環境性能・修復性能・森林保全 を考慮した建築構造設計法の研究

STUDY ON STRUCTURAL DESIGN IN CONSIDERATION OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE AND REPAIR PERFORMANCE AND FOREST CONSERVATION

藤井秀行 ——— * 1 稲田達夫 ——— * 2

Hideyuki FUJII ——— * 1 Tatsuo INADA ——— * 2

キーワード:

環境問題, 耐震安全性, 森林保全, 建築構造設計, 環境性能評価, 修復性能評価, 長寿命化, 木床

Keywords:

Environmental issues, Earthquake-proof safety, Forest preservation, Structural design of building, Environmental impact evaluation of building, Repairable evaluation of buildings, Correlation, Timber floor

In recent years, the needs of society's structure is diversified. Therefore, support is becoming difficult to only structural design of safety-critical legacy. Problem of environmental and seismic safety and forest conservation is important in Japan. For this reason, we focus on environmental performance of the building in environmental issues, repair performance of the building in seismic safety and the introduction of the wood floor in issue forest conservation. It is the purpose of this report is carried out as a study for a specific case for the involvement of these.

1. はじめに

近年、建築の構造設計に対する社会の要求について、大きな変化がみられる。従来は、地震などの災害に対する安全の確保が主眼であり、対象も建築の構造部材のみに絞り利用者に安全を提供してきた。東日本大震災後、あれほどの大災害であったにもかかわらず地震動そのものによる被害が少なかったことは日本の耐震技術の成果といえる。

しかし、構造工学の重要性を示した一方、天井などの非構造部材の損傷による事業停止や、原発問題に端を発する環境負荷の増大など、従来、関心外であった問題が浮上し、その打開策を建築構造に求めるケースが生じている。例えば、事業継続性、不動産資産価値評価、環境性能評価などが問題として挙げられる。これら意匠、構造、設備設計者といった専門技術者単独では直接的に対応することが出来ない要求に対して、現状は事業継続計画（以下、BCP）や地震 PML 評価、建築環境総合性能評価システム（以下、CASBEE）などを用いて対応している。ただしこれらは、構造設計については設計段階で建物にフィードバックされることはほとんどなく、完成品の評価に限られる。

以上、述べた様な要求性能の複雑化は時間の経過とともに加速され、将来的には現行の設計法では対応できない状況を迎えることになると思われる。

そこで各専門分野が縦割りの専門領域をこなす設計に甘んじるのではなく、各分野を横断した大局的な設計体系が必要となると考える。特に構造分野は、他の専門領域とも関わることが多いことから、重要な役割を担うことを求められるのではないかとと思われる。

2. 研究の背景・目的

2.1. 環境問題への配慮

今年の夏は、過去に類を見ない異常気象が観測された。西日本では夏の平均気温が1946年以降で第1位を記録し、また竜巻、ゲリラ豪

雨の発生など異常気象を観測された。これは日本だけではなく世界中でもこの様な異常気象が観測され、今後も同様の問題の発生が懸念される。この原因として温室効果ガスの増加に起因する地球温暖化の問題が挙げられる。我国では、一人あたりのCO₂量が世界の上位を占めることから、この問題に対する意識を高める必要がある。また、日本の産業分野では建築分野によるCO₂排出量が3割以上を占めている²⁾ことから建築分野へのCO₂排出削減に対する期待が集まっている。これに伴い2009年に建築17団体で2050年カーボンニュートラル化の提言が行われ、低炭素社会を目指したCO₂(60~80%)排出の削減が求められている。

2.2. 耐震安全性への配慮

地震大国である我国では毎日のように地震の発生が観測されている。近年では、東日本大震災の様な巨大地震や阪神淡路大震災の様な直下型地震など頻繁に大規模な地震の発生が確認されており、今後も想定外の大規模な地震が起きる可能性が懸念される。また、近年では長周期地震動の問題もあり超高層建物との共振による問題や、非構造部材の破壊等の問題が懸念されている。東日本大震災では幸運にも地震による被害は比較的少なかったが地震への不明確な部分も多く、阪神淡路大震災のような直下型地震では被害率も大きく未だ明確な解決策は無いのが現状である。今後、南海トラフ巨大地震も懸念されており益々の地震対策が求められている。

2.3. 森林保全の問題への配慮

我が国の木材生産量は1960年当時、約4000万m³あったのに対し1998年以降では2000万m³以下と低迷した⁷⁾ことで人工林蓄積量が年々増加し20億m³を上回っているのが現状である。そのため国産木材生産量を1960年当時の水準に戻すことが課題となっている。それに伴い、「公共建築物への木材の使用に関する法律」が公布され、また環境問題の視点からもエコマテリアルである木材に注目が集ま

¹⁾ 福岡大学大学院工学研究科建設工学専攻
(〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1)

²⁾ 福岡大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Fukuoka Univ.

²⁾ Prof., Dept. of Arch., Fac. of Eng., Fukuoka Univ., Dr. Eng.

っており、木材・森林資源の保全は重要な課題である。

2. 4. 本報告の目的

以上述べた様に、近年構造分野に対する社会のニーズが多様化しており従来の安全重視の構造設計だけでは対応が困難となりつつある。環境問題の側面からはエコマテリアル、特に木材等の積極活用が望まれるほか、建物の長寿命化の推進も重要である。また、建築分野の特性から空調・照明等の建物の運用段階に排出されるCO₂量は膨大であり、それらを考慮したライフサイクルCO₂(以下LCCO₂)への配慮も不可欠である。この様に今後構造分野において環境性能(CO₂排出量の削減)評価は重要な問題である。

また、2.2で述べた様に非構造部材の損傷がもたらす問題は場合によって建物の解体等に結び付くことから建物の寿命の問題とも関わる重要な問題である。したがって修復の可能性を判断する修復性能評価は環境性能とも関わる重要な問題である。

また同様に、エコマテリアルである木材の活用は、軽量化により耐震性能の向上にもつながる可能性があり環境性能の改善も見込める重要な問題である。

以上より、木材の活用を対象に環境性能・修復性能の関わりについて具体的な事例を対象として検討を行うのが本報告の目的である。

3. 検討方法

3. 1. 修復性能評価

修復性能評価は建物の振動解析を行うことによって得られる応答加速度、層間変形に注目し、復旧費用比率(修復費用／初期建設費用)を求めることを可能としている。これにより、建物の地震による被害を定量的に評価することを可能としている。詳しくは既往研究¹⁾を参照のこと。

3. 2. 環境性能評価

環境性能評価は一貫計算プログラムから得られる構造投入資材料に着目することで構造設計者が簡便に設計・生産・運用・改修・廃棄に排出するCO₂量(kg-CO₂/m²/年)を計算することを可能としている。詳しくは既往研究¹⁾を参照のこと。

3. 3. 木材の活用による安全性の評価

建築用木材の使用率は住宅が9割を占めており非住宅が1割⁸⁾というのが現状である。そのため非住宅なかでも超高層オフィスに木床を採用することで木材の使用量を大幅に上げることが可能となる。木床を採用するに当たって設計の自由度の拡大、建設段階におけるCO₂排出削減、重量の低減という多くの利点が期待できる。本報では重量を低減することができることに注目し固有周期の低減効果の検討を行ったので報告する。

4. 具体的解析モデルの説明

4. 1. 建物モデルの詳細

3章に示した検討方法をモデル建物に適用し検討を行う。モデル建物は、超高層建物であるS造30階建てモデルを採用した。その床伏図、軸組図を図1に示す。まず第1に、モデル建物をコンクリート床とした場合と木床とした場合について環境性能・修復性能の評価を行う。次に地震対策を施さない場合と施した場合(間柱制振装置を設置した場合)についても同様に評価を行う。各性能評価の結果から、木床化あるいは地震対策を施した場合の環境性能・修復性能への影

図 1. 床伏図、軸組図

表 1. 採用モデル情報

モデル	躯体	床情報			用途	規模	詳細
		床種別	床厚	その他			
1	S造	RC造	150mm	デッキプレート	オフィス	30階	地震対策なし
2	S造	RC造	150mm	含む	オフィス	30階	制震装置
3	S造	木造	150mm	耐火被覆無視	オフィス	30階	地震対策なし
4	S造	木造	150mm		オフィス	30階	制震装置

響について考察を行う。具体的に検討を行ったモデル建物と床の詳細を表1に示す。

4. 2. 入力地震動モデルの詳細

本報では様々な地震レベルにおける耐震性能評価を行うために、告示波及び過去の既存観測波を採用し、位相や目標スペクトルを変化させた人工地震動を作成した。それらの再現期間等を考慮してレベル分けを行ったのが表2である。この地震動モデルの特徴としてはレベル2の告示波(極稀)のほかレベル3としてさらに再現期間を2倍程度とした場合及び、その地震波に直下型、長周期地震動の特徴を付加したレベル4地震を想定したことが挙げられる。それぞれの地震波のエネルギースペクトル(エネルギー等価速度)を図2に示す。

表 2. レベル別地震波一覧

レベル		地震波	PGA (gal)	PGV (kine)	位相	再現期間	地震像	備考
稀	レベル1	告示波	63.6	9	ランダム	50年	プレート型 大地震	基準法レベル
		既存観測波 (EL CENTRO 等)	250	24				過去の建物と の比較用
極稀	レベル2	告示波	318	43	ランダム	500年		基準法レベル
		既存観測波 (EL CENTRO 等)	500	49				過去の建物と の比較用
	レベル3	告示波	609	98	JMA-KOBE	1000年	直下型地震 長周期地震	
	レベル4	告示波	658	104	JMA-KOBE	2000年		
告示波		639	107	ランダム

図 2. 地震波別エネルギースペクトル図

5. 具体的解析モデルへの適用

5.1. 修復性能評価による復旧費用比率の評価

図1の建物モデルに表2の地震波を用い振動解析を行い、修復性能評価（復旧費用比率）の計算を行った。既往研究¹⁾では層間変形角1/60以上で復旧不可と定義しているが、本報では超高層建築物を対象としており、残留変形が大きくなればP-δ効果等の影響も懸念されることから修復は難しい。そのため層間変形角が1/100以上になったときに復旧不可とみなし検討を行った。表3は振動解析結果の一例であり、これを用い修復性能評価を行い、復旧費用比率を求めたものが図3である。

表3. レベル4 告示波(長周期)による振動解析結果

レベル4 告示波(長周期)									
地震対策なし									
層数	コンクリート床				木床				
	X		Y		X		Y		
	層間変位 (cm)	加速度 (cm/s ²)	層間変位 (cm)	加速度 (cm/s ²)	層間変位 (cm)	加速度 (cm/s ²)	層間変位 (cm)	加速度 (cm/s ²)	
30	1.03	372	1.00	367	0.78	470	0.79	466	
29	1.57	343	1.54	339	1.25	450	1.25	446	
28	2.42	309	2.24	309	1.64	420	1.67	416	
27	3.11	300	2.91	297	2.32	384	2.28	379	
26	3.48	287	3.33	281	2.68	347	2.73	345	
25	3.54	267	3.37	262	2.71	321	2.76	319	
24	3.87	254	3.82	251	2.65	318	2.55	317	
23	4.65	244	4.34	241	2.97	323	2.76	321	
22	4.90	236	4.78	232	3.19	332	2.94	329	
21	5.20	239	4.83	234	3.42	338	3.12	335	
20	5.28	238	4.85	233	3.57	340	3.43	336	
19	5.68	235	5.08	231	3.61	337	3.45	332	
18	5.71	230	5.56	227	3.61	328	3.53	324	
17	5.45	226	5.51	223	3.77	316	3.82	312	
16	4.94	223	5.39	221	4.10	301	5.08	298	
15	5.04	222	5.44	222	5.36	287	6.23	284	
14	5.74	223	5.77	223	6.22	275	6.80	271	
13	6.27	224	6.11	224	6.74	265	6.93	262	
12	6.93	224	6.41	224	7.10	259	6.83	255	
11	6.93	220	6.50	220	7.21	254	6.91	251	
10	7.27	214	7.02	215	6.98	250	7.14	248	
9	6.53	207	6.20	207	7.10	244	6.95	242	
8	5.78	199	5.80	199	7.76	237	7.33	235	
7	6.17	192	6.03	192	8.36	233	8.17	225	
6	5.42	186	5.67	187	9.15	235	9.05	237	
5	5.99	205	5.59	208	9.72	237	8.96	237	
4	7.22	196	6.34	192	9.53	235	8.93	235	
3	8.82	215	7.49	210	9.61	229	8.64	229	
2	8.23	285	7.66	285	7.50	240	7.41	236	
1	2.71	277	3.14	264	2.65	270	2.85	268

図3. 床種・地震波・地震対策別の復旧費用比率

表4. 復旧費用比率による性能基準

性能レベル	復旧費用比率	想定される状態
安全確保	規定無し	死傷者(重傷者以上)の発生はないが、非構造要素等の損傷は激しく、場合によっては、建て替えた方が経済的な場合もある。
修復後使用可	0.1以下	非構造要素等の損傷は比較的軽微であるが、場合によっては、一次退去し修復工事が必要なこともある。
継続使用可	0.05以下	非構造要素等の損傷は軽微であり、地震後も退去することなく、継続して使用可能である。

図3から、極稀の観測地震波の場合、卓越周期が固有周期と一致し共振していることから応答が大きくなっているものもあるが、全体的に木床の応答が小さくなっていることがわかる。また、復旧費用比率により性能レベルを分けた一例が表4である。図3の復旧費用比率に注目すると木床・コンクリート床に関わらず、レベル2の極稀地震では修復後に使用可能となり、レベル3、4の極稀地震では安全確保とはなるものの修復不可能という結果となっている。これらに制震装置を設置することによってコンクリート床では復旧費用比率は低減するものの性能レベルには変化は無い。一方、木床ではレベル2の告示波の場合、建物の継続使用も可能となり、レベル3、4の地震では多くが修復可能という結果となることから、木床と制震装置の有効性が見て取れる。

5.2. 環境性能評価による段階別年間CO₂排出量の評価

環境性能評価は今回使用したモデル建物に耐用年数の相異について評価を行ったのを図4に示す。

図4. 耐用年数・床種・地震対策別CO₂排出量

この結果から、耐用年数の相異によるLCCO₂は約10%の削減となり、木床にすることで建設段階のCO₂量を約20%削減することが可能であることがわかる。

また供用期間を35年として、その間に排出する建設段階と運用段階のCO₂量の比較を行ったものを図5に示す。図5の建設段階と運用段階の総CO₂排出量を比較すると1:2.5となっており、図4の結果からも運用段階において排出されるCO₂量が多いことがわかる。しかし今後、省CO₂化や再生可能エネルギーの普及により運用段階において排出されるCO₂量は現状の80%程度は削減可能といわれており、建設初期の1,2年で大量にCO₂を排出する建設段階が今後、問題視されることが考えられる。これらがどのように影響を及ぼすかについては次章の時間軸を考慮したCO₂排出に関する評価で検討する。

図5. 供用期間35年間に排出する建設・運用段階からのCO₂排出量

5. 3. 木床化による固有周期の変化に関する検討

モデル建物のコンクリート床、木床それぞれで固有値解析を行い固有周期の算定を行った。その結果を表5に示す。

表 5. 床種別・剛性の変化による固有周期の変化

	方向	1次固有周期(s)	2次固有周期(s)	3次固有周期(s)
コンクリート床	X	3.66	1.32	0.81
	Y	3.67	1.32	0.81
木床	X	2.96	1.07	0.65
	Y	2.97	1.07	0.65
コンクリート床 躯体剛性1.5倍	X	2.99	1.08	0.66
	Y	2.99	1.08	0.66

これにより、木床にすることで固有周期を 0.7 秒程度低減することが可能であることがわかる。表 5 にあるようにコンクリート床で木床導入時と同等の固有周期を得るには剛性を約 1.5 倍にする必要がある。それに伴いより多くの構造資材が必要になることから建設費用や建設段階の CO₂ 排出量も増加することが想定される。

6. 時間軸を考慮した CO₂ 排出に関する評価

時間軸を考慮した考え方をタイムインターフェースデザイン（以下 TID）と称して検討を行う。本報では 1000 年間で建て替えや地震の影響を考慮した検討を行う。コンクリート床を設置したモデル建物を S-RC-0-30、木床を設置した場合を S-T-0-30 と表記する。

6. 1. 地震被害も含めた耐用年数・省 CO₂ 化が環境に与える影響の検討

性能評価を行ったことにより 1 年当たりに排出する CO₂ 量や復旧費用比率を計算でき建設から解体までに排出する CO₂ 量等を計算することが可能となった。しかし、実際には時代の進展とともに建物の長寿命化や設備機器等の改良、耐震性技術の発達などが進むことが予想され現状の情報だけでは予測できる未来に限られる。そのため TID の視点からより先の状況を予測することを目的として解析を行った。本報では耐用年数の延伸、改修期間の延伸、運用段階の省 CO₂ 率の改善等を考慮した低炭素建築の 4 つのモデルを設定し検討を行った。検討結果を用い、供用期間が終了すれば同じ建物を再び建設すると仮定して今後 1000 年間で排出する CO₂ 量の計算を行った。また、地震被害の影響を考慮して、表 2 で提示した各レベルの地震が再現期間の年次で発生すると仮定する。ただし再現期間が 1000 年の地震波については 500 年目で 2000 年の地震波については 1000 年目で発生すると仮定している。

6. 1. 1. 耐用年数が環境に与える影響（表 6-図 6）

このモデルでは S-T-0-30 を採用し、運用段階の省 CO₂ 率と改修期間を一定とし耐用年数の相異の影響のみを考慮して CO₂ 排出量の検討を行ったものである。図 6 から耐用年数の延伸により LCCO₂ 量が大きく低減しており、また建設段階の CO₂ 排出量の多い制震ありの場合と地震対策なしの場合を比較すると、互いに大差ない値となっていることがわかる。また、耐用年数が 35 年と 200 年で比較すると制震装置ありの場合となしの場合で LCCO₂ の逆転現象がみられる。これは 1000 年間で見たとき耐用年数 35 年の場合は建て替え時に建設段階の CO₂ 排出量が多大なため地震被害の影響が薄れている一方、建物の長寿命化とともに建て替え時に建設段階の CO₂ 排出量が低減し地震被害の影響が顕在化するためだと考えられる。今後、CO₂ 排出量を削

表 6. 耐用年数の相異を考慮したモデル

モデル	1	2	3	4
耐用年数	35年	50年	100年	200年
改修期間	15年	15年	15年	15年
省CO ₂ 率	0%	0%	0%	0%

図 6. 耐用年数の相異を考慮した CO₂ 排出量グラフ

表 7. 省 CO₂ 率の相異を考慮したモデル

モデル	1	2	3	4
耐用年数	35年	35年	35年	35年
改修期間	15年	15年	15年	15年
省CO ₂ 率	0%	20%	50%	80%

図 7. 省 CO₂ 率の相異を考慮した CO₂ 排出量グラフ

表 8. 耐用年数・改修期間・省 CO₂ 化全体の相異を考慮したモデル

モデル	1	2	3	4
耐用年数	35年	50年	100年	200年
改修期間	15年	20年	30年	50年
省CO ₂ 率	0%	20%	50%	80%

図 8. 全体の変化を考慮した CO₂ 排出量グラフ

減するために建物の長寿命化は必要であり、建物を長期的に維持するためにも改修の重要性が増すものと考えられる。

6.1.2. 省 CO₂ 化が環境に与える影響（表 7-図 7）

このモデルは S-RC-0-30、S-T-0-30 両方のモデルを採用し、6.1.1 のモデルとは異なり耐用年数・改修期間を一定とし、運用段階の省 CO₂ 率の相異の影響のみを考慮して CO₂ 排出量の検討を行ったものである。図 7 の総 CO₂ 排出量が耐用年数を考慮した図 6 の検討より減少していることから運用段階で排出される CO₂ 量の多さが改めて確認できる。また運用から排出する CO₂ 量を 80%低減しても LCCO₂ は全体で約 50%の削減しか見込めず、CO₂ の削減は運用にのみ依存しているわけではないことがわかる。これは現在 CO₂ 排出量の削減を設備分野のみに依存するのはいずれ限界がくることを表しており、これ以上 CO₂ 排出量を削減しようとした時、はじめて耐用年数や改修期間の重要性が増すと考えられる。そのため次節では耐用年数、省 CO₂ 化、改修期間全体の影響を考慮した検討を行う。

6.1.3. 耐用年数・改修期間・省 CO₂ 化、全体が環境に与える影響（表 8-図 8）

このモデルは S-T-0-30 のモデルを採用し、6.1.1、6.1.2 の両方の条件と改修期間の相異の影響を考慮して CO₂ 排出量の検討を行ったものである。図から地震被害の影響はモデル 1 にはほとんどみられないが、モデル 4 では建設段階・運用段階から排出される CO₂ 量は大きく減少し、地震被害の影響が見て取れるようになる。つまり現在環境という視点で見ると地震被害が環境負荷に与える影響は運用段階や建設段階に排出される CO₂ 量が多いため目立たない状況である。しかし今後、建物の長寿命化や運用段階の省 CO₂ 化が徹底されれば地震被害が環境に与える LCCO₂ への影響というものも顕在化してくるため構造分野の重要性が増すものと考えられる。

制震装置に関してみると制震装置の有無が環境負荷に与える影響はほとんど見られなかった。CO₂ 排出量に大きな差がないということから考えると、環境的視点に拘らずより効果的な耐震対策を選択すれば良いと考えられる。

このモデルでは耐用年数・改修期間の延伸、省 CO₂ 率の改善を考慮することで総 CO₂ 排出量の約 80%削減が可能であることがわかった。今後、建物の長寿命化や設備機器等の改良、自然エネルギーの採用などで耐用年数・改修期間・省 CO₂ 率が大きく改善したとき、今以上に環境への影響を緩和することができ、低炭素社会の目標である CO₂ 排出量 60～80%削減も実現可能になるといえるだろう。

7. まとめ

これまでの報告で、環境問題・耐震安全性の問題・木材の活用の 3 つの観点から検討を行った。

環境問題については時間軸を考慮した LCCO₂ 排出量の確認を行った。これにより、耐用年数の増加を考慮したところ今後、耐用年数が 200 年になることで約 30%の LCCO₂ の排出量削減が見込めることがわかった。次に省 CO₂ 率の改善を考慮したところ今後、省 CO₂ 率が 80%になることで約 50%の LCCO₂ の排出量削減が見込めることがわかった。これら 2 つの影響と改修期間の延伸も考慮することで将来的に約 80%の LCCO₂ の排出量削減が見込めることを本報告で明らかにした。また、今回は地震被害が環境に与える影響も検討したが、運用段階や建設段階に排出する CO₂ 量が多大なため環境に与える LCCO₂

への影響がほとんどないことがわかった。

耐震安全性についてはモデル建物を仮定し、地震動モデルを作成し振動応答解析を行うことによって修復性能評価を行った。これにより、木床化や制震装置を導入することにより耐震安全性の向上や継続使用性・修復性等の確保の可能性を見出すことができた。

木材の活用では木床を導入することの提案を行い従来のコンクリート床との比較検討を行った。それにより環境的側面では木床化することにより建設段階で 20%もの CO₂ 排出量を削減することを可能とした。また、建物の固有周期について言えば木床化を行うことにより約 0.7 秒の固有周期の低減を達成することができた。このことは今後、長周期地震動対策等で応用が可能と考える。

本報告では具体的な事例を中心に検討を行った。今後はより様々な条件での検証把握を行う。

参考文献

- 1) 新久保達也, 稲田達夫: 地球環境時代における建築構造設計の在り方に関する研究、技術報告集 第 43 号 P.955 2013.10
- 2) 日本建築学会: 建物の LCA 指針, 第 3 版, 2006
- 3) 日本建築学会他関連 17 団体: 提言 建築関連分野の地球温暖化対策ビジョン 2050 2009.12
- 4) 新久保達也, 稲田達夫, 藤井秀行: 建築構造設計手法に関する研究 その 2 日本建築学会研究報告九州支部第 52 号, No. 307, pp653～656, 2013
- 5) 藤井秀行, 稲田達夫, 新久保達也: 建築構造設計手法に関する研究 その 3 日本建築学会研究報告九州支部第 52 号, No. 307, pp657～660, 2013
- 6) 稲田達夫: 低炭素時代における建築構造のあり方に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 Vol. 74, No. 644, pp. 1887～1894, 2009.10
- 7) 林野庁: 木材需給（供給）量累年統計 2011
- 8) 国土交通省: 2013 年建築着工統計調査（年計）2014.1.31

[2013 年 10 月 8 日原稿受理 2014 年 4 月 1 日採用決定]