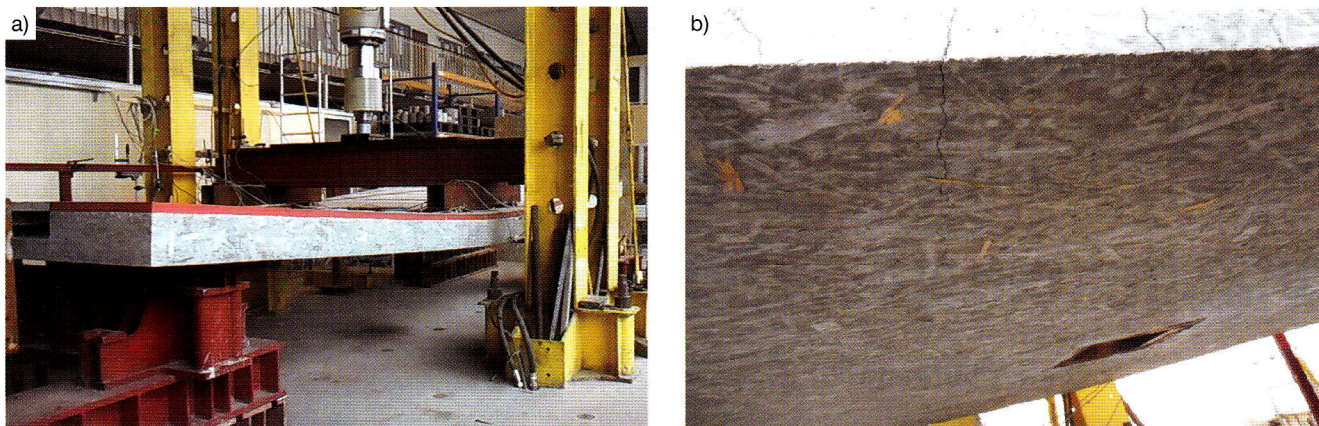


**Rys. 7.** Zmiany ugięcia trwałego pozostałego po odciążeniu i od przyrostu ugięcia (a), średniej siły w kablu od liczby cykli obciążenia (b), szerokości rysy pod obciążeniem kontrolnym od liczby cykli obciążenia (c), naprężeń w stali zwykłej od liczby cykli obciążenia (d)



**Rys. 8.** Zależności ugięcia od siły (a), średniej siły w kablu (b), szerokości rysy pod obciążeniem kontrolnym (c) i naprężeń (d)





**Rys. 9.** Widok obciążonej płyty (a), widok rys w końcowej fazie obciążania przy ugięciu 185 mm (b)

## 4. Podsumowanie

Analizując otrzymane wyniki badań kablobetonowej płyty sprężonej przeznaczonej do wagi samochodowej 30-tonowej stwierdzono, że:

- płyta została prawidłowo zaprojektowana, pomierzone wielkości nieznacznie odbiegają od założeń projektowych i są na poziomie bezpiecznym i gwarantującym utrzymanie wymaganej trwałości płyty, nawet po 1 008 000 cyklach obciążenia nominalnego;
- pomimo użycia betonu na kruszywie bazaltowym uzyskano wartość modułu sprężystości po 28 dniach dojrzewania dokładnie odpowiadającą wartości normowej (35 GPa), definiowaną dla kruszyw kwarcytowych. Płyty można zatem produkować z betonu wykonanego na tańszych kruszywach kwarcytowych. Pozwoli to uniknąć stosowania, używanych w konstrukcjach z betonu sprężonego droższych kruszyw bazaltowych;
- należy zauważyć, że w badaniach przyjęto dość rygorystyczne założenie, iż we wszystkich cyklach wystąpi obciążenie o pełnej, nominalnej wartości 240 kN. Przy normalnym użytkowaniu wagi, prawdopodobieństwo takiej sytuacji jest niemal zerowe. Wobec tego, osiągnięte w badaniach wartości (przy dochowaniu wszelkich zaleceń podanych w projekcie) nigdy nie wystąpią w trakcie eksploatacji wagi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Szydłowski R., Ogrodniczek M., Pierwsze krajowe pomosty wag samochodowych z betonu sprężonego, Przegląd budowlany 6/2015, str. 100–104
- [2] Szydłowski R., Labuzek B., Prestressed Concrete Truck Scale platform with a capacity of 60 tons. Design assumptions and test results, PCI Journal (in review)
- [3] Lin T. Y., Partial Prestressing Design Philosophy and Approach, FIP Notes 69, czerwiec-sierpień 1977, str. 5–9
- [4] Naaman A. E., Siriakson A., Serviceability Based Design of Partially Prestressed Beams, Part 1: Analytic Formulation, PCI Journal, tom 24, nr 2, marzec-kwiecień 1979
- [5] Harajli M. H., Naaman A. E., Deformation and Cracking of Partially Prestressed Concrete Beams Under Static and Cyclic Fatigue Loading, Research Report No. UMCE 85–2, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, kwiecień 1985
- [6] Kripanarayanan K. M., Branson D. A., Short-term deflections of beams under single and repeated load cycles, ACI Journal, tom 69, nr 2, luty 1972
- [7] Seruga A., Politalski W., Graniczne naprężenia stali sprężającej w elementach zginanych sprężanych ciągniami bez przyczepności. Czasopismo Techniczne, Z1-B/2004, str. 1–25
- [8] Politalski W., Przyrost naprężeń w ciągnie bez przyczepności w wyniku obciążenia sprężonej belki kablobetonowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo, Z. 109, 2006, str. 309–316
- [9] Seruga A., Faustman D., Politalski W., Stan graniczny nośności zginanych belek sprężonych ciągniami bez przyczepności. Materiały Konferencji Dni Betonu, Wisła, 13–15 października 2006, str. 847–856
- [10] PN-EN 1992–1–1: Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonem – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, wrzesień 2008