



## 統合ファサードシステム

岩田 衛\* 大熊 武司\* 岩本 静男\*\*

### Integrated Façade System

Mamoru IWATA\* Takeshi OHKUMA\* Shizuo IWAMOTO\*\*

#### 1. はじめに

大都市への一極集中により、都市景観問題、防災・耐震問題、環境エネルギー問題が顕在化している。ここでは、これらの問題を効果的に改善するために、新たに技術開発する統合ファサードを活用することで、都市の大部分を構成する既存建物の改修に利用できる問題解決手法を提示する。

建物の外壁面を構成するファサードは、都市景観を形成する重要な要素の一つであるとともに、建物内部を外的環境から保護し、建築物の消費エネルギー効率に影響を与える。これに耐震性能の要素を加え、ファサードに関するエンジニアリングを統合することにより、都市が抱える問題を解決する一つの具体的な方策が可能となる(図1)。

ファサードエンジニアリングはヨーロッパを中心に近年発達してきたが、気候が異なり、かつ地震国である我国に適用する上では、コンセプトの改良と変更が必要である。また、ファサードエンジニアリングは意匠・構造・環境の各分野で個々に行われてきているが、専門分野を横断する総合的な取り組みが求められる。

技術開発にあたっては、まず、意匠・構造・環境の3軸をファサードの評価軸として、統合ファサードシステムの条件を探り、具体的な構法を着想し、その性能を解析した後、試作実験を通じて実現性を考察する。更に、プロトタイプの実現を通じて検証を行い、総合的評価から得られた性能評価をもとに、統合ファサードシステムの構築を図る(図2)。

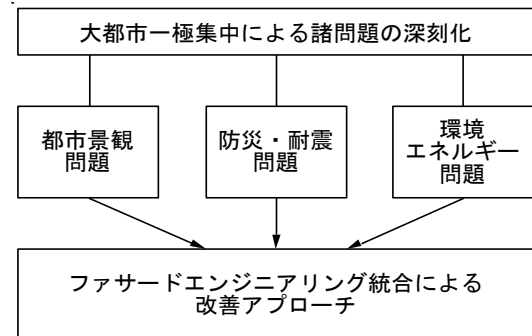


図1 ファサードエンジニアリングの統合

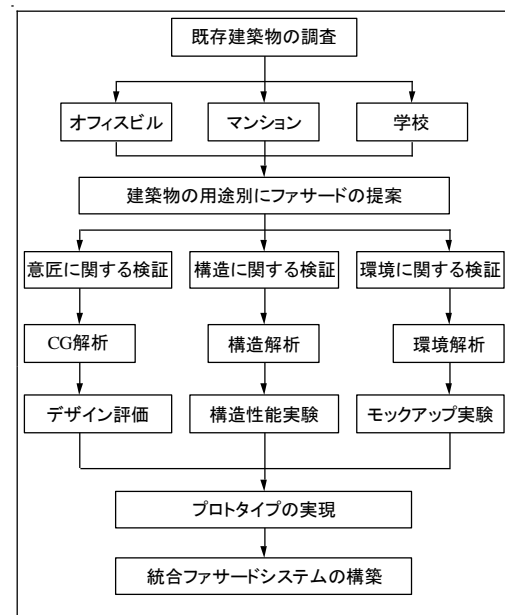


図2 技術開発フロー

\*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture and Building Eng.

\*\*准教授 建築学科

Associate Professor, Dept. of Architecture and Building Eng.

1.1 技術開発の計画

技術開発の項目を次に示す。

- (1) 既存不適格建物のファサード調査
- (2) 統合ファサードの具体例・発案
- (3) CG解析による意匠・景観の評価
- (4) 構造解析による構造性能の評価
- (5) 環境解析による環境性能の評価
- (6) 構造実験による耐震・制振性能・安全性の評価
- (7) モックアップ実験による施工性・環境性能の評価
- (8) プロトタイプ設計・施工による実用性の評価
- (9) 統合ファサードシステムの構築

1.2 技術開発を実施する構成員

代表者(岩田)のテクノロジーマネジメントのもとに、次の7つの構成員が共同開発する(図3)。

- (1) 神奈川大学工学部建築学科(岩田研究室、大熊研究室、岩本研究室)
- (2) Arup Japan
- (3) 株式会社三菱地所設計
- (4) 株式会社久米設計
- (5) 株式会社巴コーポレーション
- (6) YKK AP 株式会社
- (7) トステム株式会社

統合ファサードを用いることにより、都市景観、防災・耐震、環境エネルギー負荷の全ての性能を向上させることができる。既存建物の改修に際しても、既存外壁を内壁として利用し、新たなファサードを付加するだけなので、居ながら改修に容易に対応できる。従来のファサードにおける耐震性とは、地震時に生じる変形に追従し、機能を維持するのみの受動的なものであったが、統合ファサードでは、自らを耐震要素として、地震力を負担・吸収する役割を担う。

2.2 技術開発の実現可能性

意匠と環境の2つの専門分野を統合したファサードエンジニアリングはヨーロッパを中心に近年活発に行われている。構成員である Arup Japan の親会社 Arup (本社 London) はそのリーダー的存在であり、Arup Japan 自身もファサードエンジニアリングの専門部門を有している。構成員である YKK AP とトステムはメーカーとして従来型ファサードについて既に多くの実績をあげている。また、耐震・制振技術に関しては、代表者(岩田)は損傷制御構造の技術開発で2003年に日本建築学会賞(技術)を、和田章博士(東京工業大学教授)と川合廣樹博士(RSI代表、当時日建設計室長)と共に取得し、この分野を専門としている。巴コーポレーションは耐震補強・制振技術に関する専門部門を有している。このような専門技術集団がまとまれば、統合ファサードシステムの実現可能性は極めて高いものとなる。

2.3 実用化・市場化の見通し

構成員である三菱地所設計と久米設計は日本有数の総合建築設計事務所であり、多くの建築主に対して本技術開発成果をアピールする機会があり、建築主のニーズにあわせてプロジェクトへ適用できる。ファサードエンジニアリング部門を有する Arup Japan は建築主だけでなく建築家に対しても本成果を積極的に提案し、実用化できる。また、メーカーである YKK AP とトステムには従来型ファサードのプロジェクトが、巴コーポレーションには耐震補強・制振技術のプロジェクトがよく持ちかけられている。これらのプロジェクトに対して、統合ファサードの適用を図ることができる。これら幾つかのプロジェクトの設計・施工を通じて実用性の評価を行い、プロトタイプモデルを設定する。さらに、プロトタイプを検証し、統合ファサードシステムの構築を図る。将来、統合ファサードシステムの技術を、他の設計事務所やメーカーに提供し、幅広く普及させることも考えられる。

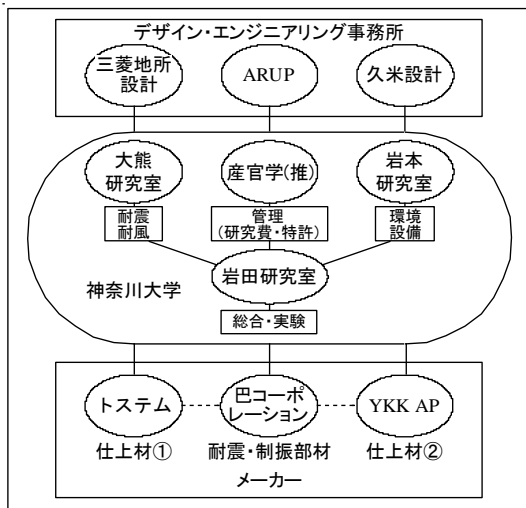


図3 構成員

2. 技術開発のポイント

2.1 技術革新性

意匠・構造・環境の3つの専門分野を横断する総合技術となる「統合ファサードシステム」を技術開発する。

### 3. デザイングループの展開

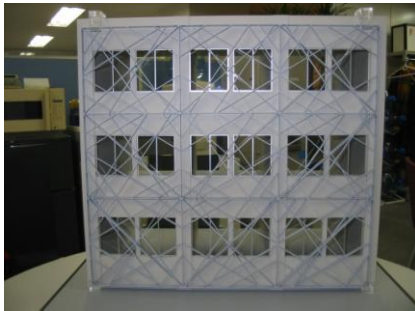
3つ（A, B, C）のデザイングループの、1年目の成果および今後の展開を羅列する。メーカーは各グループに共通して関与している。

#### 3.1 グループA

グループAは、統合ファサードに関して考慮すべき、次の7つの指標をまとめた。

(1) 安全性、(2) 光環境、(3) 温熱環境、(4) エコフレンドリー、(5) 経済性、(6) 意匠性、(7) 施工性・メンテナンス性

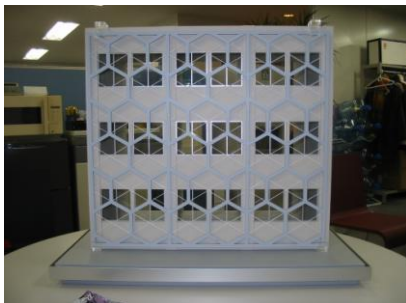
更に、提案する統合ファサードの構成において、魅力的な形状であり、かつ外観と兼用できる構造システム案が提案された（図4）。



a) バウンド案



b) アーガイル案



c) ハニカム案

図4 構造システム案

現在は、上記に示す構造システム案を基に、模型および解析スタディ結果を反映した統合ファサードの模型の製作を行い、7つの指標を反映した「統合ファサード評価方法の構築」に向けて検討を行っている。

#### 3.2 グループB

グループBは、想定した新築建物と既存建物改修の両方に適応できる、耐震・環境負荷低減を考慮したファサードを検討している。

新築建物については、全体模型と部分詳細模型を製作し、構造検討を行っている。

既存建物改修については、統合ファサードを用いた耐震補強計画をつくり、補強イメージパースに基づいて補強計画の妥当性について確認を行っている（図5）。

また、統合ファサードに組み込む、超軽量の制振ブレースの検討を行い、実大実験による構造性能の確認を行う。



a) 補強前



b) 補強後

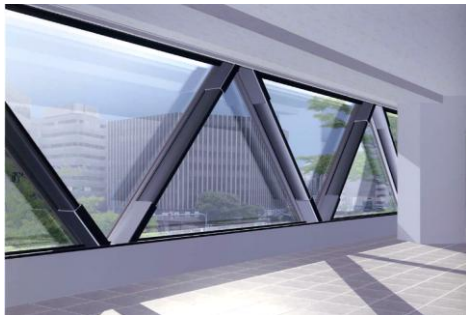
図5 学校の耐震補強イメージ

### 3.3 グループC

グループCは、提案する統合ファサードの構造システムとして、できる限り目立たず、構造を感じさせないものを検討している。構造システム、特に接合部の意匠に関して、CG解析による評価を踏まえ、モックアップを製作した(図6)。また、提案する統合ファサード全体の環境負荷の検討も行っている。



a) 外観CG



b) 内観CG



c) モックアップ

図6 提案ファサードの例

### 4. モックアップ実験

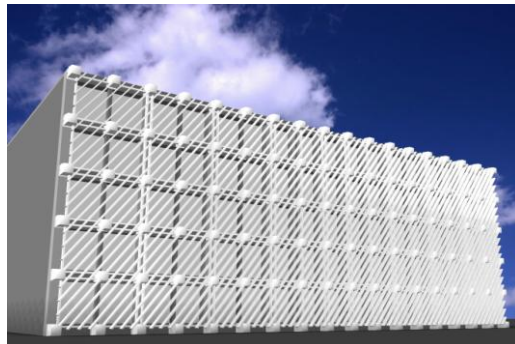
RC造建物(神奈川大学8号館)の1スパンを取り出し、その寸法を基に、統合ファサードのモックアップ実験を行った。

#### 4.1 実験計画

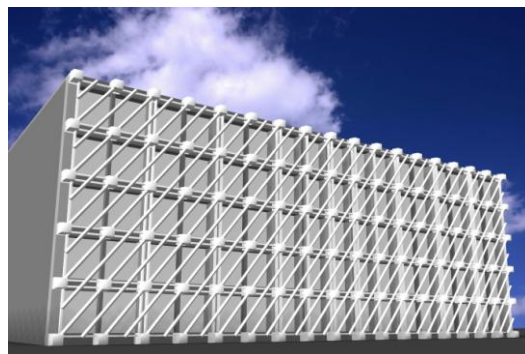
統合ファサードとして、建物東西面の環境性能向上に効果が期待できる斜行配置とした、RタイプとCタイプの2種類を考える。Rタイプは断面が長方形で、ルーバーの平面が正面を向いている(図7a))。Cタイプは断面が正方形で、ルーバーの角部が正面を向いている(図7b))。

モックアップの模式図を図8に、RタイプとCタイプの外観を図9に示す。建物のペリメータ空間を想定し、試験体の背後に幅4500mm×奥行5400mmの内部空間(暗室)を設置する。

モックアップに対して、照度計、魚眼レンズによる昼光率の測定を行う。測定点は机上面850mmで、窓際から900mm、2700mm、4500mmの3点とし、ルーバーなし、Rタイプ、Cタイプの3種類の状態について測定する。



a) Rタイプ



b) Cタイプ

図7 斜行配置ファサード

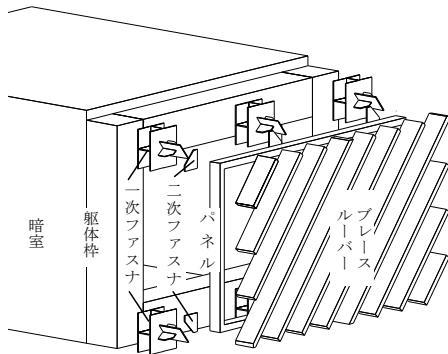


図8 モックアップ模式図

#### 4.2 実験結果

昼光率の測定結果を図10に示す。窓際から900mmでは、両タイプはルーバーなしに比べて、低くなっているが、窓際から4500mmでは、両タイプともにルーバーなしよりも昼光率は高く、特にCタイプとルーバーなしの比較では、1%近くの差がある。

既存建物に新たにルーバーを設置する場合、ルーバーによって室内が暗くなる印象がある。しかし、今回の結果によると、窓際に近いとルーバーの遮蔽効果で昼光率は低くなるが、窓際から離れるにつれルーバーが光を反射し、拡散させて室内の奥まで明るくしている。ペリメータ空間における光環境のパッシブデザインの可能性を広げることができると思う。

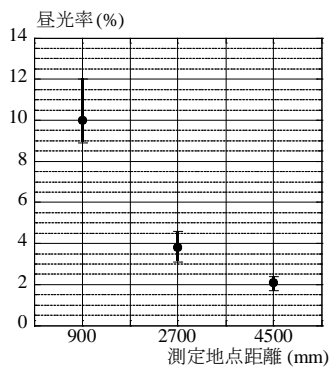


a) Rタイプ

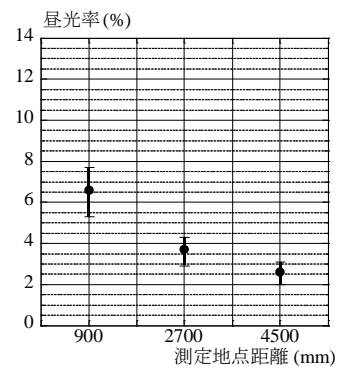


b) Cタイプ

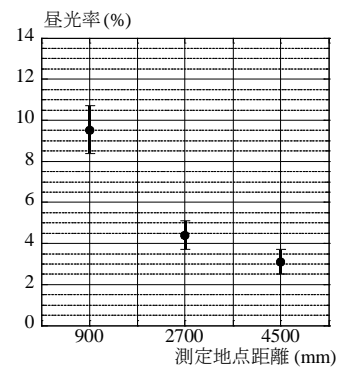
図9 実験用モックアップ



a) ルーバーなし



b) Rタイプ



c) Cタイプ

図10 昼光率の測定結果

### 5. 斜行配置座屈拘束ブレースによる耐震補強

斜行配置ファサードをRC造建物（神奈川県8号館）の耐震補強工法として適用した場合について検討した。

#### 5.1 構造システム

構造要素として引張力と圧縮力で同等の性能を有する座屈拘束ブレースを用いる。ルーバーでカバーをした座屈拘束ブレースは、必要な場所に適宜、1本置き、あるいは2本置きに斜行配置させる（図11）。このことによって、構造要素を意識せず、従来の耐震補強工法にない意匠的に新しい耐震補強が可能となる。構造システムは、H形鋼柱間に曲げ剛性と振れ剛性の高い角型鋼管梁を架け渡し、外面に斜行配置座屈拘束ブレースを偏心させて角型鋼管梁に取り付けたものである。

斜行配置座屈拘束ブレースを耐震補強工法とする場合は、外付け枠付ブレース補強工法となる。この補強工法を採用する場合、既存建物の主架構に振れや撓み変形を生じさせにくい接合部を採用する必要があり、補強部分においても偏心させて連続斜行配置する座屈拘束ブレースを健全に機能させなければならない。

図12に示すような接合部とすることで、偏心して接合する座屈拘束ブレースの荷重により外付け枠に振れや撓み変形が生じて、既存建物の主架構に生じる振れや撓み変形を小さくできると考える。

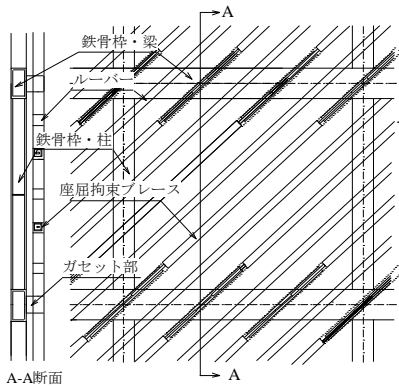


図11 構造システム

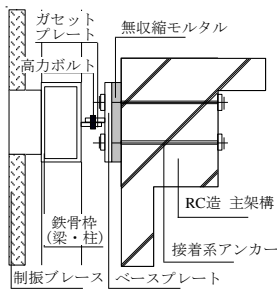


図12 接合部

#### 5.2 実験と解析結果

偏心させて連続斜行配置した座屈拘束ブレースが、外付け枠に与える影響について、構造実験と解析により確認する。

図13に建物の補強前と補強後を示す。図13b)に示す補強後の建物の2階部分を1層1スパン抜き出し1/2.5に縮小したものを試験体とする。試験体のセットアップと座屈拘束ブレース番号を図14に示し、試験体詳細を表1に示す。

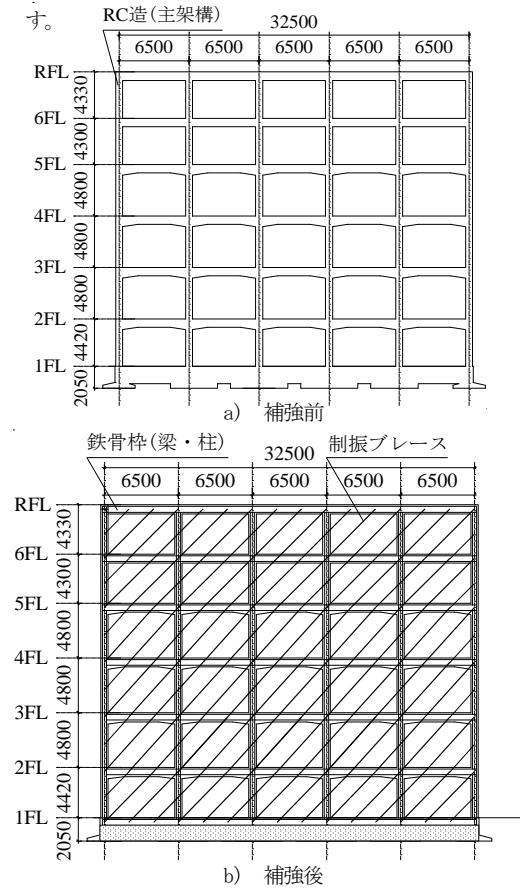


図13 想定建物

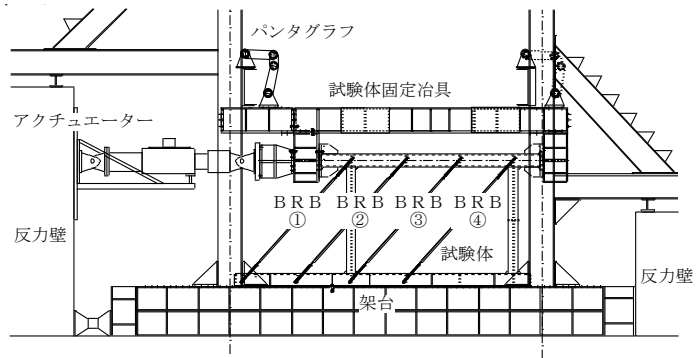


図14 試験体セットアップ

表1 試験体詳細

試験体名	部材	部材パラメータ	$I_x$	$J_T$	パラメータ詳細
			( $\text{cm}^4$ )	( $\text{cm}^4$ )	
Rtype1試験体	梁	□-200×100×12×12	3316	2380	図13に示す想定建物の2階部分を1層1スパン抜き出し 1/2.5に縮小した試験体
	柱	H-100×150×6×12	-	-	
Rtype2試験体	梁	□-200×50×9×9	1786	476	Rtype1の角型鋼管梁の断面2次モーメント $I_x$ の約1/2となる 断面2次モーメントをもつ角型鋼管梁断面を設定した試験体
	柱	H-50×150×6×12	-	-	
Htype1試験体	梁	H-200×100×16×16	3443	50	Rtype1とほぼ同等な断面2次モーメント $I_x$ となる 断面2次モーメントをもつH形鋼梁断面を設定
	柱	H-100×100×9×16	-	-	

※ $I_x$ :断面2次モーメント  $J_T$ :振り定数

試験体の中でRtype1とRtype2は、梁に角型鋼管を用いており、柱に用いるH形鋼は荷重方向に弱軸配置とする。Rtype1に比べてRtype2の断面性能は低い。Htype1は、梁にH形鋼を用いており、柱に用いるH形鋼は荷重方向に強軸配置とする。柱の設定にあたっては、各試験体の耐力がほぼ一致する断面を用いている。座屈拘束ブレースは、すべて梁に偏心させて接合している。各試験体の実験結果を図15に示す。各試験体とも急激な耐力低下せず、安定した履歴特性を示した。

実験結果を踏まえて解析モデルを設定し、履歴曲線を確認した。Rtype1とRtype2ともに、設計時に期待したような健全な挙動が確認できた。しかし、Htype1試験体では、座屈拘束ブレース(BRB)②、③が層間変形角1/150以降で降伏していることが分かった(図16)。これは、振り剛性や曲げ剛性の低い梁に対し、座屈拘束ブレース(BRB)②、③により生じる鉛直成分の荷重によって梁に大きな振れや撓み変形を起こしたことが原因である。H形鋼を外付け枠の梁として採用すると、RC造建物を炭素繊維等で補強して柱を曲げ崩壊型(許容変形角1/150)にしたとしても、目標とする補強耐力に達する前に、柱に損傷を与えてしまう可能性があると考えられる。

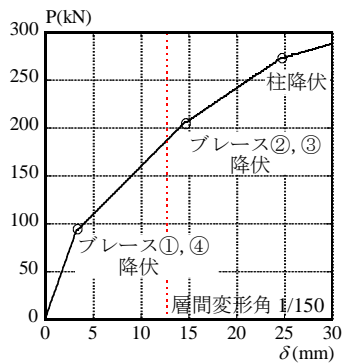
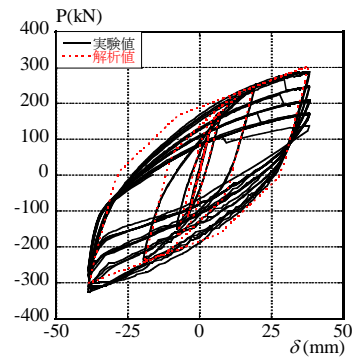
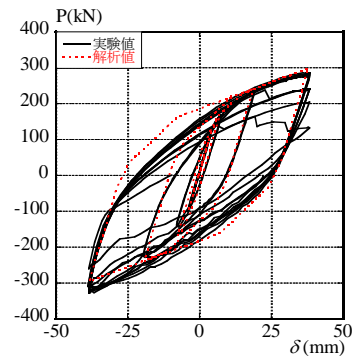


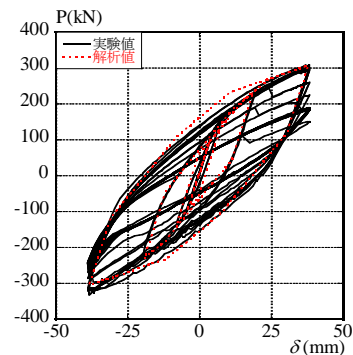
図16 荷重-変位関係



a) Rtype1 試験体



b) Rtype2 試験体



c) Htype1 試験体

図15 実験と解析の結果

## 6. RC 躯体と鉄骨の接合部実験

耐震補強を想定する RC 造建物との接合部を模した実験を行った。

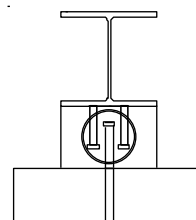
### 6.1 実験計画

RC 造建物を統合ファサードで耐震補強する際、RC 躯体と鉄骨をつなげる接合部は、大切な要素の一つである。RC 躯体と鉄骨の接合部は、一般的には強度型の設計であるため、最大耐力を対象としたものが大半である。座屈拘束ブレースを補強材として用いる場合も、多くは耐震ブレースとして利用されている。しかし、座屈拘束ブレースを制振部材として用いて耐震補強する場合、RC 躯体と座屈拘束ブレースの接合部は、多くの繰り返し荷重を受けても劣化しないことが重要である。

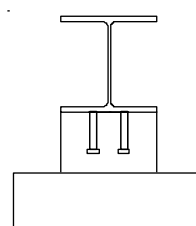
本実験では、補強を想定する RC 造建物と座屈拘束ブレースの枠材との接合部を模したものを試験体として製作し、これに繰り返し荷重を与えた場合にどのような履歴特性が得られるのかを確認する。試験体の概要を表 2 に、形状を図 17 に示す。実験状況を図 18 に示す。



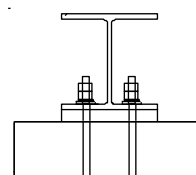
図 18 実験状況



a) No1 試験体



b) No2 試験体



c) No3 試験体

図 17 試験体形状

表 2 試験体概要

試験体名	試験体概要
No1 試験体	鉄骨枠材を用いた耐震補強に使用する標準的接合ディテールを有する試験体
No2 試験体	グラウトの強度破壊挙動を確認するため、No1 試験体からアンカーボルト、スパイラル筋を除去した試験体
No3 試験体	No1 試験体、No2 試験体とは異なる接合部で、躯体に埋め込んだアンカーボルトに直接鉄骨を取り付けた試験体



## 6.2 実験結果

実験から得られた各試験体の荷重-変形関係を図19に示す。

No1 試験体は、グラウトにせん断ひび割れが生じる前まで、安定した履歴特性を示した。せん断ひび割れが生じた後は、微少に変形が進行したものの急激な耐力低下はなく、 $\pm 1.4\text{mm}$ の変形まで耐力低下しなかった。 $\pm 1.6\text{mm}$ 以降から徐々に耐力低下を始め、 $\pm 2.2\text{mm}$ の変形時には、ほとんど耐力が上昇することなく、実験を終了した。

No2 試験体は、No1 試験体と同様なグラウトにせん断ひび割れが生じる前に、グラウトとコンクリートの接合面が剥離したことで、 $0.1\text{mm}$ に満たない変形量で急激な耐力低下を示したため、実験を終了した。

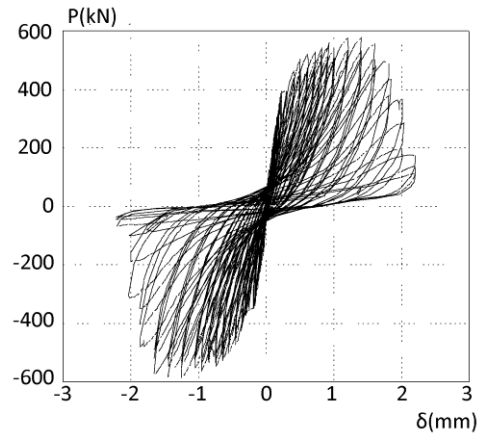
No3 試験体は、小振幅から剛性が低下し始めたため、グラウトのせん断ひび割れ時の荷重が明確に現れなかったが、 $\pm 2.0\text{mm}$ まで急激な耐力低下はなく、荷重はピーク値にまで達した。 $\pm 4.0\text{mm}$ で、耐力低下したものの、繰り返しによる変位が $\pm 10.0\text{mm}$ に達しても一定の耐力を維持したままであった。さらに荷重を続け $\pm 12.0\text{mm}$ で、耐力低下したため、実験を終了した。

No1 試験体とNo3 試験体は、繰り返し荷重を与えても、急激な耐力低下はなく、最大耐力まで達した。最大耐力到達後は、No3 試験体のほうが、大きな変形量を与えても一定の耐力を維持する結果となった。これは、グラウト内のアンカーの接合方法が異なったことによるものと考えられる。

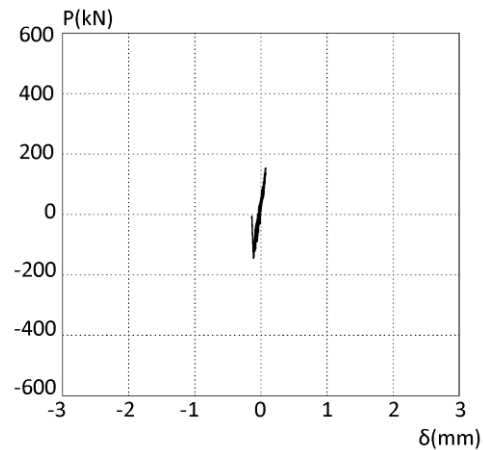
No2 試験体では、変位急増した直後に大きく変形した。これは、グラウトとコンクリートの接合部にアンカーがなかったため、グラウトとコンクリートの接合面にひび割れが生じた際、抵抗するアンカーがなかったことで、急激な変形が生じたと考える。

## 7. おわりに

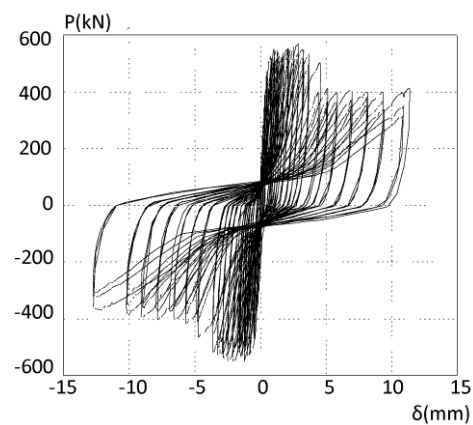
以上、2007年度の成果をまとめた。2008年度と2009年度は、各デザイングループが具体化する統合ファサード案をCG・構造・環境解析で評価した後、実際の設計として可能なものを幾つか選択し、モックアップによる検討、また、実大構造実験や施工実験を行う。更に、統合ファサードのプロトタイプを設計・施工し、種々の検証を行い、統合ファサードシステムの構築を図る。



a) No1 試験体



b) No2 試験体



c) No3 試験体

図19 荷重-変形関係

## 謝辞

本研究は神奈川県工学研究所の平成 19 年度共同研究ならびに平成 19 年度国土交通省住宅・建築関連先端技術開発助成事業より、研究費の援助を受けて遂行した。国土交通省住宅・建築関連先端技術開発助成は平成 20 年度も採択され、平成 21 年度まで継続予定である。

本研究の実験の計画、遂行にあたり神奈川県大学院生(当時)金木洋平氏、神奈川県大学院生、中村慎氏、早川智美氏、古川純也氏の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1)竹内徹、大野隆司：透明皮膜の建築技術、日本建築学会建築年報 1993、pp.32-33
- 2)建築外装メカニズム読本、建築技術、1995.12
- 3)斎藤公男：透明なデザインと建築技術、建築技術、No550、1996.1
- 4)浦野良美、中村洋：建築環境工学、森北出版株式会社、1996
- 5)建設大臣官庁官庁営繕部監修：グリーン庁舎計画指針及び同解説、公共建築協会、1999
- 6)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1999
- 7)日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説(改訂版)、2001
- 8)日本構造技術者協会編：構造レトロフィット、建築技術、2001.6
- 9)旭硝子：ダブルスキン・ファサード、Glass&Architecture、2001.12
- 10)日本建築学会：鋼構造設計基準、2002
- 11)日本建築学会編：地球環境建築のすすめ、彰国社、2002.8
- 12)日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル-枠付き鉄骨ブレースによる補強」、2003.2
- 13)建築画報特別号：Facade Engineering、vol.39、2003.12
- 14)日本建築学会：ガラスの建築学、学術出版社、2004
- 15)ファサードの挑戦者：日経アーキテクチュア、2004年10月4日号
- 16)吉田倬朗：ガラス建築の設計手法、建築技術、No653、pp.91-193、2004.6
- 17)日本建築学会：デザインとエンジニアリングの融合、建築雑誌、2004.10
- 18)竹内徹、小谷野一尚、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-既存ファサードの性能調査・分析-、日本建築学会環境系論文集、No592、pp97-104、2005.6
- 19)竹内徹、小谷野一尚、安田幸一、湯浅和博、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-統合ファサードの提案および性能評価-、日本建築学会環境系論文集、No601、pp.97-104、2006.3
- 20)日本建築学会：鋼構造接合部設計指針・同解説、pp46-47、2006
- 21)竹内徹、安田幸一、宮崎健太郎、湯浅和博、金木洋平、岩田衛、岡山俊介：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-その2 統合ファサードのコンセプト-、日本建築学会大会学術講演梗概集.C-1、構造Ⅲ、pp1023-1024、2006.9
- 22)金木洋平、宮崎健太郎、竹内徹、岡山俊介、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-その3 ブレース・ルーバー一体型ファサードの検討-、日本建築学会大会学術講演公集.C-1、構造Ⅲ、pp1025-1026、2006.9
- 23)宮崎健太郎、金木洋平、竹内徹、岡山俊介、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-その4 ブレース・ルーバー分離型ファサードの検討-、日本建築学会大会学術講演公集.C-1、構造Ⅲ、pp1027-1028、2006.9
- 24)岡山俊介、金木洋平、竹内徹、宮崎健太郎、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-その5 実施プロジェクトへの適用-、日本建築学会大会学術講演公集.C-1、構造Ⅲ、pp1029-1030、2006.9
- 25)竹内徹、安田幸一、湯浅和博、岡山俊介、宮崎健太郎、岩田衛：統合ファサードによる既存不適格建物の耐震改修、日本建築学会技術報告集、第 24 号、pp.161-166、2006.12
- 26)大島康昌、金木洋平、宮崎健太郎、竹内徹、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-その6 一体型斜行配置ファサードの提案-、日本建築学会大会学術講演公集.C-1、構造Ⅲ、pp937-938、2007.8
- 27)金木洋平、竹内徹、宮崎健太郎、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-その7 一体型斜行配置ファサードの構造実験-、日本建築学会大会学術講演公集.C-1、構造Ⅲ、pp939-940、2007.8
- 28)金木洋平、竹内徹、宮崎健太郎、岩田衛：ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-統合ファサードの構造性能-、日本建築学会技術報告集、第 27 号、pp137-142、2008.6