

Панчук Ю. М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО ТА КРУПНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНІВ ПРИ ДІЇ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СЕРЕДНЬОГО ТА ВИСОКОГО РІВНІВ

Проведено детальний аналіз існуючих експериментально-теоретичних досліджень за цією проблематикою. Наведено результати експериментальних досліджень деструктивних характеристик зразків призм, виготовлених із дрібнозернистого та крупнозернистих бетонів при дії малоциклових стискаючих навантажень-розвантажень середнього і високого рівнів. Побудовані діаграми об'ємного деформування бетонів дозволяють простежити за тенденцією деформування матеріалу із зростанням кількості циклів навантаження. Верхній рівень малоциклового стискаючого навантаження чинить вплив на роботу бетону за циклічних навантажень. Отримані діаграми об'ємного деформування дозволяють чітко простежити за розвитком процесу деформування бетону із збільшенням кількості циклів прикладання навантаження. При дії малоциклових стискаючих навантажень середнього рівня, проходило ущільнення бетону з подальшою стабілізацією об'ємних відносних деформацій. При малоциклових повторних навантаженнях високих рівнів відбувалось поступово від циклу до циклу розущільнення структури бетону і, в процесі розвитку магістральних мікротріщин відриву, проходило його руйнування.

Ключові слова: дрібнозернистий бетон; крупнозернистий бетон; циклічні навантаження; рівень навантаження; кількість циклів навантаження; об'ємне деформування; напружено-деформований стан.

Вступ. Будівельні конструкції під час експлуатації зазнають впливу малоциклових навантажень середніх та високих рівнів. Під час дії циклових навантажень в конструкціях відбуваються руйнування специфічного характеру, при якому проходить зростання деформацій матеріалу конструкції за повторних навантажень, що не перевищують граничного одноразового навантаження. Так, під час розрахунку міцності конструкцій на вплив малоциклових



навантажень одним із основних завдань є визначення рівнів та кількості циклів повторних навантажень, за яких відбуватиметься стабілізація деформацій. Будівельні конструкції та їх елементи під час експлуатації можуть сприймати перевантаження, а саме повторні циклічні навантаження перевищуватимуть розрахункові значення. Прикладання певної кількості циклів навантаження, можуть викликати в матеріалі конструкції значні зростання пластичних деформацій, тобто набуття граничного стану при впливі повторних циклічних навантажень (малоциклової втомленості).

Аналіз останніх публікацій. В роботах [4; 5; 6; 7] вказано, що структура бетону за рахунок зміни крупності заповнювачів, призводить до зміни рівнів навантажень, які відповідають нижній і верхній межах мікротріщиноутворення. В цих роботах було встановлено, що крупна фракція заповнювача, будучи складовим елементом бетону, є концентратором напружень, створює поля напружень в контактній матриці та заповнювача, де відбувається утворення мікротріщин [8].

Мета роботи – це експериментально-теоретичні дослідження напружено-деформованого стану дрібно- та крупнозернистих бетонів на вплив малоциклових навантажень-розвантажень середнього та високих рівнів, дослідження деструктивних характеристик вказаних бетонів, об'ємного деформування зразків.

Результати експериментальних досліджень. Внаслідок прикладання стискаючого навантаження змінюється об'єм бетонного зразка [1]. Спочатку проходить ущільнення бетону, що супроводжується зменшенням об'єму, далі відбувається процес розущільнення матеріалу, утворюються і зростають мікротріщини, вони об'єднуються, в результаті виникають макротріщини, які викликають руйнування і збільшення об'єму зразка. Зміну об'ємних деформацій зразків обумовлено деструктивними процесами, які відбуваються в бетоні, вона характеризується граничними рівнями утворення і розвитку мікро- та макротріщин. Величину відносної об'ємної деформації бетону ε_v при короткочасному центральному стискаючому навантаженні визначають за формулою:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_l - 2 \varepsilon_{tr}, \quad (1)$$

де ε_l , ε_{tr} – відносні поздовжні та поперечні деформації.

За статистичною обробкою дослідних даних, отриманих в [2; 3; 4; 5] можна зробити висновок, що залежність «напруження – січний модуль пружно-пластичності» ($\sigma - E_p'$) при дії стискаючих навантажень бетонних призм, які завантажувались з постійною

швидкістю зростання напружень, можна вважати лінійною до моменту руйнування дослідного зразка при нелінійній гіперболічного виду залежності « $\sigma - \varepsilon$ »:

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E_b - \frac{E_b - E_R}{R_b} \sigma = E_b \left(1 - \frac{E_b - E_R}{R_b} \frac{\sigma}{R_b} \right), \quad (2)$$

$$\frac{E_b - E_R}{R_b} = \lambda_R = 1 - \nu_R = 1 - \frac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_b^u} = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_b^u}, \quad (3)$$

де λ_R, ν_R – граничні значення (при $\sigma = R_b$) коефіцієнтів пластичності і пружності; ε_{el} – пружні відносні деформації; ε_{pl} – відносні деформації швидко натікаючої повзучості; ε_b^u – повні відносні деформації бетону. Якщо підставити (3) в (2) і враховувати, що $\eta = \frac{\sigma}{R_b}$, тоді залежність (2) набудатиме наступного вигляду:

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E_b (1 - \lambda_R \eta). \quad (4)$$

Характеристики матеріалів, склади дрібнозернистого та крупнозернистого бетонів для виготовлення дослідних зразків, а також методика та результати експериментальних досліджень малоцикловими стискаючими навантаженнями-розвантаженнями наведені в [6].

Математична обробка даних дослідних випробувань призм, виконаних з дрібнозернистого (ДЗБ) та крупнозернистого (КЗБ-2) бетонів за [7], дозволила отримати лінійні рівняння регресії $E'_{bl} - \eta$, $E'_{btr} - \eta$:

$$E'_{bl} = \frac{\sigma}{\varepsilon_l} = E_{bl} (1 - \lambda_{lR} \eta), \quad (5)$$

$$E'_{btr} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{tr}} = E_{btr} (1 - \lambda_{trR} \eta). \quad (6)$$

Підставляючи (5) і (6) в (1), отримуємо:

$$\varepsilon_v = \frac{R_b \eta}{E_{bl} (1 - \lambda_{lR} \eta)} - 2 \frac{R_b \eta}{E_{btr} (1 - \lambda_{trR} \eta)}. \quad (7)$$

Значення величин верхнього, нижнього та критичного рівнів утворення і розвитку поздовжніх мікро- і макротріщин відриву були визначені в наслідок математичної обробки формули (1) [7], в результаті отримані такі аналітичні залежності:

$$\eta_{crc}^{low} = \frac{\sqrt{\lambda_{lR} E_{btr}} - \sqrt{2 \lambda_{trR} E_{bl}}}{\lambda_{trR} \sqrt{\lambda_{lR} E_{btr}} - \lambda_{lR} \sqrt{2 \lambda_{trR} E_{bl}}}; \quad (8)$$

$$\eta_{crc}^{top} = \frac{\sqrt{E_{btr}} - \sqrt{2 E_{bl}}}{\lambda_{trR} \sqrt{E_{btr}} - \lambda_{lR} \sqrt{2 E_{bl}}}; \quad (9)$$

$$\eta_{crc}^{cr} = \frac{E_{btr} - 2 E_{bl}}{\lambda_{trR} E_{btr} - 2 \lambda_{lR} E_{bl}}, \quad (10)$$

де $\lambda_{lR}, E_{bl}, \lambda_{trR}, E_{btr}$ – коефіцієнти пластичності і початкові модулі



пружності відповідно поздовжніх і поперечних деформацій. При дії стискаючих навантажень, які не перевищують нижнього рівня $\eta_{сгс}^{low}$ відбувається нерівномірно-прискорене ущільнення бетону внаслідок зміни пластичних деформацій цементного каменю, діаграма $\varepsilon_v - \eta$ має опуклість, повернену до осі η і при рівні $\eta_{сгс}^{low}$ проходить зміна знаку кривизни діаграми до осі ε_v . Утворення та розвиток поздовжніх мікротріщин переводить об'ємне деформування в нерівномірно-уповільнений стан. При напруженнях в межах рівнів $\eta_{сгс}^{low} < \eta < \eta_{сгс}^{top}$ пластичні деформації цементної решітки перевищують деформації, викликані розвитком поздовжніх мікротріщин, що призводить до уповільненого ущільнення структури і зменшення об'єму бетону. При напруженні $\eta_{сгс}^{top}$ проходить зміна напрямку діаграми $\varepsilon_v - \eta$ внаслідок розвитку поздовжніх мікротріщин, тобто відбувається перехід з нерівномірно-уповільненого ущільнення і зменшення об'єму в нерівномірно-прискорене розущільнення бетону і збільшення об'єму зразка. При напруженнях рівня $\eta_{сгс}^{top}$ бетон набуває максимального ущільнення $\varepsilon_v = \varepsilon_{v\max}$. В діапазоні напружень в межах $\eta_{сгс}^{top} < \eta < \eta_{сгс}^{cr}$ деформації викликані процесами розвитку поздовжніх мікро-тріщино утворень переважають пластичні лінійні деформації цементної складової бетону, в наслідок цього виникає зростання об'єму V до початкового значення V_0 . Відбувається поєднання мікротріщин між собою і виникають магістральні макротріщини відриву. При навантаженнях граничного рівня $\eta_{сгс}^{cr}$ значення об'ємних відносних деформацій наближаються до нуля $\varepsilon_v = 0$, вважають величину цього рівня навантаження якісною межею деструктивного процесу в розвитку напружено-деформованого стану бетону [10]. Після підстановки відповідних значень $E_{\text{вн}}, \lambda_{\text{вн}}, E_{\text{внгр}}, \lambda_{\text{внгр}}$, отриманих з дослідно-кореляційних рівнянь регресії для окремого i -ого циклу малоциклового навантаження в залежність (1), була визначена величина об'ємної деформації бетону ε_v на певному i -ому циклі навантаження.

В результаті отримані діаграми об'ємного деформування ($\varepsilon_v - \eta$) дрібнозернистого та крупнозернистого бетонів при дії малоциклового центрального стискання і зміні числа циклів прикладання навантаження $\eta_{сгс}$, вони наведені на рисунку а, б. Як видно з діаграм об'ємного деформування ε_v , побудованих за дії малоциклових стискаючих навантажень високих рівнів ($\eta =$

0,78...0,86) і при зростанні кількості циклів навантаження n_{cyc} проходило від циклу до циклу поступове зменшення величин об'ємного ущільнення. А саме, для дрібнозернистого бетону (ДЗБ) (рисунок, а) величина максимального об'ємного ущільнення на 1-му циклі навантаження склала $50,0 \times 10^{-5}$, при дії малоциклових стискаючих навантаженнях зменшилась і на 2-му та 3-му циклах склала відповідно $28,6 \times 10^{-5}$ і $23,7 \times 10^{-5}$, на 5-му циклі навантаження відбулось наступне зменшення до $12,58 \times 10^{-5}$, а на 7-му циклі становила $4,56 \times 10^{-5}$. В діапазоні з 10-го по 35-й цикли прикладання навантажень отримані об'ємні відносні деформації бетону набули від'ємних значень та із збільшенням кількості циклів навантаження продовжувалось зменшення деформацій бетону. Від'ємні значення об'ємного деформування бетону ϵ_v свідчать про настання процесів розущільнення структури, які супроводжуються незворотнім зростанням об'єму бетону V відносно початкової його величини V_0 . Очевидно в цих межах циклів прикладання навантажень, в процесі розвитку поздовжніх магістральних мікротріщин відриву, проходить незворотній процес руйнування бетону.

Максимальне значення об'ємного ущільнення ϵ_{vmax} визначене для крупнозернистого бетону (КЗБ2) (рисунок, б) на 1-му циклі навантаження, склало $41,12 \times 10^{-5}$, при зростанні кількості циклів прикладання навантаження воно має тенденцію до зниження. А саме на 2-му та 5-му циклах повторного навантаження значення ϵ_{vmax} зменшились і склали відповідно $23,28 \times 10^{-5}$ і $19,81 \times 10^{-5}$, такі ж значення, отримані для 10-го, 20-го і 30-го циклів навантаження становили відповідно $14,45 \times 10^{-5}$, $7,66 \times 10^{-5}$ і $5,16 \times 10^{-5}$. З настанням 40-го циклу і до моменту руйнування бетону (89 цикл) величини об'ємних відносних деформацій бетону ϵ_v , визначені на цих циклах, набувають від'ємних значень, відбувається їх зменшення зі зростанням кількості циклів прикладання навантаження, проходить незворотне розущільнення і руйнування бетону.

Для встановлення більш повного характеру об'ємного деформування крупнозернистого бетону (КЗБ2) проводились експериментальні дослідження зразків бетонних призм на вплив малоциклових стискаючих навантажень середнього рівня, значення якого приймали рівним $\eta_c = 0,6$. Аналізуючи отримані в результаті випробувань діаграми об'ємного деформування бетону (рисунок, в) видно зростання значень ϵ_{vmax} в продовж перших 5-ти циклів, що свідчить про процес ущільнення матеріалу. Значення максимального об'ємного ущільнення, отримані на 1-му, 2-му та 5-му циклах

навантаження склали відповідно $46,5 \times 10^{-5}$; $53,22 \times 10^{-5}$ і $51,25 \times 10^{-5}$, при подальшому зростанні кількості циклів прикладання навантаження з 10-го по 40-й цикли разом з певним зменшенням максимального об'ємного ущільнення $\epsilon_{v, \max}$, спостерігалася його стабілізація ($\epsilon_v = 37,04 \dots 41,58 \times 10^{-5}$).

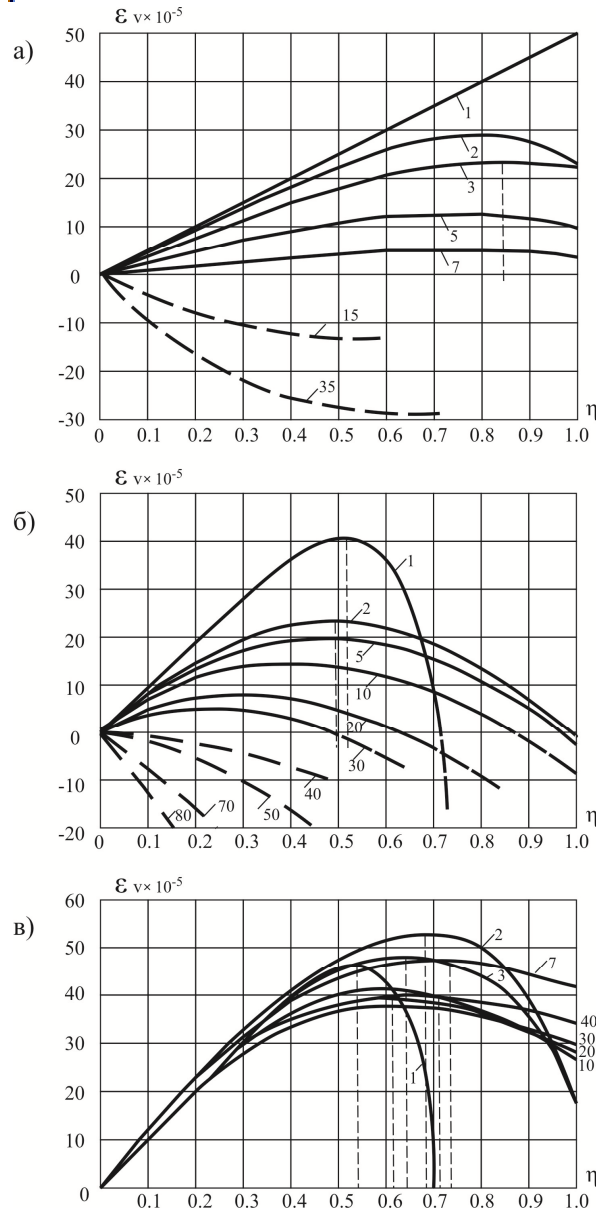


Рисунок. Діаграми об'ємного деформування бетонів за малоциклового осевого стиснення: а) ДЗБ; б) КЗБ2 ($\eta = 0,78$); в) КЗБ2 ($\eta = 0,6$)

Висновки. 1. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану зразків з дрібнозернистого та крупнозернистого бетонів виявили такі особливості. Верхній рівень малоциклового стискаючого навантаження чинить вплив на роботу бетону за циклічних навантажень. 2. Отримані діаграми об'ємного деформування дозволяють чітко простежити за розвитком процесу деформування бетону із збільшенням кількості циклів прикладання навантаження. 3. При дії малоциклових стискаючих навантажень середнього рівня, проходило ущільнення бетону з подальшою стабілізацією об'ємних відносних деформацій. 4. При малоциклових повторних навантаженнях високих рівнів відбувалось поступово від циклу до циклу розущільнення структури бетону і, в процесі розвитку магістральних мікротріщин відриву, проходило його руйнування. 5. З вищенаведеного випливає, що існує такий рівень малоциклового навантаження, при перевищенні якого відбувається розущільнення структури і руйнування бетону, а при навантаженнях, які менші за цей рівень, проходить процес ущільнення матеріалу і стабілізація деформацій. Таким рівнем прийнято вважати рівень малоциклової втомленості (приспосованості) матеріалу [8; 9].

1. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. : Госстройиздат, 1961. 96 с. 2. Бабич Е. М., Макаренко Л. П. Экспериментальное исследование модуля упругости бетонных образцов при различной интенсивности сжимающих нагрузок. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1967. № 3. С. 20–27. 3. Макаренко Л. П., Фенко Г. А. Практический способ определения модуля упруго-пластических характеристик бетона при сжатии. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1970. № 10. С. 141–147. 4. Макаренко Л. П. Оценка деформаций бетонов с учетом нелинейной ползучести. *Бетон и железобетон*. 1985. № 2. С. 25–26. 5. Макаренко Л. П. Рекомендации по экспериментально-статистической оценке прочностных, деформативных характеристик бетонов при кратковременном нагружении. Ровно : ООП ВЦ Облмашинформа, 1987. 17 с. 6. Панчук Ю. М. Експериментальні дослідження пружно-пластичних властивостей крупнозернистого бетону за малоциклових навантажень високих рівнів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. статей. Рівне, 2012. Вип. 23. С. 372–377. 7. Макаренко Л. П. Развитие и углубление существующих представлений о деформациях, деструкции и прочности бетона при сжатии. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1988. № 2. С. 1–6. 8. Бабич Е. М., Крусь Ю. А., Панчук Ю. Н. Влияние малоцикловых статических нагружений на прочность тяжелого бетона. *Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях* : тезы докл. международ.



научн.-практич. Конф. Сумы, 1994. С. 168–171. **9.** ДСТУ 2444-94. Розрахунки та випробування на міцність. Опір втомі. Терміни та визначення. К. : Держстандарт України. 1994. 71 с. **10.** Голуб А. В. Особенности прочностных и деформативных свойств бетона со шлаком ТЭС и их учет при расчете железобетонных конструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1990. 22 с.

REFERENCES:

1. Berh O. Ya. *Fyzicheskye osnovy teoryy prochnosti betona y zhelezobetona*. M. : Hosstroizdat, 1961. 96 s.
 2. Babych E. M., Makarenko L. P. *Ekspyrymentalnoe yssledovanye modulua uprugosti betonnykh obraztsov pry razlychnoi yntensyvnostry szhymaiushchykh nahruzok*. *Yzvestyia vuzov. Stroytelstvo y arkhytektura*. 1967. № 3. S. 20–27.
 3. Makarenko L. P., Fenko H. A. *Praktycheskyi sposob opredeleniya modulua upruho-plastycheskykh kharakterystyk betona pry szhatyy*. *Yzvestyia vuzov. Stroytelstvo y arkhytektura*. 1970. № 10. S. 141–147.
 4. Makarenko L. P. *Otsenka deformatsyi betonov s uchetom nelyneinoi polzuchesty*. *Beton y zhelezobeton*. 1985. № 2. S. 25–26.
 5. Makarenko L. P. *Rekomendatsyy po ekspyrymentalno-statystychechkoi otsenke prochnostnykh, deformatyvnykh kharakterystyk betonov pry kratkovremennom nahruzhenyy*. *Rovno : OOP VTs Oblmashynforma*, 1987. 17 s.
 6. Panchuk Yu. M. *Ekspyrymentalni doslidzhennia pruzhno-plastychnykh vlastyvosti krupnozernystoho betonu za malotsyklovykh navantazhen vysokyykh rivniv*. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy* : zb. nauk. stattei. Rivne, 2012. Vyp. 23. S. 372–377.
 7. Makarenko L. P. *Razvytye y uhlublenye sushchestvuiushchykh predstavleniy o deformatsiyakh, destruktssy y prochnosty betona pry szhatyy*. *Yzvestyia vuzov. Stroytelstvo y arkhytektura*. 1988. № 2. S. 1–6.
 8. Babych E. M., Krus Yu. A., Panchuk Yu. N. *Vlyianyе malotsyklovykh statycheskykh nahruzheniy na prochnost tiazheloho betona*. *Sovershenstvovanye stroytelnykh materyalov, tekhnolohiy y metodov rascheta konstruktsiy v novykh ekonomycheskykh uslovyakh* : tezy dokl. mezhdunarod. nauchn.-praktych. Konf. Sумы, 1994. S. 168–171.
 9. ДСТУ 2444-94. *Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist. Opir vtomi. Terminy ta vyznachennia*. К. : Derzhstandart Ukrainy. 1994. 71 s.
 10. Holub A. V. *Osobennosty prochnostnykh y deformatyvnykh svoystv betona so shlakom TES y ykh uchet pry raschete zhelezobetonnykh konstruktsiy* : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Mynsk, 1990. 22 s.
-

Panchuk Yu. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

RESEARCH OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF FINE-GRAINED AND COARSE-GRAINED CONCRETE UNDER THE ACTION OF CYCLIC LOADS OF MEDIUM AND HIGH LEVELS

Building structures during operation are affected by short-cycle loads of medium and high levels. During the action of cyclic loads in the structures, destruction of a specific nature occurs, in which the growth of deformations of the material of the structure takes place under repeated loads that do not exceed the limit of a one-time load. Thus, when calculating the strength of structures under the influence of low-cycle loads, one of the main tasks is to determine the levels and number of cycles of repeated loads at which deformation stabilization will occur. Building structures and their elements during operation can perceive overloads, namely repeated cyclic loads will exceed the calculated values. Applying a certain number of load cycles can cause a significant increase in plastic deformations in the material of the structure, i.e. the acquisition of a limit state under the influence of repeated cyclic loads (low-cycle fatigue).

The purpose of the work is experimental and theoretical studies of the stress-strain state of fine- and coarse-grained concretes under the influence of low-cycle loads-unloads of medium and high levels, studies of the destructive characteristics of these concretes, volumetric deformation of samples. The results of experimental studies of the destructive characteristics of prism samples made of fine-grained and coarse-grained concrete under the action of low-cycle compressive loads-unloads of medium and high levels are presented. Constructed diagrams of volume deformation of concrete allow to follow the trend of deformation of the material with increasing number of load cycles. The upper level of low-cycle compressive load affects the performance of concrete under cyclic loads. The obtained volume deformation diagrams allow you to clearly follow the development of the concrete deformation process with an increase in the number of load application cycles. Under the action of low-cycle compressive loads of medium level, compaction of concrete took place with subsequent stabilization of volumetric relative deformations. With low-cycle repeated loads of high levels, the

concrete structure was gradually loosened from cycle to cycle and, in the process of the development of the main microcracks of detachment, its destruction took place.

***Keywords:* fine-grained concrete; coarse-grained concrete; cyclic loads; load level; number of load cycles; volume deformation; stress-strain state.**