بتن متخلخل و کاربردهای آن مهمترین پیشرفت در فناوری بتن چند دهه اخیر استفاده از حباب هواساز در مخلوط برای بهبود دوام ، کارایی ، یکنواختی ، و سایر ویژگی های مهم مورد نیاز برای بتن با دوام و مقاومت بالا است . اطمینان به شدیدترین شرایط مثلا قرار گرفتن در معرض تکرار چرخه انجماد و ذوب و نمک طی سالیان گذشته این را نشان داده است. بتن متخلخل حاوی میلیاردها سلول هوای میکروسکوپی در هر فوت مکعب است. این جیب های هوا با تهیه محفظه های کوچکی که آب هنگام یخ زدن در آن منبسط می شود ، فشار داخلی بر روی بتن را کاهش می دهند. بتن متخلخل با استفاده از سیمان پرتلند حباب ساز یا با معرفی عوامل حباب سازهوا ، تحت نظارت دقیق مهندسی ، به دلیل مخلوط شدن بتن در اجرا ، تولید می شود. مقدار هوای محبوس معمولاً بین چهار تا هفت درصد از حجم بتن است ، اما ممکن است در صورت نیاز به شرایط خاص ، متنوع باشد.

## بتن متخلخل چیست ؟

بتن متخلخل بتن معمولی است که حاوی مقادیر کنترل شده ای از هوا به صورت حباب های میکروسکوپی است. این حباب های هوا که عمداً ایجاد می شوند بسیار کوچک هستند. اندازه آنها از چند هزارم اینچ قطر تا چند صدم متر است. به معنای واقعی کلمه میلیاردها حباب هوا در یک فوت مکعب بتن متخلخل وجود دارد و وجود آنها ماهیت بتن تازه و سخت شده را به طرز چشمگیری تغییر می دهد وقتی بتن در مرحله پلاستیک است ، حباب در بتن ایجاد می شود و بیشتر حباب ها در بتن سخت شده باقی می مانند .این حفره ها با مواد افزودنی هواساز، تثبیت شده و در خمیر بتن سخت شده باقی می مانند. استفاده اولیه از بتن هواساز برای مقاومت در برابر یخ زدگی است. حفره های هوا مکان های جذب فشار را در هنگام یخ زدگی فراهم می کنند و باعث می شوند آب داخل بتن بدون ایجاد تنش های داخلی زیاد منجمد شود. فضای خالی هوا محل هایی برای تجمع غلظت نمک و فشارهایی است که به دلیل شیب غلظت ایجاد می شود. از دیگر کاربردهای بتن متخلخل می توان به مقاومت سولفات ، مقاومت در برابر واکنش قلیایی - سیلیس و بهبود کارایی اشاره کرد. با این حال ، مزیت اصلی هوای موجود در بتن سخت شده ، مقاومتی است که در برابر یخ زدگی و ذوب شدن و پوسته پوسته شدن ناشی از نمک زدایی یا مواد شیمیایی ایجاد می کند. بتن حاوی مقداری رطوبت است که در طی دمای انجماد منبسط می شود. بدون فضای لازم برای این انبساط ، نیروهای بزرگی ایجاد می شوند که می توانند سطح را گسیخته کنند .حباب های محبوس به عنوان مخزن یا محفظه انبساط برای کاهش این فشارها عمل می کنند. تحقیقات نشان داده است که فاصله و اندازه حباب های هوا برای اطمینان از عملکرد مناسب آنها مهم است. برای اثرگذاری ، فاصله حباب ها نباید بیشتر از 0.01 اینچ در طول خمیر سیمان باشد. با استفاده از روشهای امروزی جذب هوا ، دستیابی به این فاصله حباب کار دشواری نیست. برخی از سوالات متداول در مورد بتن متخلخل عبارتند از:

آیا حباب هواساز مقاومت را کاهش می دهد؟
آیا بر نسبت مخلوط بتن تأثیر می گذارد؟
و آیا می توان از آن در آب و هوای معتدل استفاده کرد؟

مقاومت بتن متخلخل به نسبت آب / سیمان مانند بتن معمولی بستگی دارد. همانطور که برای مخلوط ، این ترکیب باید به گونه ای طراحی شود که برای افزایش میزان هوا در نظر گرفته شود. مقدار آب برای مخلوط 3 تا 5 گالن در هر یارد مکعب کمتر از مخلوط معمولی با هوای مشابه خواهد بود. میزان شن و ماسه نیز در حدود 90 تا 125 پوند در هر یارد مکعب کمتر خواهد بود. مزیت عمده بتن هوا این است که توانایی مقاومت در برابر صدمه ذوب-یخ و پوسته پوسته شدن ناشی از نمک زدایی یا مواد شیمیایی را دارد.

## مقدار درصد هوا در بتن متخلخل

انواع مختلف بتن حاوی درصدهای مختلف هوای محبوس هستند .اثرات دو عامل جذب کننده هوا به طور گسترده ای مقایسه شده و اطلاعات به دست آمده از آزمون ها نشان می دهد که میانگین قطر فضاهای خالی در بتن ممکن است از حدود 0.1 میلی متر متفاوت باشد. جباب های کوچک هوا در بتن متخلخل مانند ریزدانه رفتار می کنند و می توانند کمبود این اندازه مواد را در شن و ماسه جبران کنند. توانایی حباب هواساز برای افزایش انسجام کاملاً ثابت شده است. بتونی که به دلیل انسجام کم در حالت عادی غیر قابل پمپ است ممکن است تنها با افزودن مقدار کمی ماده حامل هوا در هوا بهبود یابد.

حباب هواساز برای پمپاژ بتنهای غنی از سیمان ، بخصوص با ماسه ریز ، هیچ فایده ای ندارد و می تواند باعث ایجاد ملات چسبنده ای شود که اصطکاک زیاد در برابر دیواره لوله با استفاده از کلاس قوام بالا و / یا استفاده از نرم کننده با کارایی بالا را تشویق می کند ، ممکن است مشکلات پمپاژ بتن متخلخل با مقاومت بالا تا حدی برطرف شود. استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب با ترکیب تک محصول ، ترکیب هوا و هوا توصیه نمی شود زیرا ضروری است که قوام ، انسجام و محتوای هوا همه به طور مستقل کنترل شوند.

یک اثر فشار پمپ بر روی حباب هوا ، فشرده سازی حباب ها است. انرژی مورد استفاده در فشرده سازی هوا منجر به افت سریع گرادیان فشار می شود و طول ها و ارتفاعاتی را که ممکن است بتن پمپ شود محدود می کند. بتن های با محتوای هوای بالا به ویژه مستعد فشرده سازی حباب هوا هستند که ، در پمپاژ عمودی ، می تواند باعث انسداد در پمپ متحرک شود.

دیده می شود که حباب های هوا محدودیت هایی را در قابلیت پمپاژ ایجاد می کند. در مواردی که بتن باید در فواصل طولانی یا از ارتفاع زیادی پمپاژ شود ، می توان از پمپاژ مرحله ای که بتن از یک ماشین به ماشین دیگر پمپاژ می شود استفاده کرد.

بتن متخلخل هنگام پمپاژ می تواند حجم قابل توجهی از هوا را از دست بدهد در استانداردهای فعلی BS 5328 ، انجام مناسب تصحیح و تلفات این برآورد برای کامل آزمایشات که است آن مستلزم موضوع این-BS 206 1 ، شود تا بتن هنگام خروج از خط لوله و ورود به کار ، دارای محتوای هوای معدنی مشخص باشد. نمونه گیری برای آزمایش انطباق باید از نظر فنی در این مکان انجام شود ، اگرچه ممکن است با توافق های قراردادی ، بتن هنگام خروج از وسیله حمل و نقل و ورود به پمپ ، نمونه برداری شود.

## هوای محبوس شده در بتن

وقتی یک بتن ریخته می شود ، حباب های بزرگ هوا همیشه پس از لرزش در بتن می مانند. این حباب های بزرگ شکلی نامنظم دارند و به طور نامنظم در بتن سخت شده توزیع می شوند که از آن به عنوان "هوای محبوس شده" یاد می شود. معمولا، یک بتن که با دقت ارتعاش شده است ممکن است 1 تا 2 درصد از هوا به دام افتاده باشد .حجم هوای محبوس شده به ویسکوزیته خمیر سیمان هیدراته ، اندازه سنگدانه درشت ، نوع بتن ، شدت لرزش و مدت زمان آن بستگی دارد. هر یک از این حبابهای محصور شده نقطه ضعفی ایجاد می کند که خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده را کاهش می دهد.

برای بدست آوردن شبکه ای از حباب های هوا بسیار ریز و پراکنده در ملات بتن ، استفاده از ماده حباب ساز هوا ضروری است. عبارت "عامل جذب کننده هوا" ممکن است گیج کننده باشد زیرا این نوع مواد افزودنی حبابهای کوچک کروی هوا را به خودی خود جذب نمی کند. بلکه حباب های هوا را که در طی مخلوط شدن در بتن ریخته می شوند ، تثبیت می کند. این نوع مواد افزودنی را باید "تثبیت کننده هوا" نامید.

این مواد افزودنی در سطح حبابهای هوا متمرکز شده و در آنجا یک فیلم نازک به اندازه کافی قوی ایجاد می کند تا حبابها را به شکل کره ثابت کند. این حباب ها به اندازه کافی قوی هستند که در هنگام مخلوط شدن در برابر تخریب مقاومت می کنند و به هم نمی پیوندند و حباب های درشت تری ایجاد نمی کنند.

بنابراین ، افزودن یک عامل هواساز هوا باعث تثبیت هوای محبوس حین مخلوط شدن به شکل میلیون ها حباب

کوچک هوا با قطر متوسط بین 10 تا 100 میکرومتر می شود که دامنه قطر ذرات سیمان معرفی شده در بتن است.
به منظور بهبود مقاومت بتن در برابر چرخه های انجماد و ذوب ، معمولاً لازم است 60-50 لیتر از این حباب های ظریف را ایجاد کنید. با این حال ، آنچه از اهمیت فوق العاده برخوردار است این است که این حباب ها به طور همگن در داخل بتن پراکنده شوند. این پراکندگی با مشخص شدن فاکتور فاصله حباب ها مشخص می شود. بدیهی است که یک سوراخ بزرگ 60-50 لیتری پر از هوا در مرکز 1 متر 3 بتن هیچ تاثیری در مقاومت این بلوک در برابر چرخه های انجماد و ذوب نخواهد داشت.

## آزمایشات بتن تازه

آزمایشاتی که معمولاً روی بتن متخلخل تازه انجام می شود ، محتوای کل هوا را اندازه گیری می کند. روش فشار ، توصیف شده در C231 ASTM ، به طور گسترده ای استفاده می شود و براساس قانون بویل است. فرض بر این است که ترکیبات جامد موجود در بتن و آب تازه غیرقابل انعطاف هستند به طوری که تغییر حجم تحت فشار به دلیل انقباض حفره های هوا است. تغییر حجم و اختلاف فشار مستقیماً به محتوای هوا در دو طرح مربوط می شود ، که به ترتیب نوع A و نوع B توصیف می شود. رویکرد دیگر ، روش حجمی ، مانند آنچه در C173 ASTM شرح داده شده است ، از دستگاهی استفاده می کند که به شما اجازه می دهد ضمن نظارت بر حجم هوای جابجا شده ، جای خالی هوا را در بتن هم زده جایگزین کند. تکنیک سوم ، روش گرانشی، شرح داده شده در C138 ASTM ، تفاوت بین وزن واقعی و نظری واحد را برای تخمین حجم نشان داده شده توسط هوا مقایسه می کند.
مشخصات به طور معمول مقدار متوسط هدف متخلخل را که باید به عنوان درصدی از بتن مورد استفاده قرار گیرد تعریف می کند و بنابراین این روش های آزمایش کافی هستند. با این حال ، نیاز در سرویس این است که مقدار معینی از هوا به عنوان درصدی از خمیر سیمان ، به درستی از طریق هزاران حباب توزیع شود مطابق با محدودیت های قطر و فاصله بنابراین آزمایش محتوای هوا به عنوان یک کنترل کیفیت مفید است اما هیچ نشانه ای از توزیع محتوای هوا ارائه نمی دهد.

نیاز به یک روش آزمایشی که بهتر با نیازهای عملکردی مرتبط باشد ، منجر به ایجاد روشی جایگزین شد که بتواند محتوای هوا ، فاکتور فاصله و سطح خاص را در مدت زمان کوتاهی اندازه گیری کند. اصل آزمایش این است که میزان بالا آمدن حباب هوا در آب به اندازه آن مربوط است. روش آزمون ، گزارش شده توسط پرایس 1996 ، از توانایی نظارت بر تغییر شناوری صفحه پشتیبانی شده توسط مایع و حباب های هوا بهره می برد. این آزمایش شامل تزریق نمونه ای از بتن تازه به مایع چسبناک در پایه یک ستون آب است. هوای داخل حرکتی حباب آزاد می شود و از طریق ستون بالا می رود و در آنجا به صفحه برخورد می کند. تغییر شناوری صفحه با گذشت زمان کنترل می شود. تغییر شناور می تواند به محتوای هوا ، سطح خاص و عامل فاصله مربوط باشد.
تحقیقات نشان داده است که مقاومت در برابر یخ زدگی و ذوب شدن به هوای محبوس موجود در حباب های کوچک در فاصله نزدیک بستگی دارد و برخی استانداردها محدودیت هایی برای این پارامترها دارند. برخی دیگر از استانداردها به مواد افزودنی هواگیر نیاز دارند تا معیارهای مشخصی را برای تأمین پارامترهای خالی هوا مناسب داشته باشند. سپس عملکرد در بتن به شرط انطباق مواد افزودنی با این الزامات ، کافی فرض می شود. استانداردها به طور کلی محدودیت هایی در بتن دارند ترکیب ، مانند حداکثر نسبت آب سیمان آزاد و حداقل کلاس مقاومت ، علاوه بر هواساز هوا. تحقیقات نشان داده است که همه انواع سیمان در برابر حمله یخ زدگی و ذوب و رسوب زدایی از یخ زدگی عملکرد یکسانی ندارند ، بنابراین استانداردها ممکن است محدودیت هایی در ترکیب سیمان داشته باشند ( ACI 318-02).

## چگونه می توان بتن متخلخل ساخت؟

مواد زیر برای ساخت بتن استفاده می شود :

1. سیمان حباب هواساز

2. عوامل حباب هواساز

## سیمان حباب هواساز

سیمان پرتلند حباب هواساز یکی از انواع خاص سیمان است که حباب های هوا را در سیمان یا بتن ایجاد می کند.

## عوامل حباب هواساز

عوامل یا مواد حباب ساز هوا شامل موارد زیر :

- پودر آلومینیوم
- پودر روی
- آب اکسیژنه
- کاهش عوامل کشش سطح
- رزین های چوب طبیعی
- چربی های حیوانی
- عامل خیس کردن
- صابون های محلول در آب از اسیدهای خاص

تمام مواد ذکر شده در بالا با مواد دیگر بتن مخلوط می شوند و به عنوان ماده کف کننده عمل می کنند. به دلیل کاهش کشش سطحی آب ، کف پایدار ریز حباب های ریز در بتن هوا را ایجاد می کند .

- با استفاده از عوامل پراکنده سیمان
- نمکهای لیگنو سولفات کلسیم

## مزایای بتن متخلخل

- درجاریزی و کارایی
- دوام سیکل یخ - ذوب
- مقاومت در برابر یخ زدایی
- مقاومت در برابر سولفات
- استحکام - قدرت
- مقاومت در برابر سایش

**1. کارایی**

در صورت بهبود کارایی بتن متخلخل ، نیاز به آب و ماسه خصوصاً در مخلوط های بتن را کاهش دهید

**2. یخ زدگی و دوام**

در فرآیند انجماد ، آب در حال انبساط است و فشار کافی را در بتن ایجاد می کند. حباب های هوا به عنوان مخزن در بتن کار می کنند تا از بتن در برابر آب انبساطی محافظت کرده و از آسیب موجود در بتن محافظت کنند.

**3. مقاومت در برابر یخ زدایی**

**بتن متخلخل بیشتر در مواردی استفاده می شود که بتن در تماس با مواد شیمیایی ضد یخ زدگی باشد زیرا هوای محبوس از پوسته پوسته شدن ناشی از استفاده از مواد شیمیایی یخ زدایی برای برف و یخ زدایی جلوگیری می کند.**

**4. مقاومت در برابر سولفات**

**اگر بتن با نسبت C / W کم ساخته شود ، سیمان با محتوای آلومینات کلسیم برای مقاومت در برابر حمله سولفات مفید است. هوای داخلی برای مقاومت در برابر حمله سولفات در بتن بسیار مفید است.**

**5. قدرت**

فضاهای خالی به عنوان حجم کل آب به علاوه هوا تعریف می شود. اگر محتوای هوا در بتن ثابت بماند ، مقاومت با نسبت c / w برعکس تغییر می کند. اگر محتوای هوا افزایش یابد ، به طور کلی می توانیم با کمک ثابت بودن حفره ها به نسبت سیمان ، قدرت معینی را حفظ کنیم.

**6. مقاومت در برابر سایش**

مقاومت در برابر سایش در بتن متخلخل همان مقاومت فشاری بتن غیر متخلخل است. اگر مقاومت در برابر سایش افزایش یابد ، مقاومت فشاری نیز افزایش می یابد.

## اثر حباب هواساز بر مقاومت بتن

اصلی ترین چیزی که تحت تأثیر بتن متخلخل قرار می گیرد ، کارایی و مقاومت فشاری بتن است اگر کارایی بتن در حال افزایش است ، مقاومت فشاری به طور خودکار کاهش می یابد زیرا کارایی و مقاومت فشاری همیشه با یکدیگر متناسب هستند.

1. اثر حباب هواساز بر مقاومت فشاری بتن

2. اثرات حباب هواساز بر مقاومت خمشی بتن

مخلوط حباب ساز هوا که معمولاً برای افزایش کارایی بتن بدون تأثیر زیاد بر مقاومت بتن ، وارد می شود. اگر از مخلوط حباب ساز هوا به مقدار زیاد یا استفاده کنیم ، مقاومت فشاری بتن کاهش می یابد. عوامل مشترکی که در کاهش مقاومت بتن تأثیر می گذارد ، نسبت مخلوط ، نوع بتن و درجه بندی بتن ، نوع سیمان و ماده حفره ای است.مقاومت بتن با استفاده از مواد افزودنی حبابساز هوا از 3 تا 7 درصد متغیر است . تغییر این 3 تا 7٪ در طراحی مخلوط بتن در نظر گرفته شده است بنابراین مقاومت فشاری مورد نظر با مقدار لازم

مواد مخلوط و کارایی حاصل می شود.قبل از انجام آزمایشات ، طرح های مخلوط آزمایشی انجام می شوند و تغییرات دقیق مقاومت را با استفاده از مواد افزودنی پیدا می کنند و سپس اصلاحات مناسب در طرح مخلوط انجام می شود. به طور کلی فرض بر این است که از دست دادن 5٪ مقاومت فشاری بتن به دلیل هر 1٪ حجم هوای فرورفته در مخلوط بتن اتفاق می افتد.
برای تخمین نسبت آب و سیمان مورد نیاز برای یک بتن متخلخل که باعث کاهش مقاومت می شود ، در طراحی مخلوط گنجانیده شده و مقاومت متوسط هدف بالا را فرض می کند مقاومت متوسط هدف بالا برای مخلوط هوا تعریف می شود

= fc + m / (1-0.055a)

جایی که،

= f مقاومت مشخصه

= m حاشیه اطمینان

٪= a درصد هوا

کاهش مقاومت خمشی بتن در اثر هواساز هوا عموماً مانند مقاومت فشاری تعیین نمی شود. از این گزارش ، اگر محتوای هوا در بتن 4٪ باشد ، حداکثر مقاومت خمشی بدست می آید.از هر دو مورد نتیجه می گیرد که مقاومت فشاری و خمشی طرح مخلوط بتن با این شرط افزایش می یابد که حداکثر کاهش آب در نظر گرفته شود و حداکثر اندازه دانه کوچک به کار رود.

## ماله کشی بتن متخلخل

ماله کاری سخت فرایندی است که طی آن یک فینیشر با استفاده از ماله استیل سطح بتن را متراکم می کند. این پایان اختیاری است و یک سطح سخت و صاف تولید می کند. پاسهای مکرر ماله شده استیل منجر به پرداخت صیقلی می شود که ظاهری آینه مانند دارد. سطوح ماله سخت برای اسلبهای بتونی خارجی توصیه نمی شود ، زیرا در صورت خیس بودن سطح صاف آن لغزنده می شود.

ماله سخت به دلایل مختلف نیز برای بتن متخلخل توصیه نمی شود. دلیل اصلی تراکم است. تراکم هوا را از سطح خارج می کند و منجر به کاهش محتوای هوا می شود. این امر احتمال آسیب درانجماد و ذوب را افزایش می دهد. علاوه بر این ، متراکم شدن هوا می تواند هوا را به سمت پایین سوق داده و منجر به یک خلا بزرگ در زیر ملات سطح شود. این باعث لایه لایه سازی می شود و ممکن است قسمت قابل توجهی از محل ریختن را پوشش دهد. پس از باز شدن سطح ، از طریق پوسته پوسته شدن یا لایه لایه سازی ، سطح متراکم حاصل از ماله سخت از بین می رود.
برش و پرداخت بخشی از بتن برای نشان دادن فضاهای خالی توزیع شده. انجام می شود وحفره هایی که بدین ترتیب در معرض دید قرار می گیرند سپس با مواد فلورسنت پر شده و زیر نور ماورا بنفش پس از تعیین توزیع اندازه و تعداد از آنها عکس گرفته می شود.حفره هایی که روی عکس ظاهر می شوند ، با استفاده از روش مقایسه خصوصیات معادلاتی که با استفاده از روش های آمار ریاضی برای تعیین خصوصیات واقعی استفاده می شود ، اندازه گیری می شوند