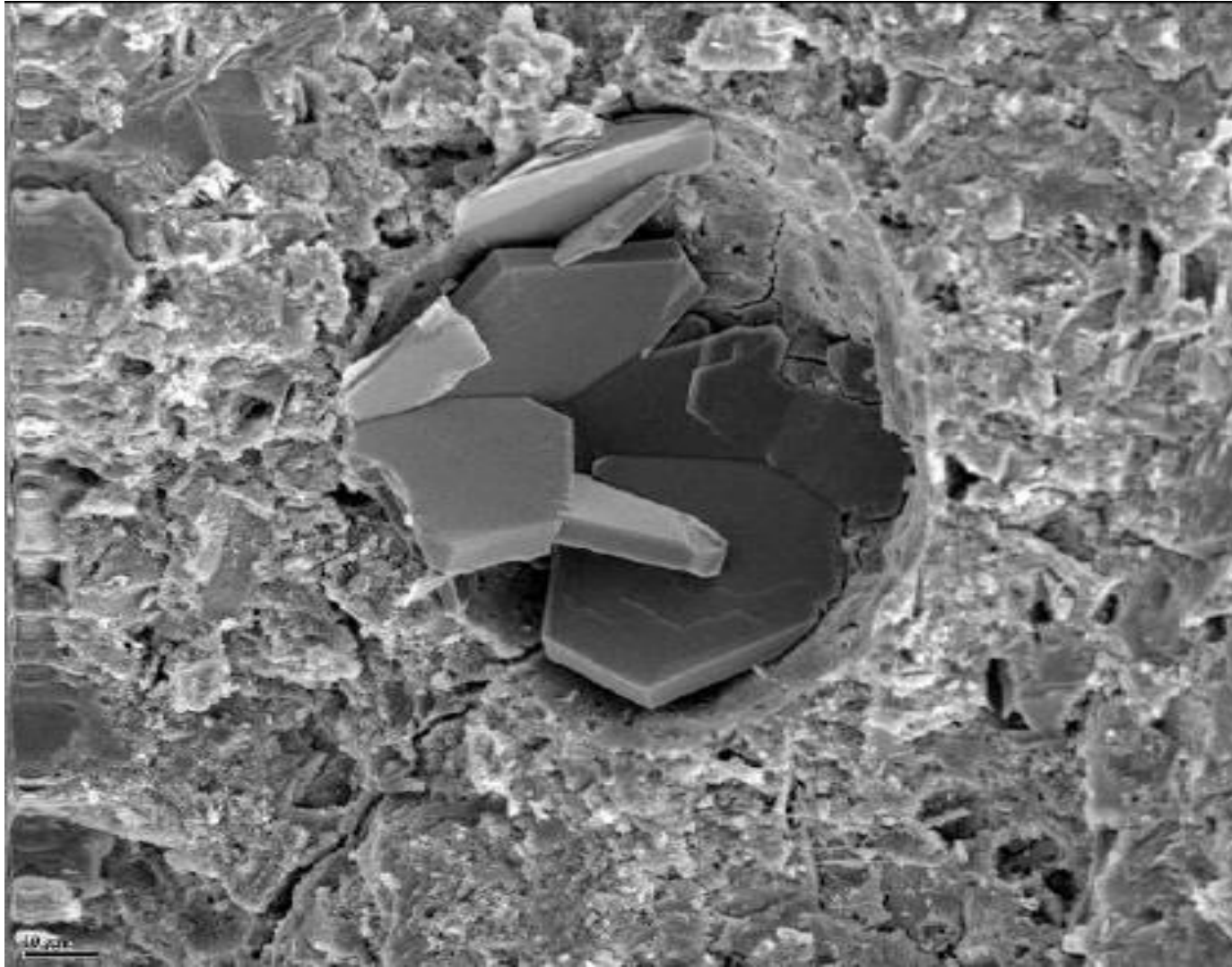


ریز ساختار بتن



ریزساختار بتن

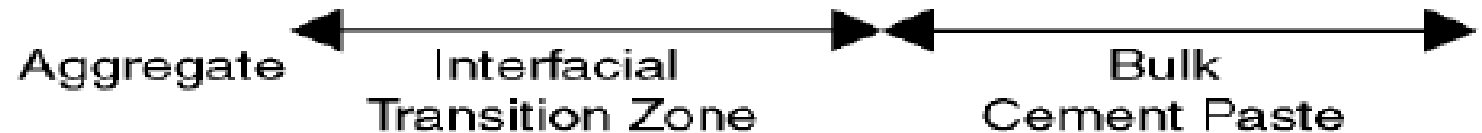
- بتن، ساختاری غیرهمگن و پیچیده دارد، لذا بسیار مشکل است که الگوهای ساختاری مشخصی را برای بتن در نظر گرفته و باتوجه به آن بتوان رفتار مصالح را پیش‌بینی کرد.
- بتن شامل دو فاز سنگدانه‌های پخش‌شده در خمیر سیمان می‌باشد.
- از بررسی ریزساختار مشخص می‌گردد که دو فاز سنگدانه و خمیر نه خودشان همگن می‌باشند و نه به‌صورت همگن نیز پخش شده‌اند.

ریزساختار بتن

- می‌توان برای مدل کردن رفتار مصالح از ناهمگن بودن بخش جامد و حفرات در داخل خمیر صرف‌نظر نمود.
- چنین فرضی درخصوص خمیر سخت‌شده در بتن صادق نیست، و با وجود سنگدانه در بتن، ساختار خمیر سخت‌شده مجاور سنگدانه‌های درشت معمولاً بسیار متفاوت از ساختار خمیر به‌تنهایی و یا در ملات خواهد بود.
- درحقیقت بسیاری از رفتارهای بتن تحت تنش، با درنظر گرفتن فاز سومی که همان فصل مشترک دانه‌ها و خمیر است مشخص می‌گردد.

ناحيه انتقال

Interfacial Transition Zone



ناحیه انتقال

- ناحیه نشان‌دهندهٔ ناحیه فصل مشترک سنگدانه‌های درشت و خمیر سخت‌شده است.
- این فاز به صورت یک پوسته نازک با ضخامت حدود ۱۰ تا ۵۰ میکرون به‌دور دانه‌های درشت قرار گرفته و عموماً ضعیف‌تر از دو بخش دیگر بتن بوده و در نتیجه تأثیر بیشتر و مهم‌تری بر روی خواص مکانیکی بتن با وجود اندازه‌اش خواهد داشت.
- توجه شود که خمیر سخت‌شده و ناحیه انتقال با گذشت زمان و تغییرات رطوبت و دمای محیط تغییر می‌کنند.

ناحیه انتقال

- ابتدا پس از تراکم بتن تازه، لایه نازکی از آب اطراف سنگدانه‌های درشت تشکیل می‌شود که به علت بالا بودن نسبت آب به سیمان در مجاورت سنگدانه‌های درشت در مقایسه با سایر قسمت‌های خمیر باشد.
- سپس در قسمت توده‌ای خمیر، **یون‌های کلسیم، هیدروکسیل و آلومینات که از حل سولفات کلسیم و آلومینات به دست آمده‌اند، با یکدیگر ترکیب شده تا تولید اترینگایت و هیدروکسید کلسیم بنمایند.**
- به علت زیاد بودن نسبت آب به سیمان در مجاورت سنگدانه‌های درشت این بلورها در این محل اغلب شامل بلورهای درشت بوده و لذا ساختاری متخلخل‌تر از بلورهای بخش خمیری سیمان یا ملات دارند.

ناحیه انتقال

- هیدروکسید کلسیم **صفحه‌ای شکل**، به صورت بلورهایی در جهتی تقریباً عمود بر **سطح سنگدانه** در این ناحیه قرار می‌گیرد.
- بالاخره با پیشرفت هیدراتاسیون، **C-S-H** کمتر بلورین، و نسل دومی از بلورهای کوچک اترینگایت و هیدروکسید کلسیم شروع به پر نمودن فضای موجود بین شبکه ایجادشده توسط بلورهای بزرگ اترینگایت و هیدروکسید کلسیم می‌کنند.
- این امر به متراکم شدن و مقاومت ناحیه انتقال کمک می‌نماید.

ناحيه انتقال



C-S-H



CH



C-A-S-H
(Ettringite)



Aggregate

Interfacial
Transition Zone

Bulk
Cement Paste

ناحیه انتقال

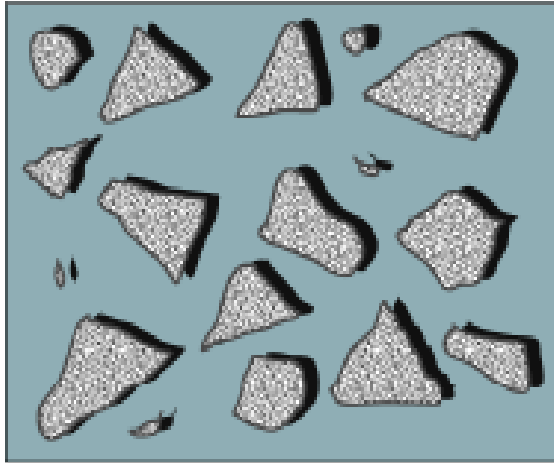
- حتی در بتن با نسبت کم آب به سیمان، در اوایل هیدراتاسیون و سنین کم، **حجم و اندازه فضاهای خالی** در ناحیه انتقال بزرگتر از مواد مشابه در ملات است ← **مقاومت پایین تر**
- علاوه بر وجود فضاهای مویینه بزرگ و بلورهای هیدروکسید کلسیم جهت‌دار در ناحیه انتقال، عامل اصلی مقاومت کم این ناحیه، همانا **وجود ترک‌های ریز** است.
- میزان ترک‌های ریز، به عواملی چون **اندازه و دانه‌بندی سنگدانه‌ها، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، درجه تراکم بتن تازه، شرایط عمل‌آوری، رطوبت نسبی محیط و تاریخچه حرارتی بتن، بستگی دارد.**

ناحیه انتقال

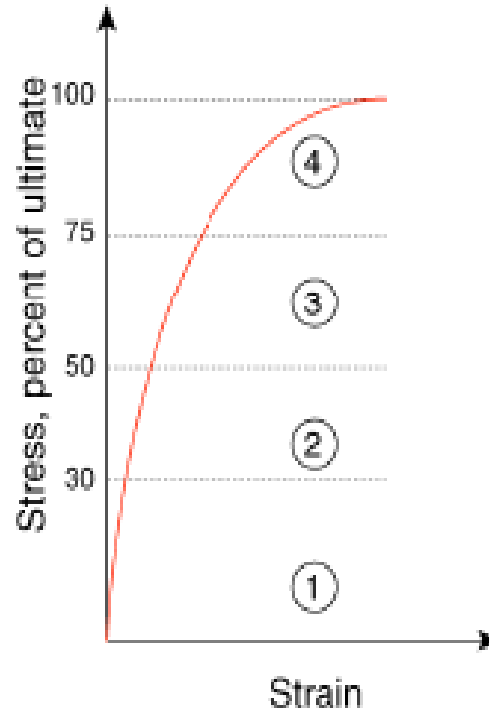
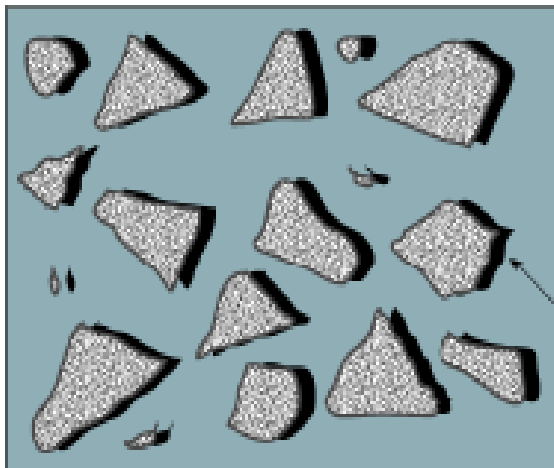
- ناحیه انتقال که در حقیقت ضعیف‌ترین حلقه در زنجیره بتن است، عامل محدود کننده مقاومت بتن می باشد.
- برای گسترش ترک‌های موجود در ناحیه انتقال، مقدار انرژی زیادی مورد نیاز نیست و حتی در ۴۰ تا ۷۰ درصد مقاومت نهایی این کار عملی است
- لذا بر اثر وجود ناحیه انتقال، بتن تحت تنشی شکسته می شود که به مراتب کمتر از مقاومت هریک از دو جزء تشکیل دهنده آن است.

ناحيه انتقال

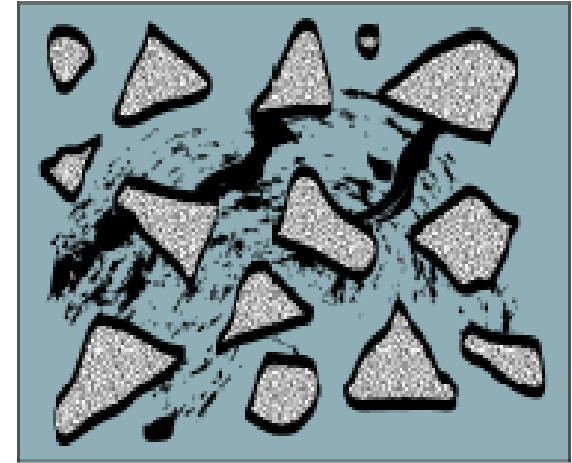
(2) 50% of ultimate stress



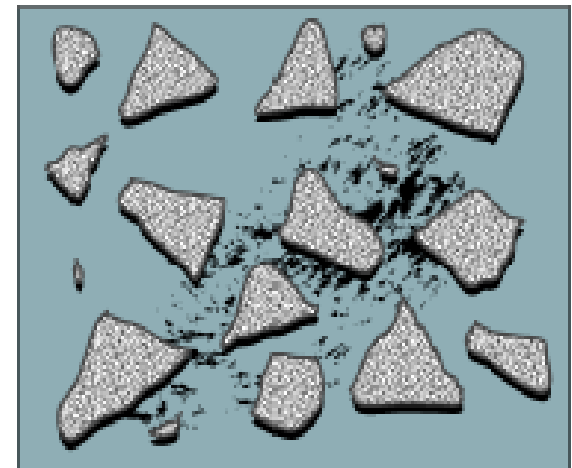
(1) 30% of ultimate stress



(4) Failure stress



(3) 75% of ultimate stress



Microcracks in the transition zone

ناحیه انتقال

- وجود ترک‌های ریز در ناحیه انتقال در فصل مشترک ملات و دانه‌های درشت، دلیل اولیه نفوذپذیرتر بودن بتن از ملات یا خمیر نظیر است.

- هرچه سنگدانه بزرگ‌تر باشد و نسبت آب به سیمان موضعی در ناحیه انتقال بیشتر باشد، بتن ضعیف‌تر و نفوذپذیرتر خواهد بود
- در حالت کلی، مقاومت و نفوذپذیری ناحیه انتقال تاثیر عمده ای بر روی مقاومت و دوام بتن دارد.

ساختار خمیر هیدراته شده

- پس از هیدراته شدن، انواع مختلف فضاهای خالی در خمیر سیمان ایجاد می‌شود که در خواص آن تأثیر به‌سزایی دارند.
- این فضاها در حالت کلی به چند دسته تقسیم می‌شوند که دارای ابعاد و خصوصیات مختلفی هستند:

– فضای بین لایه ای در C-S-H (Interlayer Space in C-S-H)

– فضاهای موئینه (Capillary Voids)

– حباب های هوا (Air Voids)

فضای بین لایه ای در C-S-H

- اندازه این حفرات عموماً بین ۵ تا ۲۵ آنگستروم می باشد.
- این فضاها حدوداً ۲۸٪ قسمت جامد C-S-H می باشند.
- این فضاهای متخلخل آن قدر کوچکند که نمی توانند تاثیری در مقاومت و تراوایی خمیر سیمان سخت شده داشته باشند.
- در صورت خروج آب تحت شرایط معین در این منافذ، جمع شدگی ناشی از خشک شدن و خزش می تواند رخ دهد.

منافذ مویینه

- حجم کل مخلوط آب و سیمان، اساساً در طول مراحل هیدراتاسیون، تغییر نمی‌کند.
- تخمین زده می‌شود که هر سانتیمتر مکعب سیمان در هیدراتاسیون کامل، به حدود ۲ سانتیمتر مکعب فضا برای جا دادن محصولات و اکنش نیاز دارد.
- فضایی که توسط سیمان یا محصولات هیدراتاسیون پر نمی‌شود، فضاهای مویینه بوده و حجم و اندازه این حفرات توسط فاصله اصلی بین ذرات سیمان هیدراته نشده در خمیر سیمان تازه مخلوط‌شده (یعنی نسبت آب به سیمان) و درجه هیدراتاسیون معین می‌گردد.

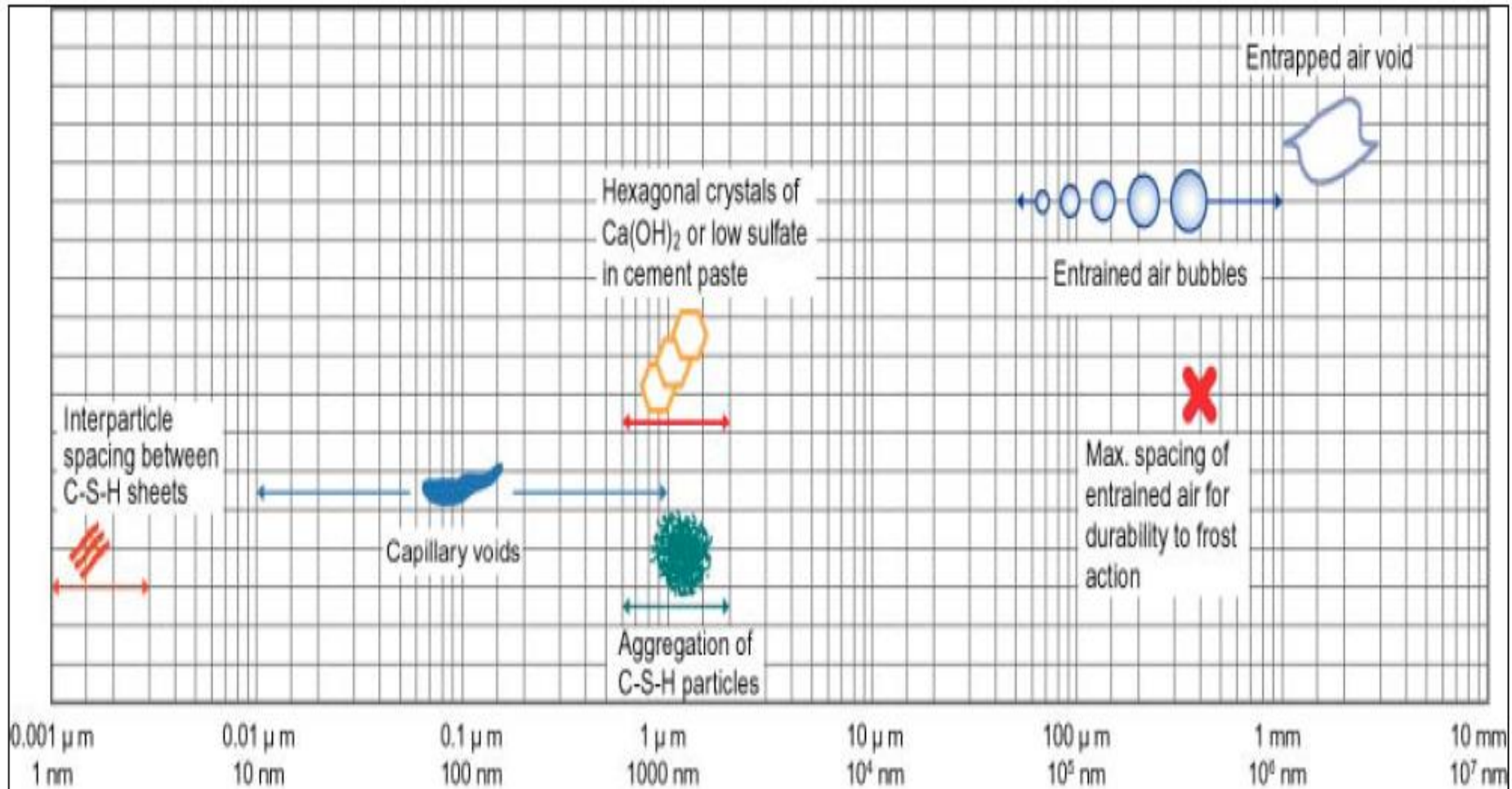
منافذ مویینه

- در یک خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده با نسبت کم آب به سیمان، فزاهای مویینه ممکن است بین ۱۰ تا ۵۰ نانومتر باشد.
- در یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان بالا در اوایل هیدراتاسیون فزاهای مویینه ممکن است به بزرگی ۳ تا ۵ میکرون باشند.
- حفرات بزرگتر از ۵۰ نانومتر در نفوذپذیری تأثیری اساسی دارند، در حالی که حفرات کمتر از ۵۰ نانومتر یعنی ریز حفرات خمیر بیشتر در جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و خزش مؤثرند.

حبابه‌های هوا

- هوا ممکن است در حین اختلاط در خمیر سیمان محبوس گردد. حبابه‌های هوای محبوس شده ممکن است به بزرگی ۳ میلی متر باشند.
- مواد حباب زا اغلب حباب هایی با قطر بین ۵۰ تا ۲۰۰ میکرون در بتن ایجاد می کنند.
- بنابراین هم حباب های هوای محبوس شده و هم حباب های ایجاد شده با مواد هوازا در خمیر سیمان هیدراته، قطری بزرگتر از فضاهاى مویینه دارند و بنابراین قادر به تاثیر در مقاومت و نفوذناپذیری بتن هستند.
- فضاهاى مویینه اغلب بدون شکل خاصی هستند، در صورتی که حباب های هوا در بتن یا خمیر اغلب کروی هستند.

حبابه‌های هوا



Dimensional range of solid and pores in a hydrated cement paste.

ساختار خمیر هیدراته شده

- خمیر سیمان بسته به رطوبت محیط و تخلخل خمیر، قادر به نگهداشتن مقدار قابل ملاحظه‌ای آب در خود است.
- شبیه قسمت‌های جامد و فضاهای خالی که قبلاً بحث گردید، آب نیز در خمیر سیمان به شکل‌های مختلف می‌تواند وجود داشته باشد.
- طبقه‌بندی آب به انواع مختلف، براساس درجه آسانی یا سختی خارج شدن آن از خمیر هیدراته شده می‌باشد.

– آب بین لایه ای (Interlayer Water)

– آب موینگی (Capillary Water)

– آب جذب شده سطحی (Adsorbed Water)

– آب ترکیب شیمیایی (Chemically Bound Water)

آب بین لایه ای

- این آب در ساختار C-S-H و بین لایه های آن توسط پیوند هیدروژنی، به صورت بسیار قوی ای نگهداشته می شود.
- آب بین لایه ای تنها بر اثر خشک شدن شدید (در رطوبت نسبی کمتر از ۱۱ درصد) کاهش می یابد.
- ساختار C-S-H بر اثر کاهش آب بین لایه ای به میزان قابل ملاحظه ای دچار جمع شدگی و انقباض می گردد.

آب مویینه

• این آب در خمیر هیدراته شده به دو دسته تقسیم می شود :

- در فزاهای بزرگتر از ۵۰ نانومتر که خروج آن از سیستم سبب هیچگونه تغییر حجمی نمی شود.

- در فزاهای مویینه کوچک تحت اثر کشش مویینگی (۵ تا ۵۰ نانومتر) که خروج آن از سیستم سبب جمع شدگی خمیر می گردد.

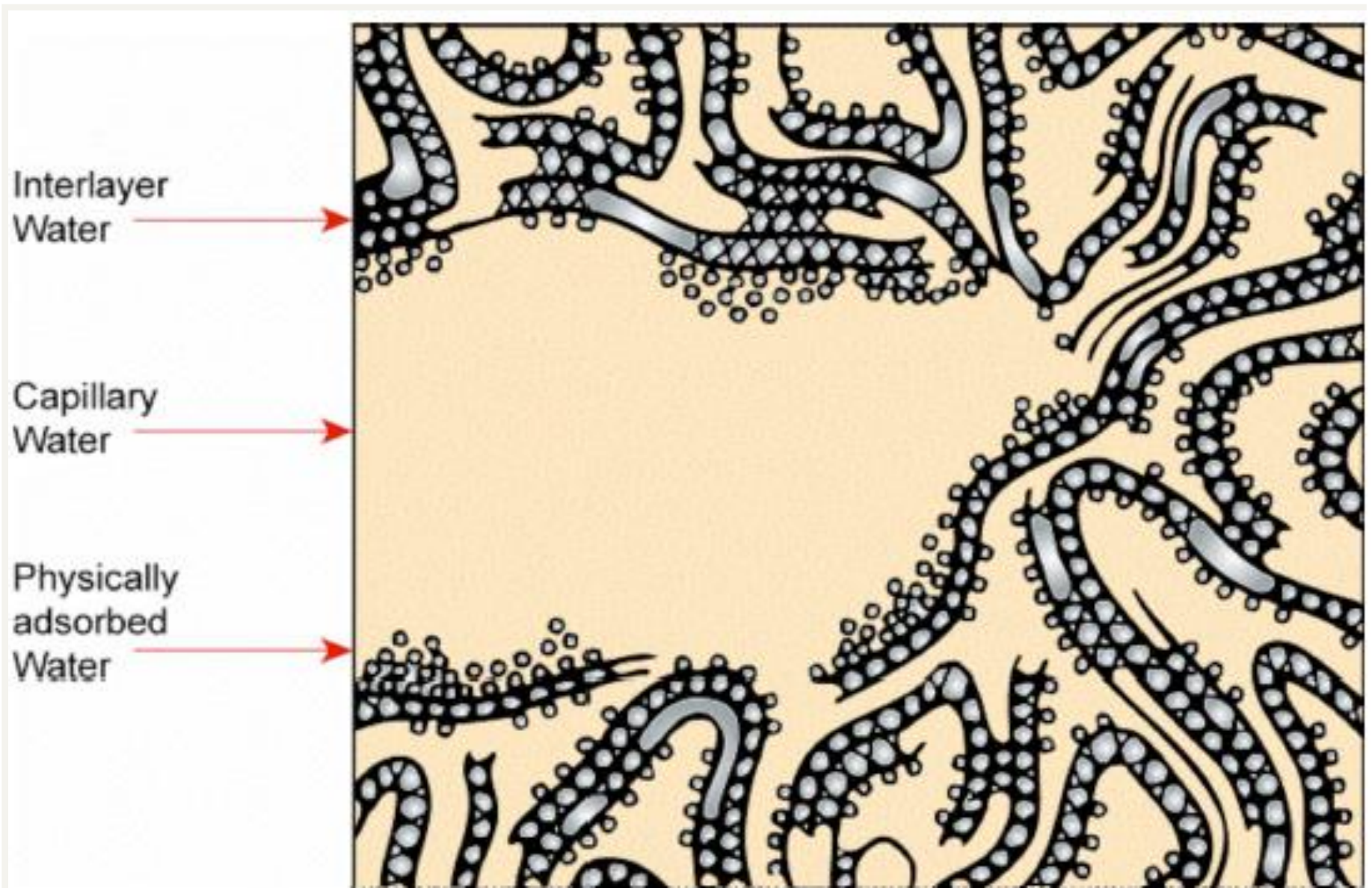
آب جذب شده سطحی

- این آب در نزدیکی سطح جامد قرار دارد. بر اثر نیروهای جذبی، مولکولهای آب به صورت فیزیکی جذب سطح قسمت جامد خمیر هیدراته شده می گردند.
- تحقیقات نشان داده است که تا شش لایه مولکولی آب می تواند به طور فیزیکی بر اثر پیوند هیدروژنی نگه داشته شود.
- به دلیل کاهش انرژی پیوند مولکولهای جداگانه آب با فاصله آنها از سطح جامد، قسمت عمده ای از آب جذب شده بر اثر خشک شدن خمیر تا رسیدن به ۳۰ درصد رطوبت نسبی از دست می رود.
- نقصان آب جذب شده سطحی، عامل اصلی جمع شدگی و انقباض خمیر بر اثر خشک شدن است.

آب ترکیب شیمیایی

- این آب در ساختار خمیر سیمان هیدراته شده به صورت شیمیایی موجود است.
- بر اثر خشک شدن خمیر، کاهش نمی یابد.
- این آب تنها در صورتی که بر اثر حرارت، خمیر تجزیه شود، آزاد می گردد.

آب موجود در بتن



مطالعه هیدراتاسیون

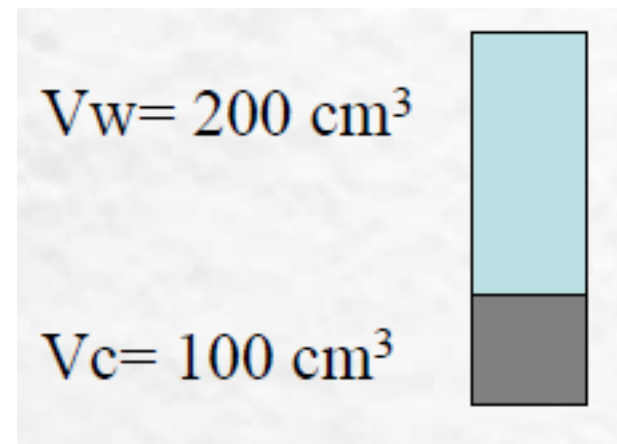
خمیر سیمانی با نسبت (وزنی) آب به سیمان 0.63 را در نظر

بگیرید: $W/C = 0.63$

فرض کنیم حجم سیمان مورد استفاده 100 cm^3 باشد

وزن سیمان و آب مورد استفاده را محاسبه می کنیم

- $M_c = 3.14 * 100 = 314 \text{ g}$
- $M_w = 0.63 * 314 = 200 \text{ g}$

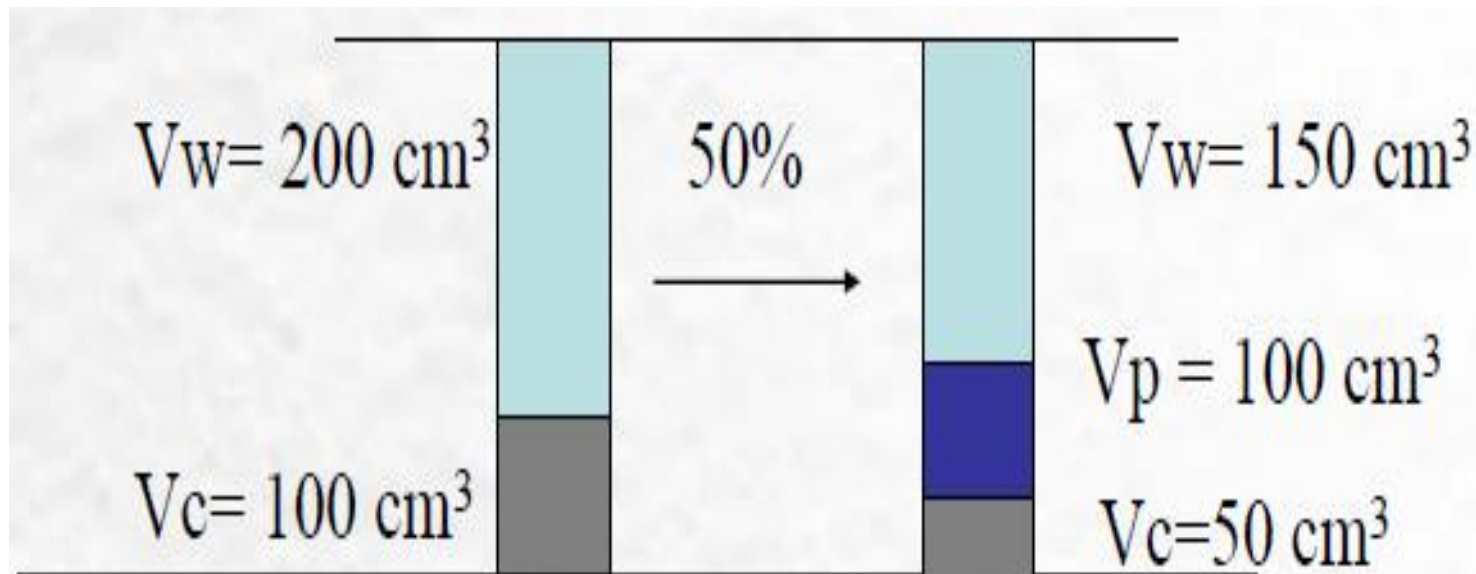


مطالعه هیدراتاسیون

واکنشهای هیدراتاسیون به نحوی هستند که حجم محصولات تولید شده ۲ برابر حجم سیمان مصرفی هستند:

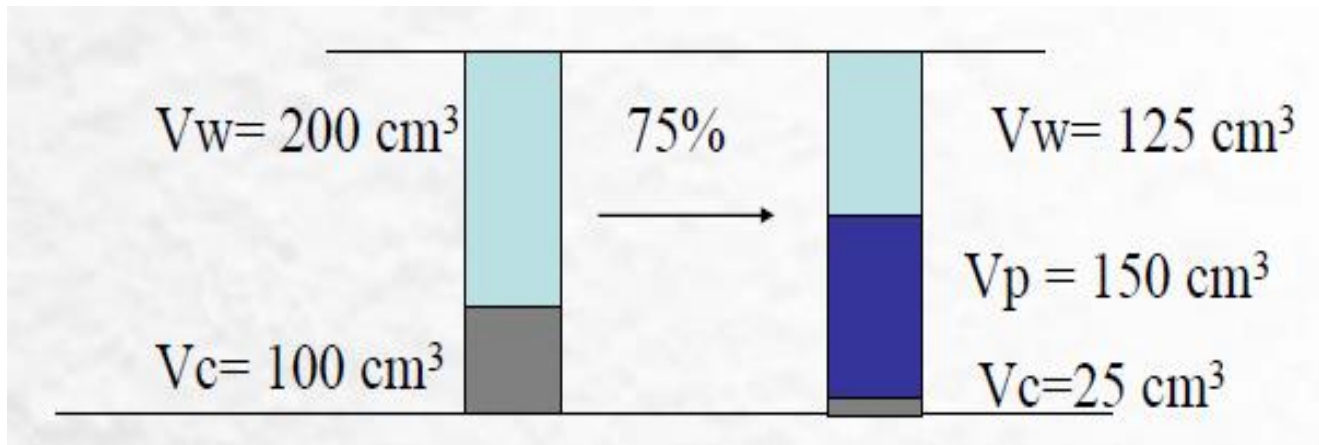
$$V_p = 2 V_c$$

با فرض درجه هیدراتاسیون = ۵۰٪ :



مطالعه هیدراتاسیون

با فرض درجه هیدراتاسیون = ۷۵٪ :



با فرض درجه هیدراتاسیون = ۱۰۰٪ :



مطالعه هیدراتاسیون

محاسبه مقدار نسبت آب به سیمان لازم برای دستیابی به تخلخل
صفر در خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده:

$$W/C = 100 / 100 * 3.14 = 1 / 3.14 = 0.32$$

