新年号特別企画＊より自由な構造をめざして
—合成・混合構造に見るコンクリート技術の現状と将来—／各論［海外事例］

海外における混合構造

和田　章*

1. 我が国の構造断面

日本には4畳半の部屋に住む文化がある。10 cm 角の十分細い柱に対しても柱型を外に出すように真壁造りで壁を設け，必要最低限の厚さの材料で部屋と部屋を仕切り，「1間半四方」の領域を極力有効に使う文化を育てた。言うまでもなく，旧来からこれらの木造建築は柱とはりが基本になって成り立っている。これは，近代になり，欧米から鉄筋コンクリート構造や，鋼構造の新しい構造法が導入されてからも同じである。建物を作り上げて行くことは，柱をつぎつぎに立て，はりをつないでいくことと誰もが考えている。ただ，昔の建物に比べ，今の建物は規模が大きくなっただけである。

現在の我が国で普通に行われている構造法は柱とはりを基本に組み立て，耐震性が不足していると思われる場合には，柱はりで囲まれる枠の中に壁を設けて耐震壁を構成する方法，または筋違を組み込む方法が用いられている。このように，鉄筋コンクリート構造や，鋼構造で作られる現在の建築構造法も，我々の気持の中では，旧来の木造工法の真壁方式の延長線上で考えていると言える。

先に述べたように，我が国の建築は狭い国土の中に建てられ，一つ一つの部屋の大きさもなかなか多くすることが難しいが，それぞれ極力大きい内部空間にしようと，昔から色々な工夫がされてきた。現在の建築家にとっても，この事情は同じである。建築家は，設計案に対して，構造設計者が細い柱断面，細いはり断面を提案してくれることを常に期待している。安全性さえ損なわなければ，建築家にとって心地良い細めの部材を提案することが，構造設計者の能力と思われているところもある。

この努力の成果は高強度コンクリートや高張力鋼の開発，各種の合成・混合構造の開発として現れ，構造物の規模がますます大きくなっている程には柱の断面は大きくならずにすんでいる。それでも耐震性の問題を常に考えなくてはならないため，実際の設計の場面では，部材断面は欧米に比べ，太くなりがちである。仕方なく断面が大きくなってしまうから，部材を細くすることが我々の目標のようになってしまうのかも知れない。

2. 欧米の構造断面

ヨーロッパの建築構造の原点は組石造であり，ル・コルビジェがドミノ・システムを発表するまでは，建物の荷重を受け持つのが壁の役目であり，壁で仕切られた中に部屋ができ，壁に穴を開けることで窓や出入り口ができていた。1914年のこのシステムの提案はヨーロッパ数千年の建築の形を変えた画期的なものであり，建物の荷重を支えるのは柱の役目とし，壁は荷重を支えることから開放され，その後のピロティやカーテンウォールの考え方に道を開いた。

ある意味では日本建築の方法が取り入れられたようにも感じる。このように，ドミノ・システムを契機に始まった今の技術では，壁は軽微なもので作ることができるようになり，柱に鋼や鉄筋コンクリートを用いれば，鉛直荷重を支えるだけのためにそれほど大きな部材は必要なくなってきた。特に地震力の影響の少ないヨーロッパの建築の場合は，細い柱で建物を作ることができるようになった。しかし，欧米の人々の頭や心の中には，組石造時代の感覚，つまり大きな断面を持つ壁構造，そこに穴を開けて窓を造り，通路を作って建築にしていく感覚が残っているように思う。欧米の建築家，構造設計者はドミノ・システム以降に考えられた柱とはりの非常に軽快な構造と，従来からあった重厚な壁構造を使い分

＊ わだ・あきら／東京工業大学教授　工業材料研究所（正会員）

け，場合によっては組み合わせることにより建築を作る能力を持っていると言える。

一つの例を上げるとロンシャンの教会がある。この建物は曲線状の厚い壁の色々な位置に色々な大きさの窓が四角錐状に開けられているので有名であるが，この壁は外面と内面に2枚建てられており，その間は空隙になっているそうである。日本において，デザインのために，二重の壁を建てその間をデッドスペースにすることなど考えにくい。

ここで紹介する混合構造についても，海外の場合は部材断面が我が国の場合に比べ非常に大きく，直径3mにもなる柱が使われている建物もある。ローマのサンピエトロ寺院の中央の空間を支持している柱の断面の大きさが，一昔前の公団住宅の一戸分の面積より大きかったことが思い出される程である。

3. 進め方の違い

我が国の建築構造と欧米の建築構造を比較するときに，我々と欧米人のものを考える順序の違いに注目する必要がある。一般に我々の場合は部分を正確に丁寧に詰めていき，それを積み上げることによって全体を構成する進め方が得意である。欧米人の場合は全体の形を先に発想し，その全体を作り上げていくために，部分を考えるという進め方が得意である。よく言われる比較は，日本の桂離宮とエジプトのピラミッドである。近づけば近づく程美しく，離れてしまうと途中の木立で建物全体を見ることができなくなってしまう桂離宮と，遠くから見ていると全体として均整が取れていて美しいが，近くによってみると石積みの段々がそれほど美しいわけではないと言うような比較である。これだけでなく，色々な場面で全体と部分に関する日本人とヨーロッパ人の考え方の違いを感じることが多い。

このように我々に染み付いてしまっている習慣は簡単には消し去ることはできない。この習慣は混合構造を用いた構造設計，新しい開発にも現れているように感じる。たとえば，CFT（コンクリート充てん鋼管柱）に関する研究，柱を鉄筋コンクリート構造，はりを鋼構造によって組み立てる骨組構造に関する研究などは，代表的な日本的アプローチによる研究と感じる。

これに比べ，海外の混合構造には建物全体への部材の配置，材料の使用法に合理的な全体感があるように感じる。

4. 高層建築への鋼とコンクリートの有効利用

鋼とコンクリートによる混合構造を考えるとき，もっとも単純な原理でその適材適所について考察することができる。

鋼材料は，引張応力・圧縮応力に対して同じ強さを持つが，部材の強さとしては圧縮力を受ける場合は座屈現象が生じるので，引張力を受ける場合に比べ弱く，安定した塑性変形は期待できない。

言うまでもなくコンクリート材料は圧縮に強く引張に弱い。部材の強さとしての引張力に対する弱さは，内部の鉄筋または鋼材によって補うことができるが，これらの鉄筋，鋼材は圧縮力に対しても有効に働くから，コンクリートを用いた部材は圧縮力を受ける部材に用いた場合にその有効性を発揮することが分かる。

建築構造物は重力に逆らって地上に建てられるため，上層部分の重量を順々に下層部分に伝えることが構造体の持つべき第一の役目である。この場合，柱に発生する応力は圧縮力が支配的である。ここに用いる材料として圧縮力に強いコンクリートが適していることが分かる。これらの柱が地震時に引張力を受けて内部の鉄筋や鋼材が降伏することがあっても地震後には鉛直荷重により再度圧縮力が作用するので，変形は元に戻る傾向があり，安定した構造体を作ることができる。

これらの柱に鋼部材を用い，地震時の繰り返し軸力を受けた場合，この変動軸力は正負同じ値であるから，常時に圧縮力を受けている分だけ実際に生じる応力は，圧縮力の方が，引張力より必ず大きくなる。鋼構造部材は圧縮力より引張力に対して大きな強さをもっているにもかわらず，圧縮力に対して断面を決めることになり，引張力に対して十分すぎる余裕があることになり，鋼構造部材の持つ強さの範囲を有効に利用しているとは言えなくなる。

50階を超えるような高層建築では，地震や風の力によって建物全体が曲がるのことを防ぐために，なるべく多くの柱断面を建物の周辺に集めたほうが効果的である。この場合に用いられる鋼構造部材はH形や箱型の断面であるが，断面の外形で囲まれる面積の内，鋼材断面そのものが占める断面積の割合は10～20%しかなく，空間を占有している割には効率が悪い。コンクリートを用いる場合は内部が充実した断面形で用いることができ，高強度コンクリートを用いれば，そのヤング率は鋼材の1/4程まで大きくすることができるので，建物全体として高い曲げ剛性をもった高層建築構造を作ることができる。

床の構造システムは軽量な鋼構造により，さらに，地震や風による水平力を分担するブレース構造には圧縮・引張に対して同等の強さを持つ鋼構造部材を用いるのが適している。

5. 海外の具体的事例

海外に目を向けると，自由な発想で，適した構造材料を用いた部材をそれぞれ適した部位に用いた建築が多く建設されているように感じる。それらの建築の名称を次に示すが，先に述べてきたように，鉛直荷重を支える重要な柱に大型の鉄筋コンクリート部材または鋼管コンクリート部材を用い，はり，筋違いおよび2次的な柱には鋼構造部材を用いていることが多い。

1) シアトル：コロンビアセンター
2) 香　　港：中国銀行
3) シアトル：AT & T ゲートウエイタワー
4) シアトル：ツー・ユニオン・ビル
5) シアトル：パシフィックファーストセンター
6) クアラルンプールシティセンター

6. おわりに

構造設計の分野でも，仕様規定型から性能規定型へ移行する話題が出ている。従来の構造形式，構造部材の利用法などの枠にとらわれず，各種の混合構造を用いることにより，作られる建築構造物が満たすべき性能に注目した自由な設計が行われるようになることに期待する。

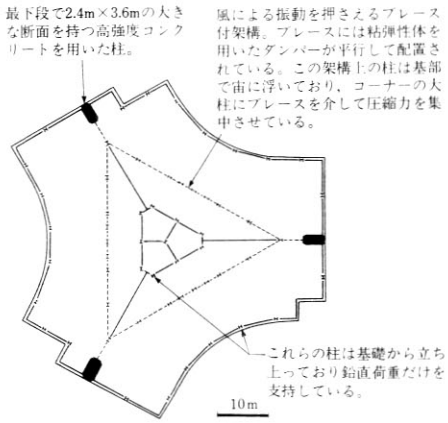


図-1 1986年アメリカ・シアトルに建設されたコロンビアセンター

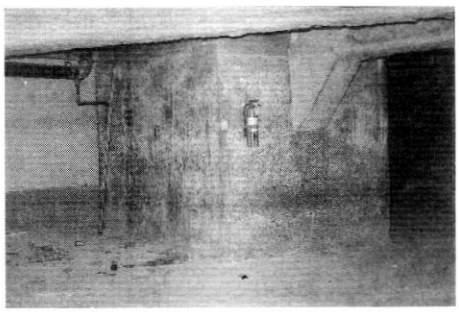


写真-1 コロンビアセンターの柱の写真であり，階高との比較により柱の大きさが分かる。

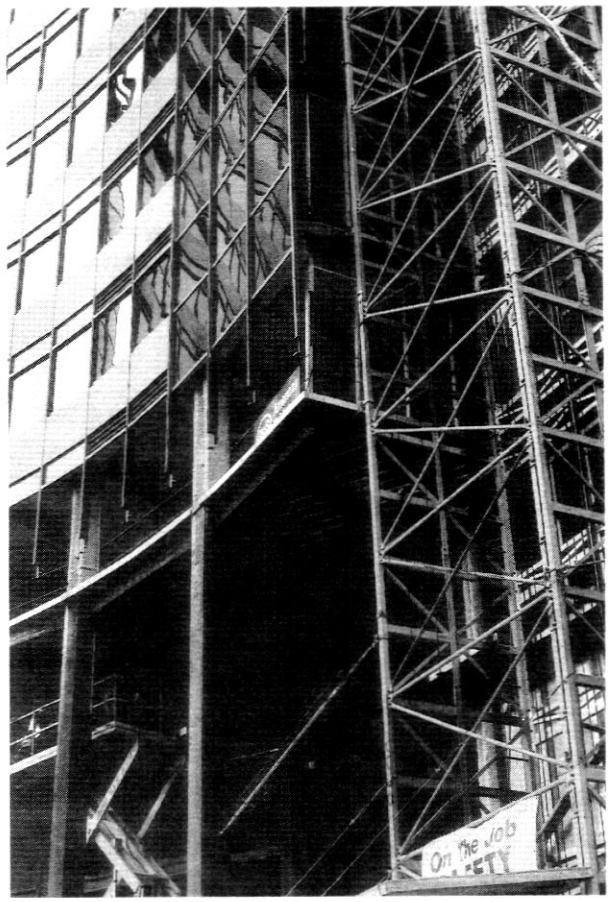
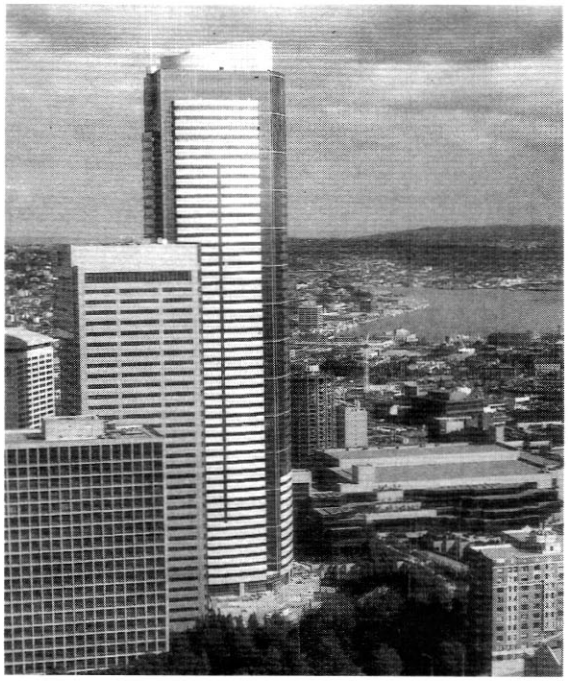
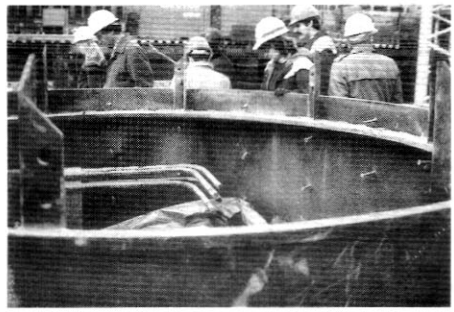


写真-2 コロンビアセンターの建物の周辺の自重のみを支持する低層階の鋼構造柱の写真である。風に抵抗する構造はコーナの大断面柱と中央のブレースに集中させているため，この写真にあるように鋼構造柱は非常に細い断面で設計されている。

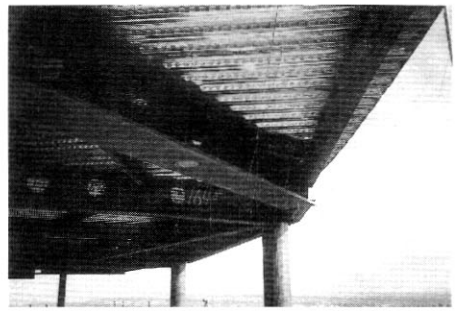


写真−3　シアトルに 1989 年に完成したツー・ユニオン・ビルの写真。これは中央のコアー回りに4 本の鋼管コンクリート柱を立て，風による水平力に抵抗し，建物周辺は鉛直荷重のみを考えた設計を行うことにより，見晴らしの良い建物を作った有名な建築である。

写真−4　ツー・ユニオン・ビルの工事中の写真。中央に鋼管が立ち上がっているのが見える。
外周の柱のピッチが大きいことも分かる。

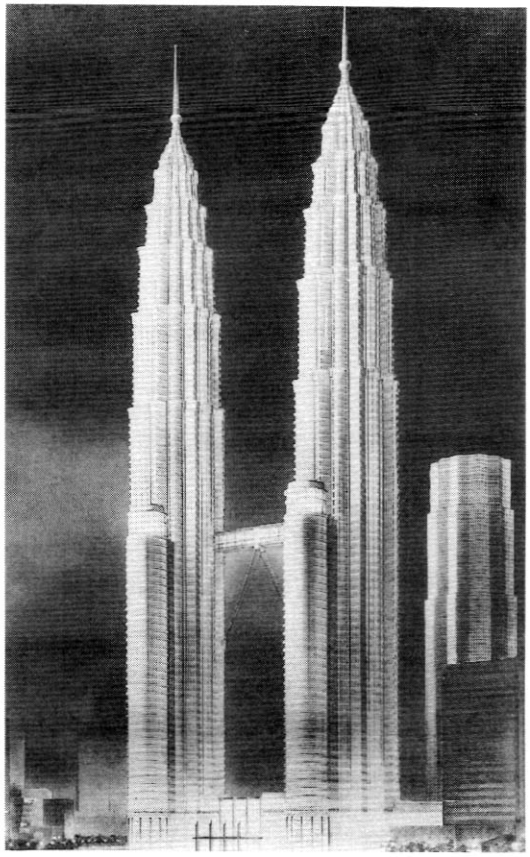


写真−5　ツー・ユニオン・ビルの鋼管柱。内側にスタッドが打たれている。



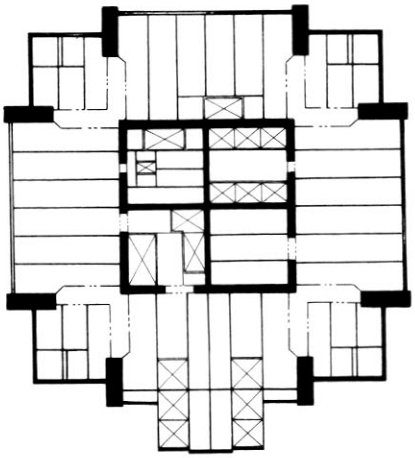
写真−6　ツー・ユニオン・ビルの周辺柱の状況。高層部分での周辺柱のピッチが大きくあいていることが分かる。

写真−7　周辺の柱にも鋼管コンクリート柱を用いている。この写真は外径が変わる部分を示す。

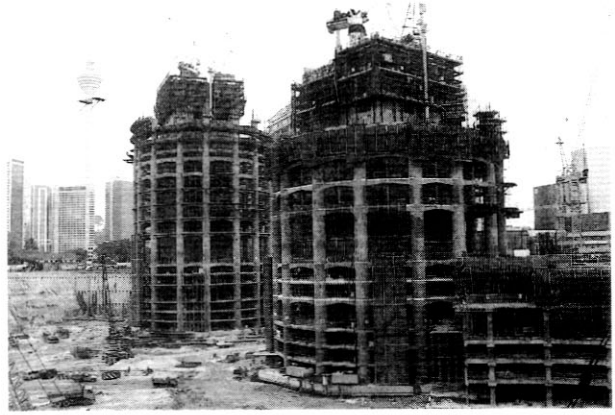


写真―8　シーザ・ペリの設計によりマレーシアのクアラルンプールに建設中の“クアラルンプール・シティ・センタ・プロジェクト(KLCC)”の完成予想写真。

写真―9　コアーと周辺柱をつなぐ床組は鋼構造によって作られている.



図―2　シカゴに計画されているミグリン・バイトラー・タワーの平面図。この建物は現時点で計画されている高層建築では最も高いものであるが，やはり柱には鉄筋コンクリート，床組みには鋼構造が使われている。



写真―10　この写真で分かるようにコアーと，周辺の柱は鉄筋コンクリートによって作られている。周辺柱の直径は2ｍである。