

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А. Г. Седракян

О некоторых основных вопросах сопротивления бетона и кладки

(Представлено А. Г. Назаровым 12 IX 1951)

Собственные напряжения первого рода и микроструктурные напряжения, возникающие в теле бетона, в основном, определяют строительные характеристики последнего, а следовательно, существенно влияют и на характеристики железобетона.

В зависимости от размера элементов конструкции, влажности и температуры среды, объема пор, минералогического состава цемента, физико-технических свойств инертных и ряда других факторов собственные напряжения могут достичь (при высыхании) величины временного сопротивления растяжению, что подтверждается появлением трещин, часто наблюдаемых на поверхности элементов бетонных конструкций при отсутствии внешних силовых воздействий.

Собственные напряжения, слагаясь с напряжениями от внешней нагрузки, при постепенном возрастании последней, приводят к последовательному разрушению площадок, для которых напряжение достигает предела прочности.

В результате этого, рабочее сечение уменьшается, хотя визуально оно неизменно. При этом нарушается также равновесное состояние собственных напряжений, что приводит к их новому перераспределению, вызывающему добавочные, так называемые остаточные деформации. При дальнейшем увеличении внешней нагрузки увеличивается общая площадь элементарных площадок, которые больше не могут воспринимать нагрузки или, вернее, не в равной мере участвуют в общей работе сечения по сравнению с теми площадками, на которых напряжения еще не достигли своего предельного значения; увеличиваются также добавочные деформации, вызванные перераспределением собственных напряжений, вследствие которых и нарушается прямолинейная зависимость между нагрузкой и деформацией сечения.

Все зависимости, предложенные разными авторами для выражения законов деформации при сжатии бетонов, в действительности выражают не связь между напряжением и соответствующей ему деформацией, как это принимается, а дают зависимость между осредненной

деформацией и нагрузкой или осредненной деформацией и осредненным напряжением при осевом сжатии.

Неправильное толкование указанной зависимости впоследствии привело к тому, что зависимость, установленная при осевом сжатии между нагрузкой и осредненным смещением сечения, приписывается напряжению и деформации на элементарной площадке. Эта зависимость без должного обоснования была распространена и на случай воздействия нагрузки, отличной от центральной (внецентренное сжатие и изгиб).

Понятие действительного модуля упругости для бетонов и кладок, как величины тангенса угла касательной точки кривой деформации, соответствующей данному напряжению, не соответствует своему определению и лишено приписываемого ему физического смысла.

Детальное изучение деформативных свойств бетонов и кладок (поведение кладки под нагрузкой сходно с поведением бетона) привело нас к убеждению, что отношение между напряжениями и соответствующими им деформациями для всех точек сечения при данной ступени нагрузки можно в среднем принять постоянным. Величина этого отношения меняется с изменением ступени нагрузки. Чем больше нагрузка, тем меньше это отношение (тем больше сумма элементарных площадок, находящихся в предельном состоянии), но при отдельных ступенях нагрузки оно имеет примерно одну определенную величину для всех точек сечения.

Имея в виду, на основании работ Л. И. Онищика ⁽¹⁾, В. И. Мурашева ⁽²⁾, М. С. Боришанского ⁽³⁾, Я. М. Немировского ⁽⁴⁾, С. С. Кратовского ⁽⁵⁾, М. Я. Пильдиша ⁽⁶⁾ и др., то обстоятельство, что сечения при внецентренном сжатии и изгибе остаются в среднем плоскими, а также результаты исследований ЦНИПС ⁽¹⁾, показавшие, что экспериментальные точки деформации нейтральной оси при внецентренном сжатии, соответствующие отношениям среднего сжимающего напряжения к пределу прочности при центральном сжатии, при различных эксцентриситетах расположены на той же кривой деформации, которую имеем при центральном сжатии, можно сделать весьма важный вывод, что изменения среднего модуля деформации в зависимости от ступени нагрузки как при центральном сжатии, так и при внецентренном — примерно одинаковы.

Несмотря на приближенность этого вывода, как мы убедились при его приложениях, не только качественно, но, что особо важно, и количественно правильно оценивается работа сечения элемента.

Что касается самого закона изменения величины среднего модуля деформации в зависимости от ступени нагрузки, то его можно вывести, используя богатый экспериментальный материал или же формулы зависимости между деформациями и напряжениями, предложенные разными авторами.

В частности, для этой цели можно использовать простую, удобную и вместе с тем достаточно точно выражающую изменения вели-

чины среднего модуля деформации в зависимости от степени нагрузки зависимость:

$$E_{\text{ср}} = E_0 \left(1 - A \frac{P}{P_{\text{раз}}} \right), \quad (1)$$

где E_0 — начальный модуль деформации,

A — эмпирический коэффициент, равный $\approx 0,65$,

P — нагрузка,

$P_{\text{раз}}$ — разрушающая нагрузка.

Из рисунка 1, на котором схематически изображен вид эпюры и величины собственных напряжений, вызванных неравномерным распре-

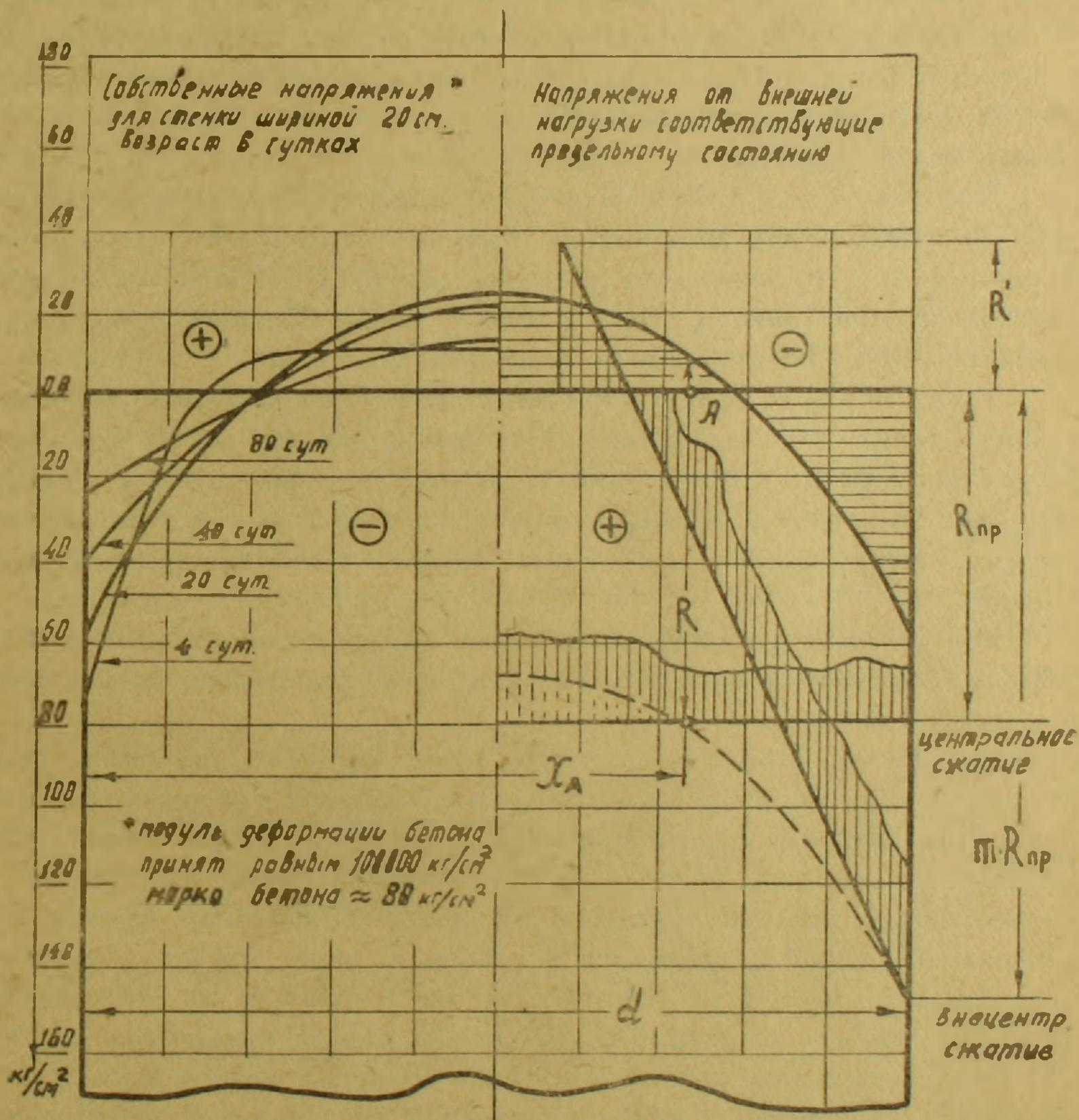


рис. 1 Напряженное состояние бетонной стенки

делением влажности (по данным А. В. Белова (7)), легко усмотреть влияние собственных напряжений на величину разрушающей нагрузки.

Если внешняя сила приложена центрально, то при увеличении нагрузки напряжения достигают своего предельного значения (сумма внешнего и собственного) сначала во внутренней части сечения элемента, когда напряжение в наружных слоях еще значительно меньше их предельного значения (на чертеже показано пунктиром). Внутренняя часть сечения, находясь в предельном состоянии, оказывает расклинивающее действие на наружный слой сечения, который после наступления предельных напряжений во внутренней части сечения работает как обойма, сопротивляясь как нормальным усилиям, так и расклинивающим действиям внутренней части. При этом, естественно, что поперечные деформации начинают возрастать быстрее продольных. При новых, более высоких степенях нагрузки, которые приводят к образованию на поверхности образца видимых на глаз трещин, к кажущемуся увеличению объема его, когда наружный слой сечения, работающий как обойма, уже не может воспринимать расклинивающего действия внутренней части, происходит полное разрушение образца.

Понятно, что в этом случае (центральное сжатие) воспринимающая способность наружных слоев сечения используется неполностью, вследствие расклинивающего действия внутренней части, что наступает значительно раньше того момента, когда значение напряжения в крайних слоях приближается к предельному.

Таким образом, при центральном сжатии разрушения начинаются во внутренней части сечения. Зона разрушенной части постепенно возрастает и вместе с тем оказывает расклинивающее действие на наружные слои сечения, что сопровождается возникновением продольных трещин, выпучиванием свободных граней и полным разрушением образца.

При этом полученное предельное среднее напряжение является условной характеристикой прочности и не учитывает всей сложности работы материала.

Достаточно изменить распределение нагрузки, например, взять внецентренное сжатие, чтобы поведение элемента совершенно изменилось. При величине эксцентриситета внешней нагрузки больше определенного минимума, предельное состояние элемента повидимому наступает тогда, когда напряжения на крайних волокнах сжатой зоны сечения достигают предельного значения. В этом случае разрушение элемента наступает с наружного слоя (при меньших же эксцентриситетах разрушение наступает с внутренних слоев) вследствие достижения предельных напряжений в крайних волокнах сжатой зоны сечения. При этом напряжения в крайних волокнах сжатой зоны, соответствующие разрушающей нагрузке, по величине могут значительно превзойти значения среднего предельного напряжения от внешней нагрузки при центральном сжатии (в частности, для сечения с указанными на рисунке 1 собственными напряжениями примерно в два раза).

Величина и вид распределения собственных напряжений определяются пока еще приближенно с рядом допущений. Поэтому не имеет

смысла определять, с точным учетом получаемых теоретически в настоящее время величин и распределения собственных напряжений, предельные значения напряжений и расстояния от края сечения, где их появление вызывает разрушения, соответствующие разным значениям эксцентриситета внешней нагрузки.

Как первое приближение можно считать, что при относительном эксцентриситете внешней нагрузки, равном e'/d , разрушение элемента наступает с одновременным наступлением предельных напряжений как в некоторой точке А, находящейся на определенном расстоянии от менее сжатого края сечения, так и в крайней точке сжатой зоны.

Понятно, что при относительных эксцентриситетах, больших, чем e'/d , разрушение элемента будет наступать с достижением краевого напряжения сжатой зоны своего предельного значения. При меньших же эксцентриситетах ($e \leq e'$) можно считать, что разрушение наступает тогда, когда в точке А напряжение достигает величины призматической прочности.

При этом возможны следующие три случая:

1) сечение полностью сжато, и растягивающие напряжения от внешней силы отсутствуют;

2) в сечении имеется растянутая зона, и разрушение наступает с достижением в точке А напряжения, равного призматической прочности, при этом относительный эксцентриситет $\ll e'/d$;

3) относительный эксцентриситет внешней нагрузки больше, чем e'/d , и разрушение элемента наступает с достижением предельного напряжения в крайних точках сжатой зоны сечения, равной $m \cdot R_{пр}$ — крайнему предельному напряжению.

Исходя из условия равновесия, величина разрушающей нагрузки, для прямоугольных сечений, при пренебрежении влиянием растянутой зоны из-за незначительности ее влияния, будет выражаться формулами:

а) для первого случая, когда $e \leq \frac{1}{6} d$

$$P_{раз} = \frac{F \cdot R_{пр}}{1 + 12 \frac{e}{d} \left(\frac{X_A}{d} - \frac{1}{2} \right)}; \quad (2)$$

б) для второго случая, когда $\frac{d}{6} \ll e \leq e'$

$$P_{раз} = \frac{4,5 \cdot F \cdot R_{пр} \cdot \left(1 - \frac{e}{d} \right)^2}{2 - 12 \frac{e}{d} - 4 \frac{X_A}{d}}; \quad (3)$$

в) для третьего случая, когда $e > e'$

$$P_{раз} = F \cdot R_{пр} \cdot \frac{3 \cdot m}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{e}{d} \right), \quad (4)$$

где P_{pa} — разрушающая нагрузка,
 F — площадь сечения,
 d — высота сечения,
 X_A — расстояние точки A от менее сжатого края сечения,
 e — эксцентриситет внешней нагрузки.

Сравнение экспериментальных данных с результатами подсчетов по вышеприведенным формулам, с подстановкой в них $m=2$ и $X_A=0,65d$ (при этом $e'=0,266d$) показывает, что максимум отклонения от средних экспериментальных данных не превышает $\pm 5\%$.

Как вытекает из изложенного, при минимальных значениях собственных напряжений (например, свежая кладка) прочность при сжатии должна совпадать с результатами подсчетов выведенных формул, с подстановкой в них $m=1$ и $X_A=d$, т. е. с результатами подсчетов по формулам сопротивления материалов (без учета растянутой зоны), что также подтверждается опытами (8).

При передаче расклинивающей силы внутренней части, скажем, спиральной арматуре в бетоне или сетчатой арматуре в кладке создаются условия для более полного использования возможной несущей способности как внутренних, так и наружных слоев сечения. При этом повышение величины несущей способности сечения с увеличением эксцентриситета внешней нагрузки будет уменьшаться и при значениях эксцентриситета нагрузки, примерно равного $e'=0,26d$ должно сводиться на нет, т. к. разрушение элемента при $e \geq e'$ наступает с наружных слоев.

На основе экспериментальных данных, коэффициент, учитывающий снижение эффективности сетчатого армирования при внецентренном сжатии, по сравнению с центральным, определяется (9) по выражению $\lambda = 1 - \frac{4 \cdot e}{d}$, т. е. именно при $e/d=0,25$ эффективность сетчатого армирования сводится на нет. Подтверждение этого имеется и в бетонных элементах, армированных спиральной арматурой (10).

Таким образом, во всех основных случаях работы бетона и кладки на сжатие принципиально подтверждается правильность изложенных здесь элементов основ сопротивления бетона и кладки. О растяжении и изгибе будет сообщено отдельно.

Теперь не только непарадоксально существование (для одного и того же материала) таких понятий, как прочность при осевом сжатии, прочность при изгибе и внецентренном сжатии и др., но и очевидна их необходимость.

Вышеизложенное достаточно, чтобы ясно представить причину ряда экспериментально установленных явлений, как то: повышенная прочность при внецентренном сжатии по сравнению с прочностью, полученной по формулам сопротивления материалов; большая предельная сжимаемость краевых волокон при внецентренном сжатии и изгибе по сравнению с предельным сжатием, соответствующем централь-

ному сжатию; кажущееся увеличение объема при высоких ступенях нагрузки; изменение деформативных и прочностных характеристик во времени и т. д.

В заключение автор считает своим приятным долгом поблагодарить чл.-кор. АН Армянской ССР А. Г. Назарова за постоянный интерес к работе и за ценные замечания.

Институт стройматериалов и сооружений
Академии наук Армянской ССР

L. Գ. ՍԵՂՐԱԿՅԱՆ

Բեռների ևլ բարվածքի դիմադրություն մի բանի հիմունքային հարցերի մասին

Հոգրվածում ցույց է տրված, որ բետոնի և շարվածքի համար իրական առաձգականության մոդուլ հասկացողությունը՝ որպես դեֆորմացիայի կորի տվյալ լարվածությանը համապատասխանող կետի շոշափողի թեքության անկյան տանգենսի, զուրկ է նրան վերագրվող ֆիզիկական իմաստից:

Ինժեներական հաշվարկումների ժամանակ պետք է օգտվել դեֆորմացիայի միջին գործակցի մեծությունից, որը բեռնավորվածության յուրաքանչյուր աստիճանում կտրրվածքի բոլոր կետերի համար մոտավորապես հաստատուն արժեք ունի: Այդ մեծության արժեքը փոփոխվում է՝ կախված բեռնավորվածության աստիճանից: Ցույց է տրված, որ դեֆորմացիայի միջին գործակցի մեծության փոփոխությունը, կախված բեռնավորվածության աստիճանից ինչպես կենտրոնական սեղմման, այնպես էլ արտակենտրոն սեղմման ժամանակ մոտավորապես նույնն է: Առաջարկվում է դեֆորմացիայի միջին գործակցի արժեքի փոփոխությունը, կախված բեռնավորվածության աստիճանից, արտահայտել (1) ֆորմուլայով, որը պարզության և հարմարության հետ միասին բավականին ճիշտ է արտահայտում այդ փոփոխման օրինաչափությունը:

Էլեմենտի դիմադրությունը սեղմող ուժերին ուսումնասիրելիս չի կարելի անտեսել նրանում առաջացող սեփական լարումները: Ի նկատի ունենալով սեփական լարումները, ցույց է տրված, որ կենտրոնական սեղմման ժամանակ քայքայումն սկսվում է կտրվածքի միջին շերտերից և ավարտվում է արտաքին շերտերի քայքայումով, որ վրա է հասնում ներքին, սահմանային վիճակի հասած, շերտերի առաջացրած հրումից, ընդ որում արտաքին շերտերի դիմադրողականությունը նորմալ ուժերին լրիվ չի օգտագործվում:

Արտակենտրոն սեղմման ժամանակ, որոշակի հարարերական էքսցենտրիսիտետից զուրս գործող ուժերի տակ, քայքայումը կատարվում է կտրվածքի արտաքին շերտերից՝ նրանց լարվածությունը սահմանայինին հասնելու հետևանքով, ընդ որում սահմանային լարվածության մեծությունը կտրվածքի եզրում կարող է զգալի չափով գերազանցել կենտրոնական սեղմմանը համապատասխանող սահմանային միջին լարվածությունից:

Քայքայում առաջացնող սահմանային լարվածության ու նրա տեղի որոշումը որոշ մտավորությամբ կատարված է հետևյալ կերպ. երբ արտաքին ուժի էքսցենտրիսիտետը մեծ է որոշակի արժեքից, քայքայումը կատարվում է՝ երբ սեղմած մասի եզրում լարվածությունը հասնում է $m \cdot R_{ap}$ -ի, իսկ դրանից փոքր էքսցենտրիսիտետով գործող ուժերի դեպքում՝ երբ լարվածության մեծությունը քիչ սեղմված եզրից X_A հեռավորության վրա հասնում է պրիզմային ամրության: Նման մոտեցմամբ կառուցված հաշվարկային բանաձևերով (2,3,4) ստացված արդյունքները (ընդունելով $m=2$ իսկ $X_A = 0,65d$ -ի), համեմատած փորձերից ստացված միջին տվյալների հետ, տալիս են $\pm 5\%$ շեղումներ:

Բետոնի և շարվածքի դիմադրության նկարագրված սկզբունքների ճշտությունը հաստատվում է նաև հորիզոնական արմատուրա ունեցող շարվածքի ու օպիրայաձև արմատուրայով բետոնե սյուների, որոնցում ուժեղացված է արտաքին շերտերի ներսից հրող

ուժերին դիմադրելու ունակութիւնը, ինչպես նաև թարմ շարվածքների, որտեղ բացակայում են, կամ մինիմում են կազմում սեփական լարումները, աշխատանքը ուսումնասիրելիս:

Մի շարք փորձերով հաստատված կարևոր փաստեր, որոնք չէին բացատրվում, այժմ դառնում են հասկանալի:

ЛИТЕРАТУРА--ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Л. И. Онщик, Особенности работы каменных конструкций под нагрузкой в стадии разрушения, Исследования по каменным конструкциям, 1949. ² В. И. Мурашев, Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона, 1950. ³ М. С. Боришанский, Изучение работы железобетонных элементов при внецентренном сжатии, отчет ЛЖБК, ЦНИПС наряд № 5201, 1939. ⁴ М. Я. Немировский, Жесткость изгибаемых железобетонных элементов и раскрытие трещин в них, Исследования обычных и предварительно напряженных ж. б. к., 1 49. ⁵ С. С. Кротовский, Экспериментальное исследование жесткости внецентрально сжатых ж. б. элементов, диссертация, архив ЦНИПС-а, 1950. ⁶ М. Я. Пильдиш, Внецентренное сжатие каменных конструкций, Исследования по каменным конструкциям, 1949, ⁷ А. В. Белов, К исследованию напряженного состояния в бетоне при его усадке, докторская диссертация, 1945. ⁸ И. Т. Котов, Прочность и устойчивость кирпичной кладки в ранних возрастах, исследования по каменным конструкциям, 1949. ⁹ У—57—43. ¹⁰ В. Я. Рутгерс, Теория прочности бетона при сжатии, 1939.