

ワイン方程式と構造設計 全四回シリーズ 第2回 構造設計と統計

平成30年3月2日
(株)飯島建築事務所
八木 茂治

Attention

このコラムでは、弊社のノウハウおよび守秘義務などに抵触しない範囲で資料を開示します。

<はじめに>

下記のような三段論法を同業者から良く聞きます。

- 1) 建物は土地の影響（例えば、敷地形状、地盤条件など）を強く受けるので、原則、一品製品である。
- 2) このため、建物毎に最適な構造設計は異なる。
- 3) 故に、建築の構造設計には統計的な手法は馴染まない。この仕事は、コンピュータで代替できないクリエイティブな分野である。

しかし、一品生産を原則とする建築構造設計分野も、統計や、それに基づくベイズ確率と、無縁ではありません。なぜならば、設計者同士が暗黙の内に共有している直観・例えば建物規模（床面積、高さ、柱間隔（以下、スパンという）、積載重量など）と柱のおおよその外形の関係など（以下、相場観という）は、統計とベイズ確率によって数値化することが可能だからです。

そこで、今回のコラムでは、この相場観が形成される要因を考察し、建物の基礎部分を例に、従来の構造設計を、AI（ベイズ確率）によって置き換えることが可能であることを示します。

<建築基準法と経済合理性が相場観を生む>

建築基準法

現在、日本で、建物を設計する場合、建築基準法が定める各種の基準を満足する必要があります。

建築基準法の第一条は、「この法律は、建築物の敷地、構造、設備及び用途に関する最低の基準を定めて、国民の生命、健康及び財産の保護を図り、もつて公共の福祉の増進に資することを目的とする。」と定められています。建築基準法と憲法との関係については諸説ありますが、建築基準法は、憲法・第25条^{注1)}と第29条^{注2)}を根拠に、財産権の原則に基づいた「建築自由の原則」を大前提としつつも、「公衆衛生の向上」と「公共の福祉」の観点から、必要最低限の規制を設けていると解釈されています。

耐震規定

構造設計に関連する事項は多数ありますが、建物の柱・梁などの部材断面に大きな影響を与える主な規定項

目としては、設計用荷重、許容応力度、床組の撓み制限、一次設計時の層間変形角、剛性率、偏心率および二次設計時の保有耐力などが挙げられます。これらの規定（以下、耐震規定という）は、日本の耐震設計基準の根幹をなすものであり、個々の建物が保有すべき、耐震シェルターとして必要な性能を明文化したものです。

耐震規定は、日本の経済発展にあわせて、強化されてきました^{注3)}。これは、経済的に実現可能な範囲で、都市に建設される建物の耐震安全性能を、政策として、徐々に高める方向に誘導してきたとも言えます。

なお、世界的に見ると、日本の耐震規定の要求は、高いレベルにあります。このため、日本の建物の柱・梁は、他国に比べると大きく、その建設コストは割高な傾向にあります^{注2)}。

安全はお金で買うもの

2018年現在、建築基準法が定める耐震設計基準は、地震荷重として、中程度の（稀に発生する）地震動^{注4)}と最大級の（極めて稀に発生する）地震動の2段階のものに対して、中程度の地震動に対しては無損傷、最大級の地震動に対しては人命の保護を目的に倒壊、崩壊しないことを目標としています³⁾。

建築基準法は、無被害を目標にしていません。従って、無被害を目標に建物を建設する場合は、建築基準法を超える設計目標を設定する必要があります。この場合、柱や梁などの断面積は大きくなるため、建設費は高くなります。

世知辛いようですが、安全はお金で買うものです。

経済合理性

劇場や宗教施設などモニュメンタルな建築物を除けば、建物の役割は、人が生活を行うための空間と、社会活動を行うための器であると言えます。

とりわけ、日本のように高度に経済が発達した先進諸国では、工場や事務所ビルなど、経済活動に特化した建物が多数建設されます。また、人口が都市部に密集するため、集合住宅（マンション）も多数建設されます。

つまり、日本では、多くの建物は経済活動の一環として建設されています。このため、その施工費は、費用対効果＝経済合理性によって決定されています。また、投資金額には一定の上限があるため、おのずと、建物の施工費にも上限が設けられます。

前述したように、日本国内においては、耐震規定の要

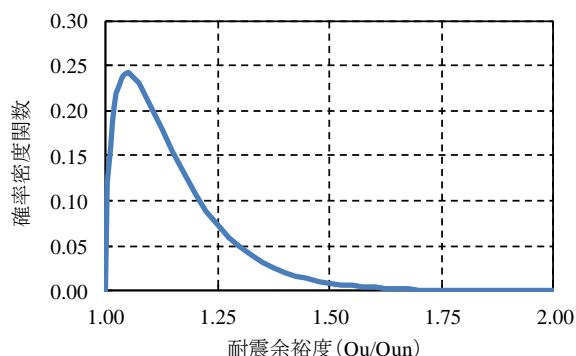
求水準が高く、建設費が割高なため、建築基準法が定める耐震規定ギリギリを目指す設計が行われる傾向があります。特に、投資に対するリターンが重要となる商業施設、大規模な開発案件などでは、その傾向が顕著になります。

なお、個人が建て主となる戸建て住宅でも、建設費に上限があるため、その本質は同じです。建設費の大半を耐震性能の向上に費やせば、敷地条件や住宅設備などが貧弱になり、日々の生活に支障が生じます。

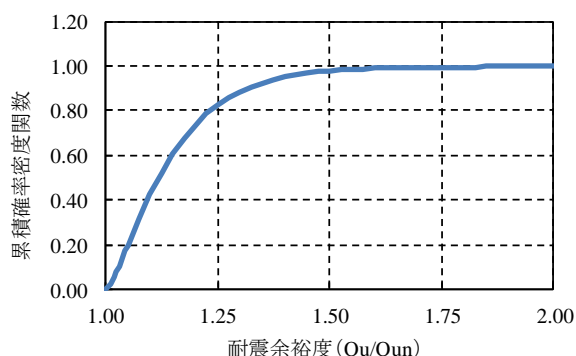
耐震性能の分布

ここまで記したように、ごくわずかな例外を除いて、建物は、経済合理性と無縁ではありません。多くの建物の設計では、建築基準法が定める耐震規定を設計目標としています。

詳細な根拠データは示せませんが、建物の耐震性能の分布は、概ね図1のような模式図で近似できます。図1の横軸の耐震余裕度1.0は、建築基準法が定める耐震規定になります。一般的な建物の耐震性能は、おおよそ耐震余裕度1.05程度をピークに分布します(図1(a))。この結果、8割以上の建物の耐震余裕度は1.25未満となります(図1(b))。



(a)確率密度関数のイメージ



(b)累積確率密度関数のイメージ

図1：建物の耐震性能分布（模式図）

相場観は統計値である

建物の耐震性能は、建物の規模に応じた、柱や梁などの断面積=物量でまきます。多くの建物の目標耐震性能は、耐震規定としているため、建物規模が決まれば、おおよその柱や梁などの断面積を推定することができます。これらが、設計者同士が暗黙の内に共有している相場観です。

つまり、建築基準法と経済合理性が、暗黙の相場観を生み出していると言えます。この相場観は、設計者が無意識に共有している統計値に基づくものです。

＜基礎の設計用荷重は延べ床面積から推定できる＞

この節では、基礎の設計用荷重が統計値から算出できることを示します。それにあわせて、AIを用いた構造設計の手法が、既往の構造設計の問題点を解決する可能性があることを示します。

基礎工事費のジレンマ

建物の構造設計は、力の流れに沿って、建物上部から基礎に向かって徐々に行います。このため、基礎の設計用荷重が決まるのは、構造設計の最終盤になります。

一般に、基礎工事は地盤の掘削などの土工事を伴うため、作業性が悪く、躯体工事に比べて、その工期が長くなる傾向があります。地盤条件が悪いほど、この傾向は強くなり、その工事費は高くなります。基礎の工事の見積もりが、事業計画で想定している金額よりも高くなると、建設計画自体が中止になることがあります。

このため、できるだけ早い段階で、基礎の工事費を把握する必要がありますが、従来の構造設計手法では、最終盤にならないと分からないという、ジレンマがあります。

AIの可能性

ここで、発想をAI的に転換し、上記のジレンマの解消法について考察します。

下記に、基礎の設計用荷重の算定条件と、ベイズ推定に基づく基礎の設計用荷重の推定手法について、列記します。

基礎の設計用荷重の算定条件

基礎の設計用荷重は、躯体自重と積載荷重および建物高さによって決まる

ベイズ推定に基づく基礎の設計用荷重の推定手法

- 1) 一般的な建物の耐震性能分布は、図1のようになっているので、建物規模が分かれば、その柱や梁などの断面積は確率的に推定できる。
- 2) 柱自重は柱断面積に階高^{注5)}を、梁自重は梁断面積にスパンをかければ算出することができる。
- 3) 構造形式および用途ごとに、経済階高^{注6)}があるた

め、平均階高を推定することができる。また、平均階数は延べ床面積÷建築面積から推定できる。従って、建物の平均高さは、延べ床面積、建築面積および用途から推定できる。

- 4) 柱と同様にスパンも、構造形式および用途ごとに、経済スパン^{注5)}があるため、建築面積と用途が分かれば、対象建物の平均スパンを推定することができる。
- 5) 1)~4)より、延べ床面積、建築面積および用途から、建物の躯体自重を確率的に予想できる。
- 6) 一方、積載荷重は用途と床面積によって決まる。
- 7) 建物高さは3)、躯体自重は5)、積載荷重は6)によって推定できるので、基礎の設計用荷重は、条件付き確率によって推定することができる。

つまり、「建物の延べ床面積」と「基礎の設計荷重」は、耐震性能分布、躯体断面積、平均階高、平均スパン、および用途を介して、相関関係があると考えられます。従って、総床面積を条件にすれば、基礎の設計用荷重を確率的に推定することができます。

基礎の設計は、基礎の設計用荷重が分かれば、上部構造と分離して行うことが可能なため、初期企画段階で、基礎の工事費を、おおまかに把握することが可能になります。

相関分析

以下では、RC 建物を例に、基礎の設計用荷重と建物の延べ床面積の相関（概要）を示すことによって、前述の考察の証明を行います。なお、ここで示すデータは、用途による分類は行っていません。

図2に建物の延べ床面積と躯体重量の相関を、図3に建物の延べ床面積と1階層せん断力の相関を示します。図2および3より、建物の延べ床面積は、躯体重量および1階層せん断力と高い相関があることが分かります。図3に基づいて推定した1階の層せん断力に、基礎自重と地下慣性力を考慮すれば、基礎の設計用荷重を高い精度で推定することができます。

この手法は、従来の手法と比べて、計算コスト（手間）は少なく済み、前述したジレンマも解消できます。また、いずれは構造設計エンジニアを必要としない手法が開発できることも示しています。まさに、建築構造設計におけるワイン方程式と言えます。

<まとめ>

このコラムでは、建築基準法と経済合理性が、暗黙の相場観・ベイズ確率を生み出していることを示し、基礎の設計荷重を例に、AIによって、構造設計を置き換えることが可能であることを示しました。また、AIを使用し

た手法では、構造設計エンジニアを必要としないことも明らかにしました。

建築構造設計分野においても、大量の設計データ（ビッグデータ）に基づいた、機械学習（回帰分析、ベイズ推定もしくはディープラーニングなど）は可能なため、将来的には、構造設計の大半は、AIによって置き換えることができます。

AI 設計時代は、否応なしに到来するのです。

<次回は>

第3回は、過去のAIと現在のAIとの違いについて触れ、公開されているAIライブラリーとそれを用いたAIの実行例を示します。

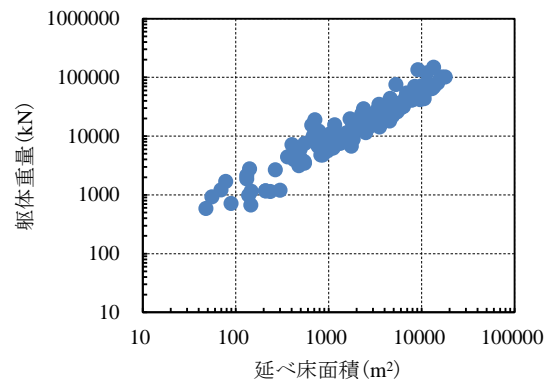


図2：建物の延べ床面積と躯体重量の相関

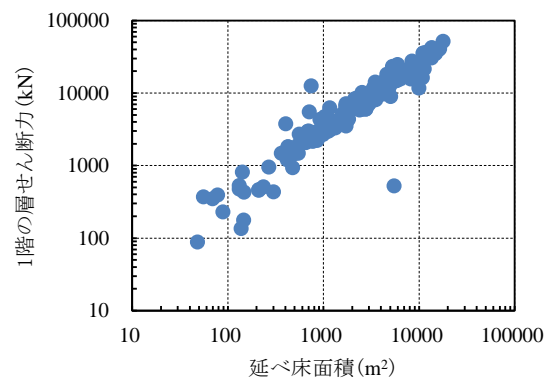


図3：建物の延べ床面積と1階の層せん断力の相関

注記

- 注1) 憲法・第 25 条は「生存権及び国民生活の社会的進歩向上に努める国の義務」について定め、第 1 項は「すべて国民は、健康で文化的な最低限度の生活を営む権利を有する」、第 2 項は「国は、すべての生活部面について、社会福祉、社会保障及び公衆衛生の向上及び増進に努めなければならない」とされています。
- 注2) 憲法・第 29 条は「財産権」について定め、第 1 項は「財産権は、これを侵してはならない」、第 2 項は「財産権の内容は、公共の福祉に適合するやうに、法律でこれを定める」、第 3 項は「私有財産は、正当な補償の下に、これを公共のために用ひることができる」とされています。
- 注3) 1950 年に建築基準法が公布された後、耐震設計関連法の変遷としては、1971 年にせん断補強筋規定などの改正、1981 年に新耐震設計法の導入、1995 年に耐震改修促進法制定、2000 年に限界耐力計算法の導入などがあります。
- 注4) 学術的には、岩石の破壊そのものを「地震」、地震による地面の揺れを「地震動」と区別して呼んでいます。「揺れ（地震動）」は、震源から遠く離れるに伴い小さくなっていく性質があります。なお、地震のエネルギーの大きさはマグニチュード、揺れの大きさは gal や震度などで評価されます。
- 注5) 階高とは、建物の各階の高さのことで、下の階の床面から上の階の床面までの高さをいいます。
- 注6) ここでは、分譲マンションを例に、経済階高、経済スパンについて説明します。分譲マンションの商品価値は、同じ部屋面積ならば、間口が大きいほど、天井が高いほど高まります。しかし、これらは建設費を押し上げる要因となります。このため、費用対効果が最大となる階高、スパンがおのずと決まります。これを、経済階高、経済スパンといいます。なお、建設費は分譲価格帯と直結しているため、分譲価格が上がると、経済階高と経済スパンは大きくなります。世知辛いようですが、快適性もお金で買うものです。

参考文献

- 1) Faithful+Gould :
International Construction Intelligence: Prospects for Global Construction
<https://www.fgould.com/americas/articles/construction-intelligence-prospects-global/>
- 2) 岩松 準 :
建築コスト遊学 16 建設費の国際比較の方法
建築コスト研究, No.77, 2012.4, pp.55-58
<http://www1.ttcn.ne.jp/~iwam/pdf/077-14.pdf>
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所監修 :
2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, pp.69-71