

# 修復性能と環境性能に着目した新構造設計法の提案

福岡大学 稲田達夫

## 1. 社会の変化と構造設計

建築設計はこの十数年で大きな変化を遂げた。高性能のコンピュータの普及やCAD・CGの表現力の向上は、建築主に対する計画中の建物の説明を、より現実感を持って行うことを可能にした。あるいは環境工学分野における様々な技術革新は、建物の運用時における大幅な省エネを可能とし、またそれと自然エネルギー利用を組み合わせることにより、従来とは一桁異なるCO<sub>2</sub>排出削減を可能にした。構造分野においても、免制震技術の普及や、既存不適格建物に対する地道な耐震改修努力により、建物そして都市防災の観点からも大幅な耐震安全性の向上に貢献している。

東日本大震災の津波被害が我々にもたらしたものは、あまりにも過酷なものであったが、一方で、M9の大地震による構造被害については、当初の想定を下回るものであった。しかしそのような中で、新たな問題の発見が見られたのも事実である。そのような問題点を列記してみると、以下の通りとなる。

- ①内装、外装材の被害の問題： 天井崩落による人的被害など、構造体は健全でも、内外装材の被害により人命が損なわれるケースや、修復費用が嵩み、結果として解体を余儀なくされる建物の存在が改めて指摘された。このような被害は、構造体の被害が少なかった分だけ、より注目されることになったとも言えるが、無視できない重要な問題であることは言うまでもないことである。
- ②BCPの問題： 建物自体には損傷がなくとも、生産ライン等の損壊により企業の事業性が著しく悪化し、また結果として部品の流通網等が破壊され、広範囲に亘り経済に多大な悪影響をもたらすという問題が指摘された。
- ③入力地震動の問題： 特に、長周期地震動やキラーパルスなど、建物にとって最悪の地震動とは何かということが改めて問われたと思う。
- ④構造性能の評価軸の問題： 例えば、初期コスト（あるいは、建設時におけるCO<sub>2</sub>排出量）とライフサイクルコスト（あるいはLCCO<sub>2</sub>）の間のトレードオフの問題。

つまり、従来の構造設計法は構造躯体の健全性と建設コストに重きを置きすぎた結果、本来の社会的ニーズに対し、適格に応えることができていなかったのではないかと思われるのである。それで、このような問題の解決のため、JSCA地球環境問題委員会は、「修復性能（非構造要素も含めた修復費用と修復期間）」および「環境性能（建設時CO<sub>2</sub>排出量と運用段階も含めたLCCO<sub>2</sub>）」に着目した新しい構造設計法の検討を進めてきたが、この度、その新構造設計法の骨子がほぼまとまったので、その概要を紹介する

## 2. 修復性能と環境性能を評価軸とした新構造設計法の提案

通常の構造設計で使用する構造一貫計算プログラムで扱う情報は極めて多く、それらの情報を有効に活用すれば、設計に有益な新たな二次情報を得ることができる。そのような観点から、本稿では、先に述べた環境性能と修復性能の評価に焦点を絞った総合的構造設計支援ツールの提案を行う。

### 2.1 環境性能に着目した新構造設計法

現在、構造設計者の環境分野（特にCO<sub>2</sub>排出削減の問題）に対する関わりは十分とは言

えず、構造設計の判断基準としての環境影響への配慮は極めて希薄であるのが実情である。しかし我が国は、2050年カーボンニュートラル化実現に向け、今後より一層環境問題、特にCO<sub>2</sub>排出量削減の問題に対する要求・圧力が厳しくなるものと思われる。先にも述べたように、環境工学分野が、着々と建物運用段階におけるその対策を進める中、建設段階で最も多くのCO<sub>2</sub>を排出する、鉄とコンクリートに深く関わる構造設計者の役割は、今後重要度を増すものと推測される。

ここで従来の環境影響評価ツールについて見てみると、日本建築学会がまとめたLCA指針や、産官学の共同でまとめたCASBEEなどが、挙げられるが、これらのツールは、環境工学分野を主眼としており、構造設計者が使用するには構造分野の項目が不十分という問題がある。それでここでは、構造一貫計算プログラムから得られる情報を利用して、構造設計者が簡便に利用することができる環境影響評価ツールを以下に提示する。

$$LCCO_2 = \sum Q_k \quad (1)$$

k : plan (設計) ~ product (生産) ~ management (運用)  
 ~ renovation (改修) ~ waste (廃棄)

上記のように、建物に必要な各ステージをkとする。排出ステージの関係性を下式のように仮定する。

$$Q_{product} = G_{structure} \times \frac{100}{C} \div L \quad (2)$$

$$G_{structure} = \sum_{k=product} \sum_m (G_{input}^{k,m}) \quad (3)$$

$$G_{input} = A_m \times U_r \quad (4)$$

m : concrete (コンクリート), reinforcing bar (鉄筋),  
 steel frame (鉄骨), などの構造躯体投入資材

$$Q_{plan} = 0 \quad (5)$$

$$Q_{waste} = 0.2 \times Q_{product} \quad (6)$$

$$Q_{management} = 2 \times \frac{L}{35} \times \frac{T}{12} \times F \times Q_{product} \quad (7)$$

$$Q_{renovation} = 0.35 \times \left[ \frac{L}{15} \right] \times Q_{product} \quad (8)$$

ただし

$Q_k$  : ステージ k における CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/年)

$G_{input}$  : 投入材料毎 CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)

$G_{structure}$  : 構造躯体 CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)

$U_r$  : 環境負荷原単位

$A_m$  : 資材投入量

$L$  : 耐用年数 (年)

$C$  : 生産に対する構造躯体の CO<sub>2</sub> 排出量比 (%)

$T$  : 施設稼働時間 (時間)

$F$  : 投入設備レベル

係数Cは構造種別・用途に応じて、下表1~5の囲いの数値を利用し、CO<sub>2</sub>原単位は表6を用いる。構造S造一用途houseについては参考資料が少なく、信頼性の高いものが得られな

かったため割愛する。また木造についてはカーボンニュートラル材料であるため、提案式による評価を行うことができない。そのため対象外とした。

表 1) 躯体 RC-用途 office 時 CO<sub>2</sub> 排出量比率

RC-office					
工事区分	細目		CO <sub>2</sub> 排出量		
			単位面積当たり	割合	
建築工事	躯体	地上	0.313	22.2%	34.7%
		地下	0.176	12.5%	
	仕上げ	非構造要素	0.165	11.7%	11.7%
設備工事	設備	電気設備	0.116	8.2%	23.3%
		空調設備	0.130	9.2%	
		衛生設備	0.071	5.0%	
		昇降機設備	0.011	0.8%	
その他			0.427	30.3%	
建物全体			1.409	100.0%	

表 2) 躯体 S-用途 office 時 CO<sub>2</sub> 排出量比率

S-office					
工事区分	細目		CO <sub>2</sub> 排出量		
			単位面積当たり	割合	
建築工事	躯体	地上	0.268	19.0%	32.6%
		地下	0.192	13.6%	
	仕上げ	非構造要素	0.165	11.7%	11.7%
設備工事	設備	電気設備	0.116	8.2%	23.3%
		空調設備	0.130	9.2%	
		衛生設備	0.071	5.0%	
		昇降機設備	0.011	0.8%	
その他			0.456	32.4%	
建物全体			1.409	100.0%	

表 3) 躯体 SRC-用途 office 時 CO<sub>2</sub> 排出量比率

SRC-office					
工事区分	細目		CO <sub>2</sub> 排出量		
			単位面積当たり	割合	
建築工事	躯体	地上	0.278	19.7%	34.4%
		地下	0.206	14.6%	
	仕上げ	非構造要素	0.165	11.7%	11.7%
設備工事	設備	電気設備	0.116	8.2%	23.3%
		空調設備	0.130	9.2%	
		衛生設備	0.071	5.0%	
		昇降機設備	0.011	0.8%	
その他			0.432	30.6%	
建物全体			1.409	100.0%	

表 4) 躯体 SRC-用途 house 時 CO<sub>2</sub> 排出量比率

SRC-house					
工事区分	細目		CO <sub>2</sub> 排出量		
			単位面積当たり	割合	
建築工事	躯体	地上	0.371	25.3%	44.2%
		地下	0.277	18.9%	
	仕上げ	非構造要素	0.381	26.0%	26.0%
設備工事	設備	電気設備	0.036	2.5%	9.0%
		空調設備	0.012	0.8%	
		衛生設備	0.080	5.5%	
		昇降機設備	0.004	0.3%	
その他			0.305	20.8%	
建物全体			1.467	100.0%	

表 5) 躯体 RC-用途 house 時 CO<sub>2</sub> 排出量比率

RC-house					
工事区分	細目		CO <sub>2</sub> 排出量		
			単位面積当たり	割合	
建築工事	躯体	地上	0.367	27.8%	39.7%
		地下	0.157	11.9%	
	仕上げ	非構造要素	0.308	23.3%	23.3%
設備工事	設備	電気設備	0.036	2.7%	10.0%
		空調設備	0.012	0.9%	
		衛生設備	0.080	6.1%	
		昇降機設備	0.004	0.3%	
その他			0.356	27.0%	
建物全体			1.320	100.0%	

表 6) 材料別 CO<sub>2</sub> 排出量原単位

材料	環境負荷原単位
コンクリート	
コンクリート(ポルトランド)Fc18N/mm <sup>2</sup>	299.9kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
コンクリート(ポルトランド)Fc21N/mm <sup>2</sup>	299.9kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
コンクリート(ポルトランド)Fc24N/mm <sup>2</sup>	309.7kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
コンクリート(ポルトランド)Fc27N/mm <sup>2</sup>	328.4kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
コンクリート(ポルトランド)Fc30N/mm <sup>2</sup>	350.5kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
鉄骨	1136kg-CO <sub>2</sub> /t
鉄筋	942kg-CO <sub>2</sub> /t

以上の評価式から予想できる様に、この評価ツールは生産段階と他の CO<sub>2</sub> 排出ステージの関係性を仮定し、それらの総和を LCCO<sub>2</sub> とし評価するものである。評価の根幹となる生産段階の CO<sub>2</sub> 排出量は構造一貫計算プログラムから得られる構造数量をインプットしたものであり、設計変更による断面の変更などにも容易に対応できる。

## 2.2 修復性能に着目した新構造設計法

阪神淡路大震災後、建物の損傷に着目した性能型構造設計が話題を集めた。これは性能マトリクスを建築主に提示し、大破・中破・小破等の想定される被害状況の中から建築主の意図に合うレベルを選択させ、その性能に合致した建物を設計するものである。しかし現実には、構造技術の専門家ではない建築主にとっては、性能マトリクスによる損傷状況のイメージは、現実感を持って理解されないまま、今日においても普及するには至っていない。

それでここでは、建築主がより理解しやすい指標として、復旧費用比率と復旧期間を用いた構造設計法の提案を行う。評価の実際としては、建物に対して振動応答解析を行いそのアウトプットから得られる加速度応答と層間変形角から、下表7~11の仮定に基づいて被害レベルを定めるものとする。

表 7) 復旧時間の想定

レベル	復旧時間	復旧時間の根拠
T0	機能継続	機能の停止がない
T1	3日以内	器材の発注等を伴わない範囲の補修
T2	3週間以内	器材の発注等は伴うが、検討事項のない補修
T3	3ヶ月以内	比較的簡易な補修工事(改修図制作を伴う)
T4	3ヶ月以上	解決すべき問題を抱える補修工事
T5	復旧不可	補修には時間・コストがかかりすぎる

表 7) 復旧時間の想定

部位		建設時工事費比率
構造躯体		0.25
外装	窓ガラス	0.10
	壁面	0.15
内装	天井	0.05
	内壁	0.05
	その他	0.05
設備機器	空調衛生機器	0.15
	配線・配管	0.10
	昇降機	0.10

表 9) 被害状況に応じた復旧費用比率

部位	大破	中破	小破	軽微	無被害	
構造躯体	0.50	0.20	0.05	0.00	0.00	
外装	窓ガラス	0.50	0.20	0.05	0.01	0.00
	壁面	0.50	0.20	0.05	0.00	0.00
内装	天井	0.50	0.20	0.05	0.01	0.00
	内壁	0.50	0.20	0.05	0.00	0.00
	その他	0.50	0.20	0.05	0.00	0.00
設備機器	空調衛生機器	0.50	0.20	0.05	0.01	0.00
	配線・配管	0.50	0.20	0.05	0.01	0.00
	昇降機	0.50	0.20	0.05	0.01	0.00

表 10) 構造躯体の被害と復旧の想定

被害の状況	復旧時間	層間変形角	想定される構造躯体の状態
復旧不可	T5	1/60以上	RC: 大きなクラックが生じ、壁等の崩落、一部床の落下等も見られる。残留変形も大きく、補修は困難。 S: 梁、プレースの破断の他、一部柱の破断、床の落下等もある。残留変形も大きく、補修は困難。
大破	T4	1/60以下	RC: かなり大きなクラックが生じており、一部壁の崩落も見られる。補修には入念な検討が必要である。 S: 梁フランジの部分的な破断、プレースの破断・座屈等がある。補修には入念な検討が必要である。
中破	T3	1/100以下	RC: かなり大きなクラックが生じている。補修が必要である。 S: かなりの範囲で梁、プレースに降伏が生じている。
小破	T2	1/200以下	RC: クラックが生じており、簡易な補修が必要である。 S: 一部の梁、プレースに破断が生じている。
軽微	T1	1/400以下	RC: よく見ると壁等に軽微なクラックが生じている。 S: 一部の制震部材が損傷している。
無被害	T0	1/900以下	RC: クラック等は殆ど生じていない。 S: 制震装置を含め損傷はない。

表 11) 非構造部材などの被害と復旧時間の想定

部位	被害の状態	被害状況	復旧時間	層間変形角	応答加速度	
外装	窓ガラス	軽微な損傷	小破	T1	1/400以上	〰️
		部分的損傷	中破	T2	1/200以上	
		全面的損傷	大破	T4	1/100以上	
壁面	軽微な亀裂・破損	軽微な亀裂・破損	小破	T1	1/400以上	〰️
		部分的亀裂・破損	中破	T2	1/200以上	
		全面的亀裂・破損	大破	T4	1/100以上	
内装	天井	軽微な落下	小破	T1	〰️	0.6G以上
		部分的落下	中破	T2	〰️	1.0G以上
		全面的落下	大破	T4	〰️	1.5G以上
内壁	軽微な損傷	軽微な損傷	小破	T1	1/400以上	〰️
		部分的損傷	中破	T2	1/200以上	
		全面的損傷	大破	T4	1/100以上	
設備機器	空調衛生機器	軽微な損傷	小破	T1	〰️	0.6G以上
		部分的損傷	中破	T2	〰️	1.0G以上
		全面的損傷	大破	T4	〰️	1.5G以上
	配線・配管	軽微な損傷	小破	T1	〰️	0.6G以上
		部分的損傷	中破	T2	〰️	1.0G以上
		全面的損傷	大破	T4	〰️	1.5G以上
昇降機	軽微な損傷	小破	T1	〰️	0.6G以上	
	部分的損傷	中破	T2	〰️	1.0G以上	
	全面的損傷	大破	T4	〰️	1.5G以上	

上表らを用いて被害の仮定を行った上で、修復性能は下式で評価される。これは、復旧費用比率（修復必要コスト／生産コスト）、及び復旧期間で表現される。

$$R_c = \sum \left( D_e \times B_e \times \sum_{k=1}^N (S_k \times R_k) \right) \quad (9)$$

Rc：復旧費用比率

Be：建築部位別建設時工事費比率

Sk：各階面積比

N：階数

Rk：損傷に応じた復旧工事比率

De：低減係数（対策していないものには1を入力）

ここで表 10、11 の被害状況は地震入力に対する対策を行っていないベーシックな建物を想定しており、天井の落下防止や外壁カーテンウォールなど被害が少なくなるような対策を行った部位には低減係数 De を乗じることで評価する。低減係数は、無対策が 1.0、対策有が 0.5 と現在仮定しているが、今後詳細な検討が必要となる。

今回評価指標として取り上げている復旧費用比率はわずか1%の誤差が生じただけで、金額に換算すると大きな差異となるため、より高い精度が要求されることは容易に想像できる。特に本評価ツールは工事比率を仮定により定めているため、多くのスタディを重ね、仮定の適切さを立証しなければならない。また一種類の地震波だけでなく、遠方海洋型～直下型までの様々な地震波を入力し、被害の大小、周期の長短をパラメトリックにスタディすることで各部位ごとの被害特性等を明確にすることができ、設計への有益な情報としてフィードバックすることが可能である。

本評価ツールにおいて結果として得られるものは、地震 PML に類似しているが、提案式は復旧費用比率を構造設計指標として評価し、また評価プロセスはすべて明示されている。それに対して地震 PML は不動産価値の評価が目的であり、また評価体系が明示されていない点で本質的に異なる。

表 12 に本設計法に従って、EXEL を用いて修復性能を求めた計算例を示す。修復性能はこのように EXEL 等を用いても計算することが可能であるが、実際にはかなり煩雑な計算となる。そのため、簡便に計算が可能なツールを準備しているもので、その概要を次節で述べる。

表 12) 修復性能評価例

階	各階床面積		応答値		構造躯体			外装(窓ガラス)			外装(壁面)		
	面積	面積比	層間変形角	加速度	状態	復旧工事費率	復旧期間	状態	復旧工事費率	復旧期間	状態	復旧工事費率	復旧期間
12	432.0	0.054	1/221	797.9	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2
11	432.0	0.054	1/144	598.2	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
10	720.0	0.089	1/211	609.2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2
9	720.0	0.089	1/180	516.0	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
8	720.0	0.089	1/158	488.5	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
7	720.0	0.089	1/152	467.2	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
6	720.0	0.089	1/142	585.4	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
5	720.0	0.089	1/140	514.9	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
4	720.0	0.089	1/136	520.3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
3	720.0	0.089	1/139	507.5	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
2	720.0	0.089	1/153	428.3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
1	720.0	0.089	1/157	394.4	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3	中破	0.2	T3
階	各階床面積		応答値		内装(天井)			内装(内壁)			内装(その他)		
	面積	面積比	層間変形角	加速度	状態	復旧工事費率	復旧期間	状態	復旧工事費率	復旧期間	状態	復旧工事費率	復旧期間
12	432.0	0.054	1/221	797.9	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2
11	432.0	0.054	1/144	598.2	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
10	720.0	0.089	1/211	609.2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2
9	720.0	0.089	1/180	516.0	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
8	720.0	0.089	1/158	488.5	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
7	720.0	0.089	1/152	467.2	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
6	720.0	0.089	1/142	585.4	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
5	720.0	0.089	1/140	514.9	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
4	720.0	0.089	1/136	520.3	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
3	720.0	0.089	1/139	507.5	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
2	720.0	0.089	1/153	428.3	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
1	720.0	0.089	1/157	394.4	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
階	各階床面積		応答値		空調・衛生機器			配管・配線			昇降機		
	面積	面積比	層間変形角	加速度	状態	復旧工事費率	復旧期間	状態	復旧工事費率	復旧期間	状態	復旧工事費率	復旧期間
12	432.0	0.054	1/221	797.9	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2
11	432.0	0.054	1/144	598.2	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
10	720.0	0.089	1/211	609.2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2	小破	0.05	T2
9	720.0	0.089	1/180	516.0	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
8	720.0	0.089	1/158	488.5	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
7	720.0	0.089	1/152	467.2	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
6	720.0	0.089	1/142	585.4	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
5	720.0	0.089	1/140	514.9	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
4	720.0	0.089	1/136	520.3	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
3	720.0	0.089	1/139	507.5	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
2	720.0	0.089	1/153	428.3	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0
1	720.0	0.089	1/157	394.4	無被害	0	T0	無被害	0	T0	無被害	0	T0

## 2.3 新構造設計法の性能評価ツールの概要

前節で述べた性能評価ツールの使い方としては、以下のような手順を想定している。

- ①構造計画
- ②構造設計
- ③構造一貫計算プログラムによる構造計算
- ④環境性能評価ツールによる環境性能の把握
- ⑤振動応答解析
- ⑥修復性能評価ツールによる修復性能の把握
- ⑦④⑥の結果を①にフィードバック

環境性能評価ツールの入力項目を、表 13 に示す。また、修復性能評価ツールの入力項目を、表 14 に示す。各ツールは、福岡大学・稲田研究室のHP、プログラムを入手することができる。

表 13) 環境性能評価ツールの入力項目一覧

変数	項目	備考
A(3)	材料別構造資材投入量	
U(2)	鉄、コンクリートのCO2原単位	
L	建物の耐用年数	35年を標準とする
C	生産に対する構造躯体のCO2排出量比	特に資材のCO2排出が少ない場合に考慮
T	施設の稼働時間	12時間稼働する場合を標準とする
F	設備機器等の省エネの度合い	通常1、ある程度省エネ0.8、徹底した省エネ0.5

表 14) 修復性能評価ツールの入力項目一覧

変数	項目	備考
N	層数	
Be(9)	建物要素別復旧工事費用比率	
De(9)	耐震対策を施した場合の損傷の低減係数	対策なしの時1、対策の効果に応じて低減
Sk(N)	各階床面積	
Rk(9, N)	損傷に応じた各階各部位別復旧工事比率	
AC(N)	各階応答最大加速度	
DEL(N)	各階最大応答層間変形角	
H(N)	各階階高	

### 参考文献)

- 1) 日本建築学会：建物のLCA指針，2006.11
- 2) 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第74巻、第644号、2009.10