

柔剛論争における柔構造に関する研究

－その1 柔剛論争の概要－

日大生産工 ○山中 美穂 日大生産工 藤本 利昭
日大生産工 水野 僚子

1. はじめに

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)~9)}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これまでの建築基準法に引き継がれている。一方、当時の柔構造の考え方は、現在の超高層建築の設計法の基礎と考えられるが、あまり知られていないのが現状である。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、提唱者である真島健三郎の主張は歴史的にも更に評価されるべきであると考え、研究を行うこととした。

そこで本研究では、まず柔剛論争の概要を示すとともに、真島博士が考案した柔構造の仕組みについて報告する。

2. 柔剛論争の概要

2.1 柔剛論争とは

1923年の関東大震災の後、大正末期から昭和初期にかけて佐野利器および武藤清、並びに真島健三郎によって「柔剛論争」と呼ばれる論争が繰り広げられた。柔剛論争とは、建物の構造（水平剛性）を硬くしたもの（剛構造）と、柔らかくしたもの（柔構造）では、どちらの構造が地震に対して優れているのかを論じ合ったものである。なお、本稿の最後に表1として柔剛論争が展開させた時期を中心とした代表的な建築物（名称・構造種別・設計者）、柔剛論争に関わる人々に関する年表をまとめた。

佐野利器と武藤清は剛構造派であり、彼らの主張は「建物の水平剛性を高め固有周期を短く設計し、地震の主要動との共振を避けるべき」というものであった。一方、真島健三郎は柔構造派で「建物の水平剛性を低くすることで固有周期を長く設計し、地震の主要動との共振を避けるべき」という考え方であった。この論争は、

明確な決着がつかないまま第二次世界大戦を迎え終息するが、市街地建築物法や、その後に制定された建築基準法において、剛構造派の主張が今日まで引き継がれている。剛構造派の主張が受け入れられた理由の一つとして、佐野利器と武藤清が東京大学の建築学科の出身で、当時の建築界の中心人物であったこと、それに対して真島健三郎は土木出身であったこと、海軍の技師として活躍していたこと、など建築界の主流から離れていたことが挙げられる。

2.2 柔剛論争の論点

柔構造派・剛構造派ともに、「地震の周期と建物の周期を離す」ということを目標にしている。この論争の発端となった関東大震災の主な周期は1秒程度と考えられており、柔構造派は建物の周期を1.5秒以上で設計し、共振を避けるべきと考え、剛構造派は0.5秒以下で設計し、共振を避けるべきと異なる考え方を提示した。

2.3 柔剛論争の中心人物とその主張

a)真島健三郎(1873-1941)【柔構造派】[表1,論文:①②④⑥⑧]

真島健三郎は、1896年に旧札幌農学校工学科を卒業。1899年～1932年の35年間海軍にて勤務し、1920年には海軍省本部部長となった。真島博士の主張は、「剛構造の建物は地震により亀裂が入ったり接合部が欠損したりすることで次第に周期が伸び、地震の周期に近づいて危険である。主要動との共振を起こさないためには、最初から建物の周期を地震の周期よりも長くなるように設計するべきだ。」というものである。その柔構造を実現するため、鉄骨構造による「単位架構」という架構形式を提案している。なお、単位架構の概要については後述する。

b)佐野利器(1180-1941)【剛構造派】[表1,論文:③]

佐野利器は、1903年に東京帝国大学建築科を

A study on the Flexible Structure in Flexible Structure vs. Rigid Structure
－ Part1 Outline of Flexible Structure －

Miho YAMANAKA, Toshiaki FUJIMOTO and Ryoko MIZUNO

卒業し、1920 年日本大学が創設した高等工学校の学長に就任。1928 年に高等工学校が日本大学工学部となり、同校学部長に就任した。世界最初の耐震規定として市街地建築物法の中に定められた水平震度の考え方は佐野博士の主張が広く取り入れられたものである。

佐野博士の主張は、「関東大震災の地震の周期は 1 秒程度だったが、周期が 1 秒以上の地震が起こらないとは言い切れない。また、低層の建物では周期 1.5 秒以上で設計するのは不可能であるため、水平剛性を高め固有周期を短く設計するべきだ。」というものである。そのため、耐震壁等を用いた鉄筋コンクリート構造を強く推奨した。

㉔武藤清(1903-1989)【剛構造派】[表 1, 論文:⑤⑦]

武藤清は、1925 年に東京帝国大学建築科を卒業し、1935 年同校教授に就任。佐野利器の弟子にあたる。

武藤博士の主張は、「関東大震災の地震の周期は、1 秒程度であると言われているが、主要動の後半には周期 2~3 秒程度の波があり、柔構造で設計をすればその波と共振を起こし、建物が長く大きく揺れ危険である。建物を剛構造で設計し、共振を避けることが望ましい。」というものである。このように、武藤博士も剛構造を推進しているが、後に建設された日本初の超高層建物である霞が関ビルの設計を担当し、柔構造による超高層建築の先駆けともいえる設計を行っていることは興味深い。

3. 論争の背景

この論争は、前述したとおり関東大震災を発端として起こったものである。震災で失った都市機能を回復し、今後地震による被害を減少させるために地震に強い建物を再建しようとした点では構造技術者である両者の想いは一致する。そして地震に強い建物を設計するにあたって相反する考え方となったことには、それぞれに理由がある。

真島博士は、柔構造派を推進していた唯一の人物であるが、当時剛構造に分類された鉄筋コンクリート構造の建物も多く設計していた。真島博士が海軍の技師であったこともあり、設計した建物の立地は海に近いものばかりであった。立地の条件も手伝って、真島博士はコンクリートが剥離し、錆が浮いている鉄筋コンクリート造の建物を多く目にしており、そのような状態の建物を大地震が襲えば大変危険であるという

考えを強く持っていたことが柔構造を推進していく理由の一つになっている。

一方佐野博士は、設計を担当した鉄骨構造の建物である丸の内ビルディングや日本郵船ビルが、関東大震災によって大きな被害を受けたことが剛構造を推進した一つの理由になる。鉄骨構造は大きく変形することで地震のエネルギーを吸収するため、関東大震災では仕上げ材や設備配管などに甚大な被害をもたらした。

また、同じく鉄骨構造で佐野博士が設計した丸善書店が火災によって急激に強度を失い、倒壊したことも鉄骨構造への不信感を抱くきっかけとなった。

前述のように柔剛論争は、地震の周期特性や解析手法が確立されていない当時は決着が付かず、結論が出ないまま終息するが、これらの論争が後の耐震設計に大きな影響を与えたことは明確である。

4. 柔構造の概要

4.1 単位架構の概要

現在の建築基準法に基づいた一般的な鉄骨構造を考えた場合、建物の固有周期 T は建物高さ H に比例し、近似的に $T=0.03H$ で表される。このことを考えると真島博士が言う固有周期 1.5 秒を超える建物とは、現代では 50m を超える高さの建物となる。このことから佐野博士の「低層の建物では周期 1.5 秒以上で設計するのは不可能」という意見は納得できる。一方で高さが 60m を超える超高層建物は、固有周期が 1.8 秒を超えることになり、剛構造としての設計は困難であり、柔構造となることがわかる。

これらのことから、当時の低層建物において剛接合による通常の架構では、柔構造の実現が難しいことは真島博士も理解していたものと推察させる。よって真島博士が、周期の長い鉄骨構造を実現させるために考案したのが、単位架構という架構形式である。単位架構とは、図 1 で示すように剛接単スパンの矩形架構で、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。

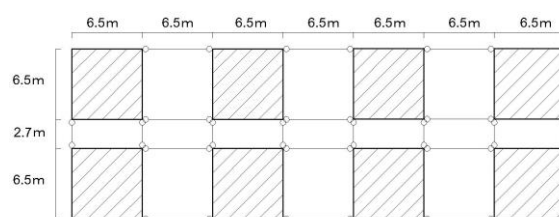


図1 単位架構

単位架構は、固有周期を伸ばすために考案さ

れた架構形式ではあるが、計算手法も十分確立されておらず、当然大型計算機もなかった当時、複雑な構造計算を避け容易に理論解を求めるといふことも、このような架構が採用された理由の一つと考えられる。

4.2 周期を伸ばす仕組み

真島博士は矩形架構同士を剛接合にせず、相互にピン接合で繋ぎ合わせることで、骨組全体の水平剛性を下げ、周期を伸ばすことを考えた。更に単位架構の骨組構成においても、剛接架構に部分的にピン接合や、ピン接合とスプリングプレートと呼ばれる頬杖を組み入れることで、周期を調整したと考えられる単位架構が幾つか提案されている⁹⁾。

ここでは、文献⁹⁾の単位架構の一例を参考に、1層1スパンの架構を用いて、柱脚の支持条件に固定支持と回転支持の例を示し、支持条件を変えたことによる剛性 K ・変形 δ ・周期 T の違いについて現在の計算法を用いて説明する。

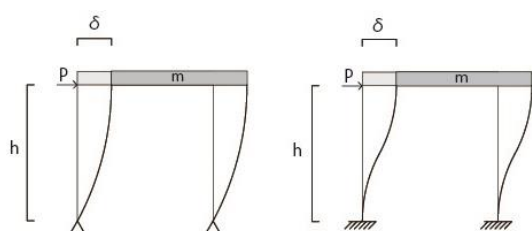


図2. 固定支点と回転支点のモデル

a) 固定支点

$$\text{柱の変形} \quad \delta = \frac{Ph^3}{12EI} \quad (1)$$

$$\text{柱1本の水平剛性} \quad K = \frac{12EI}{h^3} \quad (2)$$

$$\text{固有周期} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{mh^3}{12EI}} \quad (3)$$

$$\text{ラーメンでは} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{mh^3}{24EI}} \quad (4)$$

b) 回転支点

$$\text{柱の変形} \quad \delta = \frac{Ph^3}{3EI} \quad (5)$$

$$\text{柱1本の水平剛性} \quad K = \frac{3EI}{h^3} \quad (6)$$

$$\text{固有周期} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{mh^3}{3EI}} \quad (7)$$

$$\text{ラーメンでは} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{mh^3}{6EI}} \quad (8)$$

ここで、 P : 水平力、 h : 階高、 EI : 柱の曲げ剛性、 m : 建物の質量である。

以上のことから回転支点では固定支点に比べ柱の変形が4倍、剛性が1/4倍、周期が2倍になり、単位架構を相互にピン接合することは水平剛性を下げ、周期を伸ばす手段として用いられたものと考えられる。

5. おわりに

柔剛論争は関東大震災の多大な被害を受け、それぞれの学者が地震に強く安全な建物を設計するにはどのような手段を用いるのが最適か論じ合ったものである。

本報告では、真島博士の著書にある最も単純な例題を基に、柱脚の支持条件が異なる（固定およびピン支持）1層1スパンの架構について比較例を示した。この例から支持条件を変化させるだけで骨組の振動特性を簡単に変化させられることは明らかである。実際に真島博士が設計したと考えられる建物や論文上の例題では、多層1スパンの架構の柱梁接合部について種々の検討がなされており、今後はそれらの条件による骨組の耐震性ならびに振動特性の相違について明らかにすることで、真島博士の柔構造の考え方をより詳細に検討していきたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 南出孝一：建築柔剛論争，1995
- 2) 佐野利器：家屋耐震構造要梗，建築雑誌，日本建築学会，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，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，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，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，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，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，昭和6年5月
- 9) 真島健三郎：地震と建築，丸善，1930年6月

表1 柔剛論争に関わる年表

			構造上の主な建物	真島博士の理論が 用いられているとさ れる建物	関連事項	真島健三郎 (1873年 - 1941年)	佐野利器 (1880年 - 1956年)	武藤清 (1903年 - 1989年)
明治	24年	1891			濃尾地震			
	25年	1892			震災予防調査会 設立			
	26年	1893						
	27年	1894	秀英舎印刷工場(S造/若山絃吉)		東京地震 日清戦争(～明 治28年)			
	28年	1895						
	29年	1896			三陸大津波 羽後地震	旧札幌農学校工科卒業		
	30年	1897						
	31年	1898						
	32年	1899				海軍技師に任用		
	33年	1900						
	34年	1901	八幡製鉄所工場(S造/ドイツGHH社)					
	35年	1902	三井銀行本店(S造/横川民輔)					
	36年	1903					東京帝国大学建築学科 卒業	
	37年	1904	横浜正金銀行(S造/妻木頼黄・遠藤於菟)		日露戦争(～明 治38年)			
			佐世保重工業内ポンプ小屋(RC造/真島健三郎)					
	38年	1905	東京倉庫兵庫倉庫(RC造/白石直治)		台湾地震		台湾地震被害調査を行う	
	39年	1906	上野駅ホーム上屋(S造)		サンフランシスコ 大地震		サンフランシスコ地震被害 調査を行う	
	40年	1907	住友倉庫(RC造)					
	41年	1908						
	42年	1909	丸善書店(S造/佐野利器)					
			旧国技館(S造/佐野利器)					
	43年	1910	東京倉庫G号棟(RC造/白石直治)					
	44年	1911	帝国劇場(一部S造/横川民輔)			佐世保海軍経理部建築 科長(明治44年～大正6		
	45年	1912	三井貸事務所(S及びRC造/横河工務店)					
大正	2年	1913			第一次世界大戦 (～大正7年)			
	3年	1914	東京中央停車場(S造/辰野葛西設計事務所)					
	4年	1915	大倉組本館(RC造)					
	5年	1916					「家屋耐震構造論」	
	6年	1917				呉海軍経理部建築科長 (大正6年～大正7年)		
	7年	1918				臨時海軍建築部工務員		
	8年	1919	東京会館(S造)		市街地建築物法			
	9年	1920				海軍建築本部部長		
	10年	1921	日本興業銀行ビル(SRC造/内藤多仲)		ワシントン軍縮会 議			
	11年	1922	帝国ホテル(RC造/F. ライト)		浦賀水道地震	呉海軍建築部長		
	12年	1923	丸の内ビルディング(SRC造/日本フラー建設会 社)		関東大震災	海軍省建築局長		
			日本郵船ビル(S造/曾禰・中條設計事務所)					
	13年	1924	歌舞伎座(SRC造/岡田信一郎)		市街地建築物法 改正	「地震動に依る構造体 の振動時相に就いて」 ①「耐震家屋構造の選択 に就いて」4月		
						「建築物の耐震に就い て」6月		
						「地震動に依る構造体 の振動時相に就いて」 10月		
	14年	1925						東京帝国大学建築学科 卒業
	15年	1926		横須賀鎮守府庁舎		②「重構造架橋建築耐震 構造論」4月	③「耐震構造上の諸説」 10月	
				横須賀海軍工廠造船 部機部製図工場		「耐震構造問題に就い て」1月		
	2年	1927			丹後地震	④「佐野博士の耐震構造 上の諸説を読む」4月		
	3年	1928	東大図書館(RC造/内田祥三)					
	4年	1929	小菅刑務所(RC造/蒲原重雄)					⑤「家屋の耐震設計方針 に就いて」11月
	5年	1930		横須賀海軍病院練習 部第一講堂 舞鶴機関学校	北伊豆地方地震	⑥「地震と建築」		
	6年	1931	大阪ガスビル(RC造/安井武雄・佐野正一)	横須賀海軍病院		「耐震構造への疑ひ」2 月 ⑧「柔構造論に対する武 藤君の批判に答へさらに 其の餘論を試み広く諸家 の教えを仰ぐ」5月	「耐震論」 11月	⑦「真島博士の柔構造へ の疑い」3月
	7年	1932				海軍退職		
	8年	1933		旧海軍航空技術廠 庁舎	三陸津波			
	9年	1934	同潤会江戸川アパート(RC造)					
	10年	1935						
	11年	1936	国会議事堂(SRC造)					
			東京女子大講堂(RC造)					
	12年	1937						
	13年	1938						
	14年	1939			第2次世界大戦 (～昭和45年)			
	15年	1940						
	16年	1941			太平洋戦争(～ 45年)	死去		
	17年	1942					1941年2月8日 朝日新聞/朝刊より	

関東大震災を教訓に、世界で初めて、震度規定に法的拘束力を持たせた。
(佐野震度)

真島健三郎博士
元海軍省建築局長
正三位勳三等
工部卿勳章三
等
氏は、大正十
八年四月二十
二日、東京市
豊島区に於て
死去した。年
六十九歳。別
式は、十八日
午後一時から
豊島区で執行
される。同氏
は、海軍省本
部第一部長、
海軍省局長と
なり、昭和七
年退官した。が、水雷式重油船の発明者であつた

