سازه چگونه می‌تواند به کمک معماری بیاید.

۱. مقدمه

Mamoru Kawaguchi

از آنجا که با پیشرفت‌های موجود در زمینه فناوری‌های ساخت و همچنین ابداع انواع سازه‌های جدید مباحث مربوط به ساختمان بیش از پیش پیچیده و تخصصی می‌شوند می‌توان پیش‌بینی نمود که در قرن حاضر و آینده نه چندان دور نقش مهندسین سازه در فعالیت‌های مربوط به ساخت و ساز نسبت به آنچه تا به حال بوده است، اهمیت بیشتری خواهد یافت. چرا که هر چه پیش می‌رویم درک رفتار اکثر این سازه‌ها برای معماران مشکل و مشکل‌تر می‌شود. بنابراین، مهندسین سازه در دوره جدید باید به گونه‌ای آموزش داده شود که توانایی ترکیب و در کنار هم قرار دادن دانش‌های مختلف را که هر کدام به یک رشته مهندسی مربوط می‌شود بدست آورند. همچنین باید قادر باشد معمار را در مسیر درک مفهومی دانش‌ها و فناوری‌های جدید هرچه بیشتر یاری دهد. آنچه در ادامه آمده است در حقیقت ارائه یک پیشنهاد و راهکار در جهت نیل به اهداف فوق‌الذکر می‌باشد.

در اینجان من کوشیده‌ام تا تلاش‌های خود را برای اراتقاء ارزش‌های طراحی در پروژه‌هایی که به نوعی در آنها دخیل بوده‌ام به تصویر بکشم. در تنظیم مطالب این دفترچه من سعی کرده‌ام تعدادی از کارهایم را انتخاب و براساس سختی مصالح مورد استفاده در آنها مرتب کنم. یعنی از سخت‌ترین مصالح (سنگ) شروع کرده و به انعطاف‌پذیرترین آنها (پارچه غیرپیش‌تنیده) برسم.

۲. یک پل عابر پیاده ساخته شده از سنگ طبیعی

نخستین نمونه که به معرفی آن می‌پردازم یک پل عابر پیادهٔ کوچک است که چند سال پیش برای شهر Deppu، در Kyushu طراحی کردم. هنگامی که شهردار Deppll نزد من آمد و از من خواست که در یک نقطه بسیار زیبای شهر، پلی را طراحی کنم، سه چیز را به عنوان انتظارات طراحی مطرح کرد که یکی از آنها منحصر به فرد بودن آن بود. او گفت که نمی‌خواهد این طرح نمونهٔ مشابهی در نقطهٔ دیگری از جهان داشته باشد خواسته دیگر او، استفاده از ایدهٔ پل‌های معلق بود، چرا که خود او علاقه زیادی به این نوع پل داشت. خواسته سوم این بود که طراحی پل موردنظر به طور خاص با شهر تناسب داشته باشد.

از میان این سه خواسته پاسخگویی به خواسته اول بسیار آسان می‌نمود چرا که به نظرم، من تقریباً همه پل‌های معروف دنیا را می‌شناختم و فکر می‌کردم می‌توانم به راحتی یک پل منحصر به فرد برای شهر طراحی کنم.

رسیدن به خواسته دوم نیز چندان کار سختی نبود چرا که ادغام ایده پل معلق با طرح موردنظر می‌توانست به اشکال گوناگونی انجام شود و حتی لازم نبود که طرح به طور واضح تصویری معمول از یک پل معلق باشد. ولی رسیدن به خواسته سوم بسیار مشکل بود چرا که شهر Beppu یک شهر شاخص نیست این شهر به خاطر داشتن چشمه‌های آب گرم معروف است و این تنها مشخصه بارز شهر است. بنابراین یافتن یک ویژگی خاص این شهر که بتوان آن را در طراحی پل به خدمت گرفت

چندان آسان نبود. من چندین بار از شهر بازدید کردم، یک بار شاهد نوسازی یک مسیر پیاده بودم که برای کف‌سازی آن از بلوک‌های سنگی گرانیت بسیار زیبایی استفاده می‌شد، من تکه‌هایی از سنگ را با خود به آزمایشگاه بردم و مورد آزمایش قرار دادم که سنگ موردنظر ۳ برابر بتن مقاومت داشت. من از مجریان طرح درباره محل استخراج این سنگ‌ها سوال نمودم که گفتند محل استخراج این سنگ‌ها شهری است به نام Yantia در چین که از آنجا سنگ‌هایی با بهترین کیفیت به Beppu وارد می‌شود. بنابراین به ذهن من خطور کرد که اگر از این سنگ در ساخت بخش مهم پل استفاده کنم می‌تواند به عنوان یک پیام دوستی بین دو شهر تلقی شود. من چنین اندیشیدم که این ایده می‌تواند به شکل‌گیری نوعی زندگی که می‌تواند برای شهر مناسب باشد، کمک نماید.

طرح نهایی این پل در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. بخش بالایی پل بتنی نیست بلکه از بلوک‌های سنگ گرانیتِ وارد شده از چین ساخته شده است. برای اعضای پایینی از یک فرم زنجیری همانطور که در شکل می‌بینید استفاده کرده‌ام. و بین هر دو المان یک سری اعضای مشبک قرار داده‌ام که هر کدام از آنها به صورت مستقل از هم و بدون هیچ اتصال جانبی در سازه جای گرفته‌اند. ظاهر پل مطابق با ساعات مختلف روز و جهت تابش نور خورشید تغییر می‌کند. هنگام صبح و عصر اعضای پایینی به وضوح قابل مشاهده‌اند و بنابراین ادراک شما از پل با آنچه واقعاً هست کاملاً مطابقت دارد (شکل ۲) ولی در هنگام ظهر اعضای پایینی در سایه عرشه پل قرار می‌گیرند و بخش بالایی پل بیشتر خودنمایی می‌کند (شکل ۳)

از آنجا که اعضای مشبک پیوسته نیستند، یک ممان خمشی در قسمت بالایی عرشه بر اثر بارگذاری‌های موضعی و تغییر شکل‌ها ایجاد می‌شود، که محاسبات نشان داد بلوک‌های سنگ گرانیت می‌تواند تحت همه شرایط تنش به خوبی از خود مقاومت نشان دهد.

طرح شماتیک ساختمان پل در شکل ۴ نشان داده شده است. ما بلوک‌های سنگی را که ۲۵cm ارتفاع، ۴۰cm عرض و طولشان در نقاط مختلف دهانه متغییر است در کنار هم قرار دادیم و آنها با استفاده از پنج رشته سیمی پیش‌تنیده که از داخل بلوک‌ها عبور می‌کردند تقویت نمودیم. وقتی که تمام اعضاء سنگین بالای پل پیش تنیده شدند، این بخش در حقیقت به نوعی سنگ یکپارچه تبدیل شد. من سعی کردم جان پناه تا حد امکان ساده و زیبا باشد.

در اتصالات اعضای پایینی از تزئینات سرامیکی استفاده کردم (شکل ۵)، که تنها تزئینات استفاده شده در پل است. البته این نوع تزئینات اختراعات شخص من نیست. من از یک شیوه سنتی برای پنهان کردن میخ‌ها استفاده کردم که در گذشته برای پوشانیدن محل تلاقی دو عضو چوبی در ساختمان‌های قدیمی ژاپن استفاده می‌شد.

۳. استفاده از پیوندهای فولادی ریخته شده در سازه فضاکار EXPÓ70

سازه‌های فولادی به عنوان یک سیستم سازه‌ای اندکی از سازه‌های سنگین نرم‌تر و انعطاف‌پذیرترند. البته فولاد در مقایسه با سنگ مصالح سخت‌تری محسوب می‌شود اما از آنجا که ما تنها مقدار کمی فولاد در سازه استفاد می‌کنیم می‌توانیم بگوییم سیستم سازه‌ای فولادی در نهایت از یک سیستم

سنگی نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر است. مثالی که در اینجا آورده‌ایم سقف عظیمی است که برای پوشاندن EXPO70 (شکل ۶)، طراحی کنز و تانگه استفاده شده است. گرچه آن را یک سقف می‌نامم در واقع چیزی فراتر از یک سقف صرف بود ابعاد این سقف در پلان تقریباً ۳۰۰m × ۱۰۰m بود. از ارتفاع ۷/۶ متری سازه سقف به عنوان یک فضای نمایشگاهی دو طبقه که تقریباً ۵۰۰۰ بازدید کنند را در خود جای می‌داد استفاده می‌شد. همان‌طور که در شکل می‌بینیم این سقف بسیار عظیم و بسیار سنگین تنها توسط شش ستون نگهداشته می‌شود. این بدان معنی است که اجزای سازه‌ای یعنی اعضا و اتصالات می‌بایست بارهای بسیار بزرگی را انتقال دهند. برای اتصالات سازه فضاکار ما نوعی از پیونده‌های فولادی ریخته شده را ابداع نمودیم که به صورت مکانیکی به هم متصل می‌شدند (شکل ۷و ۸)

در سازه، ما فراوانی از فولاد ریخته شده، استفاده کردیم. اگرچه این نخستین بار نبود که ما در طرحمان از این نوع مصالح بهره می‌گرفتیم چرا که در استادیوم Yoyogi که در مورد آن در بخش‌های بعدی توضیح داده‌ایم نیز از فولاد ریخته شده برای اولین بار در دنیا به عنوان اجزای اصلی یک سازه بسیار عظیم استفاده کرده بودیم.

اما در این سازه استفاده از فولاد ریخته شده از سادگی و وضوح بیشتری برخوردار است و بنابراین جریان نیروها در سازه سقف EXPO70 ساده‌تر درک می‌شود. پیتر رایس فقید در زندگینامه خود نوشته است: «یک مهندس کسی است که تخیل دارد» و اینکه بازدید او از این ساختمان باعث شده تا برای طراحی مرکز پمپیدو از فولاد ریخته شده استفاده نماید.

نکته بعدی که در این طرح اهمیت خاصی داشت چگونگی ساخت آن بود به نظر من روش ساخت در طراحی سازه‌ای از جایگاه بسیار بسیار مهمی برخوردار است. بعضی از طراحان درباره رفتار سازه تنها پس از کامل شدن آن حساسیت دارند. ولی من فکر می‌کنم روش ساخت یک سازه هم از نظر منطق سازه‌ای و هم از نظر اقتصادی بسیار مهم است. در ساخت این ساختمان ما سعی کردیم از روش Lifting استفاده کنیم. این اولین بار بود که از این روش ساخت در یک سازه با مقیاس کلان استفاده می‌شد. کل سازه سقف در سطح زمین بافته شد. بعد از تکمیل این مرحله سقف توسط جک‌هایی پنوماتیک (غیرهیدرولیکی)، که در امتداد ۶ ستون ساختمان به سمت بالا حرکت می‌کردند بالا کشیده شد (شکل ۹).

۴. روش منطقی برپایی سازه‌های کروی... سیستم Pantadome

از آنجایی که بالا بردن سقف EXPO70 به طور موفقیت‌آمیزی به انجام رسید این مسأله به ذهن من خطور کرد که شاید بتوان نوع دیگری از سازه‌های فضاکار را که مسطح نبوده و فرم کروی دارند، با استفاده از روشی مشابه برپا نمود. اما همان طور که در شکل ۱۰ می‌بینید تا کردن یک سقف کروی به سهولت امکان‌پذیر نیست چرا که چنین سقفی علاوه بر مقاومت در جهت قوس‌ها، در جهت مدارها نیز مقاومت می‌کند و ترکیب این دو باعث می‌شود که گنبد در مقایسه با یک قوس بسیار صلب‌تر و مقاوم‌تر باشد. این خصوصیت گنبد از نظر افزایش صلبیت و مقاومت سازه بسیار ارزشمند است، اما

باعث می‌شود که تا شدن سقف بسیار سخت باشد.

به این منظور من تصمیم گرفتم که همه اعضای یک مدار مشخص را به طور موقت بردارم تا گنبد بتواند در آن نقطه تا شود (شکل ۱۱)

انجام کار سرهم کردن گنبد در ارتفاع پایینی انجام می‌شود که این امر موجب می‌گردد کار ساخت با سهولت ایمنی و قابلیت اعتماد بیشتری انجام گیرد. پس از آنکه همه اعضا برروی شکل تا شده گنبد سرهم شدند سازه با استفاده از جک‌های هیدرولیک با تکیه‌گاه‌های موقت یا با دمیدن هوا به درون آن بالا کشیده می‌شود. وقتی سازه فرم نهایی خود را گرفت اعضایی که به طور موقت کنار گذاشته شده بودند در محل‌های مربوط نصب می‌شوند و سازه کامل می‌شود. اگر شما بخواهید سازه گنبد را در مرحله اول در سطح پاین‌تری سرهم کنید باید دو ردیف از اعضای مداری را برداشته و به این ترتیب امکان تا شدن گنبد می‌باشد که ابعاد آن در پلان ۷۰M× ۱۱۰M است. این ساختمان که در زلزله کوبه بسیار نزدیک به مرکز لرزه قرار داشت هیچ آسیبی ندید. دومین مورد استفاده از این سیستم در استادیوم ملی سنگاپور بود که توسط کنزوتانگه طراحی شده و دارای ابعاد ۱۳۰M× ۲۰۰M می‌باشد. مقطع این ساختمان بیشتر شبیه به یک خط معلق است تا یک گنبد. مورد بعدی استفاده از این سیستم در قصر بازی‌های المپیک Sant Jordi در بارسلونا بوده که برای المپیک سال ۹۲ ساخته شد. این سیستم در سازه‌های دیگری نیز استفاده شد که اسامی آنها در جدول آمده است.

در اینجا می‌خواهیم چند نمونه از سیستم‌های Pantadome را با تفصیل بیشتری شرح دهم. مقطع Santa Jordi در شکل ۱۴ نشان داده شد. ما مفصل‌های را در پایین و بالای ستون‌ها و همچنین نقاط میانی سقف در نظر گرفتیم به این ترتیب در مقطع شش مفصل دیده می‌شود. اگر سازه به صورت مسطح می‌بود طراحی چنین مقطعی امکان‌پذیر نبود، چون بیش از حد ناپایدار می‌شد.

اما از آنجا که سازه مذکور دارای رفتار سه‌بعدی است قرارگیری مفصل‌ها باعث ناپایداری آن نمی‌شود شکل ۱۵ فرایند ساخت سازه را نشان می‌دهد. ایسوزاکی می‌خواست که فرم سقف یک شکل گنبدی کامل را القا نکند بلکه اشاره‌ای به روش ساخت گنبد در فرم نهایی آن مستقر باشد. یعنی شکل نهایی این احساس را بوجود آورد که گنبد هنوز در حال بالا کشیده شدن است.

نماهای بیرونی و داخلی سازه پس از کامل شدن آن در شکل ۱۶و ۱۷ نشان داده شده‌اند. برای تأکید هرچه بیشتر بر روش ساخت ایسوزاکی بخش‌های متحرک سازه را به همان صورت نگاه داشت و از آنها به عنوان نورگیرهای سقفی استفاده نمود.

یک نمونه دیگر از سیستم Pantadome که در اینجا به شرح آن می‌پردازیم «Namihaya Dome» است که برای پوشش سقف یک استخر شنا در ساخته شده است (شکل ۱۸و ۱۹)

این طرح دارای یک پلان بیضوی و ابعاد ۱۱۰m× ۱۲۰m است. دایره عظیمهٔ آن افقی نبوده بلکه به اندازه 5^0 شیب دارد. محور سطح کروی نیز نسبت به جهت عمود 5^0 انحراف دارد. بنابراین پس از پایان کارِ سرهم نمودن گنبد، سقف در امتداد یک خط مایل بالا کشیده شده. به طور معمول بالا کشیدن یک سازه نیمه ساخته شد. در جهت غیر عمود خطرناک است ولی از آنجا که یک

Pantadome فقط می‌توان در یک جهت مشخص آزادانه حرکت کند، در اینجا نیز سازه سقف فقط می‌توانست در جهت محور که 5^0 با خط عمود اختلاف داشت آزادانه حرکت کند. و در جهات دیگر در برابر حرکت مقاومت می‌کرد. مراحل برپایی سازه در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

سقف مذکور می‌توانست بدون هیچ مشکلی در یک جهت غیرعمود بالا کشیده شود و نیازی نبود که ما نگران نیروهای جانبی حین برپایی سازه باشیم. عملاً این گنبد نیروی بسیار بزرگی را، هنگام ساخت، بر اثر وقوع زلزله کوبه متحمل شد ولی هیچ آسیبی ندید. کل این سقف در ۸/۵ ساعت بالا کشید شد.

آخرین مثال از سیستم Pantadome، «Nara Centennial Hall» است که توسط ایوزاکی طراحی شده. در این مورد خاص علاوه بر سقف دیوارها نیز تا شدند پس از پایان کار سرهم نمودن، گنبد بالا کشیده شد.

در طول عملیات بالا کشیدن سازه سقف مطابق با موقعیت آن شکل‌های مختلفی به خود گرفت. شما نمی‌توانید تصور کنید که فضای تالار تا چه حد هنگام بالا کشیده شدن سقف دچار تغییر و تحول می‌شد (شکل ۲۰). در حقیقت فرم ساختمان در هنگام عملیات برپایی بسیار پویاتر از فرم آن پس از کامل شدن بود (شکل ۲۱).

این‌گونه به ذهنم می‌رسد که ساخت چنین سازه‌ای باید بسیار جالب باشد یعنی سازه‌ای که چنین حرکاتی حتی پس از کامل شدن نیز، بتواند در آن رخ دهد. که از لحاظ فناوری فکر نمی‌کنم به مشکل غیرقابل حلی بربخورد. تنها مشکل آن عدم مطابقت با آیین‌نامه‌های ساخت و ساز است.

۵. سازه‌های فولادی انعطاف‌پذیر

در اینجا می‌خواهم دربارهٔ یک سازهٔ فولادی بسیار انعطاف پذیرتر و نرم‌تر یعنی سازه معلق صحبت کنم. استادیوم Yoyogi (شکل ۲۲) برای المپیک توکیو که در سال ۱۹۶۴ برگزار شد طراحی گردید. طراحی معماری این استادیوم توسط Kenzo Tange و Accoc انجام شد و طراحی سازه آن بر عهدهٔ Yoshikatsu tsubbi و موسسه او بود.

من در همین زمان سرپرست مهندسین این موسسه بودم و بنابراین بر طراحی سازه‌ای این ساختمان نظارت داشتم. پیش از آغاز طراحی و محاسبه سازه نیز ما همکاری نزدیکی با گروه معماری داشتیم و مدل‌های اولیه زیادی را با هم ساختیم و من فکر می‌کنم همکاری ما (مهندسین سازه و معماری) در این مرحله، تأثیر بسزایی در افزایش کیفیت طراحی این ساختمان داشت.

شکل ۲۳ نمای داخلی ساختمان را نشان می‌دهد که علاوه بر زیبایی بصری از لحاظ آکوستیکی نیاز عملکرد بسیار مناسبی دارد. سیستم سازه‌ای این ساختمان در شکل ۲۴ نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم بخش مرکزی سازه شباهت زیادی به پل‌های معلق دارد. وقتی ما شروع به طراحی و محاسبه سازه نمودیم، متوجه شدیم، که هیچ تئوری قدرتمندی برای انجام محاسبات سازه سقف در اختیار نداریم. بنابراین مجبور بودیم خودمان معادلات اساسی را برای آن بخش‌هایی از سازه که به صورت شبکه‌ای با مقداری صلبیت خمشی هستند بدینوسیله که به این بخش‌ها، سقف‌های

معلق نیمه صلب می‌گفتیم. برای انجام محاسبات نیز هیچ وسیله‌ای که بتوان آن را کامپیوتر نامید در اختیار نداشتیم و بنابراین از ماشین حساب استفاده کردیم. با این همه توانستیم به یک نتیجه قابل اطمینان با قابلیت اعتماد کافی برای کامل نمودن طراحی سازه‌ای دست یابیم.

مشکل بعدی در طراحی این سازه ارائه طرح جزئیات آن بود. یکی از علل اساسی که کار ما را در طراحی جزئیات مشکل‌تر می‌کرد انعطاف‌پذیری بیش از حد سازه سقف بود. سازه آنقدر انعطاف‌پذیر بود که بخش مرکزی کابل‌های اصلی در طول ساخت به اندازه ۲ متر جابجایی داشت. بنابراین ما مجبور بودیم هر یک از اجزا را به گونه‌ای طراحی کنیم که بتواند این تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های بزرگ را در برگیرد.

برای اتصال بین کابل‌های اصلی و اعضای فلزی معلق ما جزئیاتی را طراحی کردیم که شباهت زیادی به سیاره زحل با حلقه پیرامونی آن دارد (شکل ۲۵ و ۲۶)

گوی مرکزی از فولاد ریخته شده کابل‌های اصلی را نگه می‌دارد و حلقه پیرامونی می‌تواند در اطراف گوی چرخش نماید. این جزئیات طراحی شده برای اتصال از آن جهت که می‌توانست تغییر شکل‌های بزرگ را که در کابل‌های اصلی در حین ساخت رخ می‌داد جذب نماید بسیار مناسب بود. از دیگر مزایای این طرح آن بود که می‌توانست در همه نقاط اتصال بکار رود.

یکی از مشخصه‌های این ساختمان تعبیه یک سیستم میراکننده لرزش‌های ناشی از نیروی باد در آن می‌باشد. از آنجا که سقف بسیار سبک است. هیچ مشکلی از نظر مقاومت در برابر زلزله ندارد اما لازم است که آثار دنیا میکی نیروی باد بر آن به دقت مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور ما آزمایش تونل به در را بر روی مدل سازه اجرا نمودیم و همه محاسبات دنیا میکی لازم را انجام دادیم تا مطمئن شویم که بر اثر وزش باد هیچ خطری ساختمان ما را تهدید نمی‌کند. اما از آنجا که کارفرما می‌خواست ساختمان تا حد ممکن مقاوم باشد تا بتواند در صورت بروز حوادث غیرمترقبه به عنوان یک مکان امن مورد استفاده قرار گیرد، ما تصمیم گرفتیم یک سیستم میراکننده برای جلوگیری از لرزش کابل‌های سقف در آن تعبیه کنیم.

برای انجام محاسبات سیستم میراکننده نیز هیچگونه نرم‌افزار کامپیوتری در اختیار نداشتیم بنابراین سیستم سازه‌ای را تا حد ممکن ساده کرده به صورت یک جرم واحد در نظر گرفتیم. علیرغم شرایط محاسباتی ضعیف ما توانستیم با استفاده از دمپرهای روغنی (oil dampers) به طراحی قابل قبولی برسیم. تا نگه می‌خواست این دمپرها نمود بیرونی داشته باشند بنابراین آنها را به رنگ قرمز درآوردیم و به گونه‌ای تعبیه شدند که از بیرون قابل رویت باشند (شکل ۲۸). در اینجا از اجزاء سازه‌ای به عنوان عناصر معماری استفاده شد. تا آنجا که من می‌دانم این اولین بار بود که یک سیستم damping با سازه تلفیق می‌شد.

۶. سازه‌های نرم ... پوسته‌های غشایی

در اینجا دوباره به ساز فضا کار EXPO '70 می‌پردازیم (شکل ۶).

اما این بار درباره یک سازه بسیار نرم و انعطاف‌پذیر یعنی پوشش سقف سازه فضا کار صحبت خواهم

کرد. سطح بالایی سازه فضا کار از ۲۷۴ شبکه که ابعاد بعضی از آنها به ۱۰m × ۱۰m می‌رسید تشکیل شده بود. بر روی هر کدام از این شبکه‌ها یک پانل پنوماتیک شفاف قرار می‌گرفت و شکل ۲۹ که سطوح بالایی و پایینی آن با لایه نازکی از پلی‌استر که در دو محور گسترش می‌یافت پوشیده شده بود. این غشا بسیار نازک بود و کل ضخامت آن به ۱/۲ mm می‌رسید. در شکل ۳۰ یک مدل واقعی که برای آزمایش ساخته شد نشان داده شده است. ابتدا هیچ‌کس حاضر نبود که بر روی سقف برود، چرا که به نظر شفاف، نازک و خیلی ضعیف به نظر می‌رسید.

ولی وقتی یک نفر جرات کرده و روی سقف رفت و بقیه مقاومت سقف را مشاهده کردند، یکی پس از دیگری به روی سقف رفتند و کار به آنجا رسید که بر روی سقف می‌پریدند و پایکوبی می‌کردند.

حالا، در مورد سازه‌ای به مراتب نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر که از پارچه ساخته شده است صحبت می‌کنیم. همانطور که می‌دانید دو نوع سازه پنوماتیک وجود دارد: یکی سازه متکی بر هوا که فشار هوا در آن در حدود ۱۰MMAq تا ۳۰ و در سازه پر شده از هوا در حدود ۱۰۰MMAq تا ۱۰۰۰ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌کنید فشار مورد نیاز برای سازه‌های پر شده از هوا بسیار بیشتر از سازه‌های متکی بر هواست.

"Fuji pauilion" (شکل ۳۲ و ۳۱) در نمایشگاه جهانی EXPO '70 که طراحی معماری آن توسط "Yutaka marata" انجام شده نمونه‌ای از سازه‌های پر شده از هوا می‌باشد.

این پا ویلیون دارای پلان مدور به قطر ۵۰m می‌باشد و فرم کلی آن دارای هندسه جذاب و ساده‌ای است. طول همه قوس‌ها یکسان است اما فاصله پای قوس با دور شدن از مرکز کاهش می‌یابد. و بنابراین با دور شدن از مرکز ارتفاع قوس‌ها افزایش می‌یابد. این امر باعث شده که شکل نهایی هر چند از یک هندسه ساده گرفته شده بسیار جذاب و منحصر به فرد باشد. فشار هوای محبوس در هر یک از قوس‌ها در حدود ۱۰۰۰mmAq است. موراتا و من یک سازه پنوماتیک جذاب برای "Electic Power Pavilion Annex" در همان نمایشگاه طراحی کردیم (شکل ۳۳ و ۳۴). در آنجا ما سه قوس پر شده از هوا طراحی کردیم که یک سقف غشایی را نگه می‌داشتند. بین دو جداره سقف فضایی وجود داشت که مادر آن فشار منفی ایجاد کردیم. این بدان معناست که فشار هوا در بین دو جدار سقف از فشار هوای داخل و خارج ساختمان که همان فشار اتمسفر می‌باشد کمتر است. در نتیجه دو لایه سقف بر اثر اختلاف فشار به سمت فضای بین دو جداره تقعر می‌یابند و به این ترتیب سقفی ایجاد می‌شود که هیچ تکیه‌گاه سازه‌ای قابل مشاهده‌ای ندارد.

۷ـ سازه‌های پنوماتیک مسلح شده با شبکه فلزی (Mesh)

پوسته سازه‌های پنوماتیک به طور معمول یک نقش دوگانه را ایفا می‌کند: یکی حفظ اختلاف فشار بین فضای داخل و خارج و دیگری مقاومت در برابر تنش‌های ناشی از بارهای خارجی و فشار هوا. برای سازه‌های بزرگ‌تر که پوسته پارچه‌ای برای پوشاندن دهانه از مقاومت کافی برخوردار نیست از کابل برای تقویت آن استفاده می‌شود. در چنین سازه‌هایی پوسته بیشتر نقش هوابند را بازی می‌کند و تحمل کشش سازه‌ای توسط کابل‌ها صورت می‌گیرد. به این ترتیب نوع جدیدی از سازه خلق می‌شود

که در آن دو نقش ذکر شده در ابتدای این مبحث به صورت جداگانه به عهده دو سیستم مختلف گذارده می‌شود ... پوسته به عنوان هوابند و مش، شبکه یا کابل برای مقاومت در برابر کشش.

گنبدهای پنوماتیک مسلح شده با شبکه فلزی که به طور مشترک توسط معما رفقید "Y.Murata" و من ابداع شده‌اند نمونه‌های از چنین سازه‌های پنوماتیکی هستند. پوسته گنبد شامل یک لایه بسیار نازک پلاستیک می‌باشد که بر اثر اختلاف فشار به یک شبکه فلزی با اعضای ظریف فشرده می‌شود، که فضای بین لبه‌ها و کابل‌های مسلح کننده را می‌پوشاند. نقش لایه نازک پلاستیک این است که یک سطح شفاف برای برای حفظ فشار هوای داخل ایجاد کند و از آنجا که ابعاد شبکه‌های فلزی از چند سانتی‌متر تجاوز نمی‌کند. این پوسته نازک به مقاومت کششی بسیار کمی نیاز دارد. بنابراین سایر مشخصات این پوسته‌های نازک از قبیل ductility، شفافیت و دوام از اهمیت بیشتری برخوردارند. وجود هیچ‌گونه اتصالی بین شبکه و پوسته لازم نیست چرا که پوسته بر اثر اختلاف فشار خود به شبکه فشرده می‌شود. بخش‌هایی که سازه که امکان دارد بر اثر نیروی باد فشارهای خارجی بزرگی را تحمل کنند یک لایه متشکل از پوسته و شبکه فلزی بر روی سازه موجود نصب می‌شود تا مانع از جدا شدن پوسته داخلی از شبکه فلزی شود. یکی از مزایای این سیستم این است که لازم نیست در مورد برش الگوهای شبکه و پوسته نگران باشیم همچنین و در این روش امکان اجرای سقف‌های گنبدی با فرم‌های پیرامونی گوناگون و با استفاده از شبکه و پوسته مسطح وجود دارد ما این نوع از سازه‌های پنوماتیک را به منظور استفاده در زمینه کشاورزی و ماهیگیری طراحی کردیم. برای چنین ساختمانهای موقتی باید از اجزاء ارزان قیمت استفاده شود. به همین دلیل از PVC به عنوان پوسته خارجی استفاده نمودیم و آن را به کمک تورهای ماهیگیری مسلح کردیم. طناب‌های سیمی فقط در بخش‌های مهم بکار برده شد و در نهایت سازه‌ای داشتیم که بسیار ارزان قیمت بود. تعدادی از این سازه‌ها در کشاورزی hydropomic مورد استفاده قرار گرفت. سیستم مشابهی نیز برای پوشاندن یک حوضچه پروش مارماهی بکار رفت. بخاطر پوشیده شدن حوضچه با یک پوسته شفاف دمای آب حوضچه همیشه گرم می‌ماند و این امر باعث رشد سریع مارماهی‌ها حتی در فصل زمستان می شود.

در یکی دیگر از طرح‌های ما از همین سیستم برای پوشاندن یک زمین بازی کودکان استفاده شد. پوسته پر شده از هوا بسیار نرم و بازی کردن بر روی آن برای بچه‌ها بسیار هیجان‌انگیز بود (شکل ۳۵).

از آخرین نمونه‌های کاربرد این سیستم می‌توان به دو پا ویلیون (شکل ۳۶) که برای دوازدهمین کنفرانس جهانی ارکید که در سال ۱۹۸۷ در توکیو بزگزار شد. ساخته شدند اشاره کرد. این و پا ویلیون توسط معمار مقید "Y.Murata" و اینجانب طراحی شدند.

گنبد شمارهٔ یک، یک پلان مدور به قطر ۷۵m را می‌پوشاند و ارتفاع آن ۱۹/۵m است. پوسته سقف گنبدی توسط رشته‌های سیمی دو طرفه که در فواصل ۵ متری از یکدیگر قرار دارند مسلح می‌شود. هر بخش را گنبد که بین رشته‌های سیمی قرار می‌گیرد شامل یک تور ماهیگیری با شبکه‌های ۱۰ سانتی و یک لایه نازک PVC به ضخامت ۰/۱mm است که در زیر شبکه قرار گرفته و نقش هوا بند را

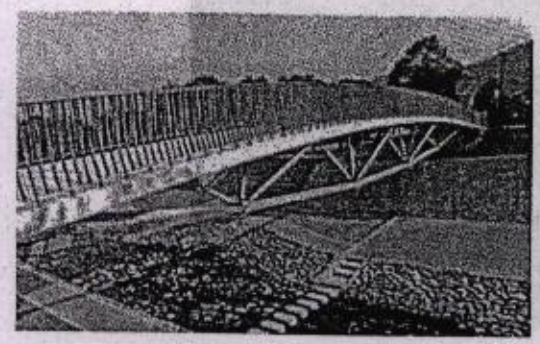
ایفا می‌کند. فشار هوای داخل mmAq بالاتر از فشار اتمسفر در شرایط عادی است که هنگام بارش برف سنگین یا وزش بادهای بسیار قوی تا ۷۰mmAq افزایش می‌یابد.
گنبد شماره دو شکلی شبیه به کرم داشته که در ازای آن نزدیک به ۱۰۰m و عرض آن در حدود ۴۰m است. این گنبد توسط رشته‌های سیمی در جهت عرضی و شعاعی مسلح شده است. در جهت طولی رشته‌های سیمی فقط در امتداد برآمدگی بالای گنبد کشیده شده‌اند و پوسته‌ای که بین این رشته‌ها را می‌پوشاند مشابه گنبد یک می‌باشد.
۸ـ نرم‌ترین و سبک‌ترین سازه ... پارچه در فضای باز
در ژاپن سنتی هست که مطابق با آن در روز پنجم ماه می برای جشن روز کودک carpهای پارچه‌ای هوا می‌کنند. این carpها که از چنین پارچه‌های کتان هستند. در شهری به نام kazo که در حومه توکیو قرار دارد، ساخته می‌شوند. اغلب آنها به طور معمول ۳ تا ۵ متر درازا دارند.
چند سال پیش، مردم این شهر از من خواستند تا در مورد امکان به پرواز در آوردن یک carp صدمتری که به عنوان یک عنصر تبلیغاتی برای شهرستان ساخته بودند تحقیق کنم.
این مسئله چند بعد داشت:

۱) آیا این carp می‌تواند پرواز کند؟
۲) آیا پوشش کتانی می‌تواند در برابر تنش‌هایی که در حین پرواز به آن وارد می‌گردد مقاومت نماید.
۳) و مشکلات تکنیکی دیگر

جالب‌ترین نکته این ماجرا این بود که مردم شهر برای ساختن این carp از پارچه‌هایی استفاده کرده بودند که برای ساخت یک carp معمولی از آن استفاده می‌شود. یک تحلیل ابعادی برای شرایط پروانه این carp محاسبه تنش‌های وارد بر پوسته و انجام یک سری آزمایش تونل باد این نکات را آشکار کرد که :

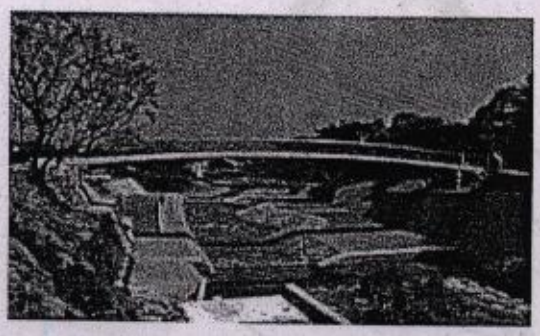
۱) jumbo carp در همان سرعت باد به پرواز در می‌آید که یک carp معمولی
۲) گر چه پوسته تحت تأثیر تنش‌هایی از ۲۰ تا ۳۰ برابر تنش‌های وارد بر یک carp معمولی در هنگام پرواز قرار می‌گیرد با این همه پارچه کتان به اندازه کافی برای تحمل این تنش‌ها قدرت دارد.
۳) درزهای بین پارچه توان تحمل این تنش‌ها را در هنگام پرواز ندارند.
۴) حل مشکلات تکنیکی مثل جزئیات دهان carp یا چگونگی بالا بردن آن تا ارتفاع مورد نظر می‌تواند با صرف هزینه امکان‌پذیر است.

براساس یافته‌های فوق درزهای بین پارچه‌ها تقویت شدند و با استفاده از لوله‌های آلومینیومی یک دهان مناسب طراحی شد و در نهایت carp مورد نظر با استفاده از یک جرثقیل (شکل ۳۷)
در یکی از روزهای زیبایی آوریل ۱۹۸۸ بالا برده شده، با نسیم به رقص درآور به زیبایی در آسمان شنا کرد.
از آن زمان تا به حال به پرواز درآوردن این carp به یکی از مهمترین وقایع سالانه شهر در تبدیل شده و هر سال در ابتدای ماه می برگزار می‌شود.

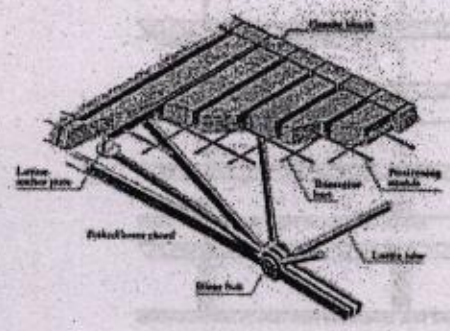


[1]

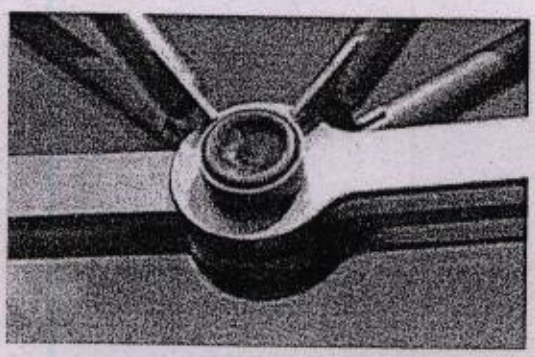
[2]



[3]



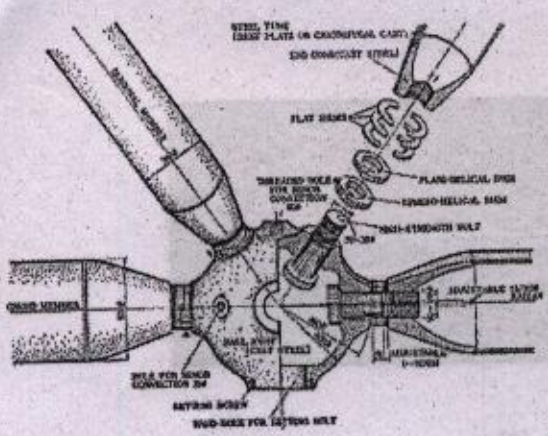
[4]



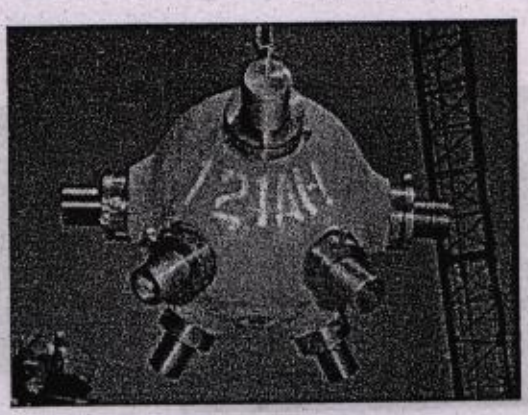
[5]

[6]

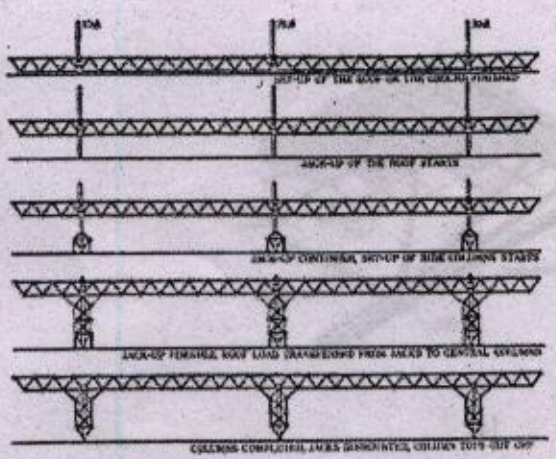
Figures for "How Structures Can Contribute to Architecture" by Mamoru Kawaguchi



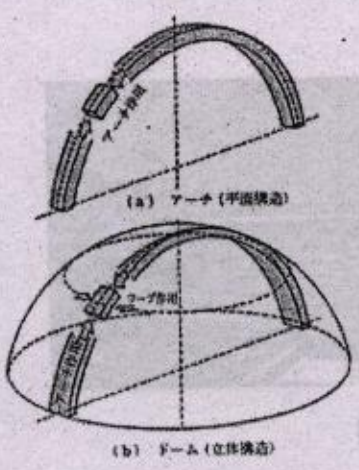
[7]



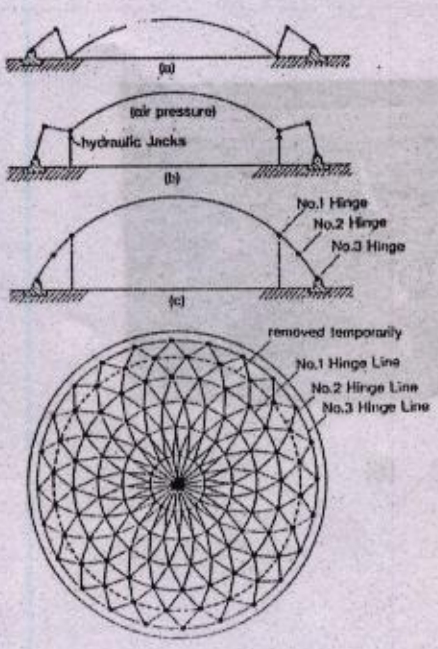
[8]



[9]



[10]

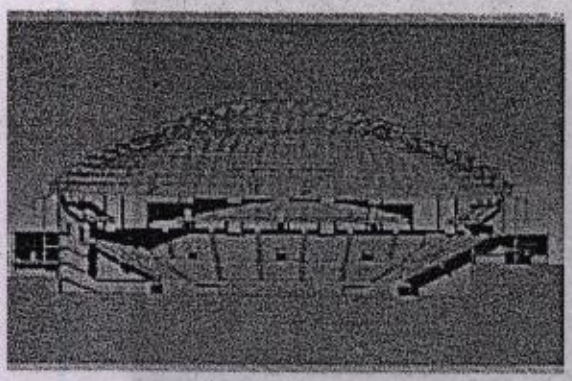


[11]

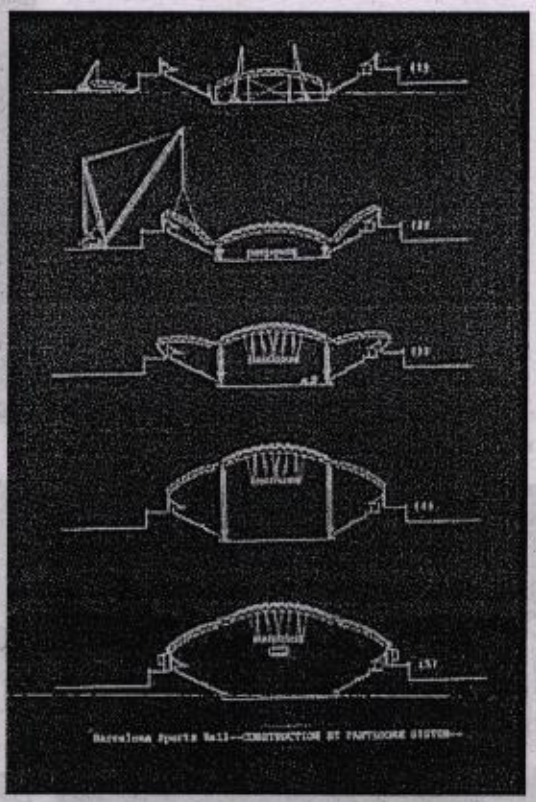
Figures for "How Structures Can Contribute to Architecture" by Mamoru Kawaguchi

[12]

TABLE: "REALIZED PANTADOMES" [13] on the next page

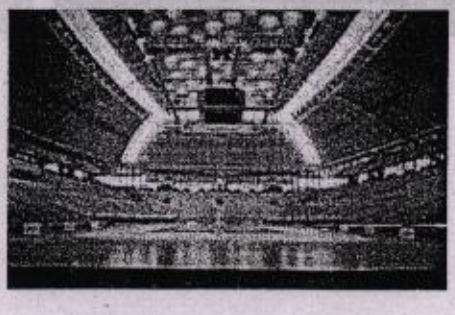


[14]



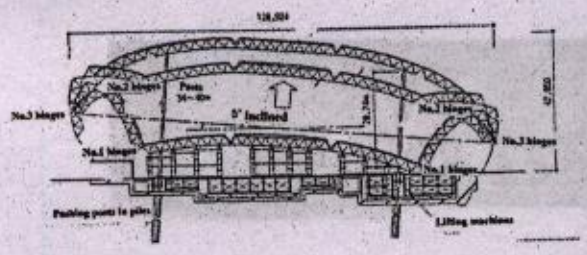
[15]

[16]



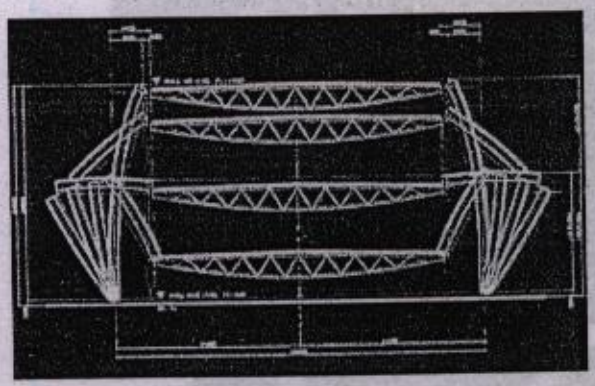
[17]

Figures for "How Structures Can Contribute to Architecture" by Mamoru Kawaguchi

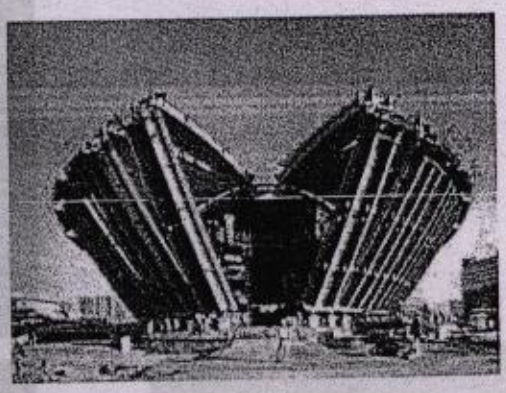


[18]

[19]

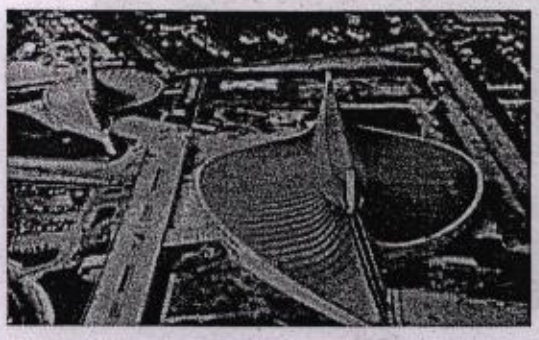


[20]

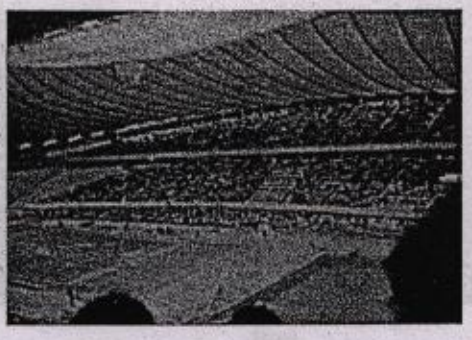


[21]

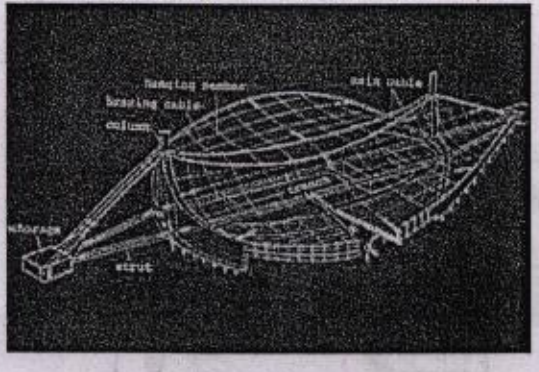
Figures for "How Structures Can Contribute to Architecture" by Mamoru Kawaguchi



[22]

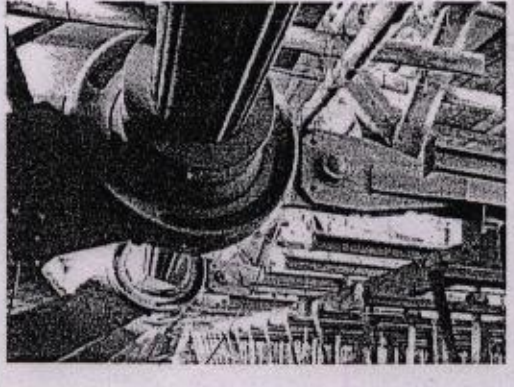


[23]

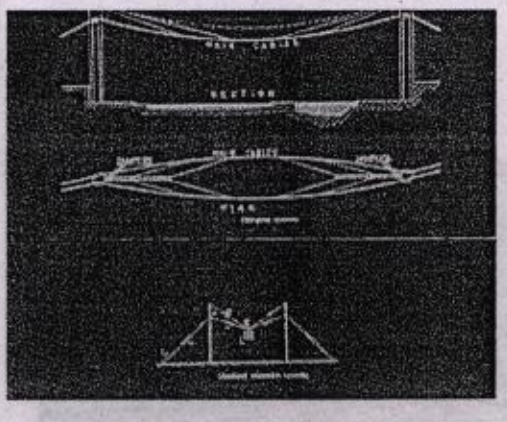


[24]

[25]

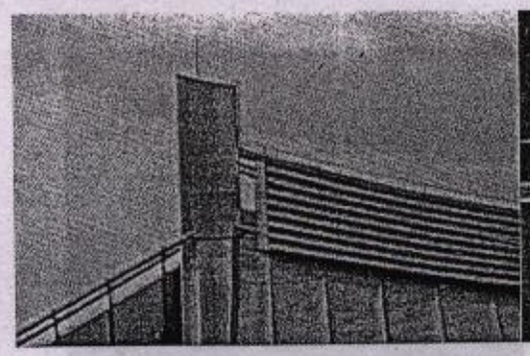


[26]

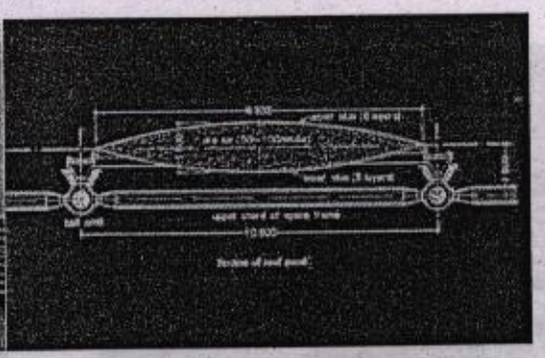


[27]

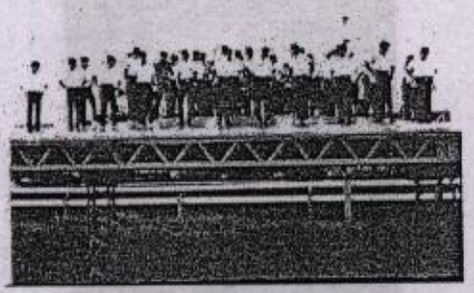
Figures for "How Structures Can Contribute to Architecture" by Mamoru Kawaguchi



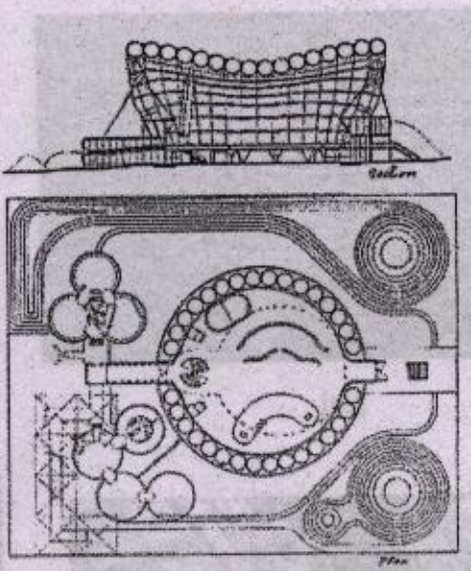
[28]



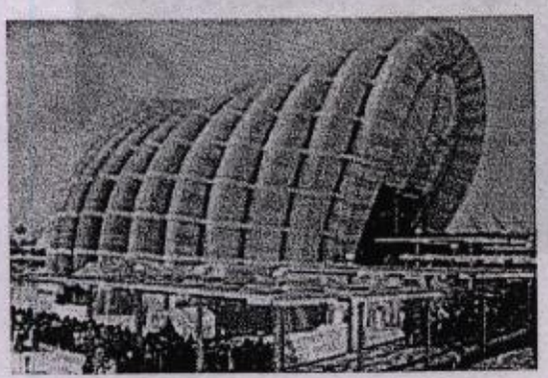
[29]



[30]



[31]



[32]

Figures for "How Structures Can Contribute to Architecture" by Mamoru Kawaguchi