

立川市立第一小学校・学習館棟

「市松状PCaPCリブ付壁の構造デザイン」

小西泰孝建築構造設計 小西泰孝
鈴木健構造設計事務所 鈴木 健

平成27年3月に竣工した立川市立第一小学校の建替事業にあたり、PCa化されたリブ付壁を市松状に積み上げ、PC鋼棒の緊張力により圧着接合した、PCaPC耐力壁構面を計画した。設計で採用した圧着部のせん断耐力、リブ部および壁部の最大耐力の妥当性を確認するために2/3モデルによる静的加力実験を行った。ここでは、構造計画、実験概要および現場施工について報告する。

プレキャスト、プレストレス、圧着工法、PCaPC 壁、市松架構、外殻構造、ダウエル効果

1. はじめに

本建築は、小学校の全面建替えに合わせて、図書館や学童保育所・学習館などの施設を併設させ一体化した、学校と社会教育の複合施設である。校舎棟と学習館棟の2つの異なる棟で構成され、連絡ブリッジを介してひとつのつながりがある建築となっている(図-1)。いずれの棟も鉄筋コンクリート(以下、RC)造を主体とし、モジュールの導入、構造要素の均一化、施工の簡略化を図り、明快な構造計画とすることを旨とし、また、異なる2つの棟の構造は、構造種別・形式は異なるが、構造スケールの連続性を持たせるよう設計を行った。

構造部材の選定においては、躯体の高品質化、工期短縮、建築計画・建築表現における優位性を獲得するためにプレキャストプレストレストコンクリート(以下、PCaPC)工法を採用している。本稿では、主に学習館棟の外周壁に採用したPCaPCリブ付壁の力学特性と施工について報告する。

2. 建築概要

- ・名称：立川市立第一小学校
柴崎図書館・学童保育所・学習館
- ・主要用途：小学校・図書館・学童保育所・学習館
- ・建築面積：校舎棟 3462.67 m² 学習館棟 1232.38 m²
- ・延床面積：校舎棟 8612.59 m² 学習館棟 3228.47 m²
- ・階数：校舎棟 地上3階 地下1階
学習館棟 地上3階 地下1階
- ・構造：校舎棟 地上 RC造, 一部S造, SRC造
地下 RC造
学習館棟 地上 PCaPC造, S造
地下 RC造
- ・基礎形式：校舎棟 直接基礎(布基礎)
学習館棟 直接基礎(べた基礎)
- ・設計期間：2010年6月～2012年9月
- ・全体工期：2012年12月～2015年3月
- ・建築設計・監理：CAI/小嶋一浩+赤松佳珠子
- ・構造設計・監理：小西泰孝建築構造設計
- ・施工：大成建設株式会社
- ・PC工事：株式会社建研

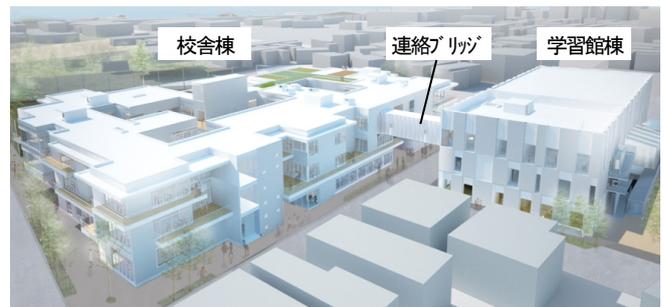


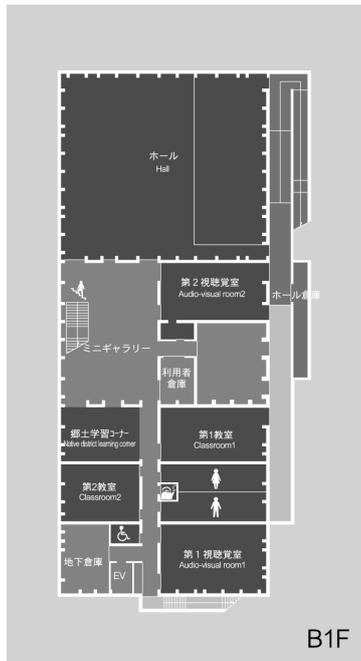
図-1 建物外観パース



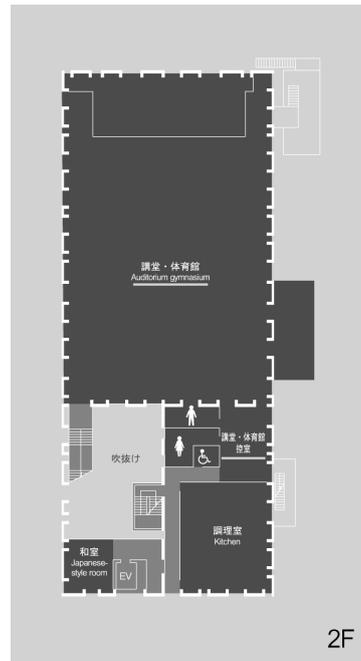
写真-1 建物外観(南面・西面)



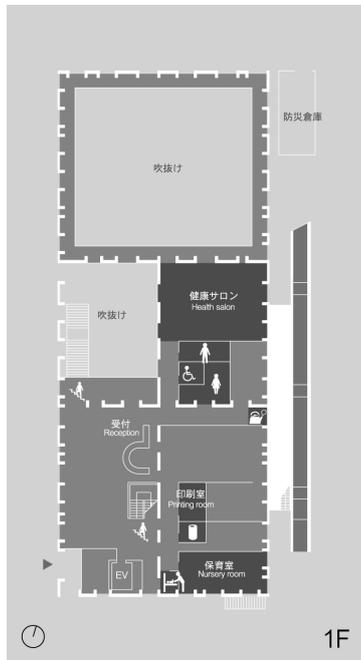
写真-2 建物外観(北面・東面)



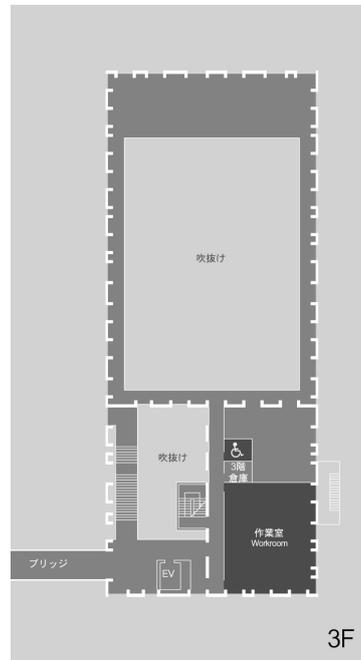
B1F



2F



1F



3F

図-2 学習館棟 模式平面図

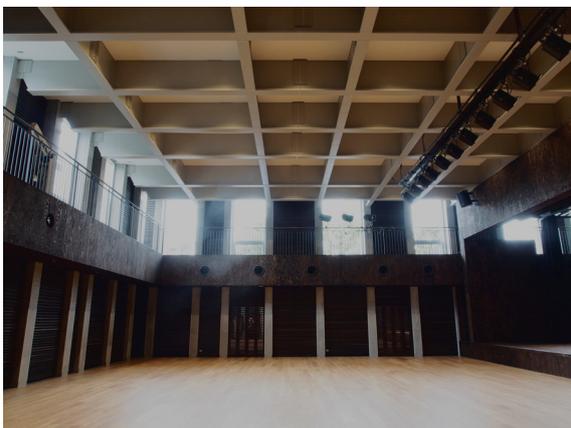


写真-3 建物内観 (多目的ホール)



写真-4 建物内観 (柴崎学習館ロビー)

3. 構造計画

3.1 上部構造

地上3階地下1階の学習館棟（図-2、写真-1、2）は、多目的ホール（写真-3）や講堂兼屋内運動場など、最大スパン20.7mとなる屋根・床架構が必要であり、また2層分の階高が必要な居室や3層吹抜けの階段ホール（写真-4）など、様々な階高が混在する建築となっている。そのような構成に対して、構造要素の種類を最小限に抑え、可能な限り構造計画を単純化するために、以下の三つの構造要素（図-3）を設定し、構造計画を行った。

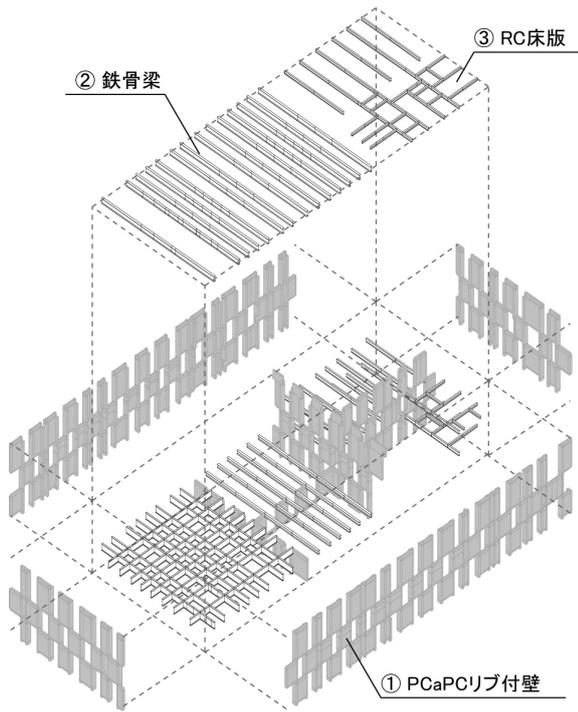


図-3 構造3要素

① PCaPC リブ付壁

建築の外壁デザインを特徴づける RC 壁面は、幅 1.2～3.3m、高さ 4.0～5.1m の PCa 化したコ型ユニットを市松状に3層積み上げ、PC 鋼棒の緊張力により圧着接合した PCaPC リブ付壁により構成される。

コ型ユニットは、幅 30cm×奥行 70cm のリブ部と厚さ 20～30cm の壁部からなり、リブ部をラップさせて積層することで、最大 13.5m の階高を確保することが可能である一方、外壁面は、幅 30cm のみが点接触的にラップする緊張感ある市松表現が可能となる。

PCaPC リブ付壁は、図-4 および図-5 に示すように建物外周にチューブ状に配置され、本構造の主要な耐震要素となる。

② 鉄骨梁

最大スパン 20.7m の床・屋根に対しては、PCaPC リブ付壁のリブピッチに合わせた 1.8～3.0m ピッチ

（図-6）の1方向 H 形鋼梁（H-400×200×8×13～BH-900×300×12×36）、講堂兼室内運動場の床では、2 方向 H 形鋼梁（BH-1,200×200×12×36）を用いている。PCaPC リブ付壁とは、リブに内包されたガゼットプレートを介してピン接合で緊結している。

③ RC 床版

講堂兼室内運動場の床は、直下階の多目的ホールに対する遮音性能を確保するために、厚さ 250mm の RC 床版を、それ以外の箇所は、厚さ 175mm の合成スラブ床版を採用している。

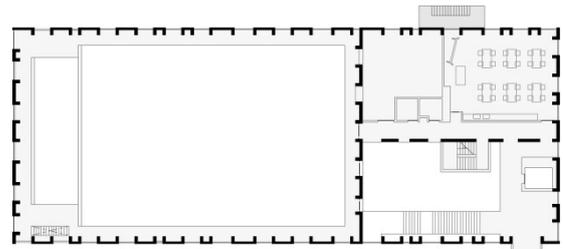


図-4 PCaPC リブ付壁 配置図（3階）

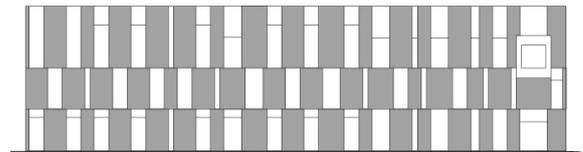


図-5 PCaPC リブ付壁 立面図（西面）

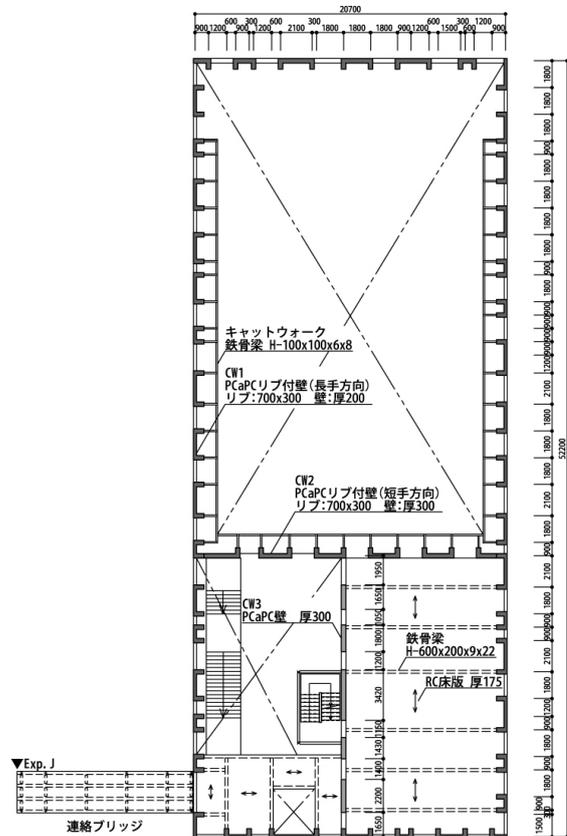


図-6 3階伏図

3.2 下部構造

下部構造は RC 造とし、基礎は GL-2.5m 以深の N 値 30 以上の砂礫層を支持地盤とする直接基礎としている。基礎形式は、建築面積全域を一律、厚さ 1m の耐圧版としている。

PCaPC リブ付壁と下部 RC 造の切替位置は、1 階床レベルを標準とし、リブ内の PC 鋼棒は地下 1 階床レベルの耐圧版に定着させている (図-7)。

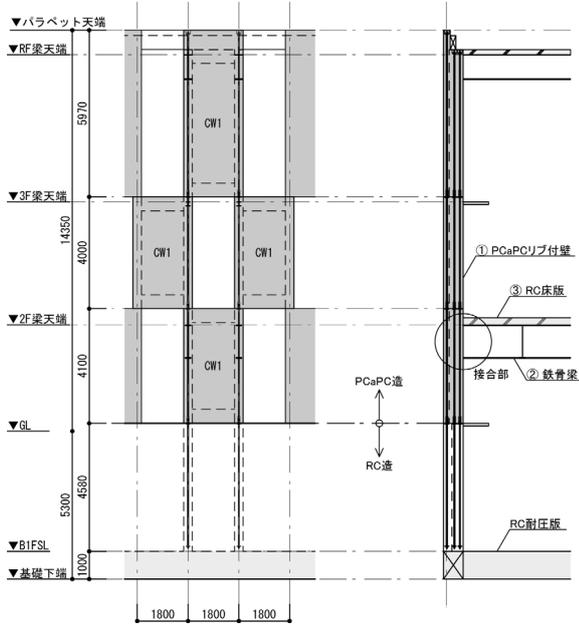


図-7 PCaPC リブ付壁 構面 軸組図

3.3 PCaPC リブ付壁断面形状

本建物は、前述の通り、主に外周部分の壁がコの字形をしており、その壁がリブ部分で重なり市松状に取り付くものとなっている。PCaPC リブ付壁の断面形状・配筋図の一例を図-8 に示す。リブ部分は、 $B \times D = 300 \times 700\text{mm}$ であり、上下階の壁版相互の接続は、PC 鋼棒による圧着接合と定着主筋 2-D19 の機械式継手による接合の併用となっている。

床および屋根部の梁は、鉄骨梁であり、リブ部分に打ち込みされたガセットプレートにより接合される。ガセットプレートの納まり図を図-9 に示す。リブの断面幅センター部分には PC 鋼棒が配置されているため、ガセットプレートのコンクリート打ち込みアンカー部分は、図示のような形状のものとした。

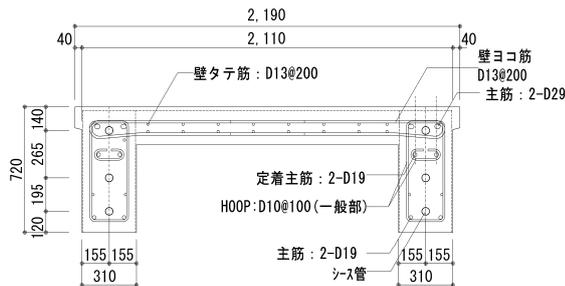


図-8 PCaPC リブ付壁断面図 (一例)

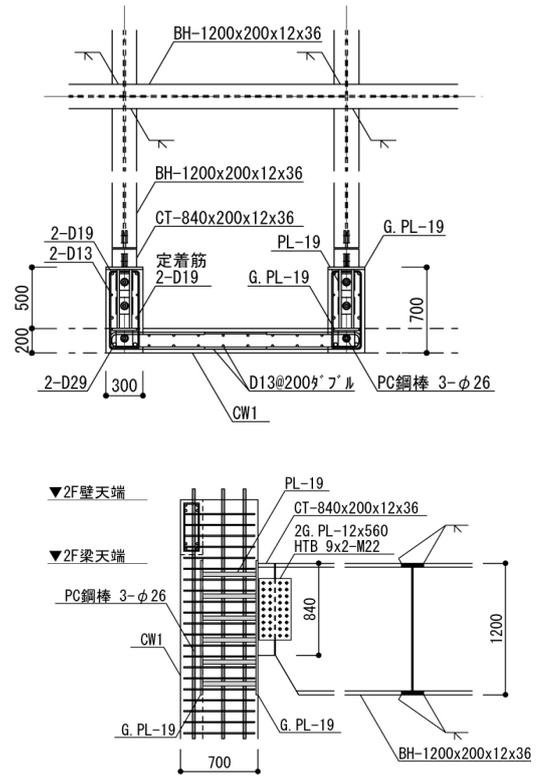


図-9 PCaPC リブ付壁-鉄骨梁 接合詳細

4. 接合部性能確認試験

4.1 実験概要

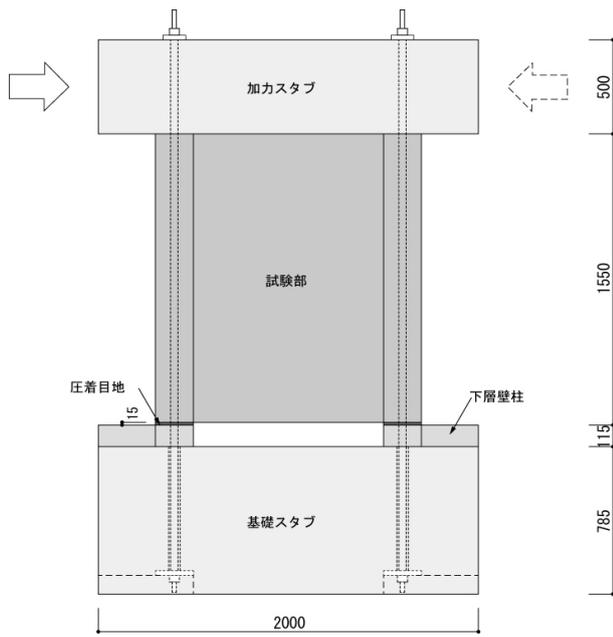
(1) 実験目的

設計式において、定着筋のダウエル効果を考慮して求めた PCaPC 部材の接合部耐力に対して、市松状に配置される実構造物での接合部性能を確認することを目的として、施工に先立ち、大成建設技術センターにおいて、性能確認試験を行った。試験において、PCaPC リブ付壁の破壊性状・最大耐力および接合部定着主筋のダウエル効果を主な確認項目とした。

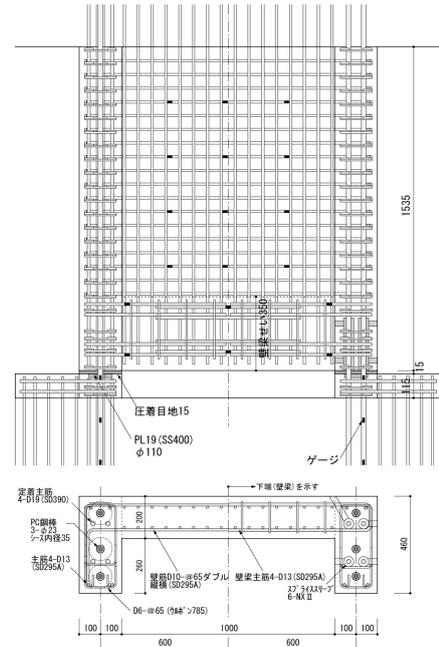
(2) 試験体

試験体は、リブ部 (縦リブ, 圧着接合) と壁部 (ウェブ, 自由辺) により構成される PCaPC リブ付壁およびこの壁版の下部両側に設置される PCaPC リブ付壁の接合部域を模擬した 2/3 スケール (幅×奥行×高さ=1400×460×1550) の 3 体とし、壁厚, PC 鋼棒の径 (導入緊張力 $0.85 \times 0.8 \times P_y$), 定着主筋 (径・強度) をパラメータとした (表-1, 図-10)。

各試験体とも緊張力の導入は PC 鋼棒 1 本あたり $0.8P_y$ の緊張力を与え、数日間放置してクリープを進行させた後、目標の緊張力に調整した。緊張作業は、まず、両側柱の中央 2 本の PC 鋼棒に緊張力を導入した後、対角方向の 2 本を一組として順次緊張力を導入した。すべての緊張作業が終了した後、シース管



(a) 試験体の形状寸法



(b) 試験体の配筋詳細

図-10 試験体概要

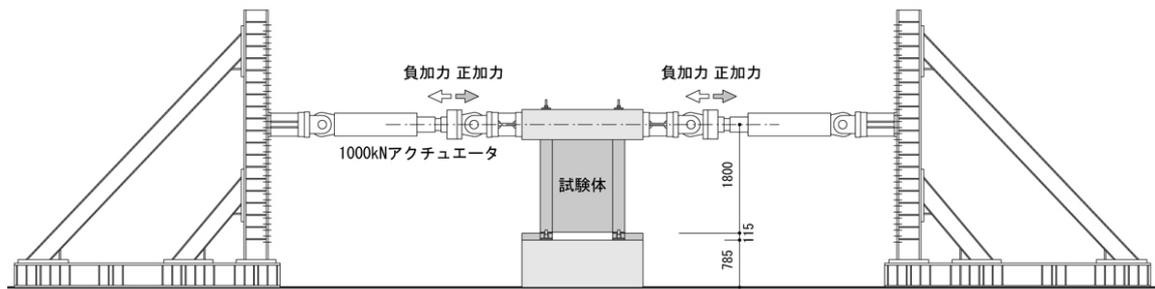


図-11 加力装置

内にグラウト材を注入した。コンクリートの実験時目標圧縮強度は 60N/mm^2 とした。実験時に材料試験から得られた圧縮強度は PCaPC 部 (試験部) で $67.3 \sim 69.2\text{N/mm}^2$, 下層部 PCaPC 部で $63.8 \sim 64.3\text{N/mm}^2$ であった。

表-1 試験体一覧

試験体名	壁厚 (mm)	PC 鋼棒 (B 種 1 号)	緊張力*1 (kN)	定着主筋	
				配筋量	強度
No.1	135	3-φ17	143	2-D13	SD295A
No.2	200	3-φ23	262	4-D16	SD345
No.3				4-D19	SD390

*1 : $0.85 \times 0.8 \times P_y$ (P_y : 降伏荷重, $\phi 17=211\text{kN}$, $\phi 23=386\text{kN}$)

*2 : コンクリートの実験時目標圧縮強度 $F_c=60\text{N/mm}^2$

(3) 荷重方法

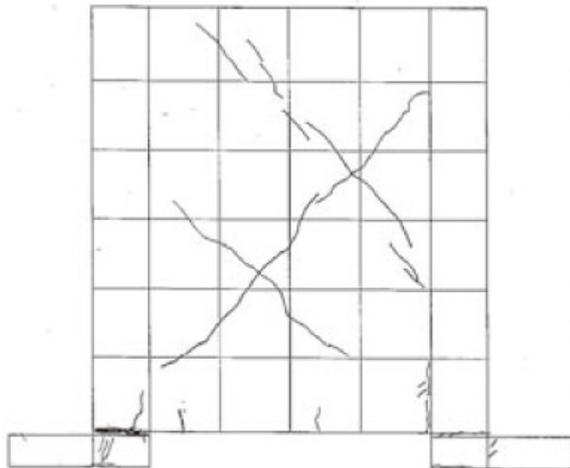
加力は試験体上部の加力スタブに対向する片側 2 台, 計 4 台のアクチュエータを用いた正負交番繰返し荷重で実施し, 片側 2 台のアクチュエータ変位が等しくなるように制御する (図-11)。

荷重履歴は, 部材角 $R=1/2000\text{rad}$ で 1 回, $1/1000\text{rad}$, $1/500\text{rad}$, $1/200\text{rad}$, $1/100\text{rad}$ で各々 2 回繰り返した後, 正側の $1/50\text{rad}$ まで荷重し, 最大耐力を確認した。計測は, アクチュエータ荷重, 加力スタブ中央位置での水平変位, 目地位置でのずれ (水平), 開き (鉛直) 変位, PC 鋼棒および定着主筋のひずみを主な測定項目とした。

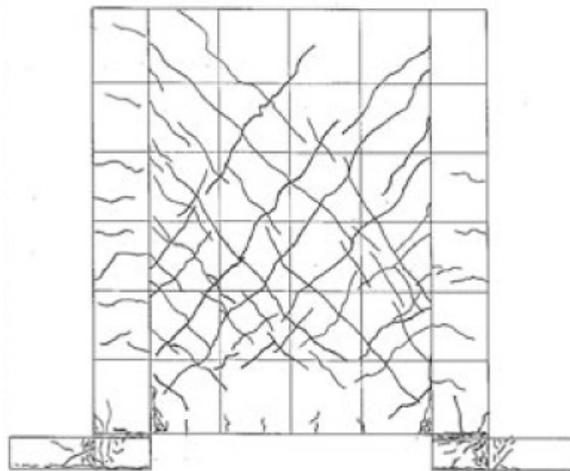
4.2 実験結果

(1) 破壊性状

図-12に No.1, No.3 における $R = \pm 1/100\text{rad}$ 載荷終了時でのひび割れ発生状況を示す。なお、図示していない No.2 のひび割れ発生状況は No.3 とほぼ同じであった。



(a) No.1



(b) No.3

図-12 ひび割れ発生状況 ($R = \pm 1/100\text{rad}$ 時)

表-2 に各試験体の実験結果一覧を示す。表中の Q はせん断力, R は部材角である。

コンクリートのひび割れ発生, 圧壊開始時期は実験時の目視により確認した。初ひび割れは, 壁部下端の壁梁部付け根の曲げひび割れであり, 第1サイクル ($R = 1/2000\text{rad}$) 載荷時に発生した。その後, 柱側面目地部での曲げひび割れ, 柱部での曲げひび割れ, 壁部でのせん断ひび割れの順に発生した。

コンクリートの圧壊開始は No.1 で約 $R = 1/150\text{rad}$ 時に, No.2, No.3 で約 $R = 1/200\text{rad}$ 時に圧縮側の柱脚部において確認された。

鋼材の降伏は, まず目地部近傍の定着主筋が No.1 で約 $R = 1/900\text{rad}$ 時に, No.2 で約 $R = 1/600\text{rad}$ 時に, No.3 で約 $R = 1/400\text{rad}$ 時に確認された。

PC 鋼棒の降伏は, No.1, No.2 で約 $R = 1/200\text{rad}$ 時に, No.3 で約 $R = 1/150\text{rad}$ で確認された。いずれの試験体とも約 $R = 1/100\text{rad}$ での柱脚部の圧壊により最大耐力となり, 3体の破壊経過はほぼ同じであった(写真-5)。

表-2 試験結果一覧

試験体 No	方向	初ひび割れ		定着主筋降伏		PC 鋼棒降伏		圧壊開始		最大耐力	
		Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)
1	正	194	1/3530	430	1/900	545	1/215	580	1/134	588	1/114
	負	-133	-1/7200	-420	-1/928	-507	-1/283	-559	-1/148	-580	-1/103
2	正	286	1/3210	791	1/619	1021	1/215	1037	1/199	1153	1/101
	負	-368	-1/2570	-800	-1/612	-967	-1/280	-1028	-1/200	-1142	-1/101
3	正	306	1/2950	928	1/390	1165	1/158	1145	1/200	1261	1/101
	負	-231	-1/4390	-925	-1/375	-1125	-1/209	-1131	-1/199	-1232	-1/100

以上より, 各試験体の破壊経過はほぼ同じであること, PC 鋼棒の径 (導入緊張力) および壁厚が大きくなると耐力が上昇すること, 定着主筋の径, 強度が大きくなると耐力が幾分上昇することを確認した。

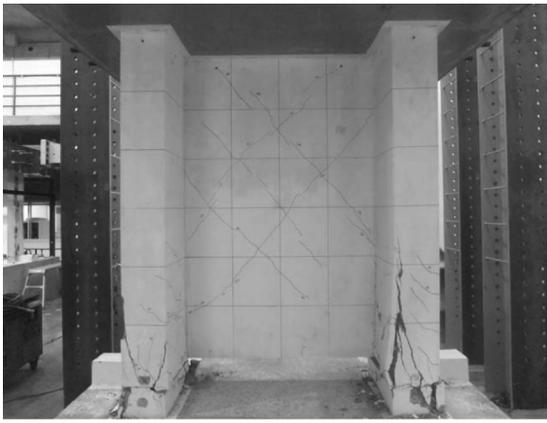
(2) せん断力 - 水平変位関係

No.1~No.3 のせん断力-水平変位関係を, 設計式で求められる耐力と比較して図-13(a)~(c) に示す。また, 図-13(c)中には, No.1, No.2 の包絡線も併せて示している。

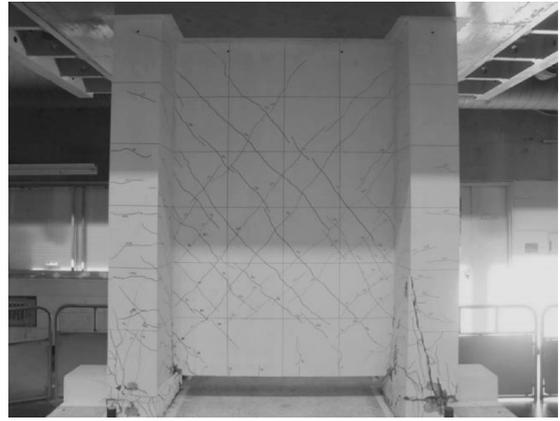
導入緊張力が小さく壁厚の薄い No.1 は, No.2 や No.3 と比較して初期剛性が幾分小さくなった。また, 導入緊張力が等しく, 定着主筋を D16(SD345)とした No.2 と, D19(SD390)とした No.3 の比較では, 水平変位が 5mm ($R = 1/360\text{rad}$) 付近まで両者はほぼ同様の履歴性状を示すものの, その後の変位段階において No.3 の耐力が大きくなった。

最大耐力は No.1 で 588kN ($R = 1/114\text{rad}$), No.2 で 1,153kN ($R = 1/101\text{rad}$), No.3 で 1,261kN ($R = 1/101\text{rad}$) となり, いずれの試験体とも設計で採用した耐力 (No.1 : 379kN, No.2 : 764 kN, No.3 : 892kN) を上回る結果であった。

また, 各試験体とも最大耐力以降での耐力低下は小さく, $R = 1/50\text{rad}$ 時の耐力は最大耐力の 8~9 割を保持し, 急激な耐力低下による脆性的な破壊モードは現れなかった。



(a) No.1



(b) No.3

写真-5 最終破壊状況

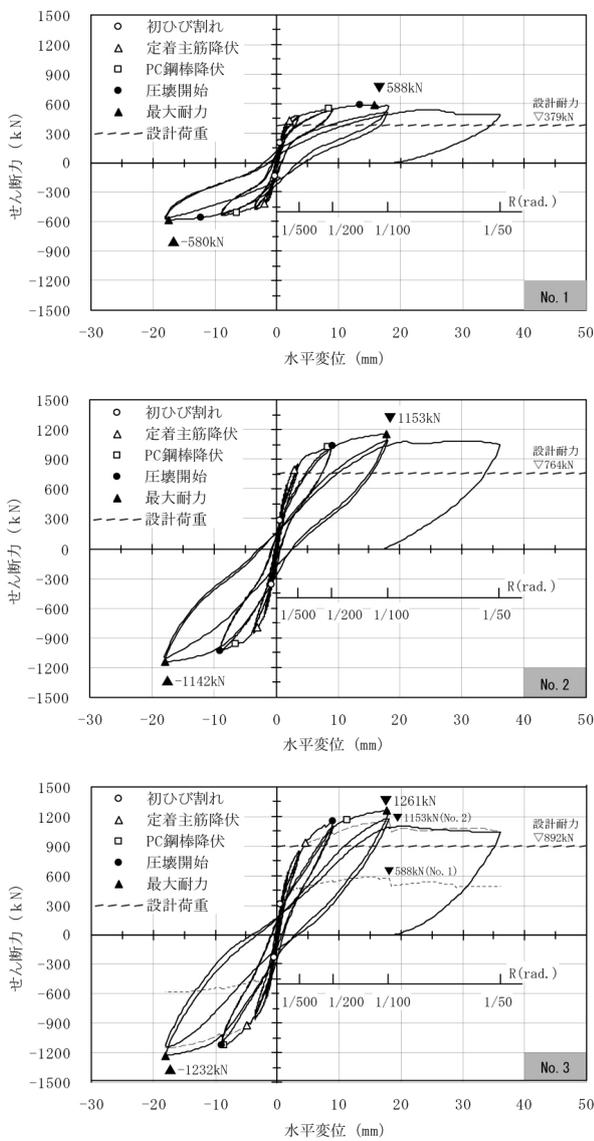
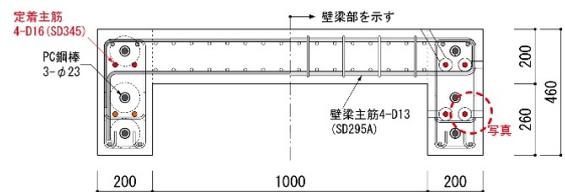


図-13 せん断力-水平変位関係



<試験体 No.2>

図-14 定着筋の変形状況

(3) 実験結果まとめ

実験によって、以下の結果を確認した

- コンクリートのひび割れ順序・破壊経過は、パラメータによらず同じ性状を示し、入力レベルに対する部材角も安全上支障のない水平剛性を確保していた。
- 最大耐力が設計耐力を上回り、設計で想定される耐力が確保された。
- 定着筋のダウエル効果を実験により確認できた。

5. 製造

5.1 モックアップの製造および確認

モックアップの外観写真を写真-6, 7に示す。本建物の外観は、うす塗り塗装でほぼコンクリート打ち放し仕上げであった。また、製作上では、PC 鋼棒用のシース管・鉄筋用の機械式継手、パネルゾーン部分にはガセットプレート、スラブ筋、グラウトホースおよびその他インサート類などが打ち込まれ、さらに、ガセットプレートがコンクリート打設面だけでなくベッド面にも取り付くため、型枠の継ぎ目が表面に表しになるなど、コンクリートの充填性や仕上がり状況に懸念があった。そのため、本製造に先立ち、モックアップを製作した。

モックアップは、基礎部と壁版部から構成されており、スケールは実物大で壁版幅は、構造部分で 1500 mm、高さは階高の約半分で 1900 mmとした。

モックアップの製作により、ガセットプレートとコンクリートとに微少なすきまが生じることがわかったため、本製造では、ガセットプレートに空気孔を設けることとした。また、意匠上のサッシュ取り合い部の形状、コーナーガードの納まりやコンクリートの仕上がり状況なども確認した。



写真-6 モックアップ外観（前面）



写真-7 モックアップ外観（背面）

5.2 本製造

本工事は、工区割りを3工区とし、A工区から順に3階までを架設し、建て逃げしながらC工区まで架設することから、部材を工区毎に製造した。部材数は、A工区で80ピース、B工区で59ピース、C工区で55ピースであった。型枠は鋼製型枠とし、型枠数は6台とした。部材製造状況を写真-8～10に示す。

部材製造に当たり、今回は市松状に部材が取り付くことから、特に上下階を接続するPC 鋼棒用シース管位置の精度確保が重要であった。そのため、シース管は図面位置に対して±3mmの許容差で管理した。また、鉄骨ガセットプレートとコンクリートとのすき間が生じないようにコンクリート打設は入念に行った。

部材製造期間は、平成24年10月末～平成25年3月末までの5ヶ月間であった。



写真-8 部材製造状況（型枠全景）



写真-9 リブ部配筋状況



写真-10 鉄骨ガセットプレート部配筋状況

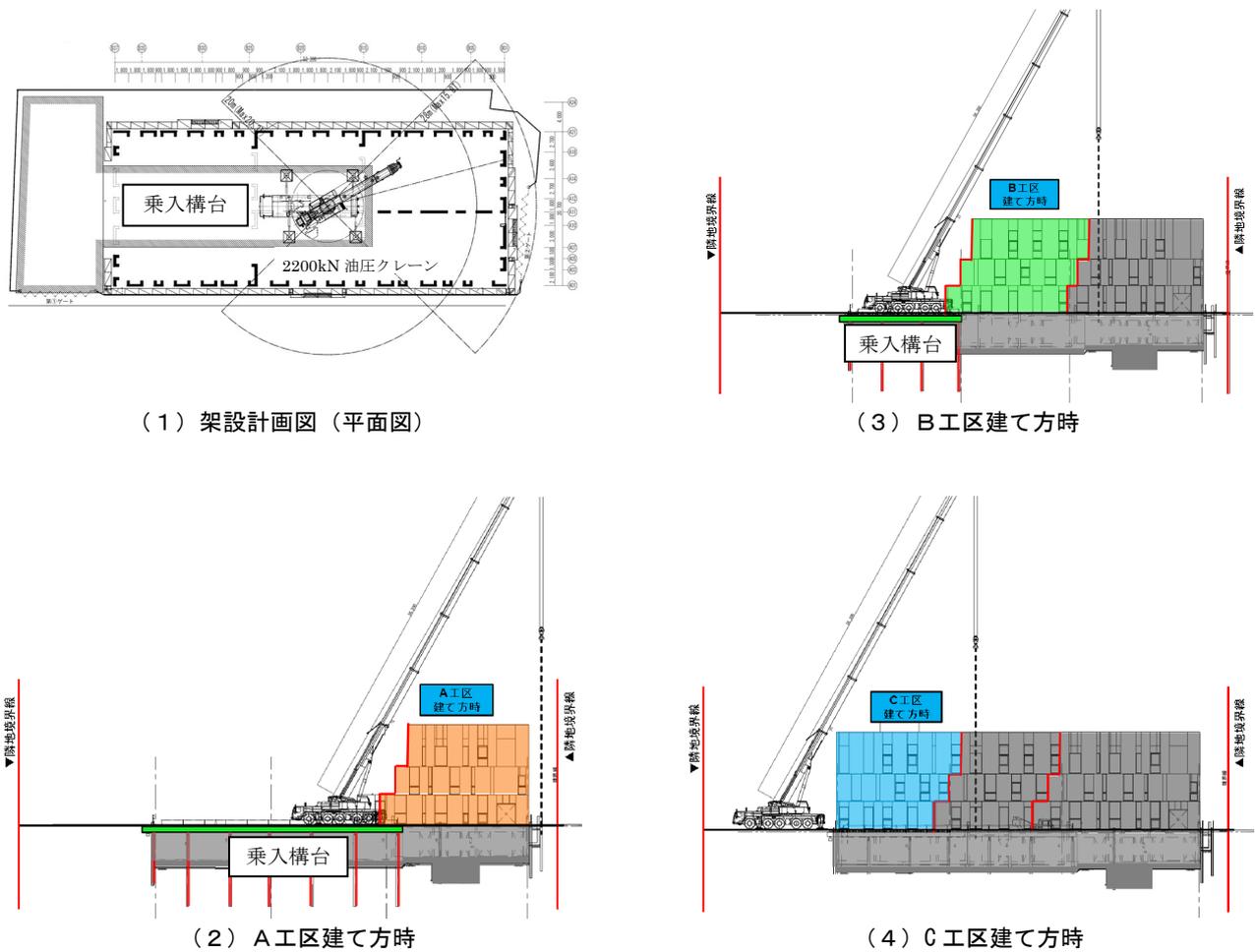


図-15 部材架設計画

6. 施工

6.1 架設計画

架設計画図を図-15に示す。敷地状況からクレーンを設置するスペースが北側にしかなく、組立解体が可能なクレーンを設定して建て方計画を行った。

建方は、建物全体をA～C工区の3工区に分け、南北方向に設けた乗り入れ構台に2200kN油圧クレーンを設置し、建て逃げする計画とした。PCaPCリブ付壁は市松状に配置されているため、立面的には階段状の工区境となる。

また、B1階躯体は、外周部を先行して施工し、乗り入れ構台が干渉する部分は、乗り入れ構台解体後に施工する計画とした。

6.2 PC部材の架設

PC工事のフローチャートを図-16に示す。RC造の地下躯体の耐圧版部および壁部にPC鋼棒をセットし、それぞれコンクリート打設前にテンプレートにてPC鋼棒位置を調整した。地下躯体の内部の壁も一部PCa製品があり、PC鋼棒緊張後に1Fスラブコンクリートを打設した。1階壁架設以降は、工区ごとに順次繰り返すのである。

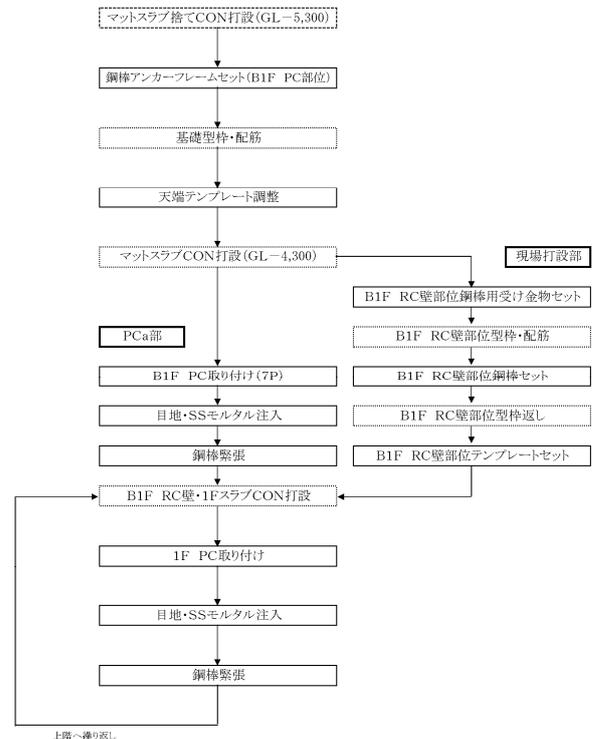


図-16 PC工事フローチャート

写真-11～18に PCaPC リブ付壁の建方状況を示す。建て入れはトランシットにより確認し、PC サポートおよび PC 鋼棒の締め込みにて調整した。PCaPC リブ付壁の重量は、6ton から最大で 14.7ton であった。



写真-11 PCaPC リブ付壁建方状況（1）



写真-15 PCaPC リブ付壁建方状況（5）



写真-12 PCaPC リブ付壁建方状況（2）



写真-16 PCaPC リブ付壁建方状況（6）



写真-13 PCaPC リブ付壁建方状況（3）



写真-17 PCaPC リブ付壁設置状況（室内側）



写真-14 PCaPC リブ付壁建方状況（4）

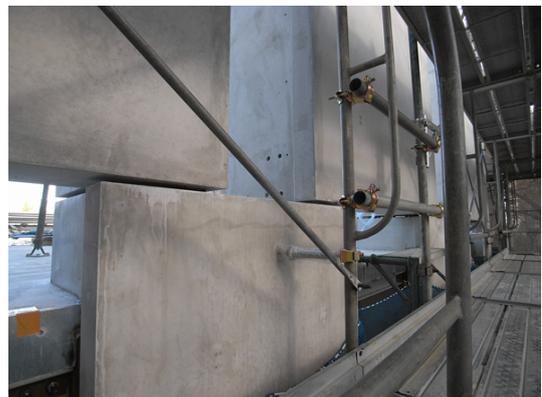


写真-18 PCaPC リブ付壁設置状況（外部側）

6.3 PC 緊張工事

PCaPC リブ付壁のリブ部に配置された PC 鋼棒の緊張状況を写真-19 に示す。PC 鋼棒の緊張は、目地部及び鉄筋のモルタル充填式機械式継手のモルタルを充填後、モルタルの強度が $30\text{N}/\text{mm}^2$ 以上発現したことを確認して行った。PC 鋼棒の緊張力は $395\text{kN}/\text{本}$ で、緊張による壁部の変形が少なく、壁両側のリブに均等にプレストレスが導入されるよう 2 台のジャッキを同時緊張する方法とした (図-17)。



写真-19 緊張状況



図-17 緊張順序

6.4 鉄骨梁取付け

一般部の鉄骨梁は 3 分割として設計されているため、鉄骨梁を構台上で地組をして、架設を行った。鉄骨梁の地組み状況を写真-20 に示す。PCaPC リブ付壁の建て入れ精度、ガセットプレートの埋込み精度、鉄骨の製作精度、地組時の鉄骨長さ精度などの累加による位置調整を考慮し、鉄骨梁は、PCaPC リブ付壁の PC 鋼棒緊張前に取り付け、支保工で一時的に仮受けし、PCaPC 壁の建て入れを確認してから壁版に打ち込んだガセットプレートとボルト接合する手順とした。写真-21～24 に鉄骨梁架設状況を示す。PCaPC 壁版の建て入れ精度、製造時のガセットプレートの埋め込み精度を $\pm 3\text{mm}$ で管理したことにより、現場での取り付けはおおむね順調であった。



写真-20 鉄骨梁地組み状況



写真-21 鉄骨梁建方状況(1)



写真-22 鉄骨梁建方状況(2)



写真-23 鉄骨梁建方状況(3)

多目的ホール天井の2階床梁は、鉄骨の格子梁となっており、X・Y方向ともに鉄骨梁を支保工で仮受けし、鉄骨梁-PC壁版および鉄骨梁-鉄骨梁相互ともに接合後にジャッキダウンを行った。写真-24に格子梁の架設状況を示す。



写真-24 鉄骨梁建方状況(4)

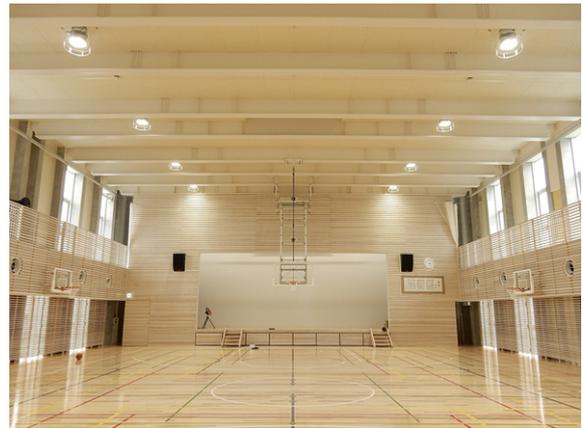


写真-27 小学校講堂内観(1)

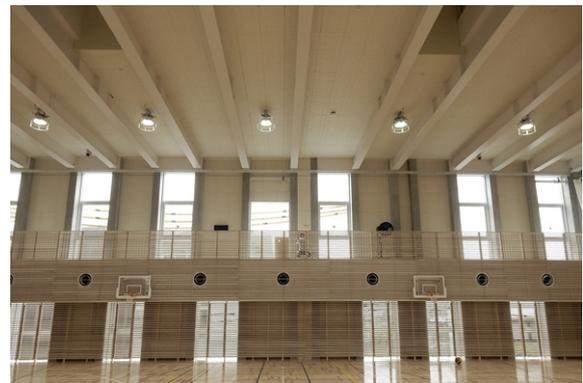


写真-28 小学校講堂内観(2)



写真-25 多目的ホール内観



写真-26 PCaPC リブ付壁-鉄骨梁 接合部

7. おわりに

本構造の計画・設計・実験・施工においては、多くの方々にご協力を頂いた。特に計画・設計の初期段階で、設計者と施工者（ファブリケーター）がコラボレートし、製作性と施工性を踏まえた設計を行い、着工後には、さらに現場のさまざまな実情に応じて修正を行うことで、構造のみならず建築全体の健全性を向上させることができることを強く実感した。

全ての方々のお名前を記すことはできないが、ここにご協力頂いた多くの方々に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 小西泰孝, 鈴木健, 森山毅子彦, 稲田博文, 竹崎真一: 圧着接合された PCa 壁柱の耐力確認実験 その 1, 2 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.777~780, 2014.
- 2) 小西泰孝, 鈴木健: architectural design 立川市立第一小学校 ; 柴崎図書館・学童保育所・学習館, 建築技術, pp.32~35, 2015.07
- 3) 小西泰孝, 鈴木健, 森山毅子彦, 妹尾正和: 工事報告 市松状 PCaPC リブ付壁の力学特性と施工 ; 立川市立第一小学校の構造計画 (建築特集), プレストレストコンクリート工学会誌, 57, pp.42-49, 2015.