

中期海外派遣研究員・研究報告書

研究題目：米国における耐震設計基準の変遷と適用に関する研究

研究者：生産工学部建築工学科 教授 藤本 利昭

期 間：平成31年3月29日～令和元年9月4日

出張先：米国カリフォルニア州スタンフォード大学ブルーム地震工学研究所，他

1. はじめに

日本では、1923年に発生した関東大震災の後、大正末期から昭和初期にかけて「柔剛論争」^{1)~8)}と呼ばれる論争が繰り広げられた。論争の争点となった「柔構造」と「剛構造」のうち、剛構造に関してはその考え方が、当時の市街地建築物法に取り入れられ、今日の建築基準法⁹⁾まで引き継がれている。一方柔構造は、現在の超高層建築の設計法の原点とも考えられるが、当時の考え方はあまり知られていない。近年、当時の柔構造の提唱者である真島健三郎の設計思想に基づき建設されたと考えられる建築物が、現存することが西澤の研究¹⁰⁾、中島らの研究¹¹⁾により明らかになってきた。

筆者は、このような背景から、柔剛論争、特にその中でも柔構造に着目し、真島健三郎が提案した柔構造理論およびその理論に基づき設計された建築物について研究を行ってきた¹²⁾。

それらの研究の中で、日本国内で柔剛論争が論じられていたのとほぼ同時期に、米国においても真島博士と酷似した考え方に基づく研究論文が見つかった¹³⁾。

このことから、本研究ではその論文を足掛かりに米国での当時の動きを明らかにすることを目的として、文献調査および文献から関連すると考えられるいくつかの現存する建物の調査を行い、当時の米国における動きと、更には日本との関係を明らかにすることを目的とした。

研究拠点としては、米国の耐震設計に関する研究が最も進んでいるカリフォルニアを選定し、スタンフォード大学における文献調査とカリフォルニアに点在する歴史的な建物の調査を行った。本報告ではその概要について報告する。

2. 真島博士が提案した柔構造架構

2.1 単位架構の概要

当時、真島博士が低層で周期の長い鉄骨構造を実現させるために考案したのが、単位架構と呼ばれる構造形式である。単位架構を用いて建物を構成する手法は真島博士の著書¹⁴⁾の中で例題として解析が行われていた。単位架構とは **Fig.1** で示すような剛接単スパンの矩形架構であり、それらを相互にピン接合で繋ぎ合わせることで建物全体を構成する構造形式である。また単位架構の特徴は、1階柱脚ならびに2階大梁両端の接合形式をピン接合にすることで、下層階の剛性を低く設計し、建物全体の固有周期を延ばすための工夫がなされている。この2階の梁端部の接合をピンとすることは、構造的には1階、2階を吹き抜けの架

構とした場合と同様の水平剛性になると考えられる。後述するが、この最下層の剛性を低く抑えることで周期を長くするという考え方は、米国でも構造技術者によって検討されていた。

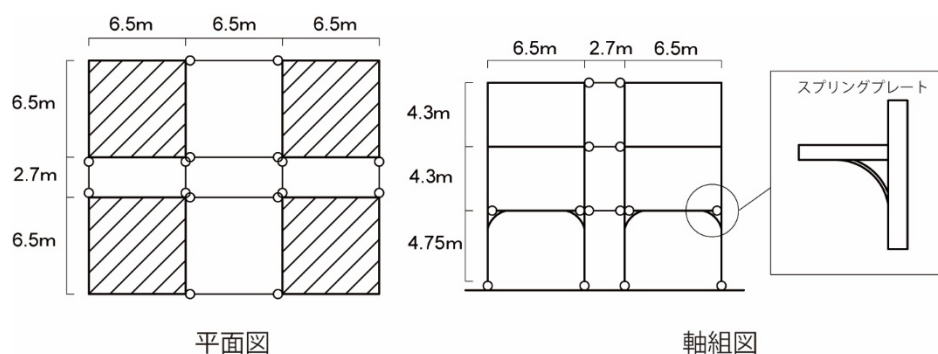


Fig.1 Unit frame

3. 米国における柔剛論争

3.1 米国における柔剛論争について

米国における文献調査の中で、柔剛論争とされる資料として唯一得られたのが文献 15)である。この文献は、応答スペクトル法の初期の歴史を示したものであるが、その応答スペクトル法の生みの親とされる、カリフォルニア工科大学の M.A. Biot 博士、および Biot 博士のアドバイザーである Theodore Von Karman 博士のコメントが示されている。

1932 年 6 月の新聞記事によれば、「建物は剛構造と柔構造に分けることができる。剛性の高い建物だけを立てるべきだという意見もあるが、柔構造として地震と一緒に揺れることで地震に抵抗するという考えもある。」ということが示されており、この柔構造を実現するための具体的な方法として、建物の 1 階を柔らかく設計するという構造 (Flexible first story または Soft first story) が示されている。Soft first story といえば、現在の免震構造の基となる考え方でもある。

3.2 米国における柔構造について

米国における当時の柔構造の考え方は、前節の通り 1 階を柔らかく設計して建物の周期を延ばすというもので、真島博士の単位架構と同様の考え方である。このような Flexible first story を理論的に説明したのが文献 16)である。

文献 16)では、数値解析に基づき、地震時における Flexible first story の特徴とその適用限界を示したものである。外部からの入力地震動としては調和振動 (定常振動) を仮定し、入力地震動と建物の固有周期の違いによる応答値への影響を報告している。これによれば、地震動の固有周期に対し、建物の固有周期が短い場合には、建物の応答が増幅するが、逆に入力地震動に対し建物の固有周期が長くなると応答低減効果が顕著になることを示している。また周期が長くなると変形が大きくなることにも着目しており、米国の鋼構造の設計規準

である AISC に基づく柱を想定した場合、変形を許容値に収めるための限界は、入力地震動の固有周期が 1 秒以下であることを報告している。

一方、実際の構造物に着目すると、文献 16)で紹介されている資料として、文献 17)がある。これはカリフォルニアの構造設計技術者である L. H. Nishkian が、自身の設計した建物を含め、当時の構造設計について考えを纏めたものである。これによれば、1, 2 階建ての低層の建物では、鉄筋コンクリート及び鉄筋入り煉瓦造といった剛構造とすべきであること、高さ 10 階までの建物では、鉄筋コンクリート又は鉄骨造とすること、10 階建て以上の建物では、1 階の階高を高く（鉄骨造では 7.62m, 鉄筋コンクリート造では 10.7m）し、Flexible first story として設計すべきであることを示している。さらにこの 1 階を柔らかくした構造の実設計例として、カリフォルニア州サンノゼに 1925 年に建てられたイタリア銀行（Bank of Italy, Fig.2）の建物を紹介している。この建物は鉄骨造の 12 階建て（中央部は 15 階建て）の建物で、1 階の階高は非常に高い約 10.36m となっている。現存する建物であり、今回実際に調査対象とした建物である。この建物はサンノゼの歴史的建造物にも指定されており、今後残るものと考えられ、当時の Flexible first story を実践した重要な建築物である。



Fig.2 Bank of Italy

本研究では、上記の建物以外に、1 階を柔らかい構造とした建物を特定することはできな

かった。ただし、文献 18)より、当時の状況を伺うことができる。

文献 18)では、20 階建～30 階建の高層ビルを建設する場合、それらが柔軟な 1 階 (Flexible first story) に支えられ、この Flexible first story により地震動が吸収されるため、建物の上部を横方向の地震力に耐えるように設計する必要がないという考えに基づいて設計されていることが報告されている。また実際に太平洋岸の多くの高層ビルはこの Flexible first story であると言われていること、1 つか 2 つの例外を除いて動的設計は行われていないことが指摘されている。このことから、実際にはかなりの数の Flexible first story の建物が建てられていたものと考えられる。

3.3 日米における柔構造の違いについて

以上、日米の柔構造について報告したが、日米において柔構造の考え方は同様であるものの、当時の建設事情の違いは明らかである。柔剛論争当時、日本ではほとんどの建物が低層建築物であったのに対し、米国では 10 階建てを超える高層建築物が建設されていた。

このことから、米国での柔剛論争は高層建築を対象に議論されていたことは明らかである。一方日本では、真島博士の著書¹⁴⁾には高層建築物への柔構造の適用も示されていたが、当時の日本ではまだ夢物語であり、低層建築物を対象に議論せざるをえなかったものと推察される。

4. まとめ

日本における柔構造の研究を基に、米国での柔剛論争および柔構造について調査を行った。文献によれば、米国においても日本の柔剛論争と同様の議論はあったことがわかった。

但し、当時の日本では低層建築物が殆どであったのに対し、既に高層建築物が建てられていた米国とでは状況が異なり、議論の対象も異なっている。但し建物の固有周期を延ばす手法として考案した構造は、いずれも Flexible first story (または Soft first story) であり、同じ方向を向いていたことは確かである。

今回の調査から、これら日米それぞれの柔剛論争および柔構造が両国間の影響を受けたものかは明らかにはならなかったが、建築構造を理解した技術者が弾性振動において固有周期を延ばす方法を考えたとき、同様の結論を得たとしても不思議ではないと感じた。

<参考文献>

- 1) 南出孝一：建築柔剛論争，平成 2 年 1 月
- 2) 佐野利器：家屋耐震構造要梗，建築雑誌，日本建築学会，1915（大正 4）年 3 月
- 3) 真島健三郎：耐震家屋構造の選択について，土木学会誌，1924（大正 13）年 4 月
- 4) 佐野利器：耐震構造上の諸説（抄），建築雑誌，日本建築学会，1926（大正 15）年 10 月
- 5) 真島健三郎：佐野博士の耐震構造上の諸説（評論）を読む，建築雑誌，日本建築学会，1927（昭和 2）年 4 月

- 6) 武藤清：家屋の耐震設計方針について，建築雑誌，日本建築学会，1929（昭和4）年11月
- 7) 武藤清：真島博士の柔構造論への疑い，建築雑誌，日本建築学会，1931（昭和6）年3月
- 8) 真島健三郎：柔構造論に対する武藤君の批評に答えさらにその余論を試み広く諸家の教えを仰ぐ，建築雑誌，日本建築学会，1931（昭和6）年5月
- 9) 建築研究所他 監修，国土交通省住宅局建築指導課他 編集：建築物の構造関係技術基準解説書(2015年版)，全国官報販売協同組合，2015（平成27）年6月
- 10) 西澤英和：近代技術編 舞鶴鉄骨煉瓦造の海軍建築 その1，歴史的建造物—保存再生技術の変遷 施工，1999（平成11）年10月
- 11) 中島久男，清水慶一，水野僚子，湯本桂：横須賀海軍工廠造船部造機部製図工場における柔構造について-横須賀市近代化遺産調査(13)-，日本建築学会大会学術講演梗概集，日本建築学会，2006（平成18）年9月
- 12) 藤本利昭，水野僚子，山中美穂，城戸基：柔剛論争における柔構造に関する研究，日本大学生産工学部研究報告A，2017年6月第50巻第1号
- 13) R. R. Martel: The Effects of Earthquakes on Buildings with a Flexible First Story, the Seismological Society of America, at Berkeley, California, June 20, 1929
- 14) 真島健三郎：地震と建築，丸善，1930（昭和5）年6月
- 15) Mihailo D. Trifunac: Early history of the response spectrum method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28 (2008) 676–685
- 16) R. R. Martel: The Effects of Earthquakes on Buildings with A Flexible First Story, 1929.6
- 17) L. H. Nishkian: Design of Tall Buildings for Resistance to Earthquake Stresses, The ARCHITECT and ENGINEER, pp.73-83, 1927.3
- 18) Norman B. Green: Flexible “First-Story” Construction for Earthquake Resistance, American Society of Civil Engineers, Paper No. 1906, Vol. 100 (1935), p.645

<謝辞>

約5か月間わたり，目標とした研究活動を行うことができた。このような時間を得ることができたのは，受け入れて頂いたスタンフォード大学の関係者はもとより，本学学部・学科の教職員の皆様のご協力によるものであり，大変感謝しています。また，私が出張中の約5カ月の長期間にわたり，互いに協力して研究室の活動を行ってくれた大学院生，卒研究生に謝意を表します。