

WIKTOR WCIŚLIK<sup>1</sup>  
PAWEŁ KOSSAKOWSKI<sup>2</sup>  
Kielce University of Technology  
<sup>1</sup> e-mail: wwcislik@tu.kielce.pl  
<sup>2</sup> e-mail: kossak@tu.kielce.pl

# CARRYING CAPACITY ASSESSMENT AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OPERATING IN CHEMICALLY AGGRESSIVE ENVIRONMENT

## Abstract

The paper presents a case of an industrial building in the chemical works, in which intensive production processes caused corrosion and weakened structural members. The results of investigations and static strength analysis are provided. They were necessary to assess the reliability of the structure operating under chemical corrosion conditions corresponding to the XA exposure class. The repair plan, already implemented, together with selected components of the building structural upgrade design are presented.

**Keywords:** reinforced concrete structures, chemical corrosion, diagnostics, carrying capacity assessment, structural strengthening.

## 1. Introduction

Civil structures in operation are adversely affected by a number of factors, which in many cases can significantly reduce usability and even pose a risk to structural integrity. Standard [1] imposes a requirement for the durability of the structure. Throughout its lifetime, the structure must meet the requirements on carrying capacity, stability and serviceability. Environmental actions on concrete structures and products are taken into account in standards [2, 3], which specify the exposure classes presented in Table 1.

Table 1. Exposure classes acc. [2, 3]

Class symbol	Risk description	Exposure class
X0	No risk of environmental attack or corrosion	X0
XC	Corrosion induced by carbonation	XC1, XC2, XC3, XC4
XD	Corrosion induced by chlorides other than those from sea water	XD1, XD2, XD3
XS	Corrosion induced by chlorides from sea water	XS1, XS2, XS3
	Environmental action on concrete	
XF	Freeze / thaw attack with or without de-icing agents	XF1, XF2, XF3, XF4
XA	Chemical attack	XA1, XA2, XA3
XM	Attack induced by abrasion	XM1, XM2, XM3

Chemical action is induced by a number of factors that can substantially reduce the durability of concrete structures. Chemical corrosion is an action often found in real-life situations. However, because of the complexity of this phenomenon, it is not precisely specified in current standards. Apart from the fact that XA exposure classes are specified, a number of parameters and requirements are not accurately stated, which is discussed below.

To achieve the required durability of concrete structures and products, it is necessary to ensure that composition and quality of concrete are appropriate for the conditions of use, which correspond to individual exposure classes. Minimum concrete parameters are specified in standard [2] for the assumed 50-year lifespan of the structure. Table 2 shows the required parameters of concrete for XA exposure classes under chemical attack situation.

Another relevant parameter that affects the durability of concrete structures exposed to environmental corrosion is the presence of cracks. For reinforced concrete structures that are non-prestressed, cracks are permitted, provided that cracks do not affect the structure operation, as stated in standard [4]. For prestressed structures, requirements on permissible

Table 2. Recommendations on concrete composition and properties for XA exposure classes acc. [2]

Class symbol	Description of the environment	Minimum strength class	Maximum w/c ratio	Minimum cement content (kg/m <sup>3</sup> )	Other requirements
XA1	Slightly aggressive chemical environment	C30/37	0.55	300	–
XA2	Moderately aggressive chemical environment	C30/37	0.50	320	Cement with resistance to sulphates
XA3	Highly aggressive chemical environment	C30/37	0.45	360	Cement with resistance to sulphates

crack widths are given for X0, XC, XD and XS exposure classes, whereas XA and XM classes are not accounted for.

To sum up, requirements on concrete composition, quality and strength are specified when the action of chemically aggressive environment is found for XA exposure class. However, precise guidelines concerning the minimum cover and permissible crack width are not available. Thus, when a chemical attack occurs, engineers have to make an assessment of the condition of a given structure, and when any risk is involved, take precautionary steps based on existing recommendations, professional knowledge and expertise.

This paper presents the case of an industrial building in the chemical works. Intensive manufacturing processes taking place in the building led to pre-failure condition resulting from the action of the aggressive chemical environment.

## 2. Description of the building structure

The building discussed in this paper is a part of the chemical works. It is a three-storey building with a basement. The reinforced concrete and steel structure consists of two parts separated by an expansion joint. In the building plan, overall dimensions are 30.8 × 14.0 m. The basic load carrying structure consists of seven two-bay reinforced concrete frames spaced 6.0 m on centre (Fig. 1). The frames are braced with a system of steel ribs of I300 profiles (part A of the building) and reinforced concrete ribs 30×40 cm in cross section (part B). Those are connected to the monolithic reinforced concrete flooring system of one-way slabs. Due to the presence of tanks and production machines, openings up to 1.7 m in diameter were designed and made in the flooring slabs.

Because of numerous damages that occurred when the building was in use, a decision was taken to obtain expert opinion on the building condition. The scope of the report and the results are presented further on in the paper.

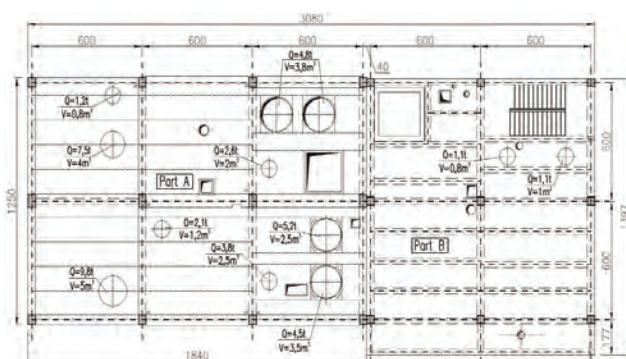


Fig. 1. Plan of the flooring system structure at the level of +4.20 (first floor slab)

## 3. Investigations into the structure condition

The expert opinion for the structure of concern included the condition survey and survey of damages, concrete rebound hammer tests and measurements of crack widths. Static strength analysis was also performed to determine the actual carrying capacity of the building structure.

### 3.1. Results of visual inspection and measurements

The visual inspection revealed the presence of many damages to the structural members. The examples that are presented refer to the floor in part B of the building at the level of +4.20.

Floor slabs showed considerable degradation manifested as concrete hairline cracks and cracks, and also chipping and scaling at the sites of member repairs. Some ribs and spandrel beams had been previously strengthened by installing steel elements (Fig. 2). The repair works proved ineffective, which was indicated by multiple cracks and crumbling of the mortar used for levelling and reinforcement protection against corrosion. Chemical corrosion of concrete and reinforcing steel was also observed. At many sites, rusty stains were found, which indicate advanced reinforcement corrosion in the reinforced concrete members.



Fig. 2. View of corrosion of the floor and floor beams at the level of +4.20 in part B

Additionally, white efflorescence was found, which results from calcium compounds being washed out of concrete. All those damages are related to the kind of production processes in the plant, where structural members are exposed to aggressive chemical environment, mainly chlorides.

Crack widths in structural members were monitored during the period of 4 years. DEMEC gauge, dial version, by Mayes & Son, with a resolution of 0.002 mm was used. The results of measurements showed the presence of multiple hairline cracks more than 0.3 mm in width. However, no significant increase in crack widths was observed in the time indicated above.

### 3.2. Rebound hammer tests of concrete

To determine the strength and a degree of degradation of concrete in the structural members, rebound hammer tests were run. Prior to the tests, external corroded layers were hacked. Proceq's type N original Schmidt test hammer was used. The results indicated that the characteristic strength of concrete ranged from 6.18 to 42.32 MPa. That meant the material in many members was not compliant with any strength classes specified by the code. The reason was the degradation of concrete structure caused by the material insufficient tightness and corrosion-prone environment.

### 3.3. Verification of the building structure carrying capacity

To verify the carrying capacity of the structure, static numerical analysis was performed. The bar and shell elements of the structural system were modelled.

Actual strength parameters of the materials, determined in the tests on individual members, and actual cross-section dimensions were accounted for. The losses resulting from the degradation of the materials structure caused by the chemical attack were also taken into consideration.

The verification of the carrying capacity of the structure indicated that for many members, the limit values and permissible level of deformations were exceeded. Consequently, it was necessary to make repairs and strengthen the structure.

## 4. Conclusions, assessment of condition and scope of repair works

The results of the investigations showed that building condition posed a serious risk to the safety of the users and the repair works conducted so far proved ineffective. Static strength computations indicated that the resistance values of spandrel beams, ribs and floor slabs might be exceeded. Cracking of reinforced concrete members, large above the permissible level given in the code, together with the corrosion environment action resulted in severe degradation of the material and further loss of structural resistance.

Because of damages and insufficient resistance of many members that posed a considerable safety risk to the building users, a decision was taken to instantly unload the floor structure and to strengthen it. The floor structure (beams and slabs on the bottom side) were renovated using the Deitermann's PCC concrete repair system.

Beam strengthening was designed to include additional load carrying components, namely two L180x18 equal angles installed underside.

Lankwitzer corrosion protection paint was applied to the steel structure. The epoxy and polyurethane material is suitable for corrosion environment (C4) and expected long lifetime of the structure (H).

Figure 3 shows the strengthening of the floor beams in part B of the building at the level of +4.20.

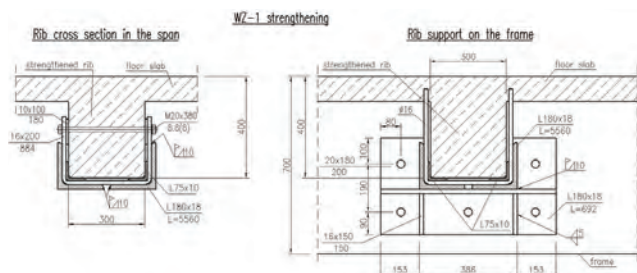


Fig. 3. Strengthening WZ-1 of the floor beams of part B at the level of +4.20

## 5. Summary

A very high rate of materials degradation process in the building of concern should be noted. That is an effect of chemically aggressive environment. As a result, the strength of the materials and the structure carrying

capacity were considerably reduced. Consequently, a pre-failure condition occurred that could pose a usability hazard. The building condition was so bad that it was necessary to instantly unload it and to strengthen its structure.

## References

- [1] PN-EN 1990:2004 Eurocode – Basis of structural design.  
 [2] PN-EN 206-1:2003 Concrete – Part 1: Requirements, properties, production and conformity.

- [3] PN-B-06265:2004 National supplements PN-EN 206-1:2003 Concrete – Part 1: Requirements, properties, production and conformity.  
 [4] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Wiktor Wciślik  
 Paweł Kossakowski

# Ocena nośności i wzmacnianie konstrukcji żelbetowych pracujących w środowisku agresywnym chemicznie

## 1. Wprowadzenie

Obiekty budowlane w trakcie eksploatacji narażone są na szereg niekorzystnych oddziaływań, które w wielu sytuacjach mogą w znaczący sposób obniżać ich przydatność do użytkowania, a nawet stwarzać zagrożenie bezpieczeństwa. Norma [1] narzuca wymóg zapewnienia trwałości konstrukcji, która powinna przez cały okres użytkowania spełniać określone wymagania w zakresie nośności i stateczności oraz użytkowości. Oddziaływania środowiskowe na konstrukcje i wyroby z betonu uwzględnione zostały w normach [2, 3], które wyróżniły tzw. klasy ekspozycji, przedstawione w tabeli 1.

Wymagana trwałość wyrobów i konstrukcji betonowych jest związana z zapewnieniem odpowiedniego składu i struktury betonu, które są dostosowane do warunków użytkowania odpowiadających określonej klasie ekspozycji. Minimalne parametry betonu określa norma [2], zakładając zapewnienie trwałości na poziomie 50 lat. W tabeli 2 podano wymagane parametry betonu dla klas ekspozycji XA w sytuacji występowania agresji chemicznej.

W niniejszym artykule przedstawiono przypadek budynku wchodzącego w skład zakładów chemicznych, w którym w wyniku intensywnej produkcji przemysłowej doszło do stanu przedawaryjnego na skutek oddziaływania środowiska agresywnego chemicznie.

## 2. Opis konstrukcji budynku

Budynek będący przedmiotem artykułu wchodzi w skład kompleksu zakładów chemicznych. Budynek trzykondygnacyjny, podpiwniczony, składający się z dwóch oddzielnych części o konstrukcji żelbetowo-stalowej. Całkowite wymiary w rzucie poziomym budynku to  $30,8 \times 14,0$  m. Podstawowy układ nośny stanowi 7 dwunawowych ram żelbetowych w rozstawie osiowym 6,0 m (rys. 1). Ramy spięte są układem żeber stalowych z profili dwuteowych I300 (w części A) oraz żelbetowych o przekroju poprzecznym  $30 \times 40$  cm (w części B) zespolonych z monolitycznym stropem żelbetowym.

W związku z licznymi uszkodzeniami obserwowanymi w trakcie eksploatacji, podjęto decyzję o wykonaniu ekspertyzy dotyczącej stanu technicznego konstrukcji budynku. Zakres i wyniki badań przedstawiono w dalszej części artykułu.

## 3. Badania stanu technicznego

Wykonana ekspertyza obejmowała inwentaryzację konstrukcji i uszkodzeń, badania sklerometryczne betonu, pomiar rozwartości rys oraz analizę statyczno-wytrzymałościową w celu określenia aktualnej nośności konstrukcji budynku.

### 3.1. Wyniki oględzin i pomiarów

Na podstawie przeprowadzonych oględzin stwierdzono obecność licznych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych budynku, których przykład przedstawiono w odniesieniu do stropu części B w poziomie +4,20.

Konstrukcja płyt stropowych, na których zaobserwowano zarysowania i spękania betonu, a także odpryski i odspojenia w obrębie miejsc napraw elementów charakteryzowała się znaczną degradacją. Część żeber i rygli ram została poprzednio wzmocniona poprzez zamontowanie elementów stalowych (rys. 2). Wykonane naprawy okazały się nieskuteczne, o czym świadczą liczne spękania oraz wykruszenia zaprawy wyrównującej i zabezpieczającej zbrojenie przed korozją. Zaobserwowano również korozję chemiczną betonu i stalowych elementów wzmacniających. W wielu miejscach wystąpiły rdzawe nacieki świadczące o zaawansowanej korozji zbrojenia elementów żelbetowych.

Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono obecność licznych zarysowań o szerokości ponad 0,3 mm, jednakże w rozpatrywanym okresie nie zaobserwowano istotnego przyrostu rozwarcia.

### 3.2. Badania sklerometryczne betonu

W celu określenia wytrzymałości betonu zastosowano młotek Schmidta typu N firmy Proceq. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż wytrzymałość charakterystyczna betonu wahała się w granicach od 6,18 MPa do 42,32 MPa, co oznacza, że w wielu elementach nie spełniała wymogów żadnej klasy normowej. Jako przyczynę tego stanu rzeczy należy wskazać przede wszystkim degradację struktury betonu wywołaną jego niedostateczną szczelnością i działaniem środowiska korozyjnego.

### 3.3. Weryfikacja nośności konstrukcji budynku

W celu weryfikacji nośności konstrukcji budynku wykonano analizę numeryczną w zakresie statycznym, modelując przestrzenny, prętowo-powłokowy układ konstrukcyjny. Uwzględniono rzeczywiste parametry wytrzymałościowe materiałów określone w trakcie badań dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz rzeczywiste wymiary ich przekrojów poprzecznych z uwzględnieniem ubytków związanych z degradacją struktury materiałowej na skutek agresji chemicznej.

W wyniku przeprowadzonej weryfikacji nośności stwierdzono, że w przypadku wielu elementów konstrukcyjnych przekroczone są ich nośności oraz

dopuszczalne deformacje, a zatem wymagają one naprawy i wzmocnienia.

### 4. Wnioski, ocena stanu technicznego i zakres prac naprawczych

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż stan techniczny budynku stanowi poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników, a wykonane doraźnie naprawy nie spełniają swojej funkcji. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wykazały możliwość przekroczenia nośności rygli ram, żeber i płyt stropowych. Znaczne, ponadnormatywne zarysowanie elementów żelbetowych wraz z oddziaływaniem środowiska korozyjnego stały się przyczyną daleko idącej degradacji materiału i dalszego spadku nośności konstrukcji.

Konstrukcję stropu (belki i płyty od strony spodniej) poddano renowacji w systemie naprawy żelbetu PCC firmy Deitermann. Wzmocnienie belek zaprojektowano poprzez zamontowanie od spodu dodatkowych elementów nośnych w postaci dwóch kątowników L180 x 18.

Zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji stalowej wykonano w systemie Lankwitzer, stosując materiał epoksydowo-poliuretanowy dobrany dla środowiska korozyjnego C4 i przewidywanego długiego zakresu trwałości H.

Na rysunku 3 pokazano wzmocnienie belek stropu w części B na poziomie +4,20.

### 5. Podsumowanie

Podsumowując, należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką intensywność procesów degradacji materiału stwierdzonej w odniesieniu do analizowanego budynku na skutek oddziaływania środowiska agresywnego chemicznie. Pociągnęło to za sobą znaczną redukcję wytrzymałości materiału i nośności konstrukcji, prowadząc do stanu przedawaryjnego, mogącego stwarzać zagrożenie bezpieczeństwa użytkownika. Stan techniczny budynku był na tyle zły, że w trybie natychmiastowym należało go odciążyć oraz wykonać wzmocnienie jego konstrukcji.