

CONFINAREA BETONULUI CU POLIMERI ARMAȚI CU FIBRE - METODĂ DE CONSOLIDARE A ELEMENTELOR STRUCTURALE- THE CONFINEMENT OF CONCRETE WITH FIBER REINFORCED POLYMERS - METHOD OF CONSOLIDATION OF STRUCTURAL ELEMENTS-

MARIN AMĂREANU*

Universitatea Tehnică de Construcții București, B-dul Lacul Tei nr. 122-124. Sector 2, 020396, București, România

Investigațiile sugerate de obiectul acestei lucrări sunt focalizate pe calculul presiunii de confinare, în cazul unor elemente structurale din beton cu secțiune circulară, și a efortului efectiv de compresiune lateral la starea limită ultimă (SLU) datorat confinării acestor elemente cu țesătură din fibre de carbon. De asemenea, lucrarea se referă la executarea și consolidarea elementelor structurale din beton prin confinare cu țesătură din fibre de carbon, astfel încât în urma solicitărilor lor în vederea obținerii rezistențelor mecanice, valorile acestora să fie comparabile cu cele obținute din calcul.

The investigations suggested by the objective of this work are focused on the calculation of the confinement pressure, for concrete structural elements with circular section, and of the effective lateral compression stress at the ultimate limit state (ULS) due to the confinement of these elements with carbon fiber fabric. The paper also refers to the execution and consolidation of concrete structural elements by confinement with carbon fiber fabric, so that following the concrete structural elements tests for obtaining the mechanical strength values, these would be comparable with the ones obtained from the calculation.

Keywords: *confined concrete, mechanical strength, design calculation*

1. Introducere

Structuri vechi, din beton armat, ale diferitelor clădiri de patrimoniu, sau afectate de evenimente, reacții chimice sau alte motive, poduri etc. pot fi reparate sau consolidate în vederea creșterii capacității lor portante.

Investigațiile sugerate de obiectul acestei lucrări sunt focalizate pe evaluarea caracteristicilor fizico-mecanice ale unui sistem complex beton de ciment – fibre de carbon (liate cu rășină epoxidică), obținut pe baza unui calcul riguros de proiectare și modelare și printr-o tehnologie corectă de execuție, astfel încât să îndeplinească condiții de performanță.

Consolidarea, cu materiale pe bază de fibre, ale structurilor din beton armat reprezintă o variantă modernă și eficientă a sistemelor de consolidare a elementelor structurale din beton. Studiile efectuate în străinătate și în țară au demonstrat avantajele potențiale ale utilizării acestui sistem: modulul de elasticitate ridicat, rezistența la agenții chimici, capacitatea de absorbție a vibrațiilor, durata redusă de execuție a lucrărilor, posibilitatea de a efectua lucrările de consolidare fără întreruperea activității construcției, cantități mici de materiale de manipulat [1-7].

Metoda de consolidare prin confinare cu țesătură din fibre de carbon, care constă în aplicarea țesăturii din fibre de carbon și fixarea ei cu rășini epoxidice pe părțile tensionate ale struc -

1. Introduction

Old reinforced concrete structures of different heritage buildings or buildings affected by events, chemical reactions or other factors, bridges etc. can be repaired or consolidated to increase their bearing capacity.

The investigations suggested by this work are focused on the evaluation of mechanical and physical characteristics of a complex concrete cement – carbon fiber (tied with epoxy resin) system obtained based on a rigorous design and modelling calculation and through a correct execution technology, so that it meets the performance requirements.

Consolidation with fiber based materials of reinforced concrete structures is a modern and effective variant of concrete structural elements consolidation systems. Studies performed abroad and in our country have proven the potential advantages of using this system: high coefficient of elasticity, chemical agents resistance, the capacity of absorbing vibrations, short execution time, the possibility to perform the consolidation work without interrupting the construction activity, the small quantity of manipulated materials [1-7].

The method of consolidation of confinement with carbon fiber fabric, which consists in applying and attaching the carbon fiber with epoxy resin on the strained parts of the structure, is one of the solutions which can be applied in order to enhance

* Autor corespondent/Corresponding author,
E-mail: mirel.amareanu@gmail.com

cturii, este una dintre soluțiile care pot fi aplicate în vederea măririi rezistenței structurii. Consolidarea structurilor de beton cu polimeri armați cu fibre (PAF) aplicați la exterior este o tehnică care se bazează pe conlucrarea dintre betonul simplu, armat sau precomprimat și armătura lipită la exterior.

Consolidarea prin confinare cu polimeri armați cu fibre de carbon se face fără supradimensionarea elementului și fără ca acesta să crească în greutate.

Acest tip de consolidare, folosind țesătura din fibre de carbon face obiectul prezentei lucrări. Materialele compozite, utilizate în experimentele de laborator care fac tema prezentei lucrări, poartă denumirea de TFC (Carbon Fiber Fabric), ele dovedindu-se utile atât în mentenanță (reparații urmare a unor acțiuni excepționale asupra structurii - foc, soc etc, compensarea efectelor din structură, generate de îmbătrânire, oboseală, pierderea rezistenței, coroziune etc.), cât și prin creșterea rezistenței în sensul aducerii structurii la noi cerințe de funcționare [8].

2. Materiale și metode

2.1. Stabilirea compoziției betonului

În prezenta lucrare s-a ales ca obiect al cercetărilor un beton de clasă C 50/60 – T₂ – CEM I 52,5 R - 0/16 – cu granulozitate continuă.

- Pentru obținerea betonului C 50/60 – SR EN 206 s-au avut în vedere următoarele prevederi compoziționale: raport a/c = 0,4, apă 185 l, dozaj de ciment: 462,5 kg/ m³, aer occlus 2 %, agregat de râu.

S-a folosit un ciment de tip CEM I 52,5 R (furnizat de CARPATCEMENT), care prezintă următoarele caracteristici (tabelul 1).

Limitele zonei de granulozitate pentru agregate 0/16 cu granulozitate continuă, în care s-a ales curba granulometrică utilizată este prezentată în tabelul 2.

structural strength. The consolidation of fiber reinforced polymers concrete structures is a technique based on the interworking between the plain, reinforced or pre-stressed concrete, and the externally bonded reinforcement.

Consolidation by confinement with carbon fiber reinforced polymers is done without oversizing the elements and without them increasing in weight.

This type of consolidation, using carbon fiber fabric is the object of this work. The composite materials, used in the laboratory experiments, are named CFF (Carbon Fiber Fabric), proving to be useful in the maintenance (repairing the damage caused by exceptional actions on the structure - fire, shock etc, compensating the effects in the structure, caused by ageing, fatigue, loss of strength, corrosion etc.), and by increasing strength in the sense of bringing the structure to new operational requirements [8].

2. Methods and materials

2.1. Determining the composition of the concrete

In this work a concrete class C 50/60 – T₂ – I 52.5 - 0/16 – with continuous granularity was chosen as the object of research.

- To obtain the concrete C 50/60 – SR EN 206 the following compositional provisions were considered: cement/water ratio = 0,4, water 185 l, dosage of cement: 462.5 kg/ m³, occluded air 2 %, river gravel.

A cement type CEM I 52,5R (provided by CARPATCEMENT) was used, which it has the following features. (Table 1).

The boundaries of the granularity area for 0/16 aggregate with continuous granularity, in which the used granulometric curve was chosen is shown in Table 2.

The amount of materials required to obtain a cubic meter of concrete are presented in Table 3.

Density obtained from the calculation 2378 Kg/m³.

Tabelul 1

Caracteristici compoziționale ale cimentului CEM I 52,5 R / Compositional characteristics of cement CEM I 52.5 R

Compoziția chimică / Chemical composition (%)											
CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	R _{ins}	LOI / PC	CaO liber / Free CaO	
63.72	20.13	3.09	4.49	3.28	2.35	0.30	0.91	0.20	2.11	0.90	
Compoziția mineralogică / Mineralogical composition (%)											
C ₃ S			C ₂ S			C ₃ A			C ₄ AF		
67.18			11.76			6.35			9.97		
Caracteristici fizice / Physical characteristics											
Suprafața specifică / Specific surface (cm ² /g)				Stabilitate / Stability (mm)				Timp de priză / Setting time (minutes)			
4198				0.0				initial		final	
								165		230	
RC _{28 zile} = 39.8 MPa						RC _{28 zile} = 59.8 MPa					

Tabelul 2

Limita zonelor de granulozitate pentru agregate (0-16) și proporțiile utilizate
The boundaries of the granularity area for 0/16 aggregate and proportions used

Diametru ochi sită / Sieve aperture (mm)		0.5	1	2	4	8	16
Treceri Pass (%)	Min.	8	12	21	36	60	100
	Max.	20	32	42	56	76	100
	Utilizat / Used	18	25	33	45	70	100

Tabelul 3

Materiale necesare obținerii betonului / *Materials to obtain concrete*

Materialul / <i>The type of material</i>	Cantitate / <i>Amount (kg)</i>
Ciment CEM I 52,5 R / <i>Cement CEM I 52,5 R (kg/m³)</i>	462.5
Apa / <i>Water (l/m³)</i>	185
A/C (<i>water cement ratio</i>)	0,4
Agregat uscat / <i>Dry aggregate (kg/m³)</i>	
sort 0/1	432.7
sort 1/2	138.5
sort 2/4	207.7
sort 4/8	432.7
sort 8/16	519.21

Cantitățile de materiale necesare obținerii unui m³ de beton sunt prezentate în tabelul 3.

Densitatea obținută din calcul este 2378Kg/m³.

2.2. Caracteristici ale fibrelor de carbon și ale rășinii epoxidice

În vederea consolidării elementelor structurale pot fi utilizate rășini epoxidice în combinație cu diferite tipuri de fibre, cum sunt fibre de sticlă, aramidice, de carbon, de bor.

În aceasta lucrare se prezintă consolidarea elementelor structurale din beton pe bază de rășină epoxidică și țesătură din fibre de carbon.

Aceste ultime două componente ale materialului compozit sunt furnizate de SC FREYROM SA sub denumirea de TFC.

TFC-ul este un material compozit alcătuit din două componente: matricea (rășina epoxidică întărită) și armătura (țesătura din fibre de carbon).

Rășina epoxidică întărită rezultă din combinarea rășinei și întăritorului la temperatura mediului ambiant în raport masic 100/40, cu timp de priză de 1h 20' la 20°C și 40 min. la 30°C, și întărire în 15 zile la 15° C, sau 3-4 zile la 20° C. Densitatea rășinii epoxidice este de 1,24 g/cm³. Aderența sistemului bicomponent la suportul din beton, exprimată prin rezistența la smulgere, este de 6,22 N/mm².

Caracteristicile țesăturii cu fibre de carbon (fig. 1) sunt următoarele [8, 9]:

2.2. Features of carbon fiber and epoxy resin

In order to consolidate structural elements we can use epoxy resin combined with various fibers, like fiberglass, aramid, carbon, boron.

This study shows the consolidation of epoxy resin and carbon fiber fabric based concrete structural elements.

These last two components of the composite material are provided by SC FREYROM SA under the name of TFC.

TFC is a composite material made of two components: the matrix (the hardened epoxy resin) and the reinforcement (the carbon fiber fabric).

Hardened epoxy resin is a result of combining the resin and the hardener at room temperature with a mass ratio of 100/40, with a setting time of 1h 20 (at 20°C and 40 min. at 30°C, and hardening in 15 days at 15° C, or 3-4 days at 20° C. The epoxy resin density is 1.24 g/cm³. *The adhesion of the bicomponent system at the concrete pad, expressed by bond strength, is 6.22 N/mm².*

The features of the carbon fiber fabric (Figure 1) are the following [8, 9]:

- 70 % longitudinal fibers
- 30 % transverse fibers
- weight 500 g/m²
- bandwidth between 40 and 300 mm, 50 m long scrolls.
- conventional band thickness: 0.48 mm
- elastic modulus: 105 GPa

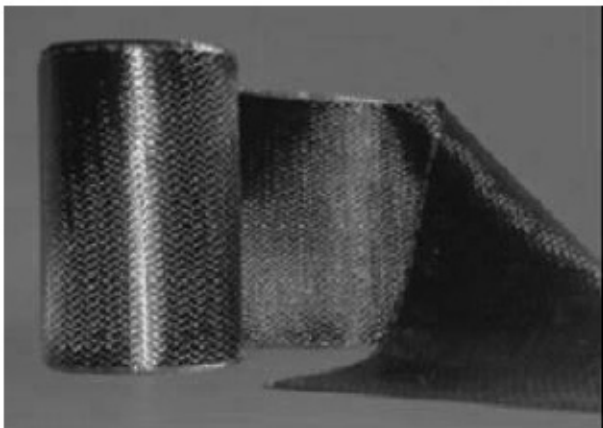


Fig. 1 - Țesătura din fibre de carbon / Carbon fiber fabric.

- 70 % fibre longitudinale
- 30 % fibre transversale
- greutate 500 g/m²
- lățimea benzii de la 40 la 300 mm, suluri de 50 m lungime.
- grosimea convențională a benzii: 0,48 mm
- modulul de elasticitate: 105 GPa
- rezistența la rupere: 1700 MPa (rupere fragilă)
- efortul la starea limită ultimă (SLU): 913 MPa
- efortul la starea limită de serviciu (SLS): 550 MPa

Aranjarea fibrelor în țesătură e reprezentată în figura 2.

În ceea ce privește rezistența la foc a materialului compozit – fibra de carbon rezistă

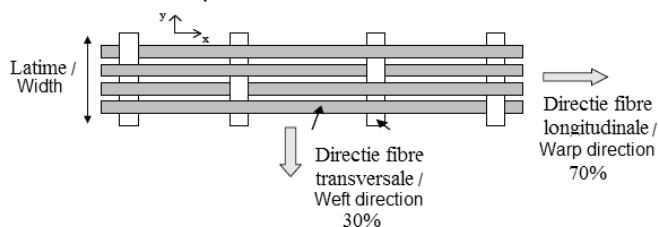


Fig. 2 - Aranjare fibre în țesătură / Arrangement of fibers in the fabric.

- tensile breaking strength: 1700 MPa
- ultimate limit state effort (ULS): 913 MPa
- Serviceability limit state effort (SLS): 550 MPa

The inclination of the fibers in the fabric is represented in Figure 2:

Regarding the fire resistance of the composite material – carbon fiber can withstand up to 1800 °C, the resin (the connection matrix) being the only one affected by the temperature growth which keeps its properties up to a critical temperature of 80 °C. A temperature of 60 °C is recommended for permanent use, but if it is necessary to expose the composite to higher temperature protection solutions can be adopted.

This composite material shows low weight, no corrosion, good resistance to fatigue (three times better than aluminium alloy and two times better than steel) but also the possibility of creating some complex shapes.

The composite is an anisotropic material, so for a good tensile behavior the right fiber orientation must be chosen (Figure 3) [8].

2.3. Conditions and experimental procedures

The efficiency of the confinement was highlighted in this work, by analyzing the structural response of the concrete test-pieces, confined with carbon fiber reinforced polymer membranes, *subjected to compression*, but also to obtain the elastic modulus.

According to Table 3, the necessary amount of materials for obtaining 6 cylindrical test-pieces (diameter = 15 cm, height = 30 cm) and 3 cubical test-pieces(diameter = 15 cm, height = 30 cm) of class C 50/60 concrete, were used.

The obtained test-pieces were stripped and kept in water for 28 days, after which some of them (3 cubical test-pieces) were subjected to compression tests to evaluate their resistance regarding the achievement of the resistance class.

On the other test pieces the influence confinement on their mechanical resistance was

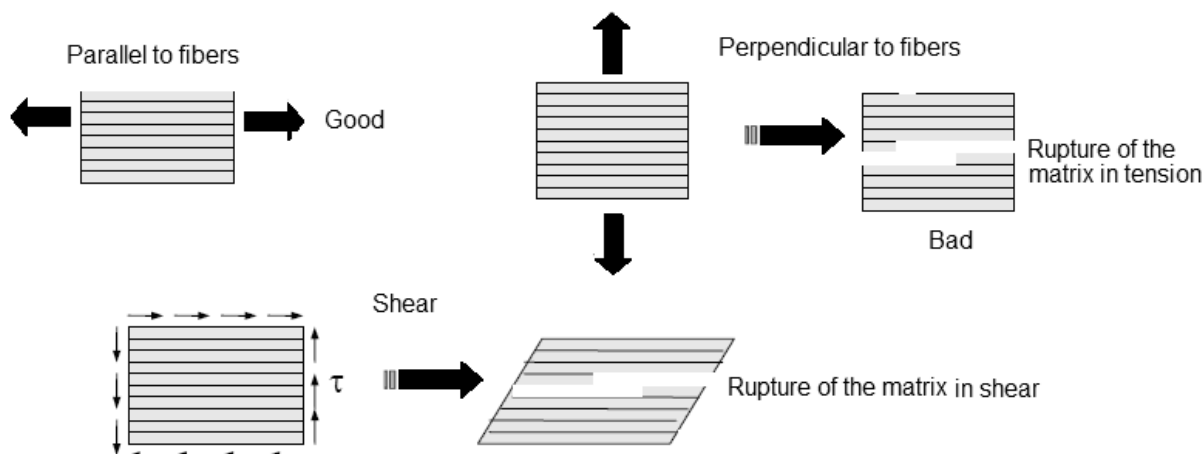


Fig. 3 - Direcția de solicitare a compozitului / Direction for composite requesting.

până la o temperatură de 1800 °C, singura afectată de creșterea temperaturii fiind rășina (matricea de legătură) care își menține proprietățile până la o temperatură critică de 80°C. Temperatura de 60 °C este indicată pentru uz permanent, dar dacă este necesară expunerea compozitului la temperaturi înalte se pot adopta soluții de protecție.

Acest material compozit prezintă greutate scăzută, lipsa coroziunii, bună rezistență la oboseală (de 3 ori mai bună ca cea a aliajului de aluminiu și de 2 ori mai bună decât în cazul oțelului) dar și posibilitatea realizării unor forme complexe.

Compozitul este un material anizotrop, pentru o bună comportare la tracțiune și întindere trebuie aleasă orientarea potrivită a fibrelor astfel (figura 3) [8].

2.3. Condiții și proceduri experimentale

Eficiența confinării a fost evidențiată, în prezenta lucrare, prin analiza răspunsului structural al epruvetelor din beton, confinate cu membrane polimerice armate cu fibre de carbon, *solicitate la compresiune*, dar și în vederea obținerii *modulului de elasticitate*.

Necesarul de materiale utilizate pentru prepararea unui volum de beton, de clasă C 50/60, corespunzător obținerii a 6 epruvete cilindrice (diametrul = 15 cm, înălțimea = 30 cm) și 3 epruvete cubice (l = 15 cm), s-a ales conform tabelului 3.

Epruvetele confecționate au fost decofrate și păstrate în apă 28 zile, timp la care o parte din ele (3 epruvete cubice) au fost supuse încercării la compresiune în vederea evaluării rezistențelor privind atingerea clasei de rezistență.

Pe celelate epruvete s-a studiat influența confinării asupra rezistențelor mecanice. Astfel, cu 3 epruvete cilindrice, s-au creat sistemele complexe beton întărit – rășină epoxidică – fibre de carbon.

Pentru îmbunătățirea rezistenței la compresiune a betonului s-a aplicat, pe toată suprafața laterală a cilindrilor, benzi din țesătură din fibre de carbon (figura 4).

După aplicarea rășinii și a țesăturii din fibre de carbon, epruvetele astfel confecționate și cele martor, au fost păstrate în condiții de laborator 10 zile, timp necesar întăririi rășinii.

După această perioadă, epruvetele sus menționate au fost supuse încercării la compresiune obținându-se astfel valorile rezistențelor lor.

S-a calculat *modulul de elasticitate* folosind modul de calcul prezentat de Thoman și Raede [10], dar și de alți cercetători [11-13] care au raportat valori, pentru modulul de elasticitate, determinat ca pantă a dreptei tangente la curba efort-deformație obținută la compresiune uniaxială, calculat la 25 la sută din valoarea maximă a

examined. So, with 3 cylindrical test-pieces, we created the epoxy resin – carbon fiber complex hardened concrete systems.

For improving the concrete's compressive strength strips of carbon fiber materials were applied to the sides of the cylinders (Figure 4).

After applying the resin and the carbon fiber fabric, the test-pieces and the reference samples, were kept in laboratory conditions for 10 days, the time necessary for the resin to harden.

After 10 days, the test-pieces were subjected to compression tests, obtaining their resistance values.

The elastic modulus was calculated using the calculation presented by Thoman and Raede [10], but also by other researchers [11-13] who reported values, for the elastic modulus determined as the inclination of the line tangent to the stress-strain uniaxial compressive curve, calculated at 25% of the maximum load, ranging from 29 to 36 GPa for concrete with compressive strength values varying between 69 and 76 MPa, and between 31 – 45 GPa, depending mostly on the method used for determining the module.

2.4. Modelling of FAP confined concrete (fiber-reinforced polymers)

2.4.1. Confining pressure

In the case of pillars with circular section, the maximum confining pressure developed by FAP is given by the formula (1) [8, 14]:

$$f_i = K_{\text{conf}} \varepsilon_{ju} \quad (1)$$

where:

f_i = maximum confinement effort (N/mm²),
 K_{conf} = FAP stiffness confinement (N/mm²)
 ε_{ju} = deformation on the circumference in the FAP sleeve at ULS (ultimate limit state).

The stiffness confinement K_{conf} is presented in the (2) formula:

$$K_{\text{conf}} = \frac{1}{2} k_e \rho_j E_j \quad (2)$$

where:

k_e = confinement efficiency factor
 ρ_j = FAP reinforcement factor
 E_j = FAP sleeve elastic modulus (MPa);

The value of the reinforcement factor can be determined by the following relation (3):

$$\rho_j = 4 n t_f / D \quad (3)$$

where:

t_f = FAP thickness (mm)
 D = pillar diameter (mm)
 n = mechanical reinforcement
 $n = V_{\text{sleeve}} \cdot f_{\text{PAF}} / V_{\text{element}} \cdot f_c \quad (4)$
 f_{PAF} = FAP sleeve resistance (N/mm²)
 f_c = the concrete's compressive strength (N/mm²)

The confinement effectiveness index, in case the sleeve covers the entire surface of the



Fig. 4 - Aplicarea compozitului TFC pe suprafața laterală a cilindrilor / Application of the composite TFC on the side surface of the cylinder.

efortului, cuprinse între 29-36 GPa pentru betoane având rezistența la compresiune variabilă între valorile 69 - 76 MPa, dar și între 31 – 45 GPa, în funcție, mai ales, de metoda de determinare a modului.

2.4. Modelarea betonului confinat cu PAF (polimeri armați cu fibre)

2.4.1. Presiunea de confinare

În cazul stâlpilor cu secțiune circulară, presiunea de confinare maximă dezvoltată de PAF este data de relația (1) [8,14]:

$$f_i = K_{\text{conf}} \varepsilon_{ju} \quad (1)$$

unde:

f_i = efort maxim de confinare (N/mm²)

K_{conf} = rigiditatea confinării cu PAF (N/mm²)

ε_{ju} = deformația efectivă pe circumferință în manșonul de PAF la SLU (starea limita ultimă).

Relația de calcul a rigidității confinării K_{conf} este prezentată în relația (2):

$$K_{\text{conf}} = \frac{1}{2} k_e \rho_j E_j \quad (2)$$

unde:

k_e = factor de eficiență a confinării

ρ_j = coeficient de armare cu PAF

E_j = modul de elasticitate al manșonului de PAF (MPa);

Valoarea coeficientului de armare se determină cu relația (3):

$$\rho_j = 4 n t_f D \quad (3)$$

unde:

t_f = grosimea PAF (mm)

D = diametru stâlp (mm)

n = coeficient mecanic de armare,

$$n = \frac{V_{\text{manșon}} \cdot f_{\text{PAF}}}{V_{\text{element}} \cdot f_c} \quad (4)$$

f_{PAF} = rezistența manșonului PAF (N/mm²)

f_c = rezistența la compresiune a betonului (N/mm²)

Indicele de eficacitate a confinării, în cazul în care manșonul acoperă întreaga suprafață a

concrete is $k_e = 1$ [8,14].

2.4.2. The constitutive relations of the confined concrete

Concrete confinement leads to a change in the stress-strain relationship: strength and final strain have superior values (Figure 5).

To find the *effective lateral compressive stress* at the ultimate limit state (ULS), due to confinement, the stress-strain relationship found in Figure 5 can be used (the compressive deformation has positive values), with higher deformations and characteristic strength in the case of a confined concrete as against plain concrete, in accordance with the following relations [8,14]:

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1.000 + 5.0 \sigma_2 / f_{ck}) \text{ for } \sigma_2 \leq 0.05 f_{ck} \quad (5)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1.125 + 2.50 \sigma_2 / f_{ck}) \text{ for } \sigma_2 > 0.05 f_{ck} \quad (6)$$

$$e_{c2,c} = e_{c2} (f_{ck,c} / f_{ck})^2 \quad (7)$$

$$e_{cu2,c} = e_{cu2} + 0.2 \sigma_2 / f_{ck} \quad (8)$$

where: σ_2 ($=\sigma_3$) is the *effective lateral compressive stress* at the ultimate limit state (ULS) due to confinement.

$f_{ck,c}$ = value of the confined concrete strength

f_{ck} = the characteristic value of the compressive strength of the concrete measured on cylinders after 28 days of strengthening.

e_{c2} = the specific compression deformation of the concrete

e_{cu2} = final specific compressive deformation of the concrete [15].

According to the calculation model given by Richart (1928) [16, 17] – which is based on using the parable – rectangle relation presented in Figure 5- and adapted to the design specifications provided in the Eurocode 2, the resistance values that need to be achieved can be calculated following compression tests on the confined concrete test-pieces. The concrete's resistance

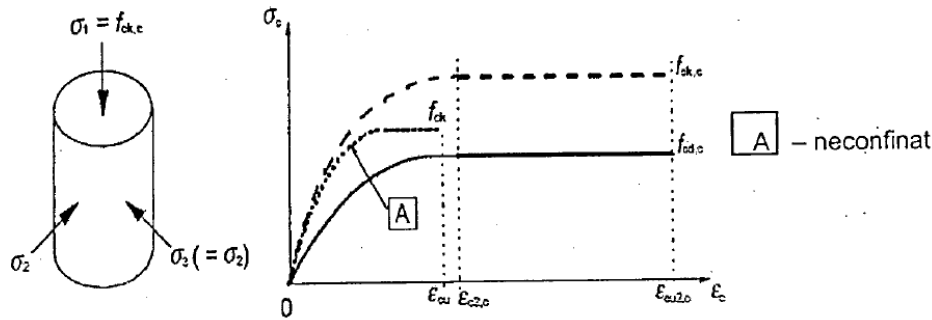


Fig. 5 – Relația efort-deformare în cazul betonului confinat / The stress – strain relationship for confined concrete [2,3].

betonului, este $k_e = 1$ [8,14].

2.4.2. Relațiile constitutive ale betonului confinat

Confinarea betonului conduce la o modificare a relației efort-deformație: rezistența și deformația ultimă au valori superioare (figura 5).

Pentru determinarea *efortului efectiv de compresiune lateral*, la starea limită ultimă (SLU), datorat confinării, se poate folosi relația efort-deformație din figura 5 (deformațiile de compresiune apar ca pozitive), cu rezistența caracteristică și deformații crescute în cazul unui beton confinat față de betonul simplu, conforme cu următoarele relații [8,14]:

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1.000 + 5.0 \sigma_2 / f_{ck}) \text{ pentru } \sigma_2 \leq 0.05 f_{ck} \quad (5)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1.125 + 2.50 \sigma_2 / f_{ck}) \text{ pentru } \sigma_2 > 0.05 f_{ck} \quad (6)$$

$$e_{c2,c} = e_{c2} (f_{ck,c} / f_{ck})^2 \quad (7)$$

$$e_{cu2,c} = e_{cu2} + 0.2 \sigma_2 / f_{ck} \quad (8)$$

unde: $\sigma_2 (= \sigma_3)$ este *efortul efectiv de compresiune lateral* la starea limită ultimă (SLU) datorat confinării.

$f_{ck,c}$ = valoarea rezistenței betonului confinat

f_{ck} = valoarea caracteristică a rezistenței la compresiune a betonului măsurată pe cilindri la 28 de zile de întărire

e_{c2} = deformația specifică la compresiune a betonului

e_{cu2} = deformația specifică ultimă a betonului la compresiune [15].

Conform modelului de calcul dat de Richart (1928) [16, 17] - care are la bază utilizarea relației parabolă – dreptunghi prezentată în figura 5- și adaptat prescripțiilor de proiectare prevăzute în Eurocode 2, se pot calcula valorile rezistențelor care trebuie atinse în urma încercărilor la compresiune pe epruvetele de beton confinat.

Valorile rezistențelor betonului se calculează conform relației 9:

$$f_c' = f_{ck} + 4 p(f_i) \quad [16] \quad (9)$$

unde:

f_c' = rezistența la compresiune a betonului confinat

f_{ck} = rezistența la compresiune a betonului martor

$p(f_i)$ = presiunea de confinare preluată de TFC

values can be calculated according to the relation 9:

$$f_c' = f_{ck} + 4 p(f_i) \quad [16] \quad (9)$$

where:

f_c' = confined concrete's compressive strength

f_{ck} = the compressive strength of plain concrete

$p(f_i)$ = confinement pressure taken by TFC

A correlation between the elastic modulus E_c and the compressive strength of normal weight concrete was reported by [13] as:

$$E_c = 3320 \times \sqrt{f_c'} + 6900 \text{ MPa} \quad (10)$$

for $21 \text{ MPa} < f_c' < 83 \text{ MPa}$

The elastic modulus of the concrete was calculated according to the relation 10 and the data obtained with the actual data of the elastic modulus measured on cylindrical test-pieces ($\Phi=15 \text{ cm}$ and $G=30 \text{ cm}$) made of the studied concrete, in the universal testing machine Advantest 9 CONTROLS, having the following characteristics: range of operation - 3000 kN, purpose – compressive strength, the elastic modulus of the concrete, precision – 0.1 kN.

3. Results and interpretation

Following measurements made on class C 50/60 concrete, after 28 days, the results shown in Table 4 were obtained:

The calculation of the confinement pressure on the concrete – fiber fabric aggregate, presented in Figure 4, was done according to chapter 2 (2.4.1), by substituting numbers.

The compressive resistance values of the plain concrete and of the confined concrete (obtained experimentally and by calculation) are presented in Table 5.

where:

f_c = the confined concrete's compressive strength obtained experimentally;

f_c' = the confined concrete's compressive strength obtained by calculation;

f_{cm} = the average compressive strength for the plain concretes;

O corelație între modulul de elasticitate E_c și rezistența la compresiune pentru betoane cu greutate normală a fost raportată de [13] ca:

$$E_c = 3320 \times \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa} \quad (10)$$

pentru $21 \text{ MPa} < f'_c < 83 \text{ MPa}$

Conform relației 10 s-a calculat modulul de elasticitate al betoanelor studiate. Datele obținute s-au comparat cu date reale ale modulului de elasticitate măsurat pe epruvetele cilindrice ($\Phi=15\text{cm}$ și $G=30 \text{ cm}$), confecționate cu betoanele studiate, în mașina de testare universală Advantest 9 CONTROLS, având următoarele caracteristici: domeniul de lucru - 3000 kN, destinație - rezistența la compresiune, modul de elasticitate beton, precizie - 0,1 kN.

3. Rezultate și interpretări

În urma determinărilor efectuate pe betoanele, proiectate cu clasa C 50/60, încercate la 28 zile, s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 4:

Calculul presiunii de confinare pe ansamblul beton – țesătură de fibre, prezentat în figura 4, s-a făcut, conform capitolului 2 (2.4.1), prin înlocuiri numerice.

Valorile rezistențelor la compresiune ale betonului martor și ale celui confinat (valori obținute experimental și prin calcul teoretic) sunt prezentate în tabelul 5.

unde:

f_c = rezistența la compresiune a betonului confinat obținută experimental;

f'_c = rezistența la compresiune, obținută prin calcul, a betonului confinat;

f_{cm} = rezistența medie la compresiune a betonului martor;

$p(f_i)$ = presiunea de confinare preluată de TFC.

$p(f_i)$ = the confinement pressure taken by the TFC.

We obtained a significant increase of the confined concrete's strength compared to the plain concrete.

Regarding the effective lateral compressive stress " σ_2 " due to confinement according to the calculation relations presented in chapter 2 (2.4.2) the following results were obtained for average compressive strength of the plain concrete of $f_{cm} = 54 \text{ N/mm}^2$, like this:

-if $\sigma_2 \leq 0.05 f_{cm} \Rightarrow \sigma_2 \leq 0.05 \cdot 54 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \sigma_2 \leq 2.7 \text{ N/mm}^2$ the relation (5) is chosen:

$f_{cm,c} = f_{cm} (1.000 + 5.0 \sigma_2 / f_{cm})$, according to which $\sigma_2 = (f_{cm,c} - f_{cm}) / 5$.

-if $\sigma_2 > 0.05 f_{cm} \Rightarrow \sigma_2 > 0.05 \cdot 54 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \sigma_2 > 2.7 \text{ N/mm}^2$ the relation (6) is chosen:

$f_{cm,c} = f_{cm} (1.125 + 2.50 \sigma_2 / f_{cm})$ according to which $\sigma_2 = (f_{cm,c} - 1.125 f_{cm}) / 2.5$.

So, the calculation of the confined concrete's effective lateral compressive strength, according to figure 4, calculated with the relation (5) is:

$\sigma_2 = (f_{cm,c} - f_{cm}) / 5 = (71.2 \text{ N/mm}^2 - 54 \text{ N/mm}^2) / 5 = 3.44 \text{ N/mm}^2$, a value that does not fulfill the

condition $\sigma_2 \leq 2.7 \text{ N/mm}^2$. So, the concrete's effective lateral compressive strength " σ_2 " is calculated with the relation (6), and it's correct value is:

$\sigma_2 = (f_{cm,c} - 1.125 f_{cm}) / 2.5 = (71.2 \text{ N/mm}^2 - 1.125 \cdot 54 \text{ N/mm}^2) / 2.5 = 4.18 \text{ N/mm}^2 > 2.7 \text{ N/mm}^2$.

The fracture mode of the studied confined concrete, subjected to compression, is shown in Figure 6.

In Figure 6 it can be observed that, the carbon fiber fabric weakened in the area with the highest tension accumulated in the concrete structure following the compressive strength test. The breaking was brittle and explosive and it was initiated in the composite membrane when the maximum confinement pressure was reached [18].

Tabelul 4

Valoarea medie a rezistențelor mecanice ale betoanelor, obținută după 28 zile de întărire
The average value of mechanical strengths of concretes, obtained after 28 days of curing

f_c , N/mm ²	Tip epruvetă / Type test piece
61.5 N/mm ²	cubică (3 cuburi cu l=15 cm) / cubical (3 cubes l = 15 cm)

Tabelul 5

Valorile rezistentelor la compresiune ale betonului martor și ale celor confinate (valori obținute experimental și teoretic - prin calcul)
The compressive resistance values of the plain concrete and of the confined concrete (obtained experimentally and by calculation)

Proba / Sample	f_{cm} , N/mm ²	$p(f_i)$, N/mm ²	f'_c , N/mm ²	f_c , N/mm ²
Martor (epruvete cilindrice - $\phi=15 \text{ cm}$, $h=30 \text{ cm}$) / Plain concrete (cylindrical test-pieces - $\phi=15 \text{ cm}$, $h=30 \text{ cm}$)	54.00	-	-	-
Beton confinat (epruvete cilindrice - $\phi=15 \text{ cm}$, $h=30 \text{ cm}$, întărite 28 zile (în apă) + 10 zile - timp necesar întăririi rășinii (în aer) (conform fig.6) / Confined concrete (cylindrical test-pieces - $\phi=15 \text{ cm}$, $h=30 \text{ cm}$, hardened 28 days (in water) + 10 days - the time needed for the resin to harden (in air) (according to Fig.6)	-	3.54	68.18	71.2

S-au obținut creșteri semnificative ale rezistenței betonului confinat comparativ cu cel neconfinat.

În ceea ce privește *efortul efectiv de compresiune lateral în beton* " σ_2 " datorită confinării conform relațiilor de calcul prezentate în capitolul 2 (2.4.2) s-au obținut următoarele rezultate pentru o rezistență medie la compresiune, pe betonul martor, de $f_{cm} = 54 \text{ N/mm}^2$, astfel:

-dacă $\sigma_2 \leq 0.05 f_{cm} \Rightarrow \sigma_2 \leq 0.05 \cdot 54 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \sigma_2 \leq 2.7 \text{ N/mm}^2$ se alege relația (5):

$f_{cm,c} = f_{cm} (1.000 + 5.0 \sigma_2 / f_{cm})$, conform careia $\sigma_2 = (f_{cm,c} - f_{cm}) / 5$.

-dacă $\sigma_2 > 0.05 f_{cm} \Rightarrow \sigma_2 > 0.05 \cdot 54 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \sigma_2 > 2.7 \text{ N/mm}^2$ se alege relația (6):

$f_{cm,c} = f_{cm} (1.125 + 2.50 \sigma_2 / f_{cm})$ conform careia $\sigma_2 = (f_{cm,c} - 1.125 f_{cm}) / 2.5$.

Astfel, *calculul efortului efectiv de compresiune laterală în betonul confinat, conform figurii 4, calculat cu relația (5) este:*

$\sigma_2 = (f_{cm,c} - f_{cm}) / 5 = (71.2 \text{ N/mm}^2 - 54 \text{ N/mm}^2) / 5 = 3.44 \text{ N/mm}^2$, valoare care *nu corespunde condiției* $\sigma_2 \leq 2.7 \text{ N/mm}^2$. Rezultă deci că *efortul efectiv de compresiune lateral în beton* " σ_2 " se calculează cu relația (6), și valoarea corectă a lui este:

$\sigma_2 = (f_{cm,c} - 1.125 f_{cm}) / 2.5 = (71.2 \text{ N/mm}^2 - 1.125 \cdot 54 \text{ N/mm}^2) / 2.5 = 4.18 \text{ N/mm}^2 > 2.7 \text{ N/mm}^2$.

Modul de rupere al betoanelor confinate studiate, solificate la compresiune, este prezentat în figura 6.

Din figura 6 se observă că, țesătura din fibră de carbon, a cedat în zona de maximă tensiune acumulată în structura betonului, în urma solicitării lui la compresiune. Ruperea a fost casantă, cu caracter exploziv și a fost inițiată în membrana compozită în momentul când s-a atins presiunea maximă de confinare [18].

Modurile de cedare a epruvetelor cilindrice din beton încercate la compresiune centrică întâlnite în cadrul experimentelor (conform figurii 6) sunt reprezentate schematic în figura 7.



a. înainte de solicitare / before requesting



b. după solicitare / after requesting

Fig. 6 - Modul de rupere al betoanelor confinate cu țesătură de fibre de carbon / The fracture mode of concrete confined with carbon fiber fabric.

The failure modes of the cylindrical concrete specimens subjected to centric compression encountered during the experiment (according to Figure 6) are represented in Figure 7.

The values of the elastic modulus calculated with the relation 10 and obtained experimentally, are shown in Table 6.

All the confined concrete test pieces had a quasi-elastic behaviour until the composite membrane ruptured.

In the case of confinement with polymeric composite materials reinforced with carbon fibers, following the experiments, increases in compressive strength and of the elastic modulus were observed compared to the unconfined test-pieces, the elastic modulus and the high tensile strength of the carbon fibers being the main causes of this effects.

4. Conclusions

To evaluate the efficiency of concrete confinement cylindrical test-pieces wrapped in carbon fiber reinforced polymeric membranes were tested at axial compression.

The effectiveness of the confinement was highlighted, by analysing the structural response of the carbon fiber polymeric membranes reinforced concrete test-pieces, tested for obtaining the compressive strength and the elastic modulus.

The axial compressive strength of the confined concrete depends on the value of the axial compressive strength of the unconfined concrete and on the confinement pressure taken by TFC.

Calculation models were used regarding the confining pressure and the determination of the effective lateral compressive stress. The values of the mechanical resistances obtained for the concretes confined with the TFC system were superior to those of the plain concrete.

The experimental results were verified with the ones obtained from the calculation, which

Valorile *modulului de elasticitate*, calculat cu relația 10, precum și cel obținut experimental, sunt prezentate în tabelul 6.

Toate probele din beton confinat s-au comportat cvasi-elastic până la ruperea membranei compozite

În cazul confinării cu materiale compozite polimerice armate cu fibre de *carbon*, în urma experimentelor efectuate, s-au constatat creșteri ale rezistenței la compresiune și ale modulului de elasticitate față de probele neconfinat, modulul de elasticitate și rezistența la întindere mare al fibrelor de carbon fiind principalele responsabile de aceste efecte.

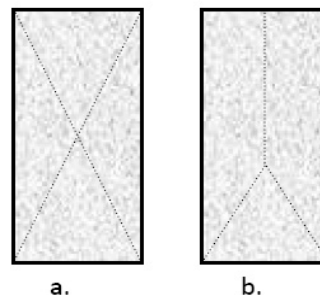


Fig. 7 - Moduri de rupere a epruvetelor cilindrice supuse la compresiune – reprezentare schematică / *Modes of breaking for cylindrical specimens subjected to compressive - schematic representation: a. tip dublu con / double cone; b. despicare cu con la bază / splitting with cone.*

Tabelul 6

Valorile modulului de elasticitate E_c calculat cu relația (10) și obținut experimental ($E_{c,real}$)
The elasticity modulus calculated using the 10 relation ($E_{c,calcul}$) and experimentally obtained ($E_{c,real}$)

Compoziții/ <i>Compositions</i>	Rezistența la compresiune <i>Compressive strength (N/mm²)</i>		$E_{c,calcul}$ (MPa) [13]	$E_{c,real}$ (MPa)
	f_{cm}	f_c		
Beton martor / <i>Reference concrete (plain)</i>	54.0	-	31296.9	39015,7
Beton confinat/ <i>Confined concrete</i>	-	71.2	34914.2	59015,7

4. Concluzii

Pentru a evalua eficiența confinării betonului s-a testat la compresiune axială epruvete cilindrice înfășurate cu membrane polimerice armate cu fibre de carbon.

Eficiența confinării a fost evidențiată, prin analiza răspunsului structural al epruvetelor din beton, confinate cu membrane polimerice armate cu fibre de carbon, *solicitate în vederea obținerii rezistențelor la compresiune, și a modulului de elasticitate.*

Rezistența la compresiune axială a betonului confinat depinde de valoarea rezistenței la compresiune axială a betonului neconfinat și de presiunea de confinare preluată de TFC.

S-au folosit modele de calcul privind presiunea de confinare și de determinare a efortului efectiv la compresiune laterală. Au fost obținute valori superioare ale rezistențelor mecanice ale betoanelor confinate cu sistemul TFC comparativ cu betoanele martor.

S-au verificat rezultatele experimentale cu cele obținute prin calcul ceea ce confirmă veridicitatea calculului de modelare utilizat.

Consolidarea elementelor structurale cu produse compozite pe bază de fibre poate constitui, în unele cazuri, o metodă avantajoasă din punct de vedere tehnic, și totodată eficientă, mai ales sub aspect tehnologic, prin aceea că permite realizarea unor sporuri însemnate de capacitate portantă în condiții puțin restrictive privind gabaritul și poziția elementelor.

Cele mai utilizate aplicații ale sistemului de consolidare, cu materiale compozite pe bază de fibre, la elementele structurale din beton, sunt cele realizate în scopul de confinare a stâlpilor, a creșterii capacității portante la forța tăietoare și

confirms the veracity of the used calculation model.

The consolidation of structural elements with fiber based composite can be in some cases, a favorable method from a technical point of view and also an efficient one, especially from a technological aspect, because it allows the achievement of some significant increases in bearing capacity in less restrictive conditions regarding the dimensions and the position of the elements.

The most used applications of the consolidation system with fiber based composite materials, of concrete structural elements, are the ones made with the purpose of confining pillars, of increasing the transverse force bearing capacity and the bending moment of beams and boards, but also a ductility increase and an improvement of the joint behavior by overlapping the reinforcement, for pillars. This method can also be used for the consolidation of structural walls made of reinforced concrete or brickwork.

REFERENCES

1. A. Amer, and M. Arockiasamy, Ultimate strength of eccentrically loaded concrete column reinforced with CFRP bars, *Advanced composite materials in bridges and structures*, Quebec, Ed. El-Badry, 1996.
2. M. Frangou, K. Pilakoutas, and S. Dritsos, The Structural Repair / Strengthening of RC Columns, *Journal of Construction and Building Materials*, October 1995, **9** (5), 259.
3. A. Mirmiran, and M. Shahawy, Behavior of concrete columns confined by fiber composites, *Journal of Structural Engineering*, 1997, **123**(5), 583.
4. M. Saafi, H.A. Toutanji, and Z. Li, Behavior of Concrete Columns Confined with fiber reinforced polymer tubes, *ACI Materials Journal*, **96**(4), 1999.

moment încovoietor a grinzilor și plăcilor, dar și de creștere a ductilității și îmbunătățirii comportării înădărilor prin suprapunere a armăturilor, în cazul stâlpilor. Acest procedeu poate fi utilizat și la consolidarea pereților structurali din beton armat sau zidărie.

5. M. Samaan, A. Mirmiran, and M. Shahawy, Model of concrete confined by fiber composites, *ASCE J. of Struct. Engineering* 1998, **5**, 123.
6. G. Opreșan, N. Țăranu, V. Munteanu, M. Budescu, C. Cozmanciuc, and R. Oltean, Improvement of concrete strength confining with composite membranes, *Romanian Journal of Materials*, 2011, **41**(4), 302.
7. B. Bahnariu, PhD thesis, The systems for building consolidation with composite materials, Technical University of Civil Engineering of Bucharest, Romania, 2010.
8. "Seminarii foreva"- Fiber reinforced polymer. Types of products and technical specifications, Foreva TFC, 2008.
9. Technical Agreement 004-07/1043-2008- "Foreva TFC - method of reinforcing with carbon fiber fabric for concrete structures, reinforced concrete and prestressed concrete", 2008.
10. W. H. Thoman, and W. Raeder, Ultimate Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Portland Cement Concrete, *ACI JOURNAL*, Proceedings, Jan-Feb.1934, **30**, (3), 231.

11. D.C. Teychenne, L.J. Parrott, and C.D. Pomeroy, The Estimation of the Elastic Modulus of Concrete for the Design of Structures, Current Paper No. CP23/78, Building Research Establishment, Garston, Watford, 1978, 11.
12. S.H. Ahmad, PhD thesis, Properties of Confined Concrete Subjected to Static and Dynamic Loading, University of Illinois at Chicago Circle, 1981.
13. S. Martinez, AH. Nilson, and F.O. Slate, Spirally-Reinforced High-Strength Concrete Columns, Research Report No. 82-10, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Aug. 1982.
14. xxx, "Norm on consolidation with fiber for concrete structural elements" developed by INCERC Bucharest - February 2005.
15. xxx, SR EN 1992-1-1: 2004, Design of concrete structures. Part1-1 General rules and rules for buildings.
16. Technical advice - 3/070-0540, Elements of structure reinforced by a method of bonding carbon fiber, corrected edition May 29, 2008, Foreva TFC.
17. M. Amăreanu, Building materials. Strength and durability issues for concrete and metal, Ed. Conspress, 2013.
18. H. Gangarao, N. Taly, and P.V. Vijay, Reinforced concrete design with FRP composites, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2007.

MANIFESTĂRI ȘTIINȚIFICE / SCIENTIFIC EVENTS

International Concrete Sustainability Conference, Boston, USA, May 12-15,2014

The 9th annual conference will be held in conjunction with the *MIT Concrete Sustainability Hub 2014 Industry Day* scheduled for May 15, 2014. The *International Concrete Sustainability Conference* provides learning and networking opportunities on the latest advances, technical knowledge, continuing research, tools and solutions for sustainable concrete manufacturing, design and construction.

Researchers, academics, students, engineers, architects, contractors, concrete producers, public works officials, material suppliers and concrete industry professionals are invited to attend, submit papers and give presentations.

- ▶ LIFE CYCLE ASSESSMENT Assessing carbon footprint, embodied energy and other environmental impacts for buildings, infrastructure, and cement and concrete manufacturing.
- ▶ LOW IMPACT DEVELOPMENT Pervious pavements and erosion control structures. Urban heat island reduction, light colored pavements, green roofs and cool communities.
- ▶ GREEN CONCRETE Recycled and alternative materials including aggregates, water, cementitious materials, and fuels. Beneficial use of byproducts for cement and concrete production.
- ▶ NEW CONCRETE TECHNOLOGY Durability, extended service life models and validation, performance based specifications to foster sustainability. Innovative concrete production methods.
- ▶ SUSTAINABILITY INITIATIVES Green building codes and standards adopted by building owners, designers, contractors and product manufacturers. Economic incentives and legislation.
- ▶ FUNCTIONAL RESILIENCE High performance concrete applications in buildings and infrastructure, fortified building codes, and community initiatives focusing on disaster resistance and adaptive reuse.

Contact: <http://www.concretesustainabilityconference.org/boston2014/>
