

[建築機能]

阪神・淡路大震災における建築非構造部材の被害分析

川原 克己
(東北支店 建築設計部)高野 進一
(東北支店 建築工事部)本間 章夫
(本社 設計本部設計技術部)

概 要

先の阪神・淡路大震災はマグニチュード7.2の規模の直下型地震であり、神戸市を中心に活断層に沿った地域では震度Ⅶを記録し、建築物に想像以上の大きな被害が見られた。建築物の構造体にさしたる被害がなかったにもかかわらず、内装部材、家具などの非構造部材の被害により避難経路が遮断されるなどの被害が見られた場合もあり、非構造部材の耐震性の重要性についても改めて認識されることとなった。本報はこうした非構造部材の被害状況を分析し、被害要因を推定して今後の耐震対策に役立てようとするものである。

1. はじめに

現実の建築物において使用されている非構造部材は極めて多岐に渡る。これらの被害状況を網羅的にのべることはかえって主旨を拡散させることになると思われる。被害例の調査の目的はあくまで今後想定される地震被害に対して有効な対策を講じるためである。したがって数多くの被害例のなかから今後の対策の指標となるものを選択することとした。

なお、非構造部材の耐震性が問題となるのは構造体が大破していないことが前提である。非構造部材の被害が大きい場合でも構造体が大破している場合等は今回の報告から除外した。

この他、屋上突出物、看板、機械基礎、建築非構造部材と設備との取り付け部等についても被害状況の把握と今後の対策が必要であるが今回は割愛した。

2. 非構造部材の耐震上の重要度

被害例として取り上げた非構造部材は以下の基準に基づいて選定した。

外装材の脱落は人命への影響がもっとも懸念される現象である。したがって外装材は震度Ⅴ強はもちろんⅥであっても脱落してはならない。

取り付け場所等の避難、人命への影響度によっては脱落が許容される場合も想定されるが原則としては脱落はあってはならないとすべきである。

内装材は重要室、避難区画経路にあっては破壊により、機能を失ってはならない。機能を失うことが人命にかかわるからである。一般室にあっては人命にかかわらない程度の被害は許容され得ると考える。

重要室とは震災直後でも機能が低下することが許容さ

れないと考えられる室であり、官庁施設にあっては災害直後に復旧にかかわる活動拠点となる室等である。民間では防火区画、避難経路などの他、用途的には病院の手術室等、クリーンルーム、美術館などが該当すると思われる。

被害現象としては天井落下、扉の開閉不能等が避難経路の確保に影響があり、重要室では加えて壁損壊等が機能確保上影響がある。

以上のような考え方により部材を選定した。

- 1) 外部 脱落により人命に影響を与える危険性のあるPC版、ガラスなどの外装部材
- 2) 内部 重要室の内装材として使用され、脱落、損壊が人命、機能の確保上から許容されない部材

3. 非構造部材の被害要因

非構造部材の被害の要因、言い換えれば非構造部材の耐震性能は主として下記の二つの要因により規定される。

層間変位追従性能

応答加速度（慣性力）への耐力

この二つの要因のうちどちらが各部材にとって決定要因となるかは、おおむね構造体と非構造部材の結合のあり方により左右される。

一般的に結合のあり方は点的な結合、線的な結合、面的な結合に分類される。点的な結合であれば構造体の層間変形の影響を受けにくく、耐震性能は慣性力による耐力で決定される傾向がある。しかしながら複数の点による接合はむしろ面的な接合に近くなる。面的な接合であれば、逆に下地となる構造体の変形の影響を大きく受け、その変形に対する追従性が耐震性能を決定する傾向となる。

非構造部材の耐震性能は慣性力への耐力より、変形追従性能によることが多いが、その関与比率を明確に論じることが現時点では困難である。

本報では被害例を述べるに当たって、要因推定、対策検討を優先し、部材をその取り付け部位ではなく、主たる被害要因により分類し記述することとした。

a) 被害要因が主として強制変形力によるもの

- 1) 外装PC版
- 2) ガラス
- 3) エキスパンションジョイント
- 4) ガラスカーテンウォール
- 5) 金属カーテンウォール
- 6) ALC壁パネル
- 7) 硬化性パテ使用のガラス
- 8) 非耐力壁
- 9) 石張り
- 10) タイル張り
- 11) 内装ボード壁
- 12) 避難扉

これらの耐震性能は慣性力への耐力よりも構造体の変形による強制力が支配的な部材である。

おおむね構造体の層間変形が大きいと認識される部分に取り付けられる部材と、そうでない部位に取り付けられる部材とがある。

前者は部材の取り付け手法に層間変形追従性を意識しており、後者は付着力、取り付け強度等で変形に対応しようとする。言い換えれば、層間変形に対する明確な対応がなく、経験的な手法によって取り付けられていた部材もこのグループといえる。

b) 被害要因が主として部材に働く慣性力によるもの

- 1) 一般天井
- 2) システム天井
- 3) 家具、備品等

天井にあつては、壁際での破壊は層間変形に起因するが、全体としては慣性力が支配的である。

家具類は慣性力により、転倒ないし移動するが、壁などの層間変形の影響も考慮する必要がある。

c) その他

- 1) 外構

外構における被害は上の二つの範疇に入りがたいため別項とする。

4. 被害状況と原因の推定

4.1 被害要因が主として強制変形力によるもの

4.1.1 想定以上の強制変形力が加わったケース

(1) 外装PC版 PC板を使用している建物31件を調査したところ大きく分けて以下のような被害があつた。

- 1) PC版の脱落 (3件)
- 2) PC版の面外押出し (15件)
- 3) ファスナー用ボルトの破断 (6件)
- 4) ファスナーの変形 (7件)
- 5) ファスナー周辺コンクリートの損傷 (11件)
- 6) PC版一般部のひび割れ (7件)
- 7) PC版外部仕上げ材の損傷 (15件)

- 8) 目地シールおよび目地周辺の版の損傷 (24件)
- 9) 目地の通りの異常 (20件) などである。

構造種別による被害を見てみるとS造が一番多く、次いでSRC+S造、SRC造の順となっている。これは当然ながらS造の層間変形が大きかったためである。(SRC造からS造に切り替わる部分での被害も多く見られた。)

挙動方式によるものではスウェイ方式の被害がロッキング方式よりも多かった。これはロッキング方式がより挙動性が高いシステムであるからといえる。

部材形式では壁パネルの被害が最も多く、梁(腰壁)パネル、柱+梁パネルの被害が少なかった。壁パネルが特に被害を受けたのは版の長さが通常、階高分あり、他のタイプの版より大きな層間変形を受けたためと考えられる。



Photo 1 ファスナー用ボルトの破断
Failure of Bolt

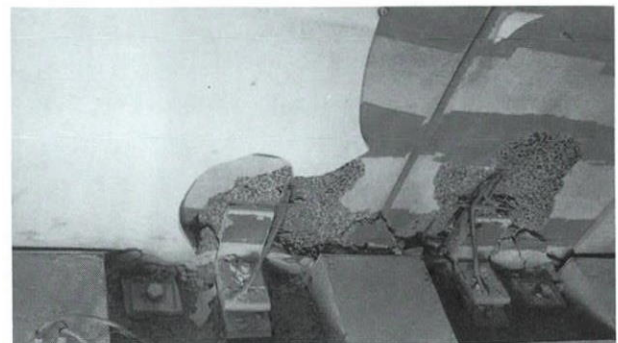


Photo 2 ファスナー周辺コンクリートの損傷
Damaged Concrete Around Metal Fitting



Photo 3 目地周辺の版の損傷
Damaged Panel Around Joint

建築物の規模による被害では高層のものよりも中低層のもので多く、低層のものでは1階の被害が、中低層のものでは中間階に被害が集中していた。これは構造体の被害と一致している。

PC版に関しては設計当初に設定していたものよりも遥かに大きな地震入力があり、そのため過大な層間変形が発生し、版の許容挙動を越えて(ルーズホールで吸収しきれずに)建築物の水平力がボルトやファスナー、版に数十トンというオーダーの応力として働き破壊に至ったものであると思われる。

また、中にはロッキングガスウェイなどの挙動するように設計されたものであっても、ファスナーが溶接されていたり、モルタルなどで固められたりしていたために挙動できなかつたと思われることも原因として考えられる。

片持ち梁に取付られたPC版の被害も多く見られたがこれは梁の上下動の影響を受けて損傷したと思われる。

(2) ガラス ガラスは崩壊するまでの面内変形量が非常に小さいため、層間変位による窓枠の変形は、窓枠とガラスとのクリアランスによる逃げによって吸収することになっている。

ガラスの被害は、この窓枠とガラスとのクリアランスによる逃げに余裕のないものほど損傷の被害が発生した。

例えば、可動窓タイプとはめ殺し窓タイプでは、はめ殺し窓タイプの方に(可動窓は可動部の戸と枠との間に逃げがあるため)、はめ殺し窓タイプでも、小さいものより大判のガラスを用いたものの方が損傷の被害があった。

また、横連窓タイプのものは、層間変位が剛性の低い窓部分に集中し、被害を多くした。

(3) エキスパンションジョイント 被害の比較的小さいものではシーリング材の損傷、カバーの変形、下地金

物類の変形、周囲の仕上げ材の欠けなどが見られた。被害の大きいものではカバー、止水板の脱落が見られた。これらの被害は上階になるほど大きくなる傾向が見られた。

特に被害の大きなものについてはエキスパンションジョイントが設けられている双方の構造体の変形が設計時に想定した振幅を上回り、構造体どうしが衝突し、カバー、止水板などの破損、脱落に至ったものと思われる。

4.1.2 強制変形力の吸収機能があり、被害が少なかったケース

(1) ガラスカーテンウォール 全面ガラスカーテンウォールは、全般に被害が少なかったが、想定以上の層間変位により、ガラスとサッシがぶつかり一部のガラスに損傷が発生した。

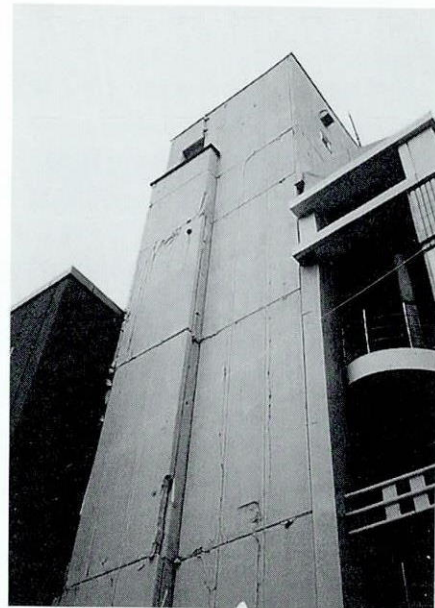


Photo 5 ALC版の被害(1)
Damaged ALC Panel of External Wall

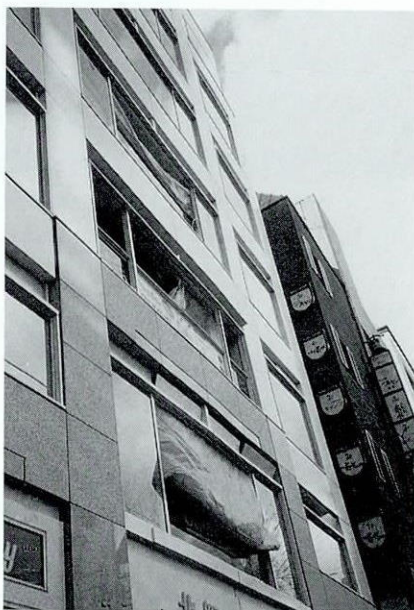


Photo 4 はめ殺し窓ガラスの被害
Damaged Glass of Fixed Window

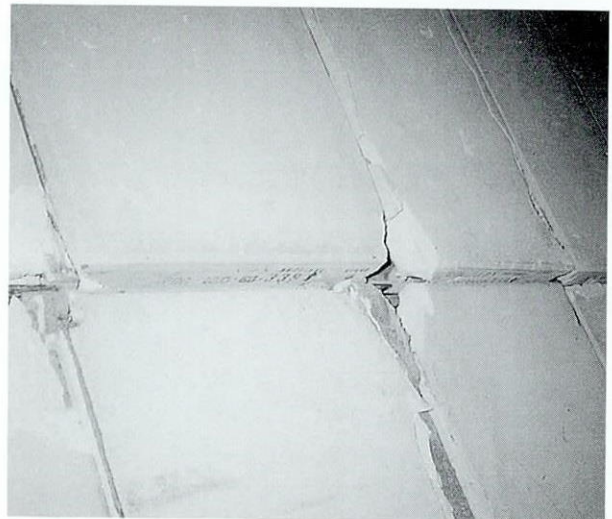


Photo 6 ALC版の被害(2)
Damaged ALC Panel of External Wall

(2) 金属カーテンウォール 金属カーテンウォールは、ほとんど被害が発生しなかった。

これらのことから、ガラス・金属カーテンウォールは部材および仕口・接合部の変形により層間変位に追従し、想定以上の層間変位に対して、ファスナー部分に加わる力が小さかったためと思われる。

4.1.3 強制変形力の吸収機能がなく被害が多かったケース

(1) ALC壁パネル ALC版の取付工法としては、挿入筋を上下パネルに通しモルタルを充填し固定する縦積み固定工法が一般的であったため、十分な免震機能が得られず、水平目地部分のパネル短辺部分が大きく損傷するとともにパネルの下部が目地鉄筋から外れて面外方向にせり出した被害例が多数見られた。

ALC版の出隅・入隅部分は伸縮目地幅が層間変位に対して十分でなく、構造体の変形によって、直交するパネルを押し出したり、パネルが相互にせり合い、パネルのコーナーや水平目地が損傷した。また、横長窓廻りの腰パネルの上下と接する壁パネルの縦目地部分が、開口補強金物とパネルが別の動きをしたために著しい欠けを発生した。

内壁ALC版は、下部を挿入筋によって固定し、上部をスライド機構として取付られているが、階段室・E V部分等のコア廻りの出隅・入隅や他の部材との取り合い部分に、地震力による構造体の水平挙動が早く大きかったため、欠損が生じた。

これらのことから、変形を吸収できる免震工法(ロッキング工法)を採用し、出隅・入隅、開口部まわり、異種部材取り合いなどには変形量に応じた伸縮目地を適切に配置することにより、ALC版の被害は防げたと思われる。

(2) 硬化性パテ使用のガラス かつて多用されていた硬化性パテ止めによるガラスは、硬化したパテにより枠とガラスが一体化して逃げがほとんどなく被害を生じやすかった。

4.1.4 強制変形力に対する明確な対応方法がなく、被害が発生したケース

(1) 非耐力壁 開口部にはさまれたRC造非耐力壁にX状のひび割れやコンクリートの欠けが多く発生していた。

また、RC造非耐力壁に設けられた開口部周辺でひび割れが多く見られた。このひび割れは開口各コーナー部より放射状にのびていた。

コンクリートブロック造非耐力壁の被害については床スラブや柱などの躯体と取り合い部分のブロックが破損する被害が見られた。

RC造非耐力壁の開口部周辺のひび割れの場合、応力集中によって引き起こされたものと思われる。X状のひび割れは壁が短柱状態となってせん断破壊したためであると思われる(現在、柱際にスリットを設ける等により、短柱になることをさげ、せん断破壊がおきないようにしている)。

コンクリートブロックの場合は材料自体の強度が躯体のコンクリートの強度よりもかなり劣るため、躯体から

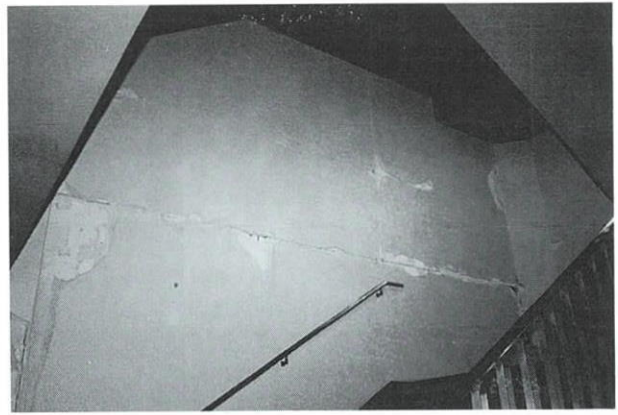


Photo 7 内壁ALC版の被害
Damaged ALC Panel of Internal Wall

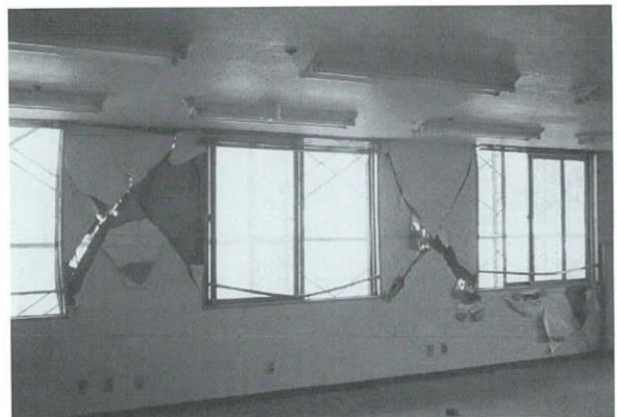


Photo 8 外壁RC造非耐力壁被害(室内側)
Damaged Reinforce Concrete of External
(Interior Side)



Photo 9 湿式石張りの被害
Damaged Stone Finish

の応力が取り合い部分のブロックにかかり破損に至ったものと思われる。

(2) 石張り 外壁石張りでは、乾式工法（石打ち込みPC工法等）による壁面は被害が少なく、湿式工法（全とろ工法・帯とろ工法）による壁面に被害が多く見られた。

内装石張りでは、損傷したものは全て眠り目地の仕様であり、挙動に対するクリアランスがなかったため、石のせり出し、衝突による割れ、損傷が発生した。

特に、眠り目地で馬目地の割付（縦目地が通らない割付）の石張りに多くの損傷が見られた。

以上のことから、変形を吸収できる取り付け方法や目地幅、他の部材・部位との取り合い部での十分なクリアランスを取れば石張りの損傷は防げたと思われる。

(3) タイル張り 外装タイルは、下地の損傷の影響を直接受けるため、躯体および非構造壁の損傷との関係が大きい。その影響の度合いは工法によって異なり、後張り

工法を採用している建物に多く見られた。

剥離・剥落の被害は、RC下地のせん断ひび割れに沿った部分、開口部周辺、建物の出隅・入隅部分、コンクリートの水平打継ぎ部に沿った部分で、タイル張りモルタルと下地の間で発生した。タイルの付着が十分であれば、せん断ひび割れに沿った部分で、それをまたいだタイル片が数枚づつ（タイルの大きさによっては1枚づつ）

の剥離が生じた。また、下地モルタルの塗り厚が厚い場合、下地モルタルが浮いているなどで付着力が十分でない場合は、剥離が大きな面積で発生する傾向があった。

内装タイルは、外装タイルと同様、せん断ひび割れに沿った部分（RC壁・コンクリートブロック壁）、異種下地の接合部・入隅等の部分で剥離・損傷の被害が発生した。また、便所等の100角タイルを積上げ張り（だんご状のセメントモルタルでタイルを張る工法）したものは、下地に大きな損傷が認められない場合でも、タイル張り壁面が周囲の部材あるいは壁面に取り付けられた設備機器等で挙動が拘束され、タイルだけが広い面積で剥離したのも見られた。

(4) 内装ボード壁 内装ボードの場合、直張り（GL）工法で張られたものに剥離・脱落などの被害が多く見られた。特に下地がALC板などの部材に張られているものについては被害が著しかった。また、部位別ではボードの出入隅部分や開口部周辺にひび割れなどの被害が見られた。一方、軽量鉄骨下地の場合はボードが外れるなどの現象が見られたが比較的、被害が少なかった。

GL工法の場合は、下地のALC板が地震時に挙動し、ALC板の表面強度が小さいためにGLボンドとの界面で剥離していることが原因と思われる。また、出入隅部分では下地の挙動の違いやボードが突きつけになっていることから、ボードがもう片方のボードを押して、ひび割れ



Photo 10 タイル張りの被害（1）
Damaged Exterior Tile



Photo 11 タイル張りの被害（2）
Damaged Interior Tile

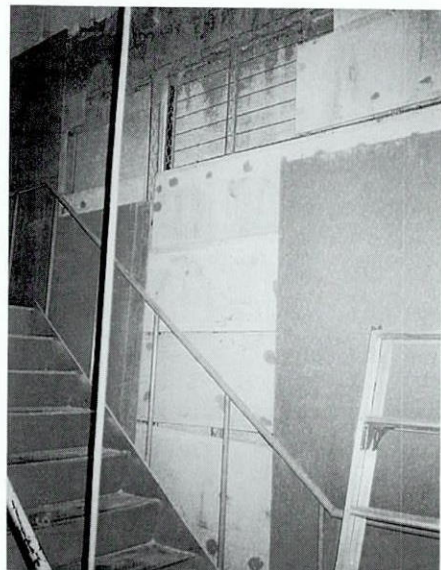


Photo 12 階段室直張りボード壁被害（ALC下地）
Damaged Gypsum Board of Staircase Wall
(ALC Panel Backing)

を引き起こしたものと思われる。

(5) 避難扉 特徴的な被害としては枠が扉本体と接触して開閉が不能となっているものが多く見られた。

枠が取り付けられているRC造等の損傷による枠の変形、ALC板、軽量鉄骨下地の層間変形にともなう開口補強の変位が、枠を変形させ、扉とのクリアランスを失い、扉との接触、扉の押しつぶし、丁番や錠前周辺が破損することによって開閉が不能になったものと思われる。

4.2 主として部材の慣性力によるもの

4.2.1 構造体との共震により、構造体より大きな振幅が生じて損傷したケース

(1) 天井 一般天井の場合、比較的大きな被害を被ったものは少なかったが、講堂や体育館などの面積が大きい部位、天井ふところが大きい部位、天井高さが異なる部位などに多く見られた。

異種部材の取り合うところでは可動間仕切、設備機器類周辺、壁・柱際に被害が見られた。



Photo 13 鋼製避難扉被害例
Damaged Steel Door for Fire Escape

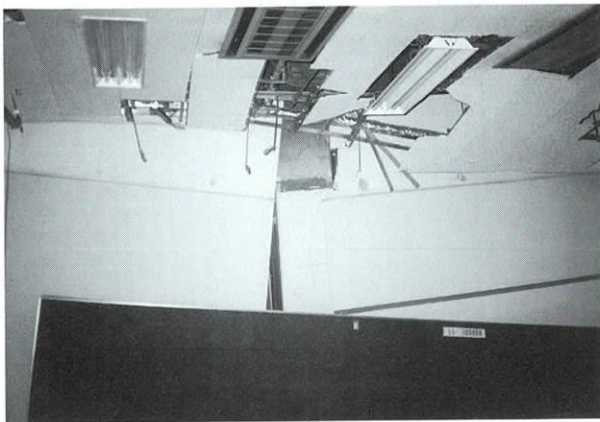


Photo 14 壁との取り合い部分の天井被害
Damaged Ceiling Adjacent to Interior Wall

(2) システム天井 システム天井の場合も一般天井と同じような被害が見られたが、特に可動間仕切、空調機等の設備機器周辺の破損・落下などの被害が多く見られた。

面積が大きい部位や天井ふところが大きい部位は天井面での変位が過大となり、壁際で衝突したり、共振現象により破損が生じたものと思われる。

また、異種部材との取り合いでは挙動の違いおよびクリアランスの不足により天井部材が他部材や構造体と衝突し損傷、脱落を引き起こしたものと思われる。

システム天井の場合はTバーの掛かり代不足、軽量鉄骨下地の強度不足によるところが大きいと思われる。

4.2.2 家具・備品等の転倒による被害のケース

(1) 集合住宅等の住宅 戸建住宅や集合住宅で箆笥や棚、ピアノなどが滑動や転倒して直接人命に被害をおよぼしたり、避難経路の障害となった。

(2) 事務所ビル等 事務所ビルなどでは背の高いスチール製のウォールキャビネットが転倒するなどの被害が数多く見られた。壁に固定しているものでもアンカーやビスの引き抜けにより転倒におよんだものもあった。

また、机や椅子の滑動によって窓ガラスが破壊されたり、OA機器が転倒する被害も見られた。今回の震災では早朝であったため事務所ビル等での人的被害は少なかったが、就業時であった場合はこれらの現象が引き起こす2次災害によってかなりの被害があったものと考えられる。

家具、備品の壁・床固定、連結がされていなかったことや、重量のあるものを収納しているなど、家具の重心位置が高くなっていたことなどが原因となったと思われる。

4.3 その他

4.3.1 外構被害のケース 今回の震災では特にポートアイランドや六甲アイランドなどの埋め立て地の舗装ブロックや建物外構部材である石材、タイルなどが割れたり段差が生じる被害が多く見られた。

これらの現象は液状化や軟弱地盤の締め固め現象による地盤沈下が主な原因であると思われる（建物自体は建設年度が比較的新しいためか被害は小さかった）。



Photo 15 外構インターロッキングブロックの被害
Damaged Interlocking Block of External Pavement

5. 被害原因のまとめと対策

外装材においては脱落を防ぐことが第一の要求点である。すなわち層間変形追従性能が必要なものはその性能の確保がまず重要であり、想定以上の変形に対しては挙動余裕度の確保が必要となる。追従性の確保の上からは適正な設計とルーズホルルの施工精度の確保が大切である。

余裕度の確保の上からは、想定以上の地震力に対しても脱落等の被害を生じないように配慮する必要がある。

PC版について言えば想定内の地震による層間変形にはスウェイ、ロッキング等の挙動システムで対応するが、想定以上の地震に対しては、別途のサブシステムで対応するなど、ファスナーへの余裕度の付与が求められる。

また取り付けファスナーには先の変形追従性のほか、万が一、破壊した場合、簡単な部品交換等により復旧できるディテールが必要と言える。

湿式タイル張り、湿式石張り等は付着強度により、構造部の歪み、層間変形に対応するものである。面的に接合しているが故に、これらの工法では付着力の増強策程度しか対策として考えられない。

変形が大きくなった場合は被害が生じやすいため、変形の小さい部分、建築物の低層部に限定して使用されるべきであろう（最近では建築物の変形にある程度追従できる乾式工法なども採用されてきている）。

一方、鋼製建具、ボード壁などは部材強度の向上では被害低減に限界があり、追従性の確保が必要となる。

耐震建具、耐震工法の採用（乾式ボード壁、天井）はコストやインテリア計画との関連もあり、耐震性のみで論ずることはできないが、重要室、避難経路等にあっては意匠性より耐震性を優先すべきであろう。

地震に対する建築物の性能は、部材の耐震性のみでなく、2次災害の防止、復旧のコスト・速やかさを総合的に判断し、設定する必要がある。

2次災害の防止の観点からは、内装材の不燃化も耐震

対策に含まれるべきであろう。

被災後の復旧の（機能回復、財産保護）観点からは、復旧工事の速やかさとローコストであることが要求される。

たとえば、軽鉄下地壁等、復旧が容易でコストも低廉であるものと比して、コンクリート雑壁などは破壊された場合、復旧するコストが大きい。これらは人命への影響度とは別に損壊を避けるような仕様とし、復旧時の技術的・経済的負荷を視野に入れて仕様・工法を選定する必要があると言える。

また、一般的に劣化度と耐震性能は正比例すると考えられる。定期的な劣化診断を行い、改修をすることが耐震性能向上にもつながることを留意すべきである。

6. おわりに

非構造部材は構造体の変形性の大小等の与条件を経験的、あるいは実証的に把握して、構造部材との接合法を選定しているものもあり、耐震性は重要であるが、伝統的工法、あるいは経験的工法がすべて耐震上問題であるということではない。また、すべての工法を耐震性能上見直す必要があるとも言えない。

人命に被害を与えない範囲の被害は、財産、機能の確保と通常のリニューアル、メンテナンスサイクルとの比較検討のうえで決定されてしかるべきであると考えられる。危機管理的判断に基づき、ポイントをしぼり、耐震性の向上をはかることが必要である。

本報では統計的データにより被害の傾向と原因を推定するところには立ち至らなかった。それらは社内に設けられた「阪神大震災被害調査」研究開発グループによって別途、まとめられる予定である。

また、先に当社では「新しい耐震設計の提案」を作成、発行した。そこでは非構造部材の耐震性能のグレードの概要をのべている。今後は、建築物の用途や室重要度の考え方に基づいた工法・仕様等について具体的に検討してゆく必要があると考える。