

# トリプルスケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築

坂本 真一 (技術研究所) 寺田 岳彦 (技術研究所) 藤城 春雄 (技術研究所) 鈴木 道哉 (技術研究所) 石井 大吾 (技術研究所) 真瀬 伸治 (技術研究所) 田村 和夫 (技術研究所)

## Sustainable Steel Structure System for Variable Inside-Space

by Shin-ichi Sakamoto, Takehiko Terada, Haruo Fujishiro, Michiya Suzuki,  
Daigo Ishii, Shinji Mase and Kazuo Tamura

### Abstract

A Steel structure building with variable inside spaces is proposed in this paper. The proposed structural system is composed of the three skeletons. The first skeleton has high durability and safety by adopting a base isolated system. The second and third skeletons together have the high function of providing variable inside space, and are easily adaptable to large-scale modification to meet the needs of the times. Earthquake response analyses of the proposed building have been carried out, and results have shown that the system can realize a long life building of 100-year grade, and cut down the discharge of CO<sub>2</sub> by 30% while the building exists.

### 概 要

本論では、21世紀の社会に適合できる機能を満足する建築構造システムとして、柔軟な空間を容易に実現できる「トリプルスケルトン構造システム」を提案している。トリプルスケルトン構造システムは、3つのスケルトンにより構成されるものであり、第1スケルトンは、免震システムの採用によって高い耐久性と安全性を備えるものである。一方、第2および第3スケルトンは、乾式接合法の採用によって、それぞれ社会の要求に伴う大規模な改修および小規模な改修時に、内部空間の再構築を容易に実現できる機能を有するものである。本システムを導入により、長寿命（100年建築）を実現でき、かつ、建物が存在する間に排出されるCO<sub>2</sub>を30%低減できることなどが明らかになった。

### § 1. はじめに

21世紀においては、前世紀の負の遺産である地球規模の環境破壊に対する反省から、地球環境に配慮した持続可能な循環型社会システムの構築が緊急課題であり、建築分野も例外ではない。

一般の建築物の場合、建設・解体時に対し運用に関わる環境負荷が5～6倍程度と大きいことから、地球環境問題への取り組みは、まず建築計画や環境工学分野の問題として取り扱われ始めた。しかし、将来にわたり持続可能な社会を実現するためには、建物の建設・改修・解体に関わる環境負荷を低減することも重要である。現在の建物は建設から数十年程度で解体される例が多い。しかし、これは構造体自体が老朽化したためではなく、時代ごとに要求される建物内の空間に対応できなくなったことが大きな理由である。したがって、構造体を長寿命化させ、内部空間を可変にできるような構造システムを構築できれば、建て直しを含めたライフサイクルCO<sub>2</sub>や廃棄物の発生量、ならびにライフサイクルコストをおさえ

ることができ、地球環境に配慮した建築構造物が実現可能となる。

構造の観点からこの問題に取り組んだ例として、スケルトンインフィルという考え方がある。このコンセプトは主に住宅に対して適用されている。この考えは、建物のスケルトン、すなわち柱、梁、床といった構造体や共有部分の設備の強度・耐久性を高めて長寿命化を目指す一方で、各住戸内部の間仕切り、内装、住戸内設備を構造体とは独立に変更可能とするものである。これにより、住人のライフスタイルや家族構成などの変化に適用可能な内部空間が確保でき、長寿命を実現することができる。しかし、従来のスケルトンインフィルの考えでは、住戸内のニーズへの変化に対しては適用可能であるが、高さ方向の変化など、大規模な構造変更を伴うようなニーズには対応できない。

筆者らが想定する21世紀の社会と建築構造物に要求される機能を図-1に示す。本論では、21世紀に建築構造に要求される機能を実現するために、建物内部空間の可変性を従来よりも格段に高める事を狙いとして、三

次元的な空間の変化に対応し、フリースペースを提供できるトリプルスケルトン構造システムを提案し、その有効性を検証する。

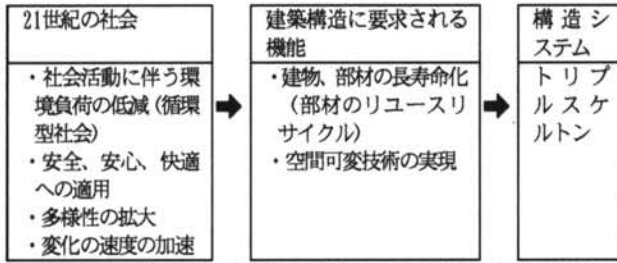


図-1 21世紀社会に適合できる建築構造の機能

## § 2. 提案する構造システムのコンセプト

本システムのコンセプトを図-2に示す。トリプル・スケルトン構造システムは、第1、第2および第3の各スケルトンにより構成される。主要な構造材として、長期にわたる品質の安定性や、大きな空間を構成できるという観点から鉄骨部材の使用を基本としている。第1スケルトン部は、建物全体を解体時まで継続して使用できる高い耐久性と、地震や台風などの外力に対して建物全体の機能を損ねることがないような高い安全性を備えるように免震構造を採用する。一方、第2および第3スケルトン部は、それぞれ社会の要求に伴う大規模な改修および小規模な改修時に、内部空間の再構築を容易に実現できる機能を有する。さらに、改修時や解体時に不要となった部材は、他の建物でリユースできるように、部材の加工が少なく解体が容易な接合法を採用する。

架構の構成を図-3に示す。本システムは、種々の用途や規模を有する建物に適用可能なものであるが、部材リユースの実現性を考慮し、図-3に示すような市場規模の大きな中低層の事務所ビルに適用した場合を一例として示す。対象とした建物は、地上12階、延べ床面積が8500㎡程度、鉄骨ラーメン構造の事務所ビルである。

第1スケルトンは、免震装置に支えられたコンクリートスラブと高剛性のコアから構成される。基礎免震構造は、建物の上部構造への地震水平力を大幅に低減し、高い耐震性能を実現する。高剛性のコアは、地震や風などの非常時水平荷重を受け持つ。これにより、第2・第3スケルトンは非常時水平力から解放される。

第2スケルトンは、複数の第3スケルトンを内包できるような大きな立体空間を支えるものであり、柱・梁の外郭と床スラブで構成される。構造的には、固定荷重と積載荷重のみを支持できる性能を満足すれば良い。ただし、第3スケルトンの変化を見込んだ余裕度を持たせる。各部の接合部には乾式工法を採用し、大きな社会的ニーズの変化に応じた大規模な立体空間の再構成を容易に実現で

きるものにする。

第3スケルトンは、複数の単位空間を構成するための構造である。構成部材には、小規模な改修に対応できるように組立・解体が容易な軽量鉄骨を用いる。また、ぬくもり感、快適感や炭酸ガスの固定化のために、木質構造とすることもできる。

このように、本システムは、スケルトンを階層化することによって、短期および中期の空間へのニーズの変化に対して柔軟に対応でき、建物全体を長期にわたって維持することを可能としたものであり、環境負荷を最小限に抑えながら持続可能な社会に適応したものである。

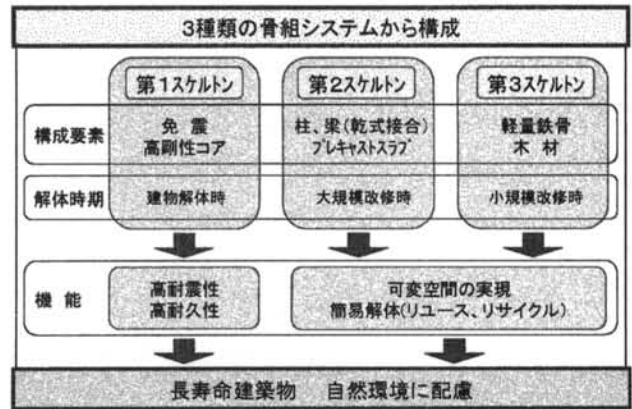


図-2 トリプルスケルトン構造のコンセプト

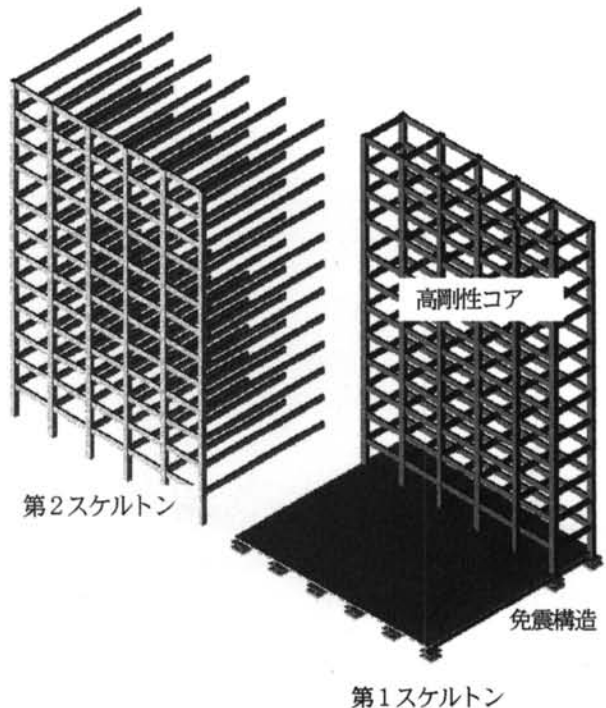


図-3 架構の構成

### § 3. 要素技術

本システムを支える要素技術のうち、主なものを述べる。

第1スケルトン部の杭頭免震構造を図-4に示す。免震構造を採用することで、従来の骨組に比べて地震時の応答を大幅に低減できる。

また、免震層の下の部分のつなぎ梁を省略し、地下部分の掘削土量を減らすことで建設時のCO<sub>2</sub>排出量を抑えることができる。

第2スケルトン部で採用する各部の乾式接合工法を図-5に示す。柱と梁は、リングパネルと言うピースを介して剛接合される。梁とリングパネルは高力ボルトによって、柱とリングパネルは粘弾性体やモルタル等を充填

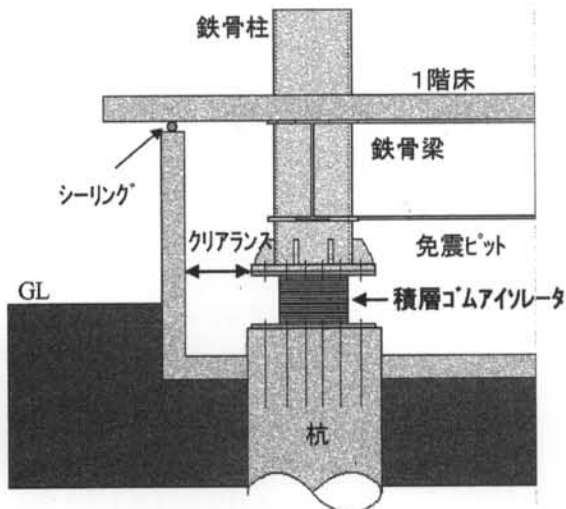


図-4 免震システム

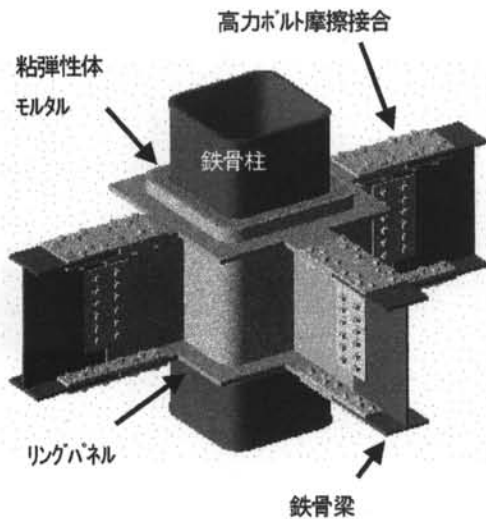


図-5 第2スケルトンを構成する乾式接合工法例

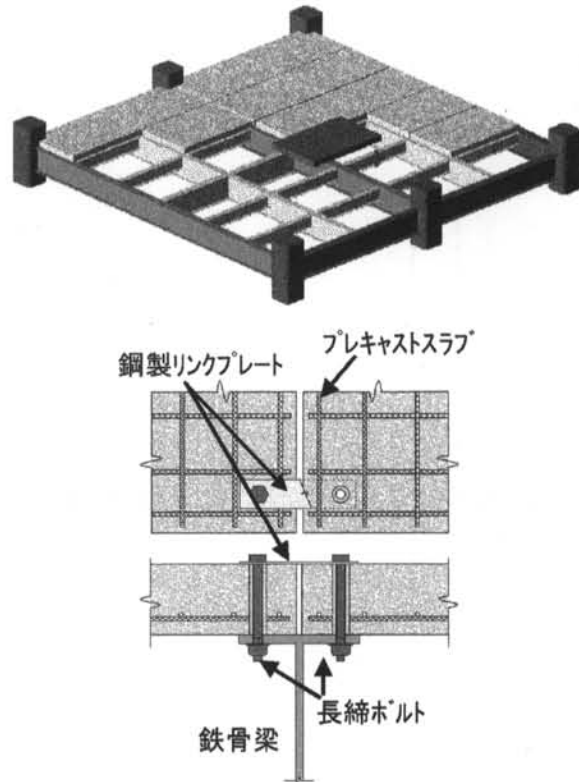
することで剛接合される。また、スラブにはプレキャストコンクリートスラブを用い、ボルトで鉄骨梁に接合する。両工法も、部材を傷めず簡単に取り外しでき、リユースできる技術である。

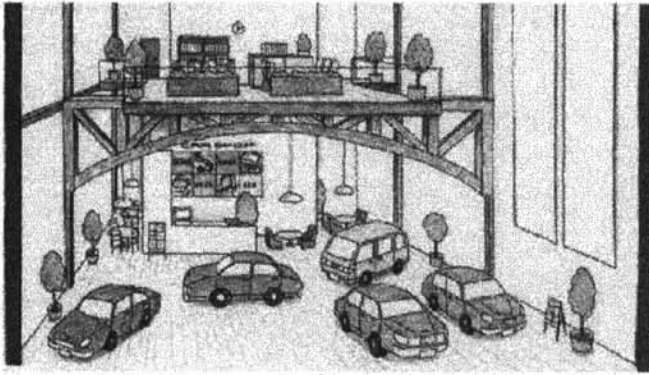
これらの技術を採用することによって、第3スケルトンの変更のみならず、第2スケルトンの梁やスラブを一部撤去して大きな空間を再構成することも可能となる。なお、以上の技術はそれぞれ一例であり、他にも基本コンセプトが同じで詳細の異なる多様な技術が適用可能である。

### § 4. 空間変更事例

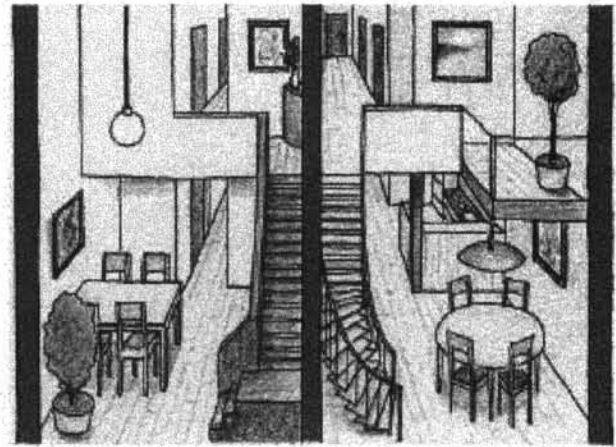
図-6は空間変更事例である。(a)は、第2ケルトンである梁・スラブを除去した大きな吹き抜け空間に展示スเปールを設けた例、(b)は同様に梁およびコンクリートスラブを除去した空間に木造の床を設け、メゾネットタイプの住戸とした例である。第2ケルトンで建物内に複数の大空間を構成した例を図-7に示す。下層部の梁の撤去、複数層のスラブの撤去による三次元的な複数の空間を建物内に構築可能であり、この空間内に第3スケルトンで建物使用者のニーズに合致した単位空間を構成する。

このような構造変更を伴う空間の再構成が可能となるのも、免震装置を含めた第1スケルトンが有する高い耐震性によるものである。





(a) 吹き抜け空間を展示スペースとする例



(b) メゾネット型住戸

図一六 第2スケルトン(梁・床)を除去した第3スケルトンによる立体空間の構成例

## § 5 トリプルスケルトン構造の地震応答性状

本章ではトリプルスケルトン構造の試設計および地震応答解析を行い、耐震性について検討する。なお、同時に従来型モデルについても比較検討する。

### 5.1 建物モデル

試設計モデルの伏図および軸組を図一八に示す。トリプルスケルトン(TS)モデルは免震建物として、従来型モデルは基礎固定として設計されており、プランは共通である。それぞれの柱梁断面を表一および表二に示す。TSモデルにおいては、構造変更を伴う空間の再構成が可能である。そこで構造変更の一例として、全層の梁・床を設けたモデル(TS-1)と2階の一部の梁を除去し、吹き抜け空間としたモデル(TS-2)を作成した。TS-2モデルは、図一六(a)を想定している。除去した梁の位置を図一八中に示す。

トリプルスケルトンモデル(TS-1およびTS-2)および従来構造(0モデル)の3つの建物モデルに対して地震応答解析を行った。応答解析には柱・梁をモデル化した部材系の3次元モデルを用いた。

なお、トリプルスケルトン構造(免震)の1次固有周期は3.7sec、免震層の減衰定数は25%としている。トリプルスケルトンモデルおよび従来モデルとも上部構造の減衰は、基礎固定時の1次モードに対応する減衰定数を2%とする剛性比例型とした。

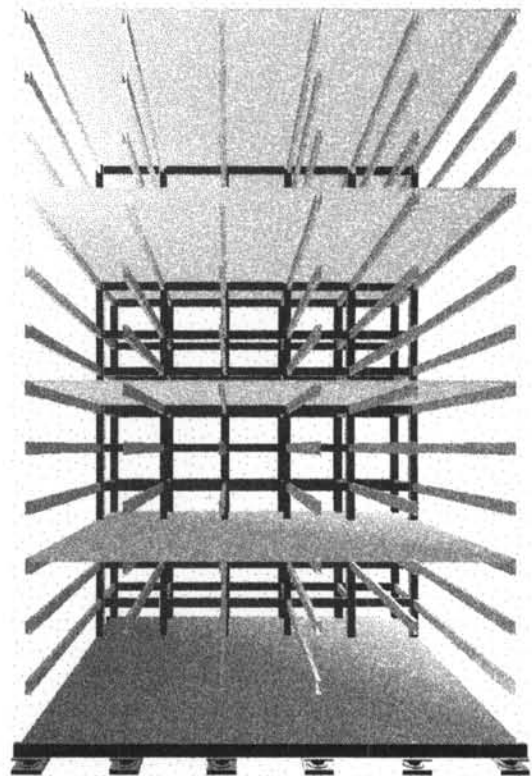
### 5.2 入力地震動

入力地震動の加速度時刻歴波形を図一九に、加速度応答スペクトルを図一〇に示す。入力地震動の最大速度は70cm/secを設定した。入力方向は図一八に示すY方向とした。

### 5.3 応答解析結果

地震応答解析結果について、最大層せん断力分布、最大応答加速度分布、最大層間変形分布を図一〇に示す。

最大層せん断力分布より、トリプルスケルトン構造システムを採用したモデル(TS-1およびTS-2)は、従来型モデル(0)に比べて地震時の応答せん断力をおよそ35%に低減できる事が分かる。また、2階のプランを変更したモデル(TS-2)とプラン変更前のモデル(TS-1)を比較しても応答解析結果にほとんど差はなく、ほぼ同等の安全性を確保することができる。



図一七 梁や床スラブ撤去による大空間の創出

表-1 トリプルスケルトン (TS) モデル部材一覧

階	柱 (SN490)			大梁 (SN490)				
	C1	C2	C3	G1	G2	G3	G4	G5
12F	□-500*22	□-500*22	□-500*22	H-550*200*9*16	H-550*200*9*16	H-550*200*9*16	H-550*200*9*16	H-850*300*14*26
11F	"	"	"	H-700*250*12*22	H-700*250*12*22	H-700*250*12*22	H-700*250*12*22	"
10F	□-550*22	□-550*22	□-550*22	"	"	"	"	H-900*300*16*28
9F	"	"	"	"	"	H-750*300*14*25	H-750*300*16*28	"
8F	"	"	"	"	"	"	"	"
7F	"	"	"	"	"	"	"	"
6F	□-650*28	□-650*28	□-650*28	"	"	H-750*300*16*28	H-800*300*12*32	"
5F	"	"	"	"	"	"	"	"
4F	"	"	"	H-750*300*14*25	H-750*300*14*25	"	"	"
3F	"	"	"	"	"	H-800*300*12*32	H-900*300*16*28	"
2F	"	"	"	"	"	"	"	"
1F	"	"	"	"	"	"	"	"

表-2 従来構造 (0) モデル部材一覧

階	柱 (SN490)			大梁 (SN490)				
	C1	C2	C3	G1	G2	G3	G4	G5
12F	□-550*22	□-550*22	□-550*22	H-600*200*10*16	H-600*200*10*16	H-600*200*10*16	H-600*200*10*16	H-850*300*14*26
11F	"	"	"	H-700*300*12*25	H-700*300*12*25	H-700*300*12*25	H-700*300*12*25	"
10F	□-650*25	□-650*25	□-650*25	"	"	"	"	H-900*300*16*28
9F	"	"	"	"	"	H-800*300*12*25	H-800*300*12*28	"
8F	"	"	"	"	"	"	"	"
7F	"	"	"	"	"	"	"	"
6F	□-650*28	□-650*28	□-650*28	"	"	H-800*300*12*28	H-800*300*12*32	"
5F	"	"	"	"	"	"	"	"
4F	"	"	"	H-800*300*12*25	H-800*300*12*25	"	"	"
3F	"	"	"	"	"	H-800*300*12*32	H-900*300*16*28	"
2F	"	"	"	"	"	"	"	"
1F	"	"	"	"	"	"	"	"

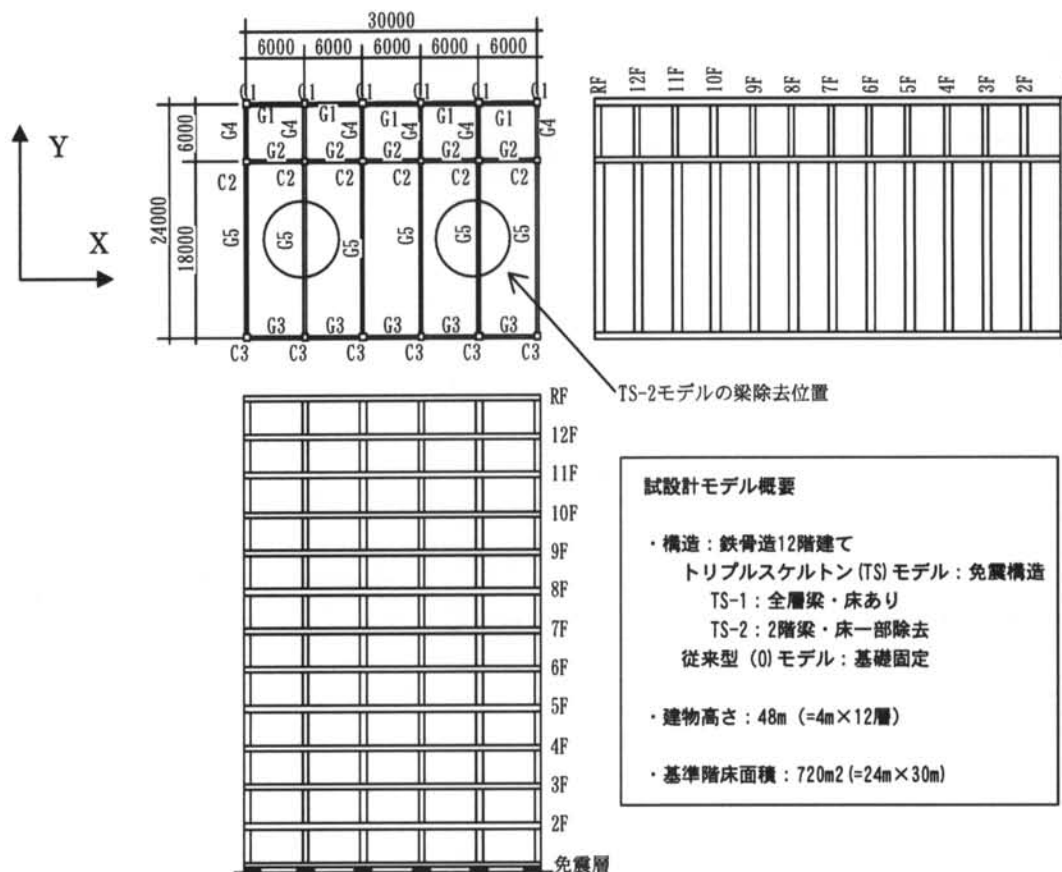


図-8 試設計モデル

最大層間変位分布より、従来型 (0) モデルではほとんどの層で4cm (層間変形角 $R=1/100$ ) を超え、最も大きな層では6cm ( $R=1/67$ ) に達している。そのため、構造体に大きな損傷が生じて大規模修繕が必要となる可能性がある。

一方、TS-1、TS-2モデルでは、全ての層において最大層間変位は2cm以下であり構造体の補修は軽微なもので済むと考えられる。

既往の文献<sup>4)</sup>による、床応答加速度と家具の転倒率の関係を図-12に示す。TS-1、TS-2モデルの最大応答加速度は約220 $\text{cm}/\text{sec}^2$ であり、提案モデルは地震時にも家具はほとんど転倒しないと考えられる。これに対し従来型 (0モデル) の最大応答加速度は約800 $\text{cm}/\text{sec}^2$ に達し、建物内の什器の転倒・破損が多数発生すると考えられる。

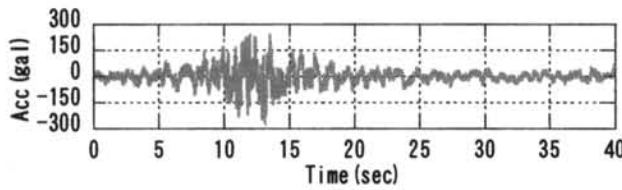


図-9 入力地震動加速度時刻歴

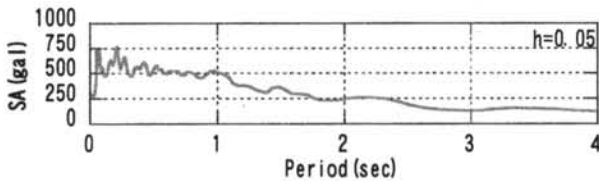


図-10 入力地震動加速度応答スペクトル

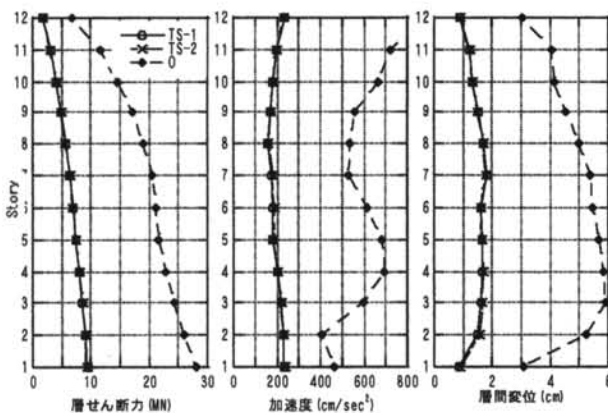


図-11 地震応答解析結果

## § 6. ライフサイクルCO<sub>2</sub>およびライフサイクルコスト

本構造システムを適用した建物は、半永久的に建物に要求される機能や安全性を確保できる。本章では、100年という期間を設けて、環境およびコストに対する効果を定量的に把握する。検討にあたっては、トリプルスケルトン構造と従来構造の建物の両者のCO<sub>2</sub>排出量ならびにコストを比較し、その低減効果を評価する。

想定条件を表-3に示す。トリプルスケルトン構造は

35年ごとに大規模改修を想定し、従来型建物はこのときに建替えるものとする。なお、トリプルスケルトン構造-Bは、35年経過後に30%の面積を事務所から住宅へ用途変更するものとする。また、レベル2相当の地震が50年経過時に発生し、従来型建物は破壊する事を想定している。

運用・維持管理に関しては、従来型建物には、標準的な設備が設置されているものとしている。トリプルスケルトン構造には、従来型設備の場合 (A) と省エネルギーに配慮した設備を採用している場合 (B) の両者を想定する。省エネルギーに配慮した設備とは、例えば、高効率空調機器や断熱の強化、高効率の照明や緑化などである。

なお、算定にあたっては清水建設開発のGEM-21を用いた。GEM-21の概要については文献5)を参照。

ライフサイクルCO<sub>2</sub>の計算結果を図-13に示す。図は従来型建物の総排出量を100として表示している。

トリプルスケルトン構造-Aでは、従来型建物に比べ8%、トリプルスケルトン構造-Bでは35%の減となっている。トリプルスケルトン構造-Bの低減量が大きいのは、省エネに配慮した設備を想定したことに加え、事務所から住宅への用途変更を考慮したことによる。

ライフサイクルコストの計算結果を図-14に示す。図-13と同様、従来型建物の計算結果を100として表示している。トリプルスケルトン構造-Aでは、従来型建物に比べ9%、トリプルスケルトン構造-Bでは25%の減となっている。CO<sub>2</sub>の低減量に比べライフサイクルコストの低減量は少ない結果となっている。ただし、ライフサイクルCO<sub>2</sub>は、建設・補修・解体時に比べ、運用時の排出量が圧倒的に大きかったが、ライフサイクルコストはCO<sub>2</sub>に比べ建設・補修・解体時の割合が相対的に大きくなっている。

- ロッカー1 (高さ210cm, 奥行き45cm)
- - - - ロッカー2 (高さ180cm, 奥行き45cm)
- · - · キャビネット1 (高さ120cm, 奥行き40cm)
- - - - キャビネット2 (高さ105cm, 奥行き40cm)

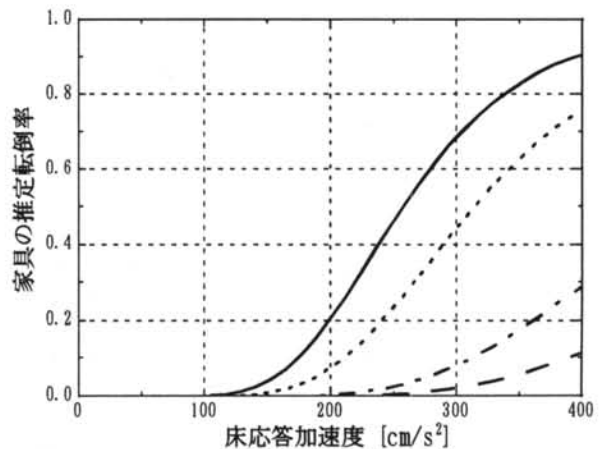
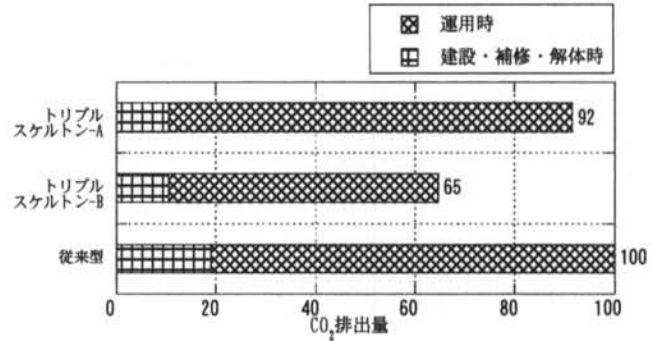


図-12 床応答加速度と家具転倒率の関係

(文献4、周期2.5sec以上、床との摩擦係数: 0.4を想定)

表一3 想定条件

モデル	想定条件
トリプル スケルトン-A	<ul style="list-style-type: none"> <li>・35年、70年で大規模改装</li> <li>・用途変更なし（事務所）</li> <li>・50年経過時の地震には無損傷</li> </ul>
トリプル スケルトン-B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・35年、70年で大規模改装</li> <li>・35年で用途変更 （事務所100% → 事務所70%、住宅30%）</li> <li>・50年経過時の地震には無損傷</li> <li>・省エネ対応設備</li> </ul>
従来構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>・35年、70年で建て替え</li> <li>・50年経過時の地震により大破、補修工事発生。</li> </ul>



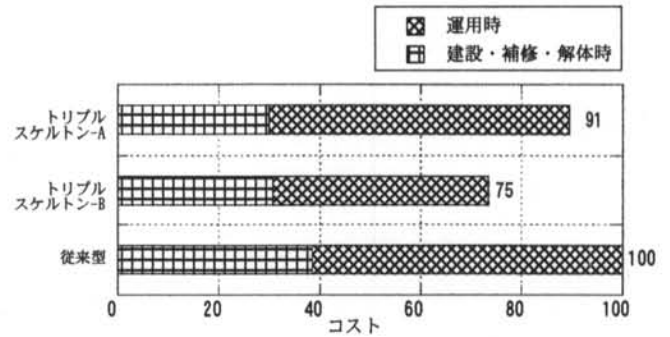
図一13 ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の比較

§ 7. 部材リユースシステム

本システムでは、第2スケルトンを構成する部材は簡単に取り外せるような接合方法を採用しているが、本提案では、これらの解体した部材をリユースしていくための循環システムについても検討を行っている。

図一15に、部材リユースシステムを示す。ここでは、「部材総合商社」というシステムを導入している。解体時に排出される部材は、事前にオンラインで部材総合商社に登録される。一方、新築現場では、建築計画時に必要とされる部材の種類や数量が部材総合商社に登録される。条件が合った場合は部材のリユースが成立する、という仕組みである。また、一定期間以上要求が無かった部材については再生セメントや骨材あるいは電炉材としてリサイクルする。

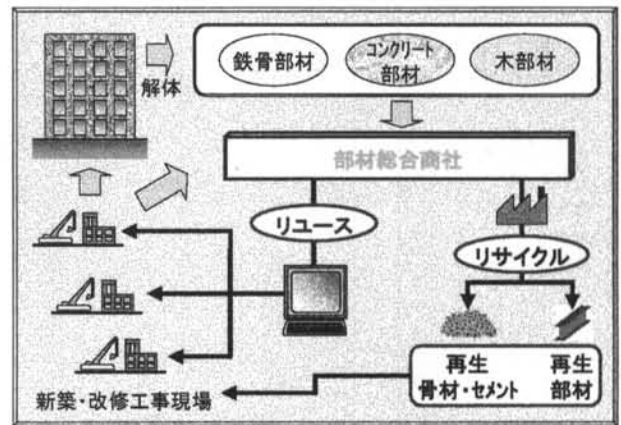
このように「部材総合商社」は部材のリユース・リサイクルを効率的に進めるために必要不可欠な核となるものである。今後、部材のリユースを実現するためには、ハード面の技術のみならず、図一15に示すような社会的なシステムを社会全体で考えていく必要がある。



図一14 ライフサイクルコストの比較

§ 8. おわりに

循環型社会に適合する建物として、内部空間の再構築を可能としたトリプルスケルトン構造システムを提案し、そのシステムを支える技術、耐震性、ライフサイクルCO<sub>2</sub>およびライフサイクルコストについて検討し、提案している構造システムの優位性を把握した。



図一15 構造部材のリユースの流れ

今後は、構造のみでなく部材リユースに関する社会システム、環境やコストに対する検討をさらにすすめ、実現を目指していく予定である。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：LCCO<sub>2</sub>30%削減、耐用年数3倍延伸をめざす建築設計、フリースペース・ビルディングの提案, 2001
- 2) 塚越, 坂本, 神野: 混合構造におけるリングパネルを用いた接合部の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, 2002. 8
- 3) 鋼材倶楽部: サステナブル建築とスチール, シンポジウム資料, 2001. 10
- 4) 金子美香: 地震時における家具の転倒率推定方法, 日本建築学会構造系論文集 第551号, pp. 61-68, 2002. 1
- 5) 本建築学会: 建物のLCA指針 第2版, p10, 2003

