سیستم‌های دال تخت – حفره‌دار (طراحی، خدمت پذیری، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و روش اجرا)- قسمت اول، کلیات

چکیده:

سیستم‌های دال تخت حفره‌دار سال‌های متمادی است که در اروپا و نقاط دیگری از دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها به دلیل برخی مزیت‌های ذاتی در ایالات متحده نیز کاربرد رو به رشدی دارند. از جمله امتیازات این سیستم می‌توان به کاهش وزن – که موجب نیروی لرزه‌ای کمتر و بارهای افزوده بیشتری برای یک دهانه مفروض می‌شود؛ امکان اقتصادی اجرای دهانه‌های بلندتر؛ کمتر شدن ارتفاع بین طبقات؛ سرعت بخشیدن به زمان‌بندی ساخت و مقاومت خوب در برابر آتش‌سوزی طبق الزامات آیین‌نامه IBC اشاره کرد. در این مقاله به این موارد اشاره می‌شود: ۱. تاریخچه و مطالعات اخیر در مورد سیستم‌های دال تخت حفره‌دار، ۲. الزامات طرح برشی و خمشی، ۳. الزامات خیز یا تغییر شکل، ۴. الزامات ارتعاش برای راحتی ساکنین و ابزارهای حساس، ۵. الزامات حریق مطابق آیین‌نامه IBC ۶. ترتیب معمول در اجرا. این مقاله نشان می‌دهد که این دسته سیستم‌های سازه‌ای را می‌توان با استفاده از ضوابط ACI برای مقاومت و خدمت پذیری طراحی و حداقل الزامات مربوط به کنترل ارتعاش و مقاومت در برابر حریق را نیز تأمین کرد. در قسمت دوم این مقاله، یک مثال موردی به کمک نرم‌افزار بررسی خواهد شد.

کلمات کلیدی: بتن، مقاومت در برابر آتش‌سوزی، بتن مسلح، سیستم‌های کف بتن مسلح، دال بتن مسلح، دال دوطرفه، ارتعاش، دال‌های حفره‌دار.

مقدمه:

در طول سالیان گذشته انواع مختلفی از سیستم‌های دال حفره‌دار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این دسته می‌توان به سیستم‌های یک‌طرفه sonotube و دال‌های مجوف (وافل) اجرا شده با استفاده از قالب‌های گنبدی شکل اشاره کرد. مطالعات مختلفی روی سیستم‌های حفره‌دار انجام شده است که خلاصه‌ای از آن‌ها در ادامه آمده است.

Pama و همکاران (۱۹۷۵) یک مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی برای بررسی صلبیت الاستیک دال با حفره‌های کروی در جهت طولی انجام دادند. این مطالعه نشان داد مطابقت خوبی بین مطالعات آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی به دست آمده از نظریه مکانیک صفحات ارتوتروپیک در مورد خیز دال‌ها، برآیند تنش‌ها و سختی خمشی وجود دارد.

Valivonis و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای برای بررسی تنش‌های ایجاد شده روی قالب‌های حفره‌ای حین فرایند ساخت انجام دادند. در این مطالعه طراحی این قالب‌ها به لحاظ بارهای ساخت تشریح شده است. در این مقاله علاوه بر بررسی تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده هنگام ساخت به مراحل نصب قالب‌ها، مسلح سازی و بتن‌ریزی نیز اشاره شده است.

Lai (۲۰۱۰) به تحلیل و بررسی سیستم‌های دال BubbleDeck در یک پل عرشه‌ای عابر پیاده پرداخت. چندین عرشه پل در برنامه SAP2000 مدل‌سازی و با سیستم‌های دال توپر مقایسه شد. Lai نتیجه گرفت که دهانه ناپیوسته با تکیه‌گاه‌های ساده به دلیل عملکرد یک‌طرفه عرشه گزینه بهینه‌ای نیست. Lai یادآوری می‌شود که سیستم BubbleDeck برای این نوع پل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد ولی مناسب بودن آن برای پل‌های دیگر نیازمند مطالعه و بررسی است.

Teja و همکارانش (۲۰۱۲) تحلیل اجزا محدود یک سیستم دال BubbleDeck را با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 انجام دادند و نتایج دال حفره‌دار را با دال توپر مقایسه کردند. این مطالعه نشان داد که تنش‌های خمشی، خیز و مقاومت برشی این نوع دال‌ها به میزان جزئی ۵ تا ۷ درصد با سیستم‌های دال توپر متفاوت است. میزان کاهش وزن دال نیز در حدود ۳۵ درصد است.

Shetkar و Hanche (۲۰۱۵) مطالعه‌ای بر روی مشخصات و امتیازات سیستم‌های دال BubbleDeck انجام دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که سیستم BubbleDeck ظرفیت برشی و خمشی بهبود یافته‌تری در مقایسه با دال‌های توپر دارد در حالی که میزان میلگرد و بتن استفاده شده در آن‌ها تقریباً فقط ۷۰ درصد دال‌های توپر است. از مزایای این سیستم‌ها می‌توان به صرفه‌جویی در مصرف مصالح، دهانه‌های بلندتر یا امکان بارگذاری‌های سنگین‌تر، ساخت و ساز سریع‌تر و وجود سیستمی سازگار با محیط‌زیست اشاره کرد.

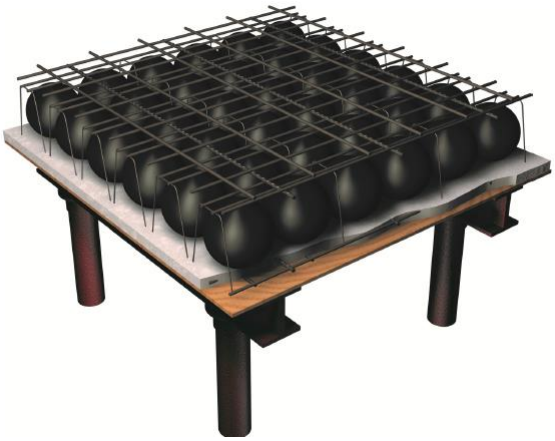
Churakov (۲۰۱۴) به توضیح انواع مختلف تکنولوژی‌های دال‌های توخالی که در ۱۵ سال گذشته توسعه داده شده‌اند پرداخت. در این مقاله، مقاومت، سختی و مزایای ساخت و ساز سیستم‌های دال توخالی از قبیل AirDeck, BubbleDeck, Cobiax و U-boot شرح داده شده است.

بررسی روند تکامل سیستم‌های دال تخت حفره‌دار را می‌توان در راهنمای طراحی CRSI (a۲۰۱۴) یافت. این مقاله روی سیستم‌های معاصر پیشرو در این زمینه که توسط Cobiax و BubbleDeck پشتیبانی می‌شود، تمرکز دارد. در این سیستم‌ها از توپ‌های پلاستیکی استفاده می‌شود. این توپ‌ها ساخته شده از پلی‌اتیلن بازیافت شده با چگالی بالا (HDPE) هستند و به‌صورت منظم در ضخامت دال بتنی توزیع می‌شوند. به این ادوات عموماً قالب توخالی گفته می‌شود (شکل ۱).

(a) (b)

شکل ۱. قالب‌های توخالی. (a) سیستم BubbleDeck (b) Cobiax

قالب‌های توخالی عمدتاً کروی یا بیضی شکل هستند. این توپ‌ها در قفسه‌هایی که توسط مفتول‌ها نگهداری می‌شوند قرار داده شده‌اند تا شبکه‌ای مدولار ایجاد نمایند (قفسه‌های مدولار). این قفسه‌ها بین لایه‌های میلگرد گذاری شده بالا و پایین دال بتنی محکم می‌شوند (شکل ۲). این توپ‌ها در نواحی که بر اساس دیدگاه مهندسی دقیق به بتن نیازی نیست و وجود آن‌ها مقاومت خمشی و مسیر انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها را دچار اختلال نمی‌کند قرار داده می‌شوند. هنگامی که لایه بالایی بتن دال روی قفسه‌ها ریخته شد، یک سیستم دال دوطرفه باضخامت یکنواخت ایجاد می‌شود. مراحل اجمالی ساخت و ساز برای هر دو حالت پیش ساخته (شکل ۱ a) و بتن در جا (شکل ۱ b) در بخش "ترتیب اجرا" این مقاله آمده است.



شکل ۲. سیستم دال تخت حفره‌دار

یکی از مزایای اصلی سیستم‌های دال حفره‌دار کاهش کلی بار مرده سیستم دال است. وزن یک دال با قالب‌های توخالی به میزان قابل‌توجهی از وزن دال توپر باضخامت یکسان کمتر است. بسته به نوع قالب توخالی، کاهش وزن مرده سیستم دال می‌تواند تا حدود ۳۵ درصد برسد. این موضوع به این معناست که بارهای سنگین‌تری را می‌توان روی دهانه با طول یکسان با سایر سیستم‌های دوطرفه اعمال کرد، یا برای بارهای یکسان دهانه بلندتری را پوشش داد.

کاهش بار مرده سازه تأثیر مستقیمی بر طراحی ستون‌ها، دیوارهای باربر و فونداسیون دارد. علاوه بر این، بر نیروهای حاصل از زمین‌لرزه و طراحی المان‌های مقاوم لرزه‌ای نیز مؤثر هستند.

سیستم‌های دال تخت حفره‌دار مطابق الزامات ACI 318 مشابه سیستم‌های دال دوطرفه دیگر طراحی و میلگرد گذاری می‌شوند. ضروری است یادآوری شود که قالب‌های توخالی نقشی در مقاومت اسمی خمشی یا برشی دال ندارند و تنها نقش آن‌ها ایجاد حفره در دال است. در بخش‌های "الزامات مقاومتی" و "الزامات خدمت پذیری" این مقاله، خلاصه‌ای از الزامات مرتبط و قابل اعمال به این سیستم‌ها آمده است. در بخش "الزامات خدمت پذیری" بحثی درباره ارتعاش بیان شده است. الزامات مقاومت در برابر حریق نیز در بخش دیگر مورد بحث قرار گرفته است.

الزامات مقاومتی

الزامات مقاومت خمشی

سیستم‌های دال تخت حفره‌دار مشابه دال‌های دوطرفه توپر برای خمشی طراحی می‌شوند. مطابق معمول، دال به نوارهای ستونی و نوارهای میانی تقسیم می‌شود. در هر مقطع از نوارهای ستونی و میانی، باید الزامات بخش ACI 18.5 مربوط به مقاومت خمشی تأمین گردد. به عبارت دیگر لازم است مقاومت خمشی اسمی مقاطع بحرانی، M_n از مقاومت خمشی مورد نیاز، M_u بیشتر باشد.

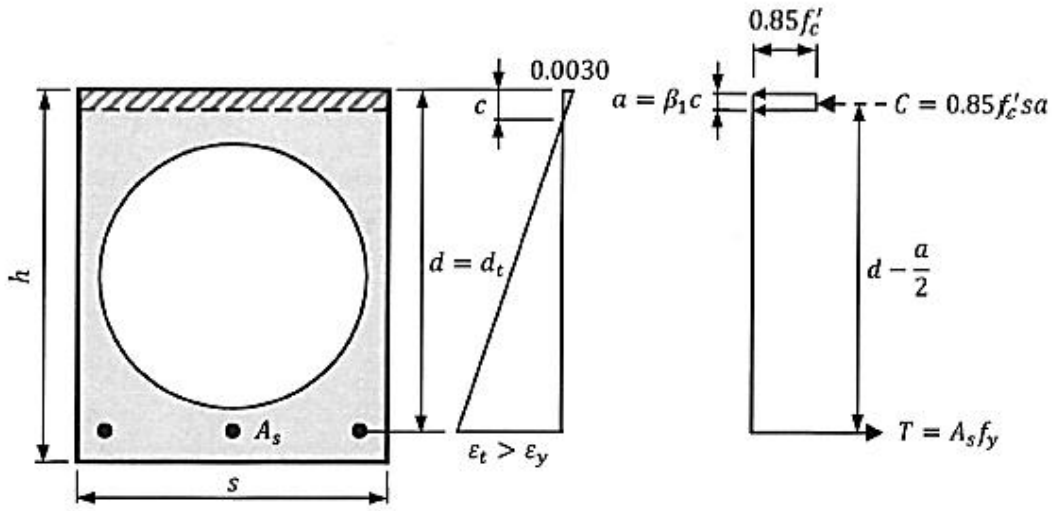
ضریب کاهش مقاومت، $\emptyset$، برای مقاطع کنترل شده کششی برابر ۰,۹ می‌باشد. برای مقاطع کنترل شده کششی، کرنش در مرکز دورترین لایه میلگردهای کششی، ε_t، بزرگ‌تر یا مساوی با ۰,۰۰۵ است. مشابه هر سیستم دال دوطرفه برای رسیدن به حداکثر کارایی، دال‌های تخت حفره‌دار نیز باید به‌صورت کنترل شده به لحاظ کشش طراحی شوند.

مقاومت خمشی اسمی مقطع M_n، با استفاده از فرضیات تعادل و سازگاری کرنش بیان شده در ACI 22.2.1-22.2.3 محاسبه می‌شود. در شکل ۳ توزیع تنش و کرنش‌ها در مقطع یک دال بتنی حفره‌دار برای محاسبه ظرفیت خمشی مثبت نشان داده شده است. توضیحی که در ادامه آمده است در مورد محاسبه میلگردهای منفی نیز برقرار است.

تحت بارهای طراحی برای کاربری‌های معمول ساختمانی، عمق بلوک فشاری، a، در محدوده توپر دال بین لبه فشاری دال و قالب‌های توخالی قرار می‌گیرد. این موضوع با توجه مطالعات متعدد آزمایشگاهی با استفاده از ضخامت‌های مختلف دال و انواع مختلف قالب‌های توخالی تائید می‌شود. بنابراین، همچنان از معادله زیر می‌توان برای محاسبات خمشی استفاده کرد:

$$M_n = A_s f_y (d - \frac{a}{2})$$

که $a = A_s f_y / (0.85 f'_c s)$ و s فاصله مرکز به مرکز قالب‌های توخالی است.



شکل ۳. توزیع تنش و کرنش در دال تخت حفره‌دار

مقاومت خمشی مورد نیاز، M_u با استفاده از ترکیبات بارگذاری جدول ACI 5.3.1 محاسبه می‌شود. میزان مورد نیاز میلگردهای خمشی در هر مقطع از قرار دادن $M_u = \emptyset M_n$ و حل معادله حاصل برای A_s به دست می‌آید. حداقل میلگرد خمشی نیز مطابق جدول ACI 8.6.1.1 محاسبه می‌شود؛ به‌عنوان نمونه برای Grade 420 این میزان $A_{s,min} = .0018hs$ می‌باشد. h ضخامت دال و s فاصله میلگردهای طولی است.

کاهش بار مرده ناشی از سیستم سازه‌ای

وزن خود سیستم دال تخت حفره‌دار که قسمتی از کل بار مرده‌ای است که باید طبق ترکیبات بارگذاری جدول ACI 5.3.1 برای محاسبه مقاومت خمشی مورد نیاز، M_u استفاده شود، متناسب با حجم قالب‌های توخالی است. میزان کاهش بار مرده را می‌توان از مدارک سازنده با توجه به ضخامت دال و حجم قالب‌های توخالی تهیه کرد. میزان کاهش وزن خود دال برابر با وزن دال توپر با فرض وجود نداشتن قالب‌های توخالی منهای وزن دال باوجود قالب‌های توخالی است.

وزن دال باوجود قالب‌های توخالی برابر است با حجم بتن در مترمربع ضربدر وزن واحد بتن. حجم بتن با کم کردن حجم بتن جابجا شده در مترمربع کل ضخامت دال به دست می‌آید [این حجم بتن جابجا شده برابر است با حجم یک توپ ضربدر تعداد قالب‌های توخالی در مترمکعب].

به‌طور متوسط، مساحت خالص قالب‌های توخالی با در نظر گرفتن هر دو قسمت توخالی و توپر (ناحیه توپر در نواحی با برش زیاد مثل دور ستون‌ها و لبه دال استفاده می‌شود) در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد قرار دارد. با توجه به اینکه مساحت نواحی توپر در هنگام طراحی اولیه مشخص نمی‌باشد، توصیه می‌شود که مساحت متوسط فضاهای خالی ۷۰ درصد در نظر گرفته شود. نیاز است کاهش وزن مرده دال تخت حفره‌دار به نحو مناسبی در برنامه‌های تجاری طراحی دال که بر اساس ضخامت کامل دال کار می‌کنند، اعمال می‌شود. برای دال‌های تخت حفره‌دار باید یک حالت بارگذاری (الگوی بارگذاری) اضافی در نظر گرفته شود: یک‌بار گسترده یکنواخت به میزان ۷۰ درصد کاهش وزن توخالی به‌کل سطح دال در جهت مخالف بارهای ثقلی اعمال می‌شود تا این کاهش وزن مرده به‌حساب آید.

کاهش سختی خمشی

علاوه بر ضریب کاهش بار مرده ضروری است هنگام استفاده از نرم‌افزارهای تجاری ضریب کاهش سختی نیز در طرح سیستم دال‌های تخت حفره‌دار اعمال شود. بسته به نرم‌افزار، این ضریب را می‌توان به مدول الاستیسیته بتن E_c اعمال کرد یا سختی کلی دال را با این ضریب اصلاح نمود. توضیحات تکمیلی راجع به بحث سختی در قسمت "خیز (تغییر شکل)" بیان شده است.

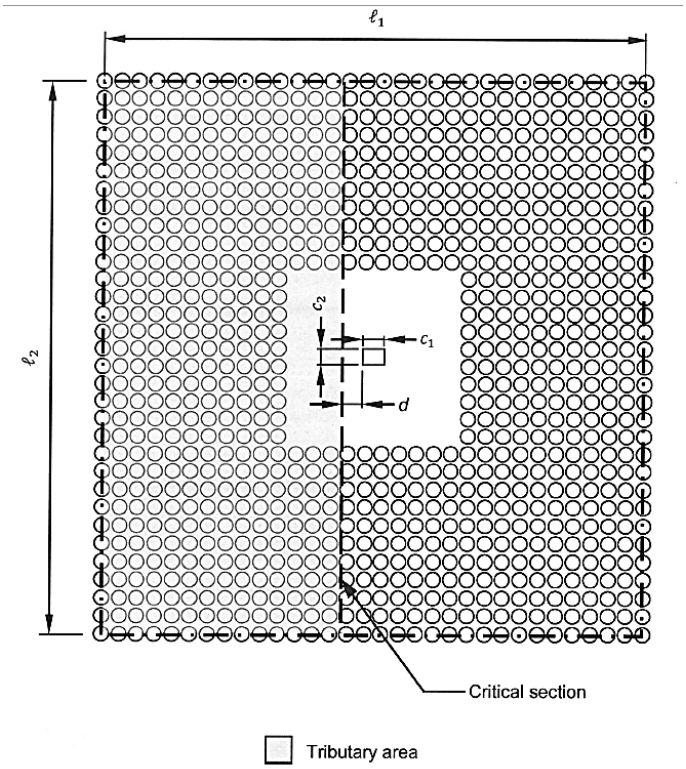
پس از اینکه مساحت میلگردهای موردنیاز خمشی در مقاطع بحرانی نوارهای ستونی و میانی محاسبه شدند، سایز میلگردها انتخاب می‌شود. حداقل و حداکثر فاصله میلگردها باید الزامات بخش 25.2، بخش ACI 8.7.2.2 را تأمین نماید. علاوه بر این، تمام میلگردها باید مطابق ACI 8.7.4 مهار و وصله شوند.

الزامات مقاومت برشی

ضروری است که هم برش یک‌طرفه و هم برش دوطرفه در دال‌های تخت حفره‌دار کنترل شوند. برای برش یک‌طرفه، باید معادله زیر در مقاطع بحرانی برقرار باشد. مقطع بحرانی در فاصله d از بر تکیه‌گاه در نظر گرفته می‌شود [شکل ۴ و ACI 22.5]:

$$V_u \leq \emptyset V_c \rightarrow \emptyset V_c = \emptyset \times 0.17 \lambda f_{sr} \sqrt{f'_c} l_2 d$$

که $\emptyset = 0.75$ و l_2 عرض مقطع بحرانی می‌باشد (که از مرکز به مرکز ستون‌ها اندازه‌گیری می‌شود). ضریب f_{sr} که در ACI 318 بیان نشده، ضریب کاهشی برشی است که از مدارک سازنده سیستم به دست می‌آید. این ضریب مقاومت برشی را به‌واسطه وجود حفره‌ها اصلاح می‌کند. بسته به نوع قالب توخالی، f_{sr}، در محدوده 0.5-0.6 قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، معمولاً یک مقطع توپر اطراف ستون‌ها وجود دارد. با توجه شکل واضح است که مقطع بحرانی برای برش یک‌طرفه از قسمت توپر و البته بیشتر از قسمت قالب‌های توخالی عبور می‌کند. ضریب f_{sr} با فرض عدم وجود مقطع توپر در اطراف ستون اعمال می‌شود. البته وزن قسمت توپر هنگام محاسبه نیروی برشی مورد نیاز V_u در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است جز در مورد دال‌های نسبتاً باریک و دراز، معمولاً برش یک‌طرفه بحرانی نمی‌باشد ولی با این وجود، کنترل آن جهت اطمینان از تجاوز نکردن از مقاومت برشی لازم است.



شکل ۴. مقطع بحرانی برای برش یک‌طرفه

معمولاً برش دوطرفه یا منگنه‌ای در این دال‌ها بحرانی است. در دال‌هایی که با آرماتورهای برشی مسلح نشده‌اند، تنش‌های برشی حاصل از نیروهای برشی مستقیم و لنگر خمشی نامتعادل به‌وسیله مقطع بتن دور ستون تحمل می‌شود. مطابق با ACI 22.6.4 مقطع بحرانی برای برش منگنه‌ای، به نحوی در نظر گرفته می‌شود که محیط آن، b_0، حداقل باشد ولی لازم نیست که فاصله آن از لبه یا گوشه ستون‌ها، بار متمرکز، نواحی عکس‌العملی و تغییر در مقطع دال از $d/2$ کمتر باشد. مقطع بحرانی با لبه‌های مستقیم برای ستون‌های مستطیلی یا مربعی مجاز است[ACI 22.6.4.1.1].

مقطع بحرانی برای دال‌های تخت حفره‌دار در شکل ۵ نشان داده شده است. الزامات برش یک‌طرفه باید برای مقطعی بحرانی که در فاصله d/2 از وجه ستون و d/2 از لبه قسمت توپر دال پیرامون ستون قرار دارد، کنترل شود.

در مقطع بحرانی قرار گرفته در فاصله d/2 از بر ستون، قسمت توپر دال قرار دارد. در این فاصله معادلات زیر باید برقرار باشند [ACI 22.6.5.2]:

$$v_u \le \emptyset v_c$$

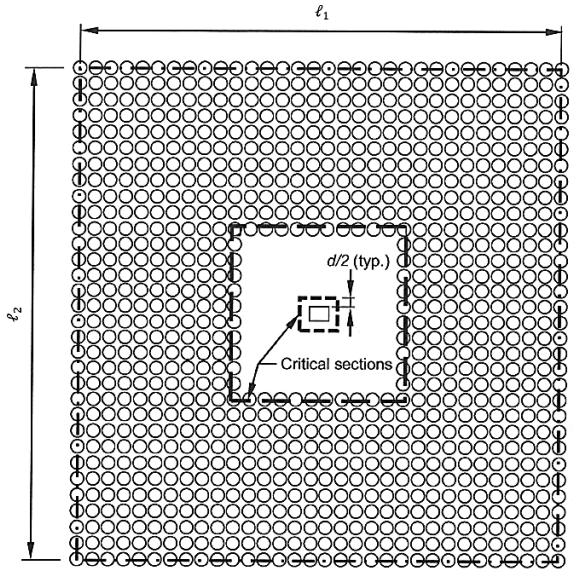
$$= \min \begin{cases} \emptyset 0.33\lambda\sqrt{f'_c} \\ \emptyset 0.17(1+\frac{2}{\beta})\lambda\sqrt{f'_c} \\ \emptyset 0.083(2+\frac{\alpha_s d}{b_0})\lambda\sqrt{f'_c} \end{cases}$$

که

β، نسبت ضلع بزرگ‌تر به ضلع کوچک‌تر ستون،

b_0، محیط مقطع بحرانی و

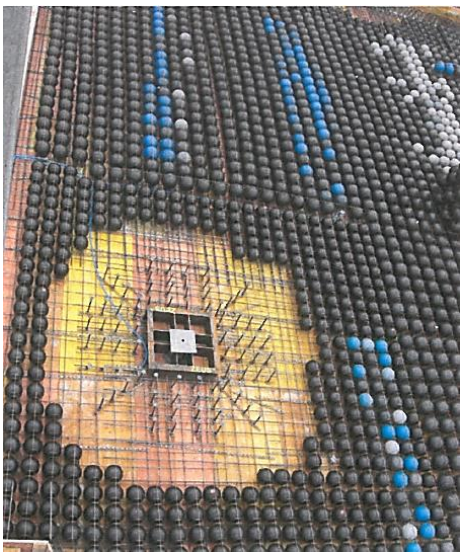
α_s، برای مقطع بحرانی با چهار ضلع برابر ۴۰؛ سه ضلع برابر ۳۰ و دو ضلع برابر ۲۰ می‌باشد.



شکل ۵. مقاطع بحرانی برای برش دوطرفه

در مقطع بحرانی قرار گرفته در فاصله d/2 از لبه قسمت توپر پیرامون ستون، مقاومت برشی طراحی، $\emptyset v_c$، باید در ضریب کاهش برشی f_{sr} (به نحوی که در موضوع برش یک‌طرفه شرح داده شد) ضرب شود؛ بنابراین، مساحت قسمت توپر باید به حد کافی بزرگ باشد تا مقاومت برشی لازم در حضور قالب‌های توخالی در مقطع بحرانی تأمین گردد.

ثابت شده است که استفاده از مسلح کننده‌های برشی نظیر گل‌میخ‌های برشی روشی مؤثر و اقتصادی در افزایش مقاومت برشی در طراحی دال‌های دوطرفه بدون افزایش ضخامت کلی دال و یا افزایش ابعاد ستون تکیه‌گاهی است (شکل ۶). Aci 22.6.6.1 ضوابط مربوط به دال‌های دوطرفه با مسلح کننده‌های برشی، شامل گل‌میخ‌های برشی که می‌توانند در دال‌های تخت حفره‌دار هم استفاده شوند را مشخص کرده است.



شکل ۶. قالب‌های توخالی در محدوده ستون‌ها حذف شده‌اند

ضوابط خدمت پذیری

خیز (تغییر شکل)

برخلاف سایر سیستم‌های دال دوطرفه، ضوابط تجربی خدمت پذیری برای سیستم‌های دال تخت حفره‌دار در بخش ACI 8.3.1 آیین‌نامه بیان نشده است. با توجه به اینکه سیستم‌های حفره‌دار مشابه تیرچه‌های دوطرفه و دال‌های دوطرفه هستند، ضخامت کلی اولیه را می‌توان با رابطه $l_n/36$ تخمین زد. در این رابطه، l_n، طول دهانه آزاد در جهت بلندتر پانل است که از بر تا بر تکیه‌گاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود (aci 8.3.1.1 در مورد حداقل ضخامت دال‌های دوطرفه بدون تیر داخلی یا دراپ پانل را ببینید).

توصیه شده است که به‌جای استفاده از این ضخامت تخمینی، محاسبات خیز مطابق ACI 24.2 برای به دست آوردن یک ضخامت مناسب برای دال انجام شود. برای محاسبه خیز آنی، ضروری است اثرات ترک‌خوردگی و میلگردهای موجود در دال روی سختی در نظر گرفته شود. سختی، تابعی از مدول الاستیسیته بتن است. E_c مطابق ACI 19.2.2 محاسبه می‌شود و ممان اینرسی مؤثر I_e را می‌توان با استفاده از ACI 24.2.3.1 محاسبه کرد.

برای مقاطع کم آرماتور، مثل دال‌های دوطرفه رابطه ACI 24.2.3.5a تخمین دست بالایی از سختی ارائه می‌دهد. در این حالت بهتر است از معادله I_e که توسط Scanlon و Bischoff (۲۰۰۸) ارائه شده استفاده شود. ممان اینرسی مؤثر I_e تابعی از لنگر ترک‌خوردگی M_{cr} است که خود تابعی از f_r می‌باشد. $f_r = 0.62\lambda\sqrt{f'_c}$ به دست می‌آید که λ ضریب اصلاح مربوط به خواص مکانیکی کاهش یافته بتن سبک نسبت به بتن معمولی با مقاومت فشاری مشخصه یکسان است. Scanlon و Bischoff (۲۰۰۸) استفاده از رابطه $f_r = 0.42\lambda\sqrt{f'_c}$ و کمیته Aci 435 نیز استفاده از رابطه $f_r = 0.40\lambda\sqrt{f'_c}$ را در محاسبات خیز دال‌های دوطرفه پیشنهاد کرده‌اند تا اثرات مربوط به نقش گیرداری ناشی از افت بتن در ترک‌خوردگی دال لحاظ شود.

برای سیستم‌های دال بتنی تخت حفره‌دار، I_e را می‌توان با اضافه کردن میانگین I_e نوارهای ستونی در یک جهت به میانگین I_e نوارهای میانی در جهت عمود بر آن تخمین زد. میانگین I_e نوارهای میانی یا ستونی برای به‌حساب آوردن نواحی لنگر مثبت و منفی نوارها محاسبه می‌شود. رابطه زیر را می‌توان برای یک ممان اینرسی مؤثر میانگین در مورد پانل‌هایی که در هر دو انتها پیوسته هستند بکار برد:

$$average\ I_e = 0.7I_m + 0.15(I_{e1} + I_{e2})$$

که در مقطع میانی نوار طراحی، $I_m = I_e$ و دو مقطع انتهایی پانل $I_{e1} = I_{e2} = I_e$ است.

برای سیستم‌های پانل مستطیلی I_e مربوط به یک پانل را می‌توان با گرفتن میانگین مقادیر I_e نوارهای ستونی cs و نوارهای میانی ms در هر دو جهت x و y تقریب زد:

$$I_{e,panel} = 0.5\left[\left(I_{e,cs,x} + I_{e,ms,y}\right) + \left(I_{e,cs,y} + I_{e,ms,x}\right)\right]$$

ضروری است یادآوری شود که باید I_e دال‌های تخت حفره‌دار را با ضریب اصلاح سختی که برای در نظر گرفتن اثرات وجود حفره در دال استفاده می‌شود، کاهش داد. این ضریب توسط سازنده انواع مختلف قالب‌های توخالی معین می‌شود. مقدار تقریبی آن ۰٫۹ می‌باشد.

خیز محاسبه شده باید کمتر یا مساوی مقادیر حداکثر بیان شده در جدول ACI 24.2.2 باشد. به این ترتیب، یک مقدار حداقل ضخامت بر اساس محاسبات خیز آنی و با فرض کردن یک قالب توخالی مشخص و کاور بالا و پایین بیان شده در مدارک سازنده به دست می‌آید. تنش دوطرفه نیز باید در مقاطع بحرانی در این مرحله از طراحی کنترل شود (به بخش ضوابط مقاومت برشی

این مقاله مراجعه نمایید)؛ اگر تصمیم بر این است که از میلگرد گذاری برای برش دوطرفه استفاده نشود، در صورتی که تنش‌های برشی ضریب دار از مقادیر مجاز بیشتر باشد، ضخامت کلی دال یا ابعاد ستون تکیه‌گاهی باید افزایش داده شود.

محاسبات خیز وابسته به زمان را می‌توان مطابق ACI 24.2.4.1 و بر اساس ضخامت به دست آمده برای خیز آنی محاسبه کرد.

ارتعاش

در نظر گرفتن ارتعاش در ساختمان یکی از جنبه‌های مهم طراحی به شمار می‌رود. ارتعاش گاهی تنها باعث عدم آسایش مختصری می‌شود و گاهی می‌تواند مشکلات مهمی ایجاد نماید، بخصوص وقتی فعالیت روزانه ساکنین، کارایی دستگاه‌های حساس یا عملکردهای حیاتی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد.

یکی از مشخصه‌های اساسی ارتعاش هر سیستم کف، فرکانس طبیعی است. فرکانس طبیعی اندازه‌ای از چگونگی پاسخ یک سیستم کف به منابعی است که باعث ارتعاش می‌شود و به‌طور مستقیم به اینکه چطور ساکنین این ارتعاش را حس می‌کنند، در ارتباط است. بسیاری از برنامه‌های تجاری می‌توانند فرکانس طبیعی و سایر مشخصه‌های مرتبط با ارتعاش را با تحلیل المان محدود محاسبه نمایند. روش‌های ساده‌ای نیز برای محاسبه فرکانس طبیعی سیستم‌های کف بتنی و از جمله دال‌های تخت حفره‌دار توسعه داده شده است که می‌توان آن‌ها را در CRSI (2014b) یافت.

ارتعاش سیستم‌های کف ناشی از منابع مختلفی است. برخی از این منابع در جدول ۱ آورده شده‌اند. منابعی که داخل ساختمان هستند یا به آن متصل هستند تحت عنوان منابع داخلی طبقه‌بندی می‌شوند و آن‌هایی که جزو این دسته نیستند به منابع خارجی تعبیر می‌شوند. مواردی که در جدول آمده فهرستی کوتاه از منابعی هستند که معمولاً در طرح ارتعاشی سیستم‌های کف مؤثر می‌باشند.

محدوده فرکانسی مربوط به این ارتعاشات گسترده است و معمولاً یک سیستم کف مفروض به‌خوبی در این محدوده کلی قرار می‌گیرد؛ بنابراین، ممکن است تأثیرات ارتعاشی هر یک از منابع در طرح کلی خدمت پذیری سیستم کف در نظر گرفته شود. توضیحی که در ادامه خواهد آمد بر تأثیرات ارتعاشی منابع داخلی روی سیستم‌های دال تخت حفره‌دار متمرکز است.

جدول ۱. منابع ارتعاش در ساختمان‌ها

منبع	توضیح
داخلی	راه رفتن ساکنین روی کف ساکنین در حرکات ریتمیک مشارکت می‌کنند. حرکاتی مثل رقص، آئروبیک و سایر اشکال ورزشی با یا بدون تجهیزات ورزشی مثل تردمیل آسانسور و تجهیزات انتقال تأسیسات سرمایشی و گرمایشی تجهیزات دوار مکانیکی نصب شده روی کف یا بام ترافیک اتومبیل‌ها در ترازهای پارکینگ داخل ساختمان
خارجی	منابع مرتبط با آمد و رفت مثل خیابان‌های نزدیک، قطارها و راه‌های زیرزمینی فعالیت‌های ساخت و ساز مجاور فعالیت‌های صنعتی مجاور

معیارهای پذیرش برای آسایش انسان

گرچه معیارهای مختلفی در طول سال‌ها برای آسایش انسان در ارتباط با ارتعاش پیشنهاد شده است اما تا امروز توافقی جامع روی این معیارها در ارتباط با راه رفتن یا تمرینات ریتمیک به وجود نیامده است. محدوده شتاب‌های مجاز برای آسایش انسان که در اثر ارتعاش ناشی از فعالیت‌های مشخص ایجاد می‌شوند، توسط iso 1989 پیشنهاد شده است. این پیشنهادها در وضعیت‌های مختلف به‌خوبی پیاده‌سازی شده‌اند. محدوده مجاز برای کاربری‌های مختلف، به‌صورت شتاب‌های RMS و به‌صورت مضربی از یک منحنی پایه داده نشان شده است. شتاب‌های حداکثر بر اساس این ضرایب در شکل ۷ نشان داده شده است.

معیارهای پذیرش برای تجهیزات حساس

حدود مجاز ارتعاش برای تجهیزات حساس (به‌عنوان نمونه، میکروسکپ‌های الکترونی یا تجهیزات تولید مرتبط با میکروالکترونیک) یا وقتی فعالیتی حساس انجام می‌شود (مثل جراحی چشم یا جراحی مغز و اعصاب) بسیار سخت‌گیرانه است. هنگامی که نتوان چنین تجهیزات یا اقداماتی را روی کف یا فونداسیونی که مستقیماً با زمین در ارتباط است، انجام داد یا نتوان کف را از بقیه سازه جداسازی کرد باید سیستم کف را مطابق با این حدود ارتعاشی و به‌صورت سخت‌گیرانه طراحی کرد، به نحوی که ابزار دقیق یا عملیات حساس مطابق روند پیش‌بینی شده عمل نمایند.

تولید کنندگان تجهیزات حساس معمولاً معیارهای پذیرش ارتعاشی را تهیه می‌کنند که این معیارها معمولاً به‌صورت محدود کردن سرعت‌های ارتعاشی ارائه می‌شوند. وقتی چنان معیارهایی در دسترس نباشند، یا نوع دقیق ابزار حساس مشخص نباشد می‌توان از معیارهای عمومی‌تری در طرح اولیه استفاده کرد (CRSI 2014b).

کنترل ارتعاش

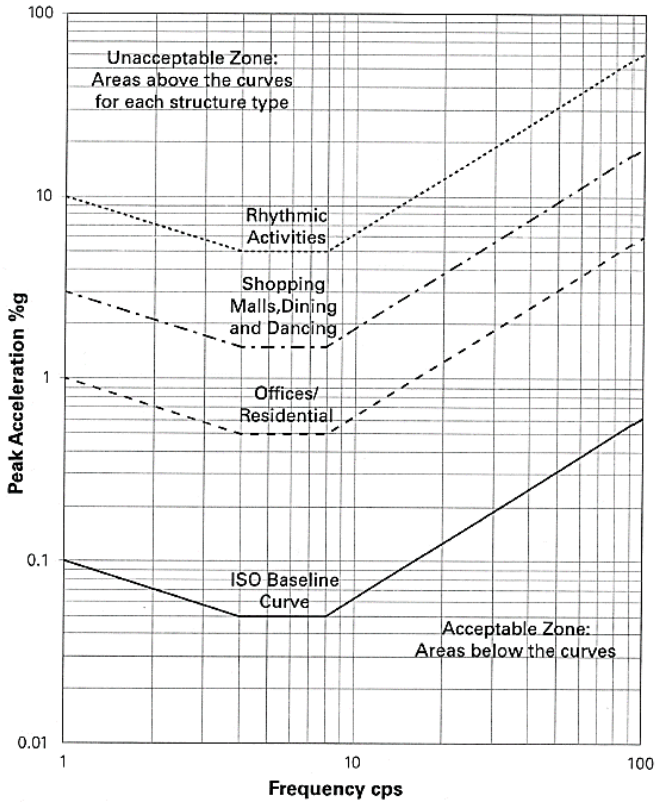
سیستم‌های دال تخت حفره‌دار مستقیماً با فرکانس سیستم کف در ارتباط هستند. شکل ۹ حداقل ضخامت دال (که معیارهای پذیرش انواع مختلف حرکات ریتمیک را تأمین کند) را به‌صورت تابعی از طول دهانه بیان کرده است. همان فرضیات بار و مصالح در شکل ۸ برای تحریکات ناشی از راه رفتن در تحلیل استفاده شده است. برای ورزش‌های توأم با پرش و آئروبیک (که سخت‌گیرانه‌ترین معیارهای پذیرش را دارد)، حداکثر دهانه ۱۰,۷ باضخامت دال تخت حفره‌دار برابر با ۵۵۰ میلی‌متر می‌باشد.

در رابطه با کنترل ارتعاش مربوط به تجهیزات حساس، حداکثر سرعت مورد انتظار ناشی از ارتعاشات راه رفتن روی کف، با معکوس سختی سیستم کف ارتباط دارد؛ بنابراین، برای تأمین معیار پذیرش ابزار حساس، سیستم کف باید بسیار صلب باشد. در شکل ۱۰ حداقل ضخامت مورد نیاز برای تأمین معیار پذیرش به‌صورت تابعی از طول دهانه و آهنگ گام‌ها با روشی مشابه شکل ۸ و ۹ ارائه شده است. نتایج مربوط به حداکثر سرعت، ۲۰۰، ۲۵ و ۶ میکرومتر بر ثانیه هستند. این سرعت‌ها به ترتیب با الزامات سیستم‌های کامپیوتری و اقامتی؛ ریز جراحی، جراحی چشم و اعصاب؛ میکروسکوپ‌های الکترونی با بزرگنمایی بیش از ۳۰۰۰۰ برابر تطابق دارند. همان‌طور که انتظار می‌رود، یک دال ضخیم‌تر برای تأمین معیار پذیرش آهنگ سریع‌تر گام‌ها مورد نیاز است. در حالاتی که ضخامتی برای یک آهنگ خاص گام‌ها و طول دهانه ارائه نشده باشد، سیستم دال تخت حفره‌دار قادر به تأمین معیار پذیرش نخواهد بود. در این حالات باید از سیستم‌های بتنی سخت‌تری نظیر تیرچه‌های دوطرفه استفاده کرد.

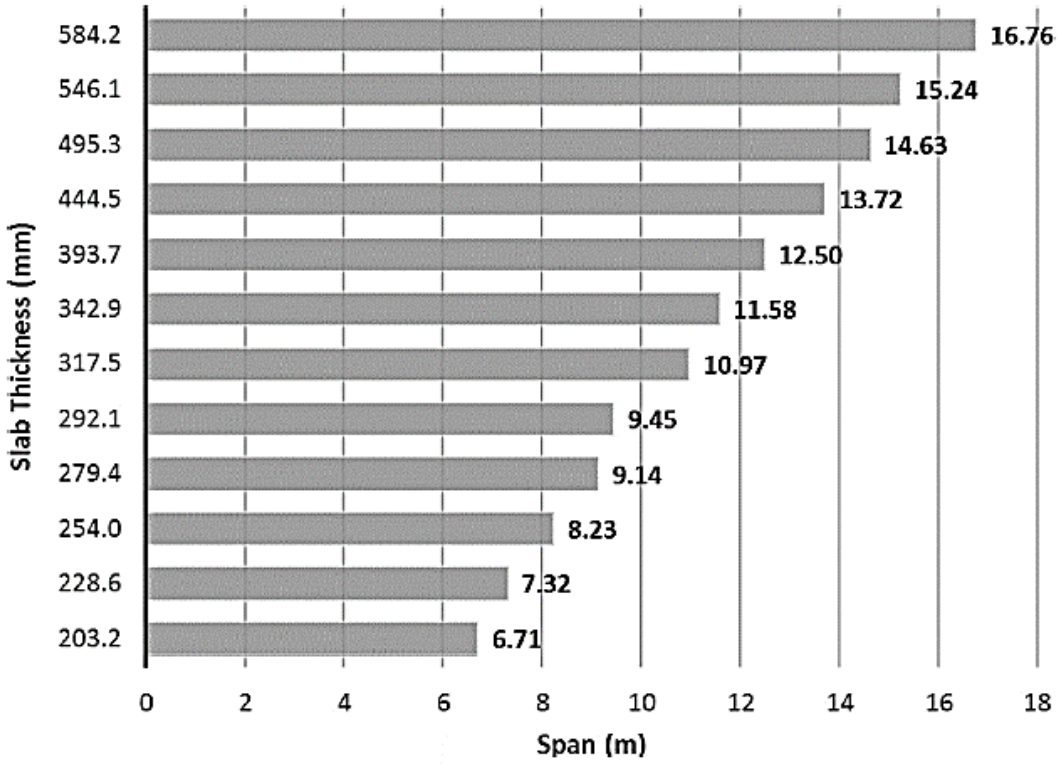
الزامات مربوط به آتش‌سوزی

بتن و فولاد قابل اشتعال نیستند؛ بنابراین هنگامی که در معرض آتش یا حرارت قرار بگیرند مشتعل نمی‌شوند یا نمی‌سوزند. از آنجا که سیستم‌های بتن مسلح ذاتاً در برابر آتش‌سوزی مقاوم هستند، به تمهیدات اضافی برای محافظت در برابر رده‌بندی‌های معمول و حداقل آتش بیان شده در آیین‌نامه‌های ساختمانی احتیاجی نیست (تمهیدات اضافی معمولاً در تجهیزات و سیستم‌هایی که شامل بتن مسلح نیستند لازم است).

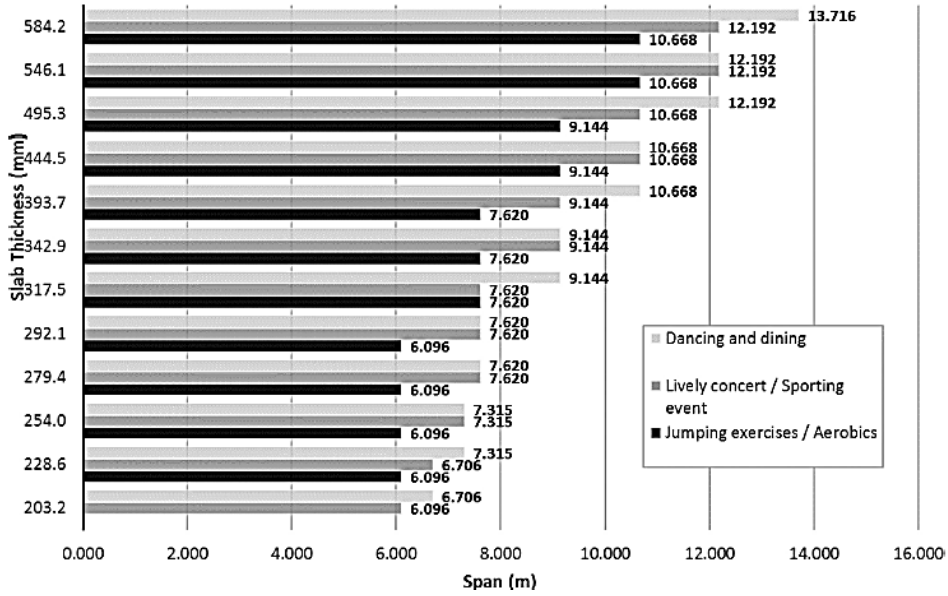
این مشخصه ذاتی خطر آتش‌سوزی را کاهش داده و نیاز به نگهداری آتی ساختمان را به حداقل می‌رساند.



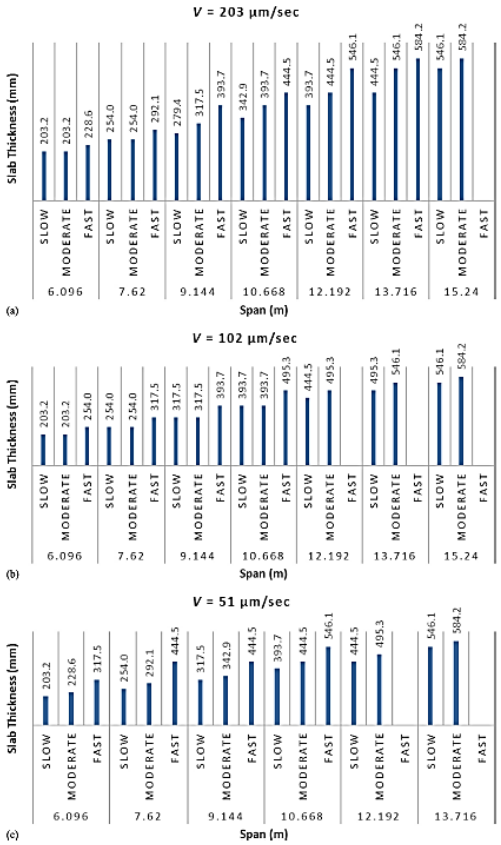
شکل ۷. شتاب حداکثر توصیه شده برای آسایش انسان. (1 cps = 1 Hz)



شکل ۸. حداقل ضخامت دال تخت حفره‌دار که معیار پذیرش مربوط به راه رفتن را تأمین می‌کند.



شکل ۹. حداقل ضخامت دال تخت حفره‌دار که معیار پذیرش مربوط به حرکات ریتمیک را تأمین می‌کند.



شکل ۱۰. حداقل ضخامت سیستم‌های دال بتنی حفره‌دار که معیارهای پذیرش تجهیزات حساس را تأمین می‌کنند. (a) حداکثر سرعت ۲۰۳ میکرومتر بر ثانیه. (b) حداکثر سرعت ۱۰۲ میکرومتر بر ثانیه (c) حداکثر سرعت ۵۱ میکرومتر بر ثانیه

عموماً رده بندی مقاومت در برابر آتش (که به ریتینگ آتش هم مشهور است) دوره زمانی است (برحسب ساعت بیان می‌شود) که یک المان ساختمانی، قسمت یا تجهیزات؛ توانایی مهار آتش را دارد و یا می‌تواند عملکرد سازه‌ای خود را ادامه دهد. رده بندی آتش با آزمایش یا با روش‌های بیان شده در بخش ۷۰۳,۳ از آیین‌نامه IBC مشخص می‌شود.

آزمون‌های مقاومت در برابر آتش‌سوزی انجام شده روی سیستم‌های دال تخت حفره‌دار

آزمایش‌های متعددی روی BubbleDeck و Cobiax مطابق ضوابط DIN 4102-02 (DIN 1977) انجام شده است. منحنی دما-زمان که برای تست نمونه‌ها طبق استاندارد DIN استفاده می‌شود با ISO 834(ISO 1999) یکسان است. کلیه آزمایش‌های انجام شده روی سیستم‌های دال حفره‌دار نشان می‌دهد که پوشش بتن روی میلگردها مجاور با آتش کنترل‌کننده مقاوم در برابر حریق هستند. حفره‌ها به‌صورت یک جداگر حرارتی عمل می‌کنند؛ به این ترتیب حرارت ناشی از آتش زیر حفره‌ها به دام می‌افتد. این موضوع باعث می‌شود حرارت میلگردهای لایه پایین حفره‌ها کمی بالاتر باشد. پوشش بتنی حدود ۲۰ میلی‌متری روی میلگردهای خمشی اصلی منجر به تاب‌آوری ۲ ساعته در برابر آتش‌سوزی می‌شود.

قالب‌های توخالی پس از آزمایش آسیبی ندیدند. حرارت داخلی آن‌ها زیر نقطه ذوب مصالح HDPE باقی می‌ماند. این مقدار تقریباً بین ۹۳ تا ۱۴۹ درجه سانتی‌گراد است.

با توجه به یافته‌های این آزمایش‌ها، واضح است که پوشش میلگردها در آتش‌سوزی، تعیین کننده میزان مقاومت دال تخت حفره‌دار در برابر آتش است. یک پوشش ۲۰ میلی‌متری روی میلگردهای پایین حداقل مقاومتی ۲ ساعته را موجب می‌شود که با الزامات فعلی در کاربری‌های معمولی تطابق دارد.

ترتیب اجرا

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، هر دو شکل سیستم دال تخت حفره‌دار پیش ساخته و با بتن درجا مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای به دست آوردن درک بهتر از روش اجرای میدانی این سیستم‌ها، به ترتیب اجرای هر دو روش تشریح می‌شود.

روند معمول برای دال‌های بتن درجا به این صورت است:

۱. قالب‌ها برپا می‌شوند و میلگردهای موردنیاز لایه پایین اجرا می‌شوند.
۲. قفسه مدول‌ها که شامل قالب‌های توخالی است نصب و به بالای میلگردهای لایه پایین محکم می‌شود.
۳. میلگردهای بالایی نصب و به قفسه‌ها محکم می‌شوند.
۴. نخستین لایه بتن ریخته می‌شود به نحوی که میلگردهای لایه پایین و قسمت پایین قفسه‌ها را پوشش دهد. این لایه بتن، قفسه‌ها را مهار می‌کند و از حرکت رو به بالای آن‌ها ناشی از نیروی شناوری لایه بعدی بتن‌ریزی، جلوگیری خواهد کرد.
۵. لایه دوم بتن ریخته می‌شود. این لایه تمام ضخامت دال را پوشش می‌دهد.

در سیستم پیش ساخته، یک لایه بتن پیش ساخته جایگزین قالب‌بندی افقی روش بتن درجا می‌شود. مراحل نصب این سیستم به قرار زیر است:

۱. قفسه با میلگردهای سازه‌ای بالا و پایین به‌صورت پانل‌های پیش ساخته ۷۵ میلی‌متری تهیه می‌شود.
۲. پانل‌ها بافاصله مرکز به مرکز ۲,۱ متری از هم روی پایه‌ها قرار می‌گیرند.
۳. در سایت، یک لایه برای رسیدن به ضخامت موردنظر بتن‌ریزی می‌شود.

در روند اجرای معمول در محل ستون‌ها، از قالب‌های توخالی استفاده نمی‌شود و از دال توپر برای تأمین مقاومت برشی لازم استفاده می‌شود. هرگاه به مقاومت برشی بیشتری احتیاج باشد از مسلح سازهای برشی مشابه گل‌میخ‌ها یا خاموت‌های برشی استفاده می‌شود.

Sonotube: نوعی قالب توخالی بتنی است که برای ایجاد حفره در کف‌های بتنی، دال‌های سقف، عرشه پل‌ها و... استفاده می‌شود برای اطلاع بیشتر به این سایت مراجعه نمایید.

خیز (تغییر شکل): برای تغییر شکل‌های قائم دال یا تیرها واژه افت نیز بکار می‌رود هرچند به دلیل تشابه با ترجمه رایج shrinkage و همچنین مصطلح نبودن بین مهندسین در اینجا از همان واژه معمول خیز استفاده شده است.

مترجم: عبدالمهدی عباسی