

名古屋造形大学

—耐震性能を有する外壁 SPC格子壁の実現—

山本理頭設計工場 玉田 誠
Arup 伊藤 潤一郎

1. はじめに

愛知県の美術系大学「名古屋造形大」のキャンパス移転計画について紹介する。郊外の自然豊かな広大な土地に、分棟形式でゆったりと建っていた既存キャンパスを、名古屋城のある名城公園の隣に移転し、郊外型から都市型の新しい美術大学へと生まれ変わらせることから計画が開始した。

移転先の敷地は、老朽化に伴い解体された官舎があった場所で、別の用途（養護老人ホームや大学）への転用が進んでいる。周辺には集合住宅や古い商店街、戸建て住宅が建ち並び、もともとそこで生活していた人たちと、新たに利用する人たちが混在するような地域である。

敷地中央の直下に地下鉄が通っているということに加えて、近隣の地域社会とどのような関係を築けるか、どのように地域に貢献できるかが大きな課題であった。

「学生や教員の創造の場である巨大なワンルームのスタジオ」「作品や活動の表現の場である半屋外のアートストリート」を計画し、大学全体が創造の場であり、地域社会の人たちが作品や大学の活動そのものに触れることができる場でもあるような開かれた建築を目指した。

2. 建物概要

- ・建物名称：名古屋造形大学
- ・建設地：愛知県名古屋市北区名城二丁目4番1他23
- ・主要用途：大学
- ・設計監理：山本理頭設計工場
Anup（構造設計・環境設備設計）
- ・施工：株式会社大林組名古屋支店
- ・PCa工事：株式会社建研
（格子壁）：協会会社東海コンクリート工業株式会社
- ・工期：2020年5月～2022年1月
- ・敷地面積：20,136m²
- ・建築面積：10,456m²
- ・延床面積：20,881m²
- ・階数：地下1階，地上4階
- ・構造：鉄筋コンクリート造（柱・耐震壁）
鉄骨造（梁・トラス）
プレキャストコンクリート造（格子壁，外周トラス）
基礎構造：杭基礎
- ・最高高さ：GL+24.9m



写真-1 アートストリート入り口

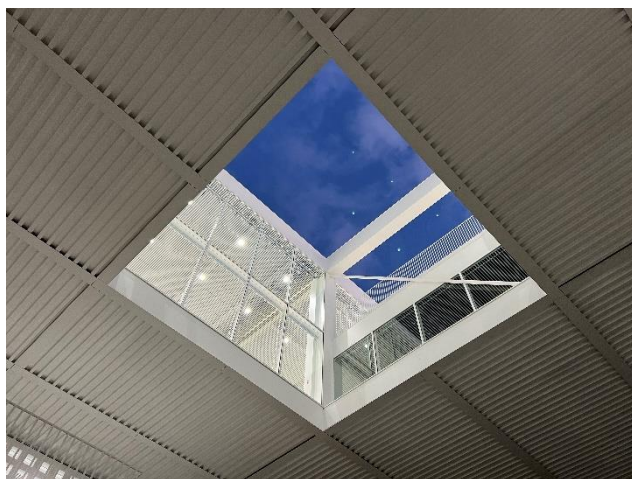


写真-2 外観

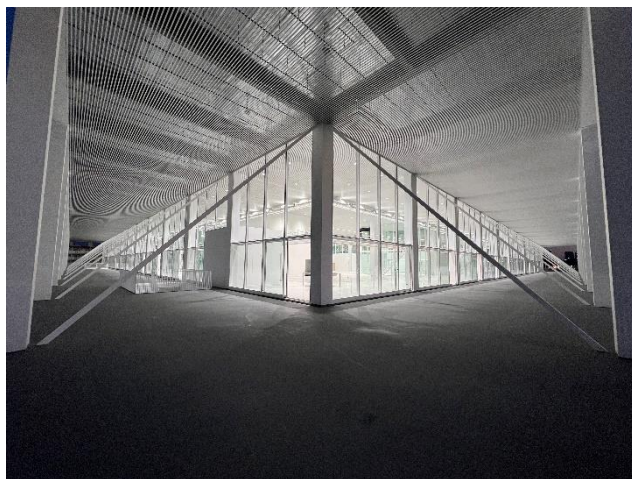


写真-3 バルコニー

3. 建築計画

さまざまな分野が集まる芸術系の大学であるため、教室ごとに活動の場を分けるのではなく、104m×104mのワンルームの大空間のスタジオ(写真-4)を計画した。1000人の学生と教員の活動場である。耐震要素を4つのコアに集約し、できるだけ一体空間となるようにした。スタジオには間仕切りは設けず、専有のテーブルも無い。学生たちは空間をシェアリングすることで分野ごとに分断されることなく、相互に関係しながら創作活動を行うことができる。スタジオの中央には先生と助手の拠点であるスタジオオフィスを配置した。ここにも先生たちの個室の研究室は無く、背の低い家具で緩やかに仕切り、スタジオと連続するように計画した。さまざまな活動がグラデーショナルに広がることを目指した。

スタジオを支える4つの棟を包む格子壁(写真-5)は構造的な耐震要素であり、直射日光を遮り自然通風を取り込む環境装置の役割も果たす。夜には内部から光が漏れ、周囲を優しく照らす灯りにもなる。繊細に作られた継ぎ目のない格子状のファサードが都市の新たな風景となることを考えた。

写真-6に示すスタジオ下の4つの棟にはアリーナ、図書館、食堂、ギャラリー、多目的ホールなど地域住民も利用しやすいものを配置した。中央を貫くアートストリート(写真-6)は最大スパン40mの大屋根がかかった半屋外空間であり、誰もが出入り可能な商店街のような場所である。アートストリートには地下鉄への荷重制限をクリアできる低層の見世を配置した。学生や先生の作った作品をプレゼンテーションする場であると同時に、作品の販売や地域住民や地域の企業との共同創作の場として活用できる空間となっている。写真-7に建物全景を示す。



写真-4 スタジオ



写真-5 格子壁とスタジオ

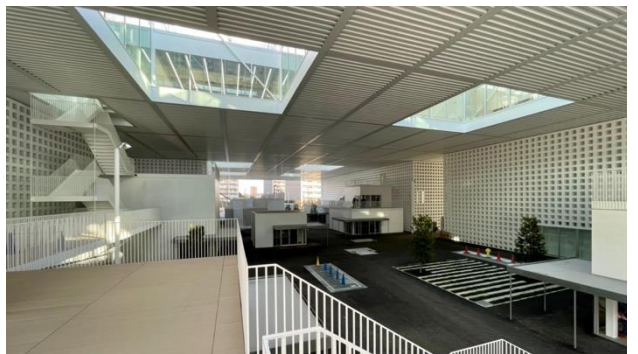


写真-6 アートストリート

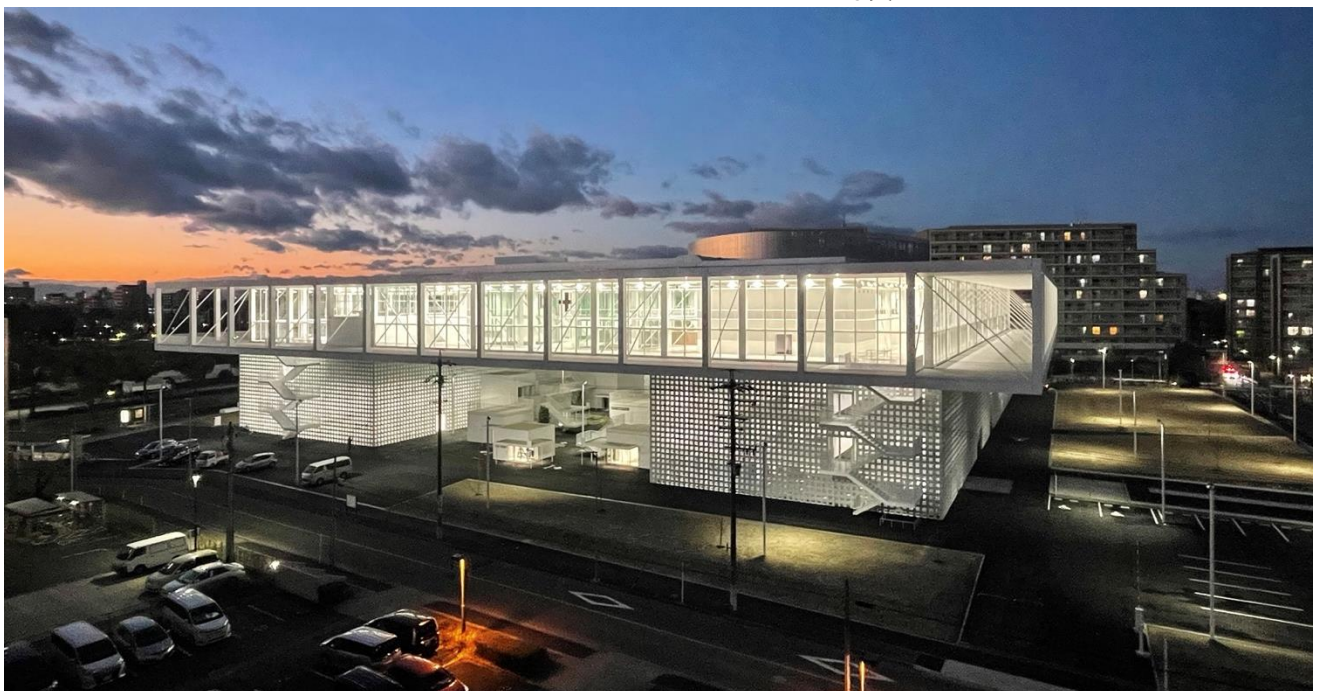


写真-7 建物全景

4. 構造計画

4.1 全体計画

敷地内に地下鉄駅舎が配置されていることは、構造計画を決めるにあたり重要な条件であった。建築家からの初期提案は、約 100m 角のスタジオを 4 階に配置し、その巨大なフロアを PCa のフレームにて支持させたいというものであった。PCa を利用する場合の建築計画の合理性は、短工期で露出した構造フレームが実現可能であること、大スパン建築が可能であるということである。PCa を基本とした構造案で計画を進めたが、基本設計・実施設計と詳細の検討を進めていくうちに、コストや施工計画が明らかになり、課題に直面した。それは重さのある PCa パーツを揚重するための重機を、耐荷重が限られた地下鉄上部で利用できないという問題である。想定される重機は 500t と巨大で、クレーンコストのみならず建方計画にも影響したため、地下鉄上部の大スパン部を鉄骨造とすることで重機による負担を軽減させることが適切との判断に至った。一方で、PCa のメリットとして SPC 格子壁と SPC 片持ちトラスの実現が可能となった。建物全体の構造部材構成を図-1 に示す。

4.2 格子壁の計画

過去に Anup が構造設計を担当した『国立劇場おきなわ』のように、PCa ファサードを建物外周部に配置した建築はあるが、構造体に利用したケースはない。その理由は明確で、格子のような繊細な部材で構成された PCa を採用した場合、地震が起きた際に PCa ファサードが損傷することが明確であり、損傷したファサードは施主にとって望ましくないと考えられるからである。それらを勘案し、建物内部に十分な耐震壁を配置することができないという建築条件から、当初は意匠的なファサードとしていた格子壁を構造体として利用する方向で検討を進めることとなった。最終的に鋼板+PCa というハイブリッドな断面構成であれば、地震後にもひび割れを最小限にとどめられるとの考えに至り、SPC 格子壁で耐震性能を確保することとした。図-2 に最終的な格子壁（青）と RC 耐震壁（赤）の配置を示す。1-3 階は開放的な図書館やアリーナ、多目的ホールや食堂であり、面的な RC 耐震壁の配置が望ましくないことと、RC 耐震壁の平面的なバランスを改善することを考え配置を決定した。水平力分担割合は格子壁：耐震壁=3：7となった。

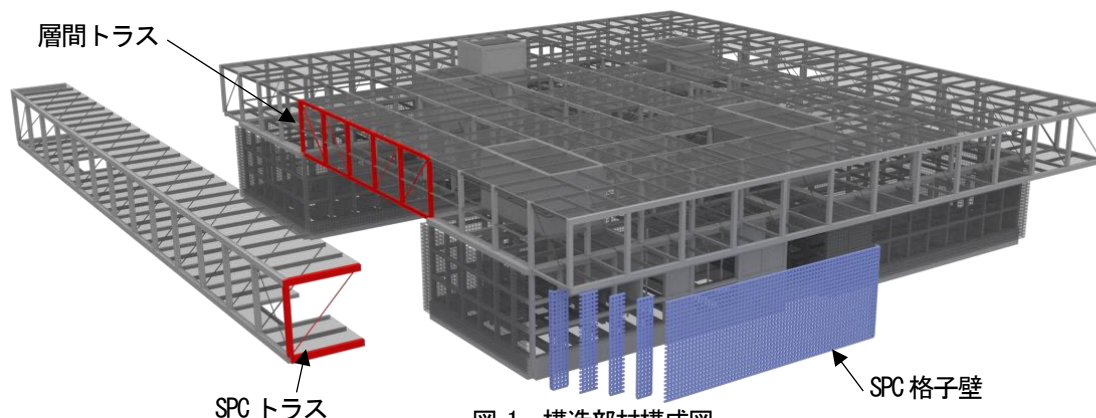


図-1 構造部材構成図

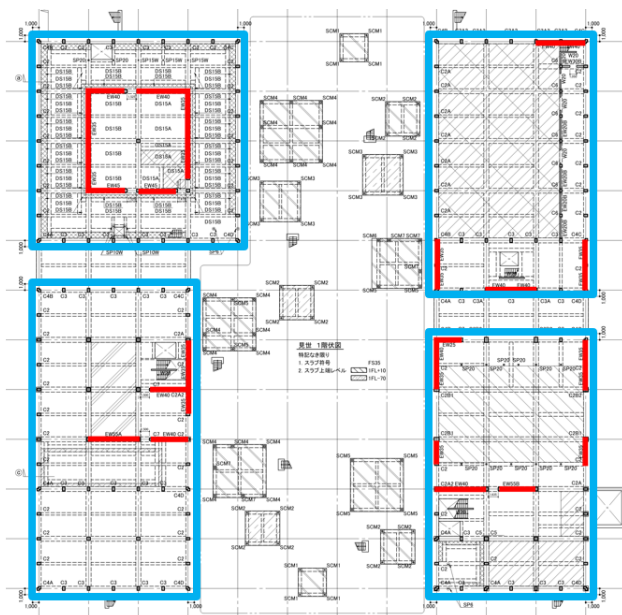


図-2 SPC 格子壁・耐震壁配置図

4.3 格子壁の設計

格子壁の設計は建築家との打ち合わせで PCa 断面が 200mm × 200mm、鋼板は応力によって適宜厚さを変える方針とした。図-3 に示す様に、最終的に鋼板は 16, 19, 22 mm を使い分けている。11m という高さの SPC 格子壁が面外方向に座屈することなく、耐震要素として効果を発揮するためには、多くの必要条件が存在した。その 1 つがコンクリート強度である。コンクリートで鋼板の座屈を補剛して耐震性能を発揮させるという考えを利用している代表的な例は「座屈拘束ブレース」である。ある時、座屈拘束ブレースの考えを東京工業大学の和田先生・竹内先生から聞く機会があった。その講演で鋼板とコンクリートの圧縮強度の比率に関する話をお伺いし、その考えを今回の SPC 格子壁に応用できないかと考えた。最終的に PCa と鋼板の圧縮強度比率は、PCa 圧縮強度 > 鋼板圧縮強度、という関係であることが必要だと判断した。この条件を満足するため、コンクリート強度は Fc60 以上が求められた。高強度コンクリートが鋼板座屈補剛のために必要となるが、SPC 格子壁の耐力については鋼板のみを考慮している。これは PCa 断面が 200mm × 200mm と小さく、PCa の主筋が中立軸に近い位置に配置されていることから、PCa が SPC 格子壁自体への耐力に与える影響は少な

いと考えたためである。結果、PCaは鋼板の座屈補剛材となった。しかし、本来は座屈補剛材にも耐力・剛性が求められることから、詳細については実験で明確にすることとした。図-4に格子壁の柱詳細図を示す。格子壁は柱と梁で構成されているが、RC造として求められる主筋4本以上という規定は満足しておらず、柱・梁共に主筋は2本とした。

SPC格子壁の次なる課題はディテールである。格子壁は厚さ200mmしかなく、4階に配置される40mスパンのトラスや8mの片持ちSPCフレームを支持することは到底できない。一方で水平力は伝達させる必要がある。このことから、SPC格子壁と躯体との間には鉛直スリットを設けたボルト接合を採用している。ボルトには1か所500kNという巨大なせん断力が発生し、耐震性能のかなめとなるため、ボルト孔による誤差は最小限にとどめる必要がある。そこで、地震が起きた際にもボルトやガセットプレート支圧部が損傷することのない角ボルト(写真-5)を採用した。角ボルトと鉛直スリット孔の間には左右0.5mmのギャップで施工することを求めた。SPC格子壁脚部にも課題があった。それはPCaをRC基礎梁に固定すると耐力が低下するという検証結果から明らかになったものである。SPC格子壁頭部は鋼板のみを接続させ、脚部はPCa+鋼板を接続させると、軸力がSPC格子壁の中を斜めに伝達する。よって軸力の偏心により、SPC格子壁に面外曲げが生まれ、早期に面外座屈してしまうのである。最終的には、頂部も脚部も鉄骨のみをRC躯体と接続させることとし、実験で最終確認することとした。接合部に至るまで詳細に市販のFEM解析ソフトであるLS-DYNAでシミュレーション(図-5,6)を繰り返すことで、新たな耐震要素を生み出すことが可能となった。

4.4 トラスの計画

地下鉄駅舎の上部に荷重をかけることが制限されていたことから、地下鉄上部は図-1に示す鉄骨層間トラスでスパンを飛ばしている。前述の通り、当初はSPCトラスを想定していたが、重機計画の問題で、最終的に以下の構成がコスト・建方的に最適であると判断した。

- ・大スパン部：鉄骨による層間トラス
- ・建物外周片持ち部：SPC(PCa) + 鉄骨斜材トラス

4.5 SPCトラスの設計

建物外周に作られた8mの片持ちバルコニー(図-1)は鉄骨で作ることも可能であったが、鉄骨造を採用する場合、階高8mの柱や片持ち梁の部分に仮設足場が多く必要となり、工期・建方計画だけでなく、コスト面にも大きな影響があった。そこで、建物外周部の柱・梁にPCaを採用している。片持ち8mのバルコニーをPCaの片持ち構造とすることは困難である。そこで、鉄骨斜材(TMCP440B)を利用し、鉄骨斜材に取り合うPCa部材は鉄骨内蔵型とすることで、斜材の軸力を円滑に伝達させることが可能となっている。トラスには40mm程度の施工キャンバーを設け、コンクリートスラブ打込み後にフラットになるように計画することで、8mという片持ちバルコニーを高精度に施工することができた。

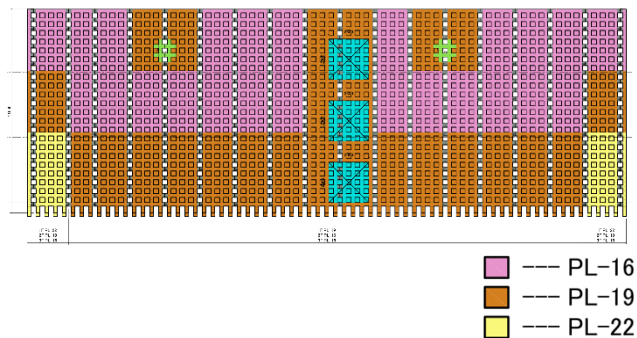


図-3 SPC格子壁 鋼板板厚

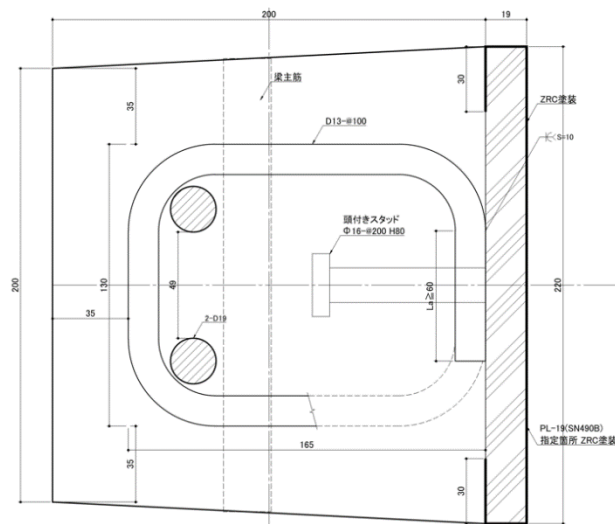


図-4 SPC格子壁断面(柱)

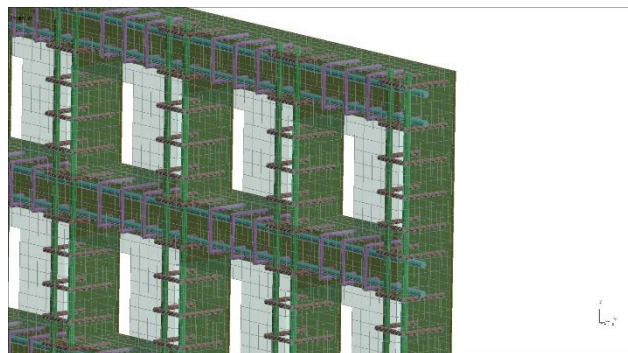


図-5 LS-DYNAによるソリッド解析

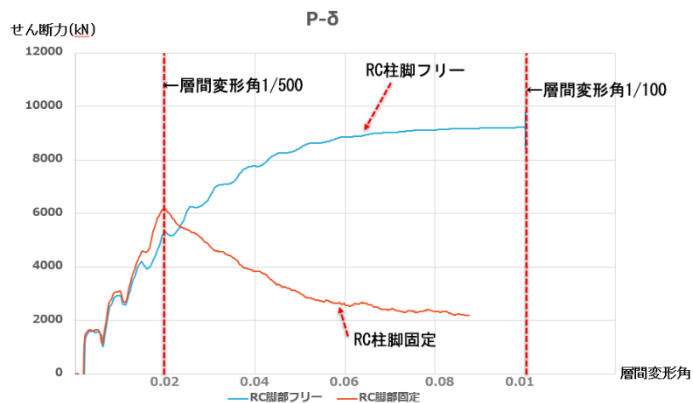


図-6 SPC格子壁 耐力曲線の比較

5. SPC 格子壁の実大実験

設計期間中に実験を行うことはできなかったが、施工者決定と同時に SPC 格子壁の実大実験を行った。実験で確認すべきことは主に次の3点である。

- ・ひび割れの程度
- ・剛性・耐力
- ・柱脚の接合 (PCa と基礎梁の接合方法)
- ・鋼板の座屈

まず、1 つ目のひび割れについては大地震が起こった際に建物自体が 1/350 程度変形すると想定した。この変形角は保有水平耐力時の変形と同じである。1/350 付近まで加力後、除荷した際のひび割れは目視で確認できるものの、大地震後の状況としては全く問題ないと判断できた。この理由は鋼板にあると考えられる。鋼板と PCa が一体になることにより、履歴曲線は RC ではなく鉄骨のような履歴曲線を描いている (図-7)。通常は SRC 構造の履歴曲線の特徴である紡錘曲線を描くはずであるが、今回の場合、鋼板が PCa よりも大きなせいであることから、PCa の剛性・耐力寄与率は低く、鋼板の剛性・耐力によって性能が決まっていた。このことから鉄骨に近い履歴曲線を描き、1/350 においても塑性化せず、原点復帰に近い履歴曲線を描くことが可能であると確認できた。

2 つ目の剛性・耐力については、MidasiGen を利用した解析モデルから得られた耐力とほぼ同じ結果が得られた。今回の建物は RC 耐震壁があるため、層間変形角は 1/100 に達することは無いが、仮に 1/100 程度まで変形が局部的に進んだとしても、1/100 程度で終局曲げ耐力をむかえることが分かった。さらに、終局耐力後も耐力低下は見られず、優れた耐震性能を確認できた (図-7)。鋼板の局部座屈を PCa で拘束可能か確認することも重要な点であった。1/50 で柱脚の鋼板が局部座屈することを除き、健全な状態を保てると確認できたため、設計で定めたスタッドのピッチは妥当であると判断した。

3 つ目の柱脚については最終試験体で PCa 脚部にモルタルを充填した試験を行い、性能を確認した。その結果として、耐力そのものに大きな影響は出ないことが確認できたが、解析ではせん断ひび割れが曲げひび割れより早期に発生すると予想していたが、実験では曲げひび割れがせん断ひび割れより早期に確認された。PCa を基礎梁と接続させると格子壁自体が面外方向に変形する挙動を示すこと、PCa 柱脚で圧縮せん断破壊が生じることが確認された。部分的な実大実験では耐力に影響は出なかったが、高さ 11m の格子壁でシミュレーションした結果、耐力差が大きいとの判断に至り、柱脚は原設計通り鋼板のみを基礎梁と接続させる計画とした。

今回、実大実験が可能となった背景には、施主・建築家・施工者 (技術研究所) ・PCa 施工業者の方々の SPC 格子壁の重要性についての理解のおかげであり、ものづくりの原点を体感することができた。



写真-8 SPC 格子壁 柱頭接合部 角ボルト



写真-9 試験体製作状況



写真-10 SPC 格子壁 実大実験状況

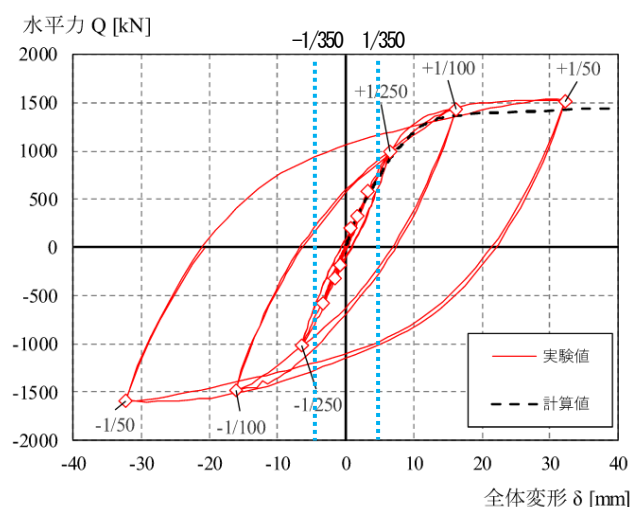


図-7 SPC 格子壁 水平力—全体変形関係

6. 施工計画

格子壁は合計 300 ピースあり、4つの棟すべての外周を囲む形で配置した。写真-11 に示す格子壁 1 ピースは 2m×12m、最大重量9.4tである。格子壁の建方は、350tや200t クローラークレーンで、ラフタークレーンを相番機として、吊上げの際は 2 台のクレーンで相吊りし、施工時のひび割れを防ぐ計画とした。

格子壁の施工における 1 番の難題は、300 ピースをつなぐ合計 6,300 か所もある現場ジョイント部の施工方法であった。写真-12 に現場接合部の状況を示しているが、当初は、連結箇所から突出している鋼板と鉄筋を 1 か所で溶接、その後、配筋・型枠をしてコンクリートを打込む計画であった。しかし、作業のしやすい格子穴の表側から鋼板の溶接をしようと、手前にある鉄筋が妨げとなって作業ができず、幅の狭い裏側からの作業となってしまった。鉄筋溶接も各ピースの鉄筋の高さや長さがバラついて溶接位置がずれると、作業に時間がかかるだけでなく、品質確保も難しくなる。そこで、鉄筋の溶接位置を 1 か所から 2 か所に変更した。広いスペースが確保でき、鋼板や鉄筋の溶接位置に多少のずれが生じて調整が可能となるなど、品質だけでなく求められる美しさの確保とともに施工実現性の向上を図ることができた。

写真-13 に示すように 12mの高さがある格子壁は、格子が縦に 23 段ある。継手部に少量のコンクリートを打込むために、ポンプ車の圧送では効率が悪く残コンも多い。バケツリレーでは大変な手間と時間がかかる。そこで、モルタル打込みへの変更を提案し、構造設計者の承諾を得て、左官工事で使用するモルタルポンプでの打込み（写真-14）する計画とした。モルタルポンプでの打込みは、作業員の習熟効果もあり最終的には17列×23段=391箇所を1日で施工することができた。

4階の建物外周に配置される SPC トラスは、1~3階に柱のない跳ね出しの構造であった。そのため、本体建屋の鉄骨トラスがすべて組み上がった後、SPC 柱脚部に仮設の支保工（ベント）を 48本の柱すべてに設置して建方を行った。写真-15 に示すように、ベントの足元にはジャッキを設置して、建方時の高さの微調整と建方後のジャッキダウンに使用した。外周 SPC の柱と梁は、鉄筋がつながらず、柱から出ているアゴに梁を乗せ掛け、目地部にグラウト注入という仕様であった。したがって SPC 建方時には、柱と梁の固定されておらず不安定な状態となるため、最大でクレーン 3 台で部材を吊りっ放しの状態で建方を行い安全性を確保した。

建屋本体から外周 SPC 材を吊る斜材（幅 100mm無垢鋼材）のジョイント溶接は、上下に 2 か所あり、上部が梁下 1m程の位置で溶接用足場上で、下部については床デッキ上で作業した。溶接部はそれぞれK型開先で斜め上進溶接とし、斜材の長さが約 11mあるため、中央部に仮設のたわみ防止用治具を設置しながら溶接を行った。

仕上は格子壁の鋼板部はウレタン塗装、格子壁と SPC のコンクリート部は N-95 白色 20%の撥水材で施工した。



写真-11 格子壁建方状況

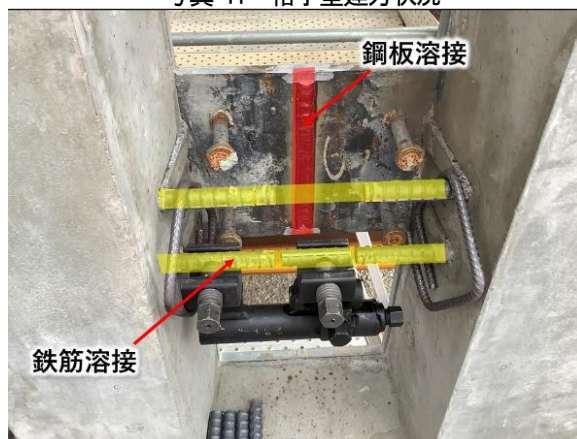


写真-12 現場ジョイント部



写真-13 格子壁全景



写真-14 モルタル打込み

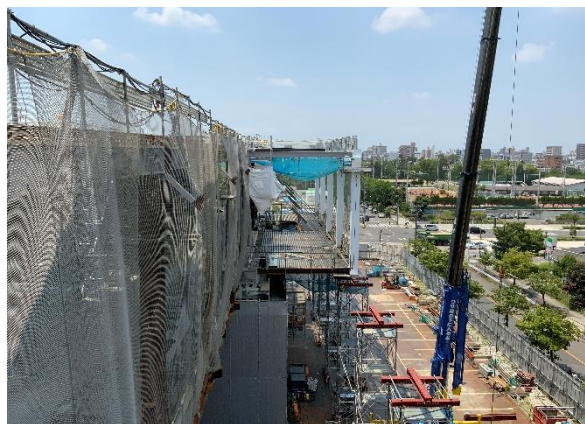


写真-15 跳ね出し SPC トラス

7. SPC 格子壁の製作

SPC 格子壁（鋼板+PCaハイブリッド形状）詳細は図-8に示す通り、柱梁主筋（共に2-D19）とD10@100フープを、鋼板上にPCaと一体化するために配置したφ19,φ16スタッドの間を縫うように配筋する構成である。製作側の課題は、建物を印象づける格子を如何に綺麗に仕上げるかという意匠的な課題と、12mもの長さのPCaを如何に変形を少なく且つひび割れを制御して現場に納入するかという構造的な課題の2点に絞られた。

SPC 格子壁の1枚当たりの標準サイズは幅1990mm×高さ12,000mmとし、その中に69個もの300mm×300mmの開口を用いて格子を形成している。この開口型枠形状を、意匠的に許される限界の抜き勾配をモックアップにて検証した結果、厚さ200mmに対し15mmの勾配に決定した。モックアップを作成する過程で鋼板開口とPCa開口が同一寸法であると、若干の製造誤差によりノロ漏れを生じ、鋼板を汚してしまうことがわかったため、鋼板開口よりPCa開口を4辺とも3mm小さくし問題を解消している。この開口型枠は鋼板の厚さによって変化するため、その製作数は400を超えた。

通常PCaは定盤面を外部仕上げ面として使用するが、SPC 格子壁では、写真-16に示すように定盤面に鋼板を敷

設し、周辺および開口型枠をセット・コンクリートを打込んでいる。その打込み面が外部仕上げ面となるため綿密なコテ仕上げを要した（写真-17）。コンクリートが完全硬化してしまうと開口型枠が抜けないことがモックアップ製作時に判明したため、同一型枠を2型用意した。完全硬化を避けるため、コンクリート打込みを朝一番から行い、夕方には仕上げを完了し開口型枠を脱型した。

製品長さが12mあることから変形および、ひび割れ対策として、写真-18に示す現場場重兼用のH形鋼による専用脱型治具を製作した。格子壁柱外側2本の両側面に脱型用インサートを均等に6箇所セットし、脱型治具を挟み込むような形で取り付けた。これにより最も懸念された若材令におけるひび割れを抑制できた。乾燥収縮および自重による変形抑制に関しては、コンクリートの乾燥収縮率は概ね470μであることが工場の試験結果から得られていた。FEM解析の結果では、支点の配置に配慮しない場合に40mm程度の反りが想定されたため、土間コン敷きのストック場で、レベル管理を徹底した長辺方向4点、合計8点による多点置きを実施。さらに、反りを日々測定し異常が見られた場合は、その傾向を判断し支持点を移動させることで、ほぼ反りのない状態で出荷できた。

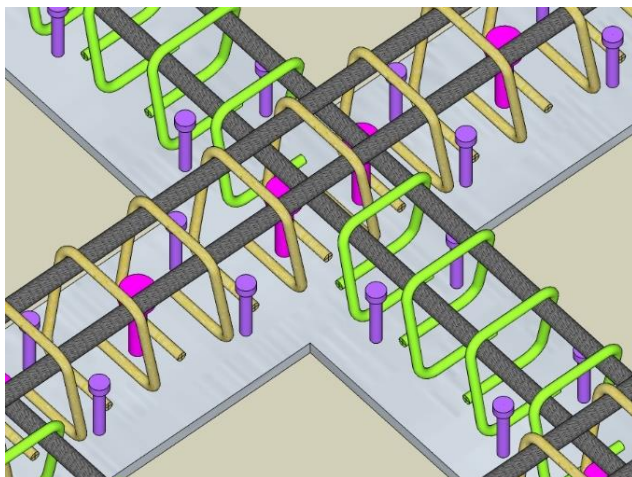


図-8 SPC 格子壁配筋納まり



写真-17 コテ仕上げ完了



写真-16 配筋・型枠セット状況



写真-18 脱型状況

8. SPC トラスの製作

SPC トラス部材の製作には部材製作図が必要となるが、製作図を作図するに先立ち、**図-9**に示す通り BIM ツールを用いて3次元モデルを作成して、鉄筋と鉄骨部材、接合用プレート等における納まりの確認を行った。

部材を製作、架設するにあたりそれぞれ必要な埋込材があるが、本建物は施主の要望で意匠性にも非常に気を遣っており、建物外部面側に補修処理跡を残さないことが求められた。そのため、建物外部面側が鋼製型枠面、建物内部面側がコンクリート打込み面となるように部材の製作方向を考慮し、埋込材はコンクリート打込み面、鋼製型枠の側面側のみの配置とした。

SPC トラスはコンクリート面から突き出した鉄骨プレートによるピン接合となっているため、内蔵の鉄骨部材の位置の精度が非常に重要となる。そのため、**写真-19**に示すように鉄骨部材が鋼製型枠内で移動しないように吊り治具、および固定治具を用いて、強固にセットしてコンクリート打込みを行った。

コンクリートの充填を確実にを行うため、内蔵の鉄骨部材には部材耐力に影響が無い範囲でコンクリート打込み用の貫通孔を設けている。部材製作時に欠け等が発生する可能性があるため、一般的に予め面取りを設けることが多いが、意匠性から難しいと判断し、欠け等が発生しないよう十分に留意して製作した。

SPC トラスの架設箇所は地上から約 12m の高さ、さらに 8m の片持ち梁の先端側の位置であるため、仕上げ材である撥水材の塗装は安全性、および作業性を考慮して**写真-20**に示すように SPC トラス部材の製作工場にて行っている。

部材製作後、現場での架設までに約 3~4 か月のストック期間があり製作工場内にて保管したが、鉄骨材がコンクリート面から剥き出しとなっている部材だったので必要箇所を保護材で包み、その上から養生シートを掛けるなどして、有害な錆びやコンクリートの白華を発生させないよう厳重に管理した。

9. おわりに

本建物は、新たな美術・芸術系大学にふさわしい創造性に富む建築計画を実現すると同時に、構造デザイン・施工計画・製作も新たな芸術のプラットフォームを創出すべく、革新的な建築構造技術にチャレンジしている。

そして、建築主、施工者（技術研究所）、製作者、設計監理者の協業により、無事 2022 年 1 月に竣工することができ、2022 年 4 月にキャンパスオープンを迎えた。

今回採用した SPC 格子壁は開放的な建築空間を生み出し、建築構造デザインの可能性を提案している。また、主架構を RC 造、さらに大スパン部分を鉄骨・PCa 造とすることで、特殊な敷地条件を活かした建築構造計画の可能性を示せたのではないだろうか。

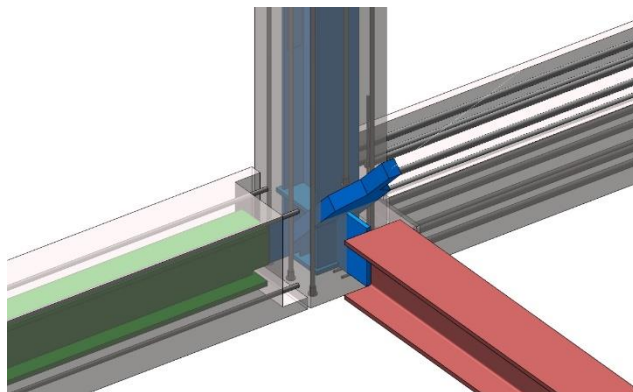


図-9 BIMによる納まり検討



写真-19 製作状況



写真-20 塗装状況