戸建住宅の外壁に関する地震時損傷リスク評価手法の提案とその適用結果

PROPOSAL AND THE APPLICATION RESULTS OF EARTHQUAKE DAMAGE RISK EVALUATION METHOD OF EXTERNAL WALL IN DETACHED HOUSES

齋藤 茂樹*, 深尾 精一**
Shigeki SAITO and Seiichi FUKAO

The aim of this research is to propose the earthquake damage risk evaluation method of external wall in detached houses, based on the result of the past experimental studies. Moreover, the validity of the method is verified by applying the technique in build-up areas.

Fragility curves for buildings and the layer deformation capability of external wall were used to evaluate the damage risk of external wall by earthquake. Moreover, the external wall damage risk in three build-up areas was evaluated based on this method. Consequently, the risk of external wall damage in old build-up area is high.

Keywords : *detached houses, external wall, non-structural element, damage risk of earthquake, high density wooden built-up area*

戸建住宅、外壁、非構造部材、地震被害リスク、木造住宅密集地域

1. 序章

近年発生する大地震では、非構造部材の被害が多く報告されている。しかし、戸建住宅の外壁に関しては、被害が広範囲に分布することなどから正確な被害実態が把握され難く、十分な研究が行われてきていないのが現状である。しかし、市街地における外壁の地震被害は、人命の危険や財産の損失に繋がるだけでなく、延焼などの二次災害発生のリスクを高めるなど多くの損害をもたらすため、十分な対策をとる必要がある。また、東京都には地震火災に対して脆弱だと言われる木造住宅が密集した市街地が数多く存在する。東京都の被害想定¹⁾によると、関東南部に M 7 程度の地震が冬季の夕方、風速 15m/ 秒の条件下で起こった場合、市街地火災の発生によって死者数 6 千人強（うち地震火災による死者数 3 千人強）、建物被害 47 万棟（うち消失棟数 34 万棟）という深刻な被害が起こるとされており、地震火災の防止がいかに緊急を要する課題であるかが伺える。

東京消防庁火災予防審議会答申²⁾の中で、延焼速度比算定にあたりモルタル外壁のひび割れと火災危険温度（260℃）到達時間との関係についての実験結果が示されており、ひび割れによる防火性能の低下が指摘されている。また、「東消消 2001」³⁾では、地震による加速度と壁面崩落率の関係について、震度 5 弱（90gal）で 0%、

震度 7（895gal）で 18% となるような線形回帰モデルが採用されている。このように、地震火災の延焼速度を求める際には外壁損傷の影響を考慮する試みは行われているが、外壁構法ごとの耐震性や地震時の損傷リスクを考慮したうえでの評価は行われていない。より精度の高い地震火災の延焼予測を行うには、より詳細な外壁損傷の実態を独立に評価し、延焼危険性の評価に組み込む必要がある。

非構造部材としての外壁構法の耐震性能に関する既往の研究は数多くなされている^{4) ~ 17)}。その多くが外壁構法の層間変位追従性能を実験によって評価するものであり、様々な条件の下で行われている。しかし、いずれの研究も実際の建物における外壁の損傷リスクを論じることはしていない。また、これらの実験結果をある基準によってまとめ、外壁構法ごとの耐震性能を評価した研究も金子ら¹⁸⁾によって行われているが、中高層建物を対象とした分析であるため戸建住宅に直接適用することはできない。一方で、建物の構造体については過去の地震被害調査の結果をもとにして被害関数の提案が様々になされており^{19) ~ 24)}、想定する地震動における建物被害確率を求めることができる。しかし、非構造部材の被害までをも評価する手法は用意されていない。非構造外壁、建物構造体双方の知見を集約し、外壁構法の地震時損傷リスクを評価することが、総合的な防災対策にとって重要な意味を持つと考える。

* 首都大学東京大学院都市環境科学研究科
博士後期課程・修士(工学)

** 首都大学東京大学院都市環境科学研究科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., M. Eng.

Prof., Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

以上より、外壁構法の地震時損傷リスクを評価し、多角的な防災性評価に供する有用な資料を作成することを本研究の目的とする。

2. 研究の概要

外壁の耐震性能は、主に非構造部材の耐震性を研究する分野で扱われている。非構造部材の地震動による損傷は、構造体の挙動の影響を大きく受ける。従って、外壁の地震時の損傷リスクを求めるには、構造体の損傷リスクを同時に評価する必要がある、それと外壁構法ごとの耐震性との関係によって評価されるべきものである。そこで、本研究では構造体の地震時損傷リスク、外壁の層間変位追随性能を評価することにより、外壁の地震時損傷リスクを求めることとする。この評価の考え方は、日本建築防災協会と建築・設備維持保全推進協会が発行している「外壁の地震に対する安全性の評価方法・同解説」²⁵⁾に準じている。すなわち、主体構造と外壁構法の性能をそれぞれ定性的に評価し、その関係によって地震時の損傷リスクを求めている。

3. 構造体の地震時損傷リスク

3-1. 建物被害関数の概要

建物の地震損傷のリスクを評価する方法については、様々な手法が提案されているが、本研究では東京都が行っている地震に関する地域危険度調査（第6回）²⁶⁾において、建物倒壊危険度の測定に使用されている手法を引用する。これは村尾ら^{21)、22)}が1995年兵庫県南部地震における神戸市灘区の建物被害の実データを基に建物倒壊危険度の評価方法を提案したものであり、同一の指標によって様々な条件の建物被害確率を求めることが可能である。また、個々の建物の全壊被害確率を求めることが可能であるためミクロな被害予想にも対応できると判断し、本研究では建物倒壊危険度測定の方法を用いることとした。この他に、個別の建物について耐震診断などの目的で詳細な調査を行う場合には、建物剛性によって構造体の損傷リスクを評価することが考えられるが、本研究では扱わないこととする。

村尾らの提案した建物全壊確率を表した被害関数（以下では単に被害関数と呼ぶ）は、地震最大速度と建物強度確率分布の関係が対数正規分布に従うと仮定して確率密度関数を求め、地盤ごとの地震最大速度正規確率密度分布と比較することによって建物被害確率を求めている。ここで、外壁は構造体が全壊^{注1)}の際にはほぼ確実に大きな損傷を受けるため、全壊を前提とした被害関数を評価指標として用いるのは必ずしも適していない。構造体が倒壊に近いほどの変形を受けるような変位は非構造外壁の設計性能としては想定されておらず、このような状況においては外壁の損傷を防ぐことよりも、外壁損傷による二次災害を防止する策を講じることが効果的であり、また有効でもあるためである。従って、より軽微な構造体の損傷に対する外壁損傷のリスクを評価することが重要である。そこで、本研究では被害関数を用いて建物の半壊率を求め、その値より建物損傷リスクを評価することとする。

建物強度の確率密度関数 R と、地盤ごとの PGV（最大速度）生起確率による建物の損傷確率分布関数 S はいずれも対数正規分布に従うと仮定されており、その確率分布関数 $f(x)$ は一般に以下の式によって導かれる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (0 < x < \infty) \quad (1)$$

ここで、 λ は平均値、 ξ は標準偏差を表している。以下に、村尾らによる文献 22 より、建物強度と地盤ごとの PGV 生起確率密度関数を用いた建物の被害確率算出の方法を引用する。引用部分の式番号は原文のままである。

『建物強度の確率密度関数を R 、地形区分ごとの PGV 生起確率密度関数を S とおくと、全壊の確率 P_f は、次の式で表される。

$$P_f = P\left(\frac{R}{S} < 1\right) \quad (7)$$

ここで、 $Z = R/S$ と置くと、上式より、

$$P_f = \int_0^1 f_z(z) dz \quad (8)$$

となる。ところで、 R 、 S は対数正規分布を仮定しており、その自然対数はその平均値をそれぞれ λ_r 、 λ_s 、標準偏差を ξ_r 、 ξ_s とすれば、 $\ln Z = \ln R - \ln S$ より、 $\ln Z$ も正規分布となる。ここで R と S が無相関と仮定すれば、 $\ln Z$ の平均値及び標準偏差はそれぞれ、 $\lambda_z = \lambda_r - \lambda_s$ 、 $\xi_z = \sqrt{\xi_r^2 + \xi_s^2}$ で与えられる。よって、

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_z} \int_0^1 \frac{1}{z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_z}{\xi_z}\right)^2} dz \quad (9)$$

$y = \frac{\ln z - \lambda_z}{\xi_z}$ と変換すると、

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\frac{\lambda_z}{\xi_z}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy = 1 - \Phi\left(\frac{\lambda_z}{\xi_z}\right) \quad (10)$$

となり、ある R と S に対する破壊確率が決定される。ここで $\Phi(\lambda_z/\xi_z)$ は標準正規確率分布関数である。』

3-2. 建物損傷リスク F の評価

戸建住宅の半壊率は、 $R2 < R1$ の範囲において、全半壊率 $R1$ から全壊率 $R2$ を差し引いたものとし（図 1 中のハッチング部分）、特定の地盤における PGV 生起確率 S による建物被害発生確率は $R < S$ の範囲における累積確率となる（図 1 中の薄墨部分の面積）。本研究では全半壊建物被害関数および全壊建物被害関数を導くのに、村尾らの文献 21 中の表 4 に示された兵庫県南部地震における神戸市灘区の被害関数における λ 、 ξ を引用し、地盤種別ごとの PGV 生起確率分布における λ 、 ξ の値は東京都地域危険度調査²⁶⁾ にお

図 1 構造体半壊確率算出の概念図

表 1 構造体の半壊確率と地震時損傷リスク F

*文献 26 を基に筆者が作成

構造	建設年	全半壊		全壊		λ_s										
						山地・丘陵	山地・丘陵 (盛土)	台地1	台地2	谷底低地1	谷底低地2	沖積層1	沖積層2	沖積層3	沖積層4	沖積層5
		λ_{r1}	ζ_{r1}	λ_{r2}	ζ_{r2}	3.58	3.77	3.87	3.93	4.47	4.32	3.81	4.23	4.36	4.47	4.47
		$\zeta_s = 0.541$														
木造	～1970	4.02	0.456	4.45	0.342	18.08	21.72	23.38	24.13	22.58	24.49	22.41	25.10	24.09	22.58	22.58
	1971～1980	4.25	0.395	4.73	0.378	11.87	16.29	18.93	20.41	28.19	27.42	17.31	26.43	27.75	28.19	28.19
	1981～	4.61	0.474	5.12	0.496	5.86	8.78	10.77	12.01	23.42	20.50	9.52	18.69	21.32	23.42	23.42
RC造	～1970	4.72	0.691	5.14	0.646	6.53	8.70	10.07	10.88	17.42	15.87	9.22	14.87	16.32	17.42	17.42
	1971～1980	4.85	0.612	5.33	0.575	4.70	6.84	8.31	9.22	18.22	15.74	7.39	14.29	16.41	18.22	18.22
	1981～	5.33	0.789	6.00	0.789	2.82	4.13	5.06	5.66	12.88	10.56	4.47	9.35	11.16	12.88	12.88
鉄骨造	～1970	4.25	0.712	4.64	0.619	12.87	15.03	16.11	16.65	17.93	18.27	15.47	18.22	18.23	17.93	17.93
	1971～1980	4.49	0.549	4.97	0.490	9.10	12.42	14.49	15.70	24.26	22.58	13.22	21.33	23.10	24.26	24.26
	1981～	5.01	0.733	5.64	0.731	4.68	6.64	7.98	8.81	17.68	15.06	7.14	13.61	15.76	17.68	17.68
軽S造	～1970	4.41	0.504	4.70	0.550	5.79	7.88	9.17	9.92	14.94	14.02	8.38	13.30	14.31	14.94	14.94
	1971～1980	4.95	0.855	5.82	0.972	6.62	8.85	10.33	11.23	20.44	17.75	9.41	16.26	18.46	20.44	20.44
	1981～	5.28	0.865	6.19	1.101	3.14	4.48	5.43	6.04	13.25	10.93	4.83	9.72	11.52	13.25	13.25
その他		4.02	0.456	4.45	0.342	18.08	21.72	23.38	24.13	22.58	24.49	22.41	25.10	24.09	22.58	22.58

F_5	F_4	F_3	F_2	F_1
30 ～ 25%	25 ～ 20%	20 ～ 15%	15 ～ 10%	10% ～

る建物倒壊危険度測定に使用されている、基盤速度 30kine における地盤の増幅率を考慮した地表面最大速度の値を引用して求めた。以上の結果を基に、地震による構造体の損傷リスクを「構造体損傷リスク F」とし、グレードを設定した。今回は便宜的に半壊率 0 ～ 10% をグレード F1、10 ～ 15% をグレード F2、15 ～ 20% をグレード F3、20 ～ 25% をグレード F4、25 ～ 30% をグレード F5 と設定した。このようにして求めた建物半壊率と、その値による構造体損傷リスクのグレードを表 1 に示す。

構造体の地震被害は、建物の揺れによってのみ起こるのではなく、液状化現象などの地盤の損傷によっても引き起こされるが、地盤の変化による構造体の被害は上記の手法では表すことができない。これは液状化などによる地盤の変形は建物の不同沈下を起し、構造体の種類や建設年代ではなく基礎形式や杭の有無によってその被害程度が大きく異なるためである。本研究では、液状化現象による構造体の被害はその性質上大破以上であるとし、構造体の損傷リスクの評価には含まないこととする。

4. 外壁の層間変位追従性能

4-1. 既往研究による外壁構法の層間変位追従性能の整理

非構造部材の耐震設計の考え方は、坂本ら²⁷⁾によって提唱されたものが基本となっている。つまり、建物構造体のように外力に対して必ずしも破壊されないことを第一の目標とするのではなく、直接的・間接的にも人命の危害を加えないような総合的な安全性の確保、損傷時であっても確保すべき性能の設定、機能・性能の回復に要するコストの想定などが重要であるという考え方である。外壁の耐震性能は慣性力と層間変位追従性能によって評価されるが、戸建住宅の外壁耐震性において主に問題となるのは層間変位追従性能である。従って、本研究においては外壁の耐震性能は層間変位追従性能によって評価することとする。

各種外壁構法の層間変位追従性能に関しては、既に様々な試験が

表 2 損傷程度による外壁被害の評価

ランク	損傷の程度での評価	
	湿式外壁	乾式外壁
軽微	1mm未満のひび割れ	残留変形
		クラックの発生
中破	1mm以上のひび割れ	パネル端部の欠け
	剥離の発生	シールの切れ
	部分的な剥落	取付け金物の損傷
大破	全面的な剥離・剥落	パネルの脱落

表 3 荷重－変形関係による外壁被害の評価

ランク	荷重－変形曲線での評価	
	Bi-Linear型 (完全弾塑性モデル)	Tri-Linear 型
軽微	特異点(降伏変位 δ_y)	特異点1
中破		特異点2
大破	荷重最大点	荷重最大点

行われている。金子ら¹⁸⁾はこれらの実験結果と過去の地震被害の関係性を明らかにすると共に、非構造部材の耐震性能を 4 種類に分類している。しかし、ここで用いられている外壁構法は中高層建物に主に用いられるものであり、戸建住宅に広く用いられているラスモルタルやサイディングなどの評価は行われていない。そこで、本研究では戸建住宅に主に用いられているラスモルタル、サイディング、ALC パネルについて、既往の各種外壁構法の実験結果を基に層間変位追従性能を評価する。ここで、各研究における実験はそれぞれ異なった目的で行われており、その結果の表記方法は様々であるため、多様な表記方法に対応した外壁被害のランクを設定する必要がある。

表4 既往の実験結果による外壁構法の層間変位追従性能の整理

	番号	試験体概要	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/120	1/100	1/75	1/60	1/50	1/40	1/30	1/20	1/15	1/10	文献
ラスモルタル	1	木造軸組み	ひび割れ						サッシ左下剥落			剥落						4
	2	木質パネル最大変形時	ひび割れ						剥離				×	×	×	×	×	5
	3	木造軸組み最大変形時	ひび割れ						剥離									5
	4	タッカー1019J 平ラ ス3号 砂モルタル				降伏変位						最大耐力						6
	5	タッカー1019J 波形 ラス1号 砂モルタル					降伏変位					最大耐力						6
	6	JASS15仕様			降伏変位					最大耐力								7
	7	タッカー1210F						降伏変位	最大耐力									7
	8	JASS15仕様 開口あり			降伏変位				最大耐力									8
	9	一般仕様 開口あり		降伏点				最大耐力										8
	10	JASS15仕様 開口あり		ひび割れ			最大ひび割れ 1.4mm					最大ひび割れ 66mm						9
	11	一般仕様 開口あり		ひび割れ			最大ひび割れ 2.1mm					最大ひび割れ 61.5mm						9
	12	面材下地 ステーパー 7-19#151 静加力	ひび割れ					浮き上り										10
	13	面材下地 ステーパー 7-19#151 動加力	ひび割れ						浮き上り									
	14	面材下地 ステーパー 6-19#151 静加力	ひび割れ					浮き上り										
	15	面材下地 ステーパー 6-19#151 動加力	ひび割れ						浮き上り					せん断割れ				
	16	ラス板下地スギ12×80 ステーパー 1013#100 静加力	ひび割れ						浮き上り			せん断割れ						
	17	ラス板下地スギ12×80 ステーパー 1013#100 動加力	ひび割れ						浮き上り			せん断割れ						
サイディング	番号	試験体概要	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/120	1/100	1/75	1/60	1/50	1/40	1/30	1/20	1/15	1/10	文献
	18	木造軸組み 横張り				目地ずれ	残留変形					シーリング切れ						4
	19	木質パネル 縦張り			目地ずれ		ホットメル ト露出		シーリン グ切れ									5
	20	木造軸組み 横張り	目地ずれ			残留変形	シーリング 切れ											5
	21	木質パネル 縦張り			目地ずれ	上下ずれ1 mm	シーリング の切れ											8
	22	パネル厚さ15mm											降伏点		最大耐力			6
	23	同縁通気工法 指定釘 腐食系サイディング									降伏変位		降伏点					10
	24	縦胴縁 引掛金物留め 静加力 最大変形時			役物微小 なズレ	目地微小な 開き						シーリング切れ						10
	25	縦胴縁 引掛金物留め 動加力						目地開き						シーリング切れ				
	26	縦胴縁 釘留め 静加 力 最大変形時	塗装切れ						微小な亀 裂			シーリング切れ、 釘浮き				面外はら み出し		
	27	縦胴縁 釘留め 動加 力	塗装切れ						釘浮き					シーリング切れ				
ALCパネル	番号	試験体概要	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/120	1/100	1/75	1/60	1/50	1/40	1/30	1/20	1/15	1/10	文献
	28	内装ボード、防水取り 付け前					ひび割れ						×	×	×	×	×	11
	29	内装ボード、防水取り 付け後			ひび割れ								×	×	×	×	×	12
	30	ロッキング構法				パネルズレ	壁頂部割れ											13
	31	スライド構法				パネルズレ	壁頂部割れ											13
	32	横壁アンカー構法 厚 さ100mm							ひび割れ	局所破壊								14
	33	押出成形セメント板 厚さ60mm 横張り工法							目違い量 15mm				局所破 壊					14
	34	ALCロッキング構法 タイル張り（パネル跨 ぎ）	ひび割 れ						タイル剥 離									15
	35	ALCロッキング構法 タイル張り（目地棒タ イプ）								異常なし								16
	36	ALCスウェーイ構法 タ イル伸縮目地あり			タイル目 地ズレ発 生	タイル間 シーリング 切れ15mm												15
	37	ALCスウェーイ構法 タ イル伸縮目地なし				ALCひび割れ												16
	38	ロッキング構法 開口 なし												固定部損傷、 一部剥落			最大荷重	15
	39	ロッキング構法 単窓							ひび割れ					固定部損傷、 一部剥落、最 大荷重			面外はら み出し	16
	40	ロッキング構法 連窓							ひび割れ					固定部損傷、 一部剥落		最大荷重		17
	41	ロッキング構法												剥離				16
	42										クラック							17
	43	ロッキング構法 開口 あり1									クラック			剥離				17
	44	ロッキング構法 開口 あり2									剥離							17
	45	ロッキング構法							パネル欠 け				×	×	×	×	×	17

小破

中破

大破

ある。本研究では表 2、3 に示すように、外壁損傷の程度、荷重－変形曲線の特徴点それぞれに対する層間変形角によって損傷ランクを設定した。

損傷程度による分類は、その損傷による補修の有無や性能低下を考慮して設定した。1 mm 未満の軽微なひび割れや乾式外壁パネルの軽微なクラックは、美観の損失は伴うが大きな性能低下には繋がらないため、軽微な損傷とした。これらの損傷が伸展し、大きなひび割れや剥落の発生、シーリングの切れなどに発展すると、耐力の低下や漏水が懸念され、補修が必要になるため中破とする。大破は外壁の機能が喪失した状態とし、広範囲の剥落やパネルの脱落がこれに相当する。補修による性能回復が困難な状況であり、全面的な改修や部材の交換が必要になる。

荷重－変形曲線でのランク設定の考え方としては、外壁が荷重（水平せん断力）を受けると、まずひび割れや留め付け金物周辺で破損が発生する（軽微および中破）。これにより壁体は塑性変形を始め、最大耐力では広範囲での脱落や剥落と等しい状態（大破）になると考えられる。従って、このような状態の変化を表す特異点を基準として損傷の程度を評価する事とした。

以上の基準に従い、これらの評価点が確認できた文献を基にして外壁の損傷程度と層間変形角の関係を整理したものが表 4 である。以下に各外壁構法の層間変位追従性能の傾向を示す。

ラスモルタル

ラスモルタルの層間変位追従性能に関する実験を行った既往研究としては、文献 4～7 などが挙げられる。ラスモルタルの層間変位追従性能は、構法によって若干の相違はあるものの、概ね同程度の性能を示している。すなわち、層間変形角 1/600 程度の小さな層間変位から軽微な損傷が発生し、1/100 から 1/150 程度で中破に至る。層間変形角 1/50 程度で大破となるが、層間変位追従性能の低い構法を用いている場合には 1/100 程度の層間変形角でも大破に至る可能性がある。

表 4 の 9 番の試験体は宮村らがラス下地モルタルの施工実態を調査した結果に基づいて作成した試験体であり、他のラスモルタル構法と比較して相関変形追従性能が低いことがわかる。大地震時には大きな剥落を起こす危険があり、一般的に使用されているラスモルタル構法の耐震性の低さが現れている。

サイディング

サイディングの層間変位追従性能を評価した実験は文献 4～6、8、10 が挙げられる。サイディングは他の外壁構法と比較して層間変位追従性能に関する評価実験が少なく、多くの実験が他の外壁構法との比較のために行われている。実験方法による層間変位追従性能のばらつきが大きい、中破以上の損傷を受けるものはほとんどなく、性能は概して高いといえる。層間変形角 1/300 以下の小さな変形では被害はほとんど発生せず、その後目地の開きやシーリングの切れといった損傷が発生するが、板の大きな損傷や脱落などの被害はかなり大きな変形でも発生しない。

ALC パネル

ALC パネルの層間変位追従性能を評価した実験は文献 11～17 などが挙げられる。これらは主に中高層建物に用いられる ALC パネルを想定してるが、本研究ではこれらの結果を戸建住宅に用いられる構法とみなして分析を行う^{注2)}。ALC パネルの構法のうち、ロッ

キング構法とスライド構法、スウェー構法は層間変位追従性を向上させることを目的として挿入筋構法に替わって開発された構法である。既往の実験研究の結果を見ると、これらの構法の層間変位追従性のの高さが証明されている。ALC パネルが最も多く用いられている中高層鉄骨造の地震時想定最大変形角は 1/200 とされており、その程度の変形に対しては十分な性能を有していることがわかる。ただし、他の ALC パネル構法と比較して層間変位追従性能が低いとされている挿入筋構法に関する実験結果はあまり見られなかった。近年の中・大規模の地震における ALC パネルの被害の多くがこの構法を用いており、既存の建物の多くがこの挿入筋構法を使用していると考えられるので、より多くの情報の整備が必要である。

4－2．外壁構法の層間変位追従性能 L の評価

表 4 の結果を基に、外壁構法の層間変位追従性能の評価を行う。戸建住宅には地震時における主体構造に対する層間変形角の設定がされておらず^{注3)}、帳壁の構造方法を定めた昭和 46 年建設省告示第 109 号においては 3 階建て以上で高さ 31 メートルを超える建築物の屋外に面する帳壁に対して「その高さの 1/150 の層間変位に対して脱落しないこと」と定められている。また、公共建築協会が発行する「官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説」においては、構造種別に応じた層間変形角の最大値として、RC 造、SRC 造は 1/200、S 造は 1/100 が設定されている。これらいずれの規定も、2 層以下の木造が主要な戸建住宅の外壁には適した評価方法とはいえない。

上述した主要構造および外壁の最大層間変形角の設定は、昭和 47 年度から 5 年間に亘って行われた建設省の総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」の成果に基づいていると考えられる。その報告書の中には、非構造部材の変形性能規定値である 1/150 は剛性の低い鉄骨純ラーメンなどを想定しているとあり、極めてまれな地震に対しては 1/75 で部材の脱落・飛散等を生じないこととする考えが示されている。また、剛性が高い壁式 RC 造等については変形性能規定値の 1/2 にあたる 1/300 を層間変形角の規定値としても不都合はないであろうとされている。本研究ではこの建物の剛性を基準としたこの規定値を基に、戸建住宅における外壁構法の層間変位追従性能の評価を行うこととする。

地震規模に応じた層間変形角を表 5 のように設定した。この各規定値に対して、表 5 で定めた外壁損傷の程度がどのように対応するかによって「外壁構法の層間変位追従性能 L」を、グレード L1～L5 と設定して評価した。

表 5 外壁構法の層間変位追従性能に着目したグレード L

グレード 層間変形角	L ₅	L ₄		L ₃	L ₂		L ₁
1/75	無被害	軽微	軽微	中破	中破	中破	大破
1/150	無被害	無被害	軽微	軽微	軽微	中破	中破
1/300	無被害	無被害	無被害	無被害	軽微	軽微	軽微

4-2-1. 各外壁構法の層間変位追従性能

ある特定の建物に関して外壁構法の層間変位追従性能を評価するには、表5より最も近いと思われる構法の実験結果を参照する。しかし、詳細な外壁構法は建物所有者であっても把握していないと考えられる。従って、ある程度大枠で外壁構法を捉え、その層間変位追従性能を示すことが重要となる。本研究では各実験結果による層間変位追従性のグレードの相加平均を取り、四捨五入したものをその外壁構法の性能とする。その結果外壁構法ごとの層間変位追従性能Lのグレードは、ラスモルタルはL2、サイディングはL4、ALCパネルはL4となった。この結果は、実験データがより充実すれば変動するものであり、確定的なものではない。

4-2-2. 維持管理および劣化抑制対策による評価

外壁の耐震性能は劣化状態によって大きく変化する。壁体内結露が発生すると下地の劣化が進み、外壁構法が本来有している層間変位追従性能を発揮することができない。そのため定期的な点検および補修・改修による外壁性能の維持が非常に重要となる。外壁構法の劣化と層間変位追従性能の関係は未だ明らかになっていないため、本研究では劣化と層間変位追従性能の関係を以下のように定性的に設定する。

ラスモルタルやサイディングなどの耐用年数は小松ら²⁸⁾によるとおよそ9～14年である。適切な改修周期の設定には明確な定義は存在しないが、耐用年数が1つの目安となると考えられる。そこで、新築時もしくは前回のメンテナンスより10年以上補修・改修などの維持保全が行われていない場合には層間変位追従性能Lのグレードを1つ下げる事とする。

通気工法や適切な断熱材の使用などにより、壁体内結露を防止することは、外壁の劣化を抑制する上で有効である。逆に、このような対策が取られていない場合、取り付け金物や下地が腐朽し、大きく性能を低下させることに繋がる。従って、このような対策が取られていない場合には層間変位追従性能のグレードを1つ下げることとする。

5. 外壁構法の地震時損傷リスクDの評価

第3章、第4章で定めた構造体損傷リスクFと外壁構法の層間変位追従性能Lより、「外壁構法の地震時損傷リスクD」の評価を行う。本研究では構造体損傷リスクFと外壁構法の層間変位追従性能Lの組合せによって表6のように外壁の地震時損傷リスクDを設定した。外壁の地震時損傷リスクDは、構造体の損傷リスクにやや重点を置いた評価になっており、定性的な指標である。なお、本研究で示した各評価値は特定の地震動に対する損傷の有無を評価するものではなく、あくまで地震に対する性能を評価していることに注意が必要である。また、構造体損傷リスクFは構造体が地震時に半壊となる確率を用いて設定したグレードであるが、構造体はその種類によって剛性が異なり、同じ半壊の損傷であっても、その際の層間変形角は大きく異なる。ただし、本研究で対象としている戸建住宅に関してはその多くが木造住宅であり、また、次いで建設数が多いと考えられる軽量鉄骨造の剛性は木造住宅のそれと近いものであるとして、一つの指標で外壁の地震時損傷リスクを表すこととした。

表6 外壁構法の地震時損傷リスクDの評価

		外壁構法の層間変位追従性能 L				
		L ₅	L ₄	L ₃	L ₂	L ₁
構造体損傷リスク F	F ₁	I	I	I	II	II
	F ₂	I	I	II	II	III
	F ₃	I	II	II	III	III
	F ₄	II	II	III	III	IV
	F ₅	II	III	III	IV	IV
I		現状で地震による外壁損傷のリスクはほぼない				
II		現状で地震による外壁損傷のリスクは小さい				
III		外壁損傷に注意が必要、対策を講じる必要がある				
IV		非常に外壁損傷のリスクが高い、早急に対応する必要がある				

表7 市街地の概要

		八王子市N地域	杉並区M地域	中野区M地域
指定地域		特になし	木造住宅密集地域	重点整備地域
地盤種別		山地・丘陵(盛土)	台地1	台地1
地域危険度	建物倒壊危険度	1	2	3
	火災危険度	1	4	5
	総合危険度	1	3	4

表6に示した外壁構法の地震時損傷リスクを評価するための構造体の損傷リスクは、このような前提の上での評価方法となっている。

6. 実際の地域における外壁リスク評価の適用

筆者ら²⁹⁾の既往の研究による複数の市街地におけるアンケート調査の結果を基に、本研究で提案した戸建住宅外壁の地震時損傷リスク評価を行った。具体的には、各戸建住宅の構造種類、建設年、外壁種類、外壁改修時の築年数のデータを用いて分析を行っている。各市街地の概要は表7の通りである。杉並区M地域と中野区M地域は木造住宅密集地域に指定されており、中野区M地域は東京都の「防災都市づくり推進計画(平成16年)」において重点整備地域に指定されている。また、東京都地域危険度調査²⁶⁾の結果では、八王子市N地域は全ての危険度が最も低い1であるのに対して、杉並区M地域と中野区M地域は火災危険度が非常に高く、総合危険度も高い。

市街地ごとに補修・改修間隔を考慮した外壁の地震時損傷リスクDの評価を行った結果が表8～10である。ここで構造体損傷リスクFの評価において、アンケート調査では鉄骨造と軽量鉄骨造の区別をしていなかったため、本研究では全て軽量鉄骨造とみなした。いずれの地域も比較的良好な地盤に立地しているため、構造体の損傷リスクFはさほど高くない。しかし、中野区M地域では1970年以前に建設された木造住宅が多く、構造体損傷リスクのグレードがF4の建物が、他の地域と比較して多い。

外壁構法の層間変位追従性能Lの評価では、各地域で最も性能が低いL1が比較的多くなっている。これは補修・改修から10年以上経過しているラスモルタルがいずれの地域でも多く存在することを示している。八王子市N地域はL1が22%程度であり、中野区M地域では3割以上がL1であった。

以上の結果より求めた各市街地における外壁の地震時損傷リスク

Dは図2のようになった。八王子市N地域は外壁の地震時損傷リスクDがグレードⅡ（以下ではDⅡと表記し、他のグレードも同様の表記方法とする。）以下が過半数を占めており、比較的被害の広がり小さいと考えられる。一方で杉並区M地域と中野区M地域はDⅢ以上が過半数を占めており、多くの外壁被害が出る事が予想される。特に中野区M地域においてはランクDⅢが41%、DⅣが13%と非常に高い値を示しており、特に注意が必要な地域だといえる。これらの地域は木造住宅密集地域、重点整備地域に指定されており、従来より市街地の防災性能が低いことが指摘されている地域である。外壁の損傷リスクという観点でもこれらの地域が脆弱であることを示す結果となり、本研究における外壁の地震時損傷リスク評価手法が従来の地域危険度調査などによる評価結果と一致した。また、八王子市N地域においても外壁の地震時損傷リスクDがDⅢ以上の建物が3割強存在しており、少なからず被害が出ることを示唆する結果となった。

7. まとめ

本研究では、戸建住宅の外壁構法の地震時損傷リスクを建物被害関数と既往の外壁構法層間変位追従性能実験の結果を用いて評価する方法を示した。以下に本研究で得た知見を示す。

- 1) 構造体損傷リスクFは構造種別では木造が高く、建設年別別では1971年～1980年に建設された建物が高くなった。これは1970年以前に建設されたものは大破となる確率が高く、相対的にこの年代における中破の確率が下がったためである。
- 2) ラスモルタルの層間変位追従性能はいずれの試験体においてもほぼ同程度の性能を示しているが、施工方法が適切でないものはその性能が大きく低下することが示唆されている。
- 3) サイディングの層間変位追従性能に関する実験研究は多くは行われおらず、それぞれの実験で示される結果もばらつきが大きい。しかし、その層間変位追従性能は概ね良好であり、大きな層間変形角においても被害は中破に止まることが確認できる。またALCパネルも同様の傾向を示している。
- 4) 外壁構法ごとの層間変位追従性能LはラスモルタルがL2、サイディングとALCパネルがL4となった。乾式の外壁構法がいずれも高い性能を有していることがわかる。
- 5) 実際の市街地において外壁の地震時損傷リスクDを評価した結果、重点整備地域に指定されている中野区M地域はそのリスクが高く、郊外住宅団地である八王子市N地域は低くなった。ただし、八王子市N地域においても3割強の建物について外壁損傷のリスクが高く、他の地域危険度による評価ほど安全ではないことを示唆する結果が出ている。

注

注1) ここでいう全壊・半壊とは、1968年に出された「被害認定統一基準」によるものであり、被災者への義捐金の配分、固定資産税の減免措置などの判断材料とする事を目的に行われるものである。判定基準は、住家の損壊部分が延床面積の70%以上もしくは主要構造部の被害額が住家の時価の50%以上が「全壊」、住家の損壊部分が延床面積の20%以上70%未満もしくは主要構造部の被害額が住家の時価の20%以上50%未満が「半壊」としている。2001年に内閣府によって基準が改められ、半

表8 八王子市N地域の外壁損傷リスク

八王子市N地域		外壁構法の層間変位追従性能					合計
		L5	L4	L3	L2	L1	
構造体損傷リスク	F1	0	31	8	36	16	91
	F2	0	0	0	0	0	0
	F3	0	2	0	35	15	52
	F4	0	0	0	1	0	1
	F5	0	0	0	0	0	0
合計		0	33	8	72	31	144

表9 杉並区M地域の外壁損傷リスク

杉並区A地域		外壁構法の層間変位追従性能					合計
		L5	L4	L3	L2	L1	
構造体損傷リスク	F1	0	7	2	1	2	12
	F2	0	9	4	36	14	63
	F3	0	0	3	8	8	19
	F4	0	0	0	3	4	7
	F5	0	0	0	0	0	0
合計		0	16	9	48	28	101

表10 中野区M地域の外壁損傷リスク

中野区M地域		外壁構法の層間変位追従性能					合計
		L5	L4	L3	L2	L1	
構造体損傷リスク	F1	0	11	2	4	0	17
	F2	0	4	4	21	9	38
	F3	0	0	0	8	17	25
	F4	0	3	0	5	11	19
	F5	0	0	0	0	0	0
合計		0	18	6	38	37	99

図2 各市街地の外壁損傷リスクの比較

壊の中でも損傷 述床面積の割合が50%以上70%未満のものを「大規模半壊」としている。

注2) 戸建住宅において多く用いられていると考えられるALC薄形パネルは、タッピングねじや木ねじを用いて下地材に直接取り付けられる構法が主である。従って、ロッキング構法やスウェー構法とは異なる層間変位追従性能を示すと考えられるが、ALC薄型パネルの取付け構法の層間変位追従性能を表した資料は見られなかった。本研究では、ALCパネルについては層間変位追従性能が高いロッキング構法やスウェー構法が戸建住宅の外壁構法として採用されてとして分析を行っている。

注3) 昭和55年告示第1790号によって定められる特定建築物に関しては、建築基準法施行令第82条の2において、「建築物の地上部分については、地震力によって各階に生ずる水平方向の層間変形角が1/200（地震力による構造耐力上主要な部分の変形によって建築物の部分に著しい損傷が

生ずるおそれのない場合にあっては 1/120) 以内であることを確かめなければならない。(一部要約)」とある。

参考文献

- 1) 東京都：首都直下地震による東京の被害想定 報告書、2006.5
- 2) 東京消防庁：地震時における市街地大火の延焼性状の解明と対策、火災予防審議会答申、1985 年
- 3) 東京消防庁：地震火災に関する地域の防災性能評価手法の開発と活用方策、火災予防審議会答申、2001 年
- 4) 濱崎信子、ほか 5 名：木質系住宅の地震時損傷状況に関する実験的研究 その 2 損傷と相関変形角の関係 (外装等)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) C-1 分冊、pp.361-362、2003.9
- 5) 早崎洋一、ほか 5 名：木質系住宅の地震時損傷状況に関する実験的研究 その 6 損傷と相関変形角の関係 (壁面実験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) C-1 分冊、pp.93-94、2004.8
- 6) 宮村雅史、ほか 5 名：ラス下地モルタル塗り外壁の強度・変形性能と破壊性状その 1 実験概要と強度変形性能、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) C-1 分冊、pp.213-214、2007.8
- 7) 西山栄一、ほか 5 名：ラス下地モルタル塗り外壁の強度・変形性能と破壊性状その 2 直張りの破壊性状、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) C-1 分冊、pp.215-216、2007.8
- 8) 大橋好光、坂本功：木造軸組ラスモルタル壁の水平せん断実験 (その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 構造系、pp.2079-2080、1982.10
- 9) 宮村雅史、太田正光、山口修由：ラス下地モルタル塗り工法の耐力及び剥落に関する研究 ーラス下地板の場合ー、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道)、pp.475-476、2004.8
- 10) 綿引誠、ほか 3 名：木造軸組構法における非構造部材の動的・静的挙動と建物の性能設計に関する実験的研究 (その 2) 外装、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) C-1 分冊、pp.509-510、2007.8
- 11) 水谷吉克、ほか 7 名：ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 その 4 ～ 5、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) A-1 分冊、pp.113-116、1998.9
- 12) 高橋大祐、ほか 3 名：内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形性能試験その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) 構造系、pp.359-362、2002.8
- 13) 浅井英克、時野谷浩良、鈴木康正：鉄骨造建物における横張り乾式外壁の相関変形追従性能確認試験、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) C-1 分冊、pp.1059-1060、2007.8
- 14) 横家尚、ほか 3 名：現場タイル張り ALC パネルの層間変位追従性能に関する実験的研究 その 1 ～ 3、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) A-1 分冊、pp.353-358、2002.8
- 15) 松岡祐一、ほか 3 名：開口部のある ALC 版外装材の大変形性能検証実験 Eーディフェンス鋼構造物実験研究その 14、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) C-1 分冊、pp.1081-1082、2007.8
- 16) 坂本功、ほか 4 名：ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究 その 1 ～ 3、日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) A 分冊、pp.201-206、1987.10
- 17) 永井昌志、山崎健一、河辺伸二：現場タイル張り ALC パネル縦壁ロッキング構法の層間変位追従性能に関する実験的研究 その 1 層間変位追従性能試験結果、日本建築士上学会大会学術講演会研究発表論文集、pp.125-128、1998.10
- 18) 金子美香、神原浩、田村和夫：非構造部材の耐震実験結果に基づく耐震性能の整理、日本建築学会技術報告集第 21 号、pp. 39-44、2005.6
- 19) 長谷部浩一、翠川三郎、松岡昌志：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建物群の震害予測その 2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例、日本建築学会構造系論文集 第 505 号、pp. 53-59、1998.3
- 20) 長谷部浩一、翠川三郎：地域メッシュ統計を利用した広域での非木造建物群の震害予測、日本建築学会構造系論文集 第 521 号、pp. 41-47、1999.7
- 21) 村尾修、山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数、日本建築学会構造系論文集 第 527 号、pp. 189-196、2000.1
- 22) 村尾修、ほか 3 名：兵庫県南部地震の被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案、日本建築学会構造系論文集 第 527 号、pp. 197-204、2000.1
- 23) 林康裕、ほか 3 名：耐震診断結果を利用した既存 RC 造建築物の地震リスク表示、地域安全学会論文集 No.2、pp. 235-242、2000.11
- 24) 岡田成幸、高井伸雄：木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用、日本建築学会構造系論文集 第 582 号、pp. 31-38、2004.8
- 25) (社) 建築・設備維持保全推進協会、(財) 日本建築防災協会：外壁の地震に対する安全性の評価方法・同解説、2004.3
- 26) 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査報告書、2008.2
- 27) 坂本功、伊藤弘：2 次部材の耐震設計に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) 構造系、pp.673-674、1976.10
- 28) 小松幸夫、遠藤和義：戸建住宅のライフサイクルコストの推計、日本建築学会計画系論文集 第 534 号、pp. 241-246、2000.8
- 29) 齋藤茂樹、深尾精一、門脇耕三：戸建住宅の外壁改修周期に関する研究 複数の市街地における比較分析、日本建築学会計画系論文集 第 615 号、pp. 61-67、2007.5

(2008年10月8日原稿受理、2009年3月23日採用決定)