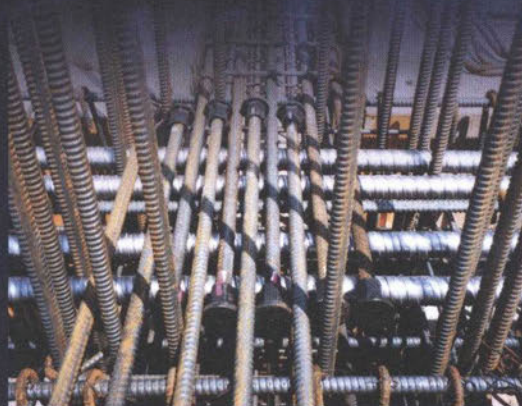




構造物を確かに支える 鉄筋



建設分野には各種の鉄鋼材料が使用されているが、その中で大きな割合を占めているのが鉄筋用棒鋼（以下、鉄筋という）である。鉄筋はコンクリートの補強材として、建築・土木構造物に不可欠な材料である。鉄筋のほとんどは、スクラップを原料とし電炉メーカーで生産されており、安定した品質を確保するため、製造にはさまざまな品質管理技術が生かされている。最近の建築分野では、高層建築などのニーズに対応し、より高性能な鉄筋の採用が広がっている。



コンクリートの特性を補う鉄筋の役割

19世紀中ごろ、フランスやドイツでコンクリートに針金を組み合わせる方法で、小船や植木鉢、階段などが作られ始めた。当時の製作物は、鉄線を網状に組んだもので形状をつくり、それをコンクリートで覆っていたといわれている。その後、1887年ドイツのケーネンは、鉄筋コンクリートの設計理論を発表した。これ以降、鉄筋をコンクリートの補強材として利用し、適切に鉄筋を配置するという技術が普及した。

日本では、1904（明治37）年の佐世保海軍工廠・ポンプ小屋、1907（明治40）年の倉庫建築（神戸）などで、鉄筋コンクリート造が採用された。

現在のようなコンクリートの製造技術が確立したのは19世紀前半のことだが、それ以前に建築や橋の材料として多く使われていたのは石だった。石に比べコンクリートは、必要な形が作りやすいという特徴がある。しかしコンクリートには石と同様に、ひび割れが入りやすい、引張力に弱い、という欠点があり、これを解決する方法がコンクリートの中に補強材を入れることだった。

一般的なコンクリートの引張強度は $1.8 \sim 5.9 \text{ N/mm}^2$ であり、鋼材に比べ100分の1レベルと小さい。そのため、補強材として

使われた鉄筋は、引張力に弱いというコンクリートの性質を補うため、引張力に強い材料として選ばれた。

つまり鉄筋コンクリート構造は、圧縮力には強いが引張力に弱いコンクリートと、引張力に強い鉄筋とを上手に組合せ、大きな荷重にも耐える構造部材を形成する構造だといえる。例えば梁を考えると、コンクリートだけでは小さな荷重で破壊してしまうが、鉄筋を上手に組み合わせることで大きな荷重にも耐える梁にすることができる。

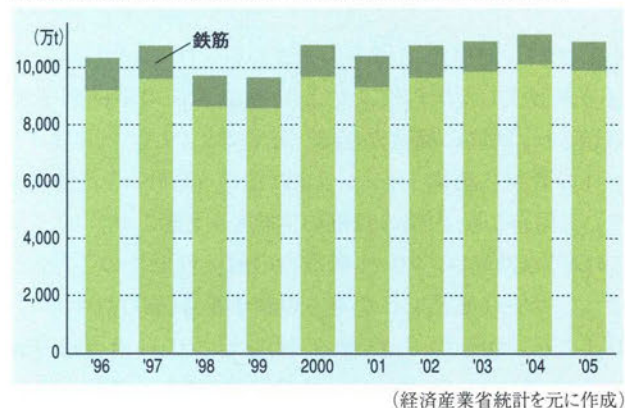
ただし、この際には鉄筋とコンクリートが一体となって荷重に耐えることが重要であり、このことから鉄筋とコンクリートの付着性が問題になる。この付着力を高めるために開発されたのが異形鉄筋であり、鉄筋表面に突起を設けることでコンクリートとのかみ合い力を増し、コンクリートとの付着力を高めている。

また鉄筋は、引張応力を増大させていくと伸びひずみが増大し、やがて降伏点に達すると応力がほとんど変わらずに、ひずみだけが增大する。伸びひずみが0.2%程度で鉄筋は降伏する。降伏した後も、同じ応力に耐えながらさらに伸びる。これに比べコンクリートの変形能力は小さく、応力が圧縮強度に達したときのひずみは0.2%程度、引張った場合には0.02%程度しかない。

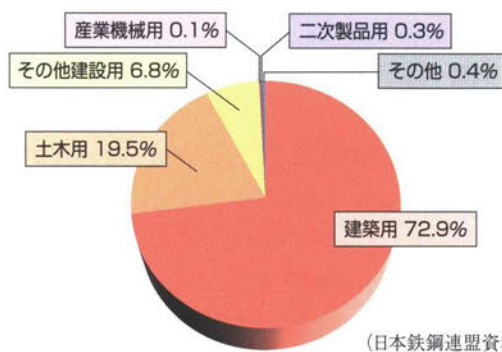
このほか、鉄筋とコンクリートを組み合わせることによる利点に

■鋼材生産高と小形鉄筋用棒鋼生産高の推移

小形鉄筋用棒鋼は全体のおおむね10%という大きな割合を占めている。



■鉄筋用棒鋼の用途(最終使途ベース受注量推計2004年度)



は、コンクリートのアルカリ性が鉄筋の腐食を防止する、コンクリートが火災時の熱から鉄筋を保護する、コンクリートが圧縮力を受ける鉄筋の座屈を防ぐ、などが挙げられる。また施工の際には、型枠の中にあらかじめ鉄筋を組み込んでおき、それにコンクリートを流し込めばよいという特徴もある。

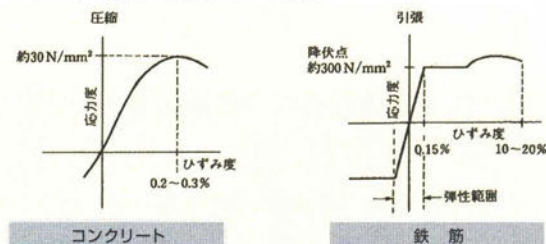


スクラップから作られる鉄筋

鉄筋は、主に電炉メーカーが生産している(総生産量の約96%が電炉品)。原料である鉄スクラップを電炉で溶解、精錬して鋼塊を作り、これを圧延する。原料のほとんどは国内で発生した鉄スクラップである。鉄筋は一般構造用鋼であるためスクラップからの製造が比較的容易であり、基本的な製鋼、圧延設備があれば製造することができる。電炉メーカーは鉄鋼業であるとともに地域に密着したリサイクル産業でもある。

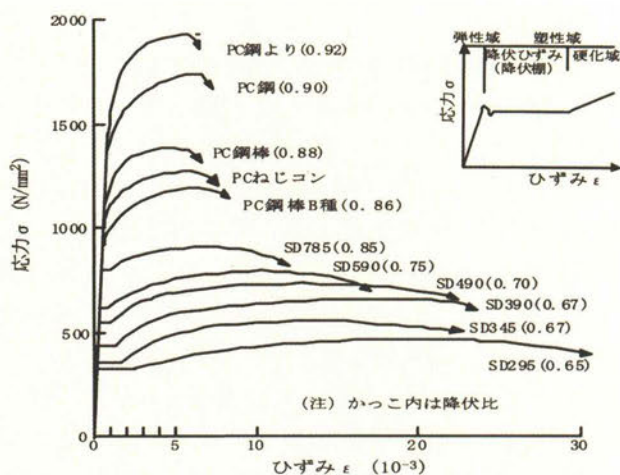
現在、建築構造物や橋梁などとしての鉄鋼製品の蓄積量は日本全体で約12億tであり、そのうち毎年約2%が市中回収スクラップとなる。これに、自動車工場など製造業から発生する加工スクラップや、製鉄所や製鋼工場からの自家発生スクラップなどを加えた約3,000万t/年が電炉メーカーで原料として使用される。鉄筋は電炉メーカーの主力製品のひとつであり、年間約1,000万t生産され、鋼材生産全体の約1割を占めている(2005年度)。これは、

■コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係



(「コンクリート技術研修テキスト平成17年度版」日本コンクリート工学協会より)

■各種鋼材の応力-ひずみ関係曲線



(「ニューRC用鋼強度鉄筋と最近の動向」永井、日本鉄鋼連盟、西山記念技術講座第134回より)

単独製品が占める比率としてはきわめて高い。鉄筋の用途は、建築用が約7割、土木(橋梁、ダムなど)が約2割を占めている。

鉄筋は、JISでは「鉄筋コンクリート用棒鋼」と呼ばれている。断面形状の種類には丸鋼(SR、Steel Roundの頭文字)、異形棒鋼(SD、Steel Deformedの頭文字)がある(異形棒鋼は一般に異形鉄筋と呼ばれる)。かつては丸鋼が用いられたが、大正時代ごろから日本でも異形鉄筋が使われ始め、現在では使用される鉄筋のほとんどすべてが異形鉄筋である。異形鉄筋は表面に突起がついており、鉄筋の長手方向に設けられた突起をリブ(肋骨の意味)と呼ぶ。付着抵抗に貢献するのは、リブと直行するか斜めに交わる突起であり、これを節と呼ぶ。節やリブの形状はメーカーによって若干異なるが、節の高さや間隔はJISに定められた範囲で製造されている。

鉄筋が建築の設計上で、重要な意味を持つのは降伏点であるため、鉄筋の鋼種の表記には降伏点(または0.2%耐力)の数値が用いられている。例えばSD345の場合は、降伏点が345~440N/mm²である。

また鉄筋の径は、Dの後ろにおおまかな直径を表す数字が付いた記号で表されており、JIS規格ではD6~D51の13種類がある(例:D25は公称直径が25.4mmの異形棒鋼)。このうちD16~41は「ベースサイズ」と呼ばれ柱の主筋などに多く使われ、D6~13は「細物」と呼ばれ補強筋などに多く使われる。また太径のD38以上は、高層建築などに用いられる。



コンクリート構造物への鉄筋腐食の影響と対策

鉄筋コンクリート構造の寿命は、おおむね50～60年程度といわれている。しかし長い年月の間に、コンクリートは徐々に劣化し、とくにコンクリートのひび割れによる水の浸入などにより、コンクリート内の鉄筋が腐食し、構造物全体の早期劣化を引き起こすことがある。

鉄筋の腐食が原因となる早期劣化の1つに、コンクリートの中性化がある。コンクリート中のセメントと水が化合して生じた水酸化カルシウムは、コンクリート中に強アルカリ性(pH12以上)の飽和水溶液となってコンクリート中に存在する。このコンクリートの表面から大気中の炭酸ガスが浸入すると、飽和水溶液になった水酸化カルシウムが炭酸ガスと反応し、炭酸カルシウムに変化する。これにより、コンクリートはpH10前後になり、アルカリ性が消失してしまう。このような現象は中性化と呼ばれている。

通常、中性化の進行はコンクリート表層から進み、50年に10mm程度とゆっくりしたものだが、中性化が鉄筋の位置まで達すると、鉄筋表面に形成されていた不働態皮膜が破壊され、鉄筋表面にさびが発生する。さびによって鉄筋は膨張し、この膨張力により鉄筋周囲のコンクリート部にひび割れが生じ、ここへさらに雨水と炭酸ガスが浸入し、鉄筋のさびが進行する。これを防ぐため、建設時に鉄筋からコンクリート表面までのコンクリートの厚さ(かぶり厚さ)を十分に確保する、コンクリートが緻密になるようにする、などの対策がとられている。

塩害と呼ばれる現象では、コンクリート構造物の材料に海砂

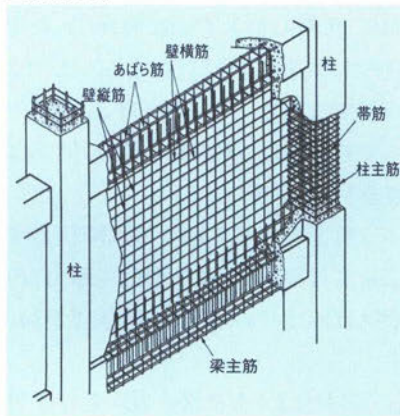
を使用したり、海岸部で海水の飛まつを受けコンクリートの中に塩分が浸入したりすることにより、鉄筋表面の不働態皮膜が破壊され、鉄筋の腐食が起る。海岸でなくても、例えばコンクリートの骨材に塩素イオンが含まれている海砂などが使用されている場合にも、内部の鉄筋の劣化を引き起こす。

このような鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上の手段としては、コンクリート製造時に塩分を規制する、鉄筋に対するコンクリートのかぶり厚さを大きくする、鉄筋コンクリート構造物の表面に塗装、吹きつけなどを行う、防錆処理を施した鉄筋を使用する、などの対策がとられている。

また鉄筋コンクリート工事にかかわる標準仕様書には「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」(日本建築学会)などがあり、これにより鉄筋のかぶり厚さや鉄筋の間隔、補強方法などが決められている。

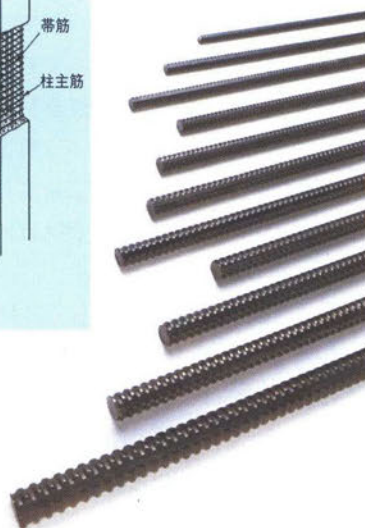
高度経済成長期以降に建設された多くの鉄筋コンクリート構造物は、建築後40～50年を迎えようとしている。また、1999年の山陽新幹線トンネル事故などで鉄筋コンクリート構造物の劣化が社会問題となったことがあったが、それ以降打音検査、コア採取診断、非破壊検査などの確な劣化診断が行われ、劣化状況に応じてコンクリート劣化部の除去・補修や鉄筋劣化部の補強などが実施されている。このような取り組みにより、多くの鉄筋コンクリート構造物の信頼が守られてきたのである。

■配筋の例

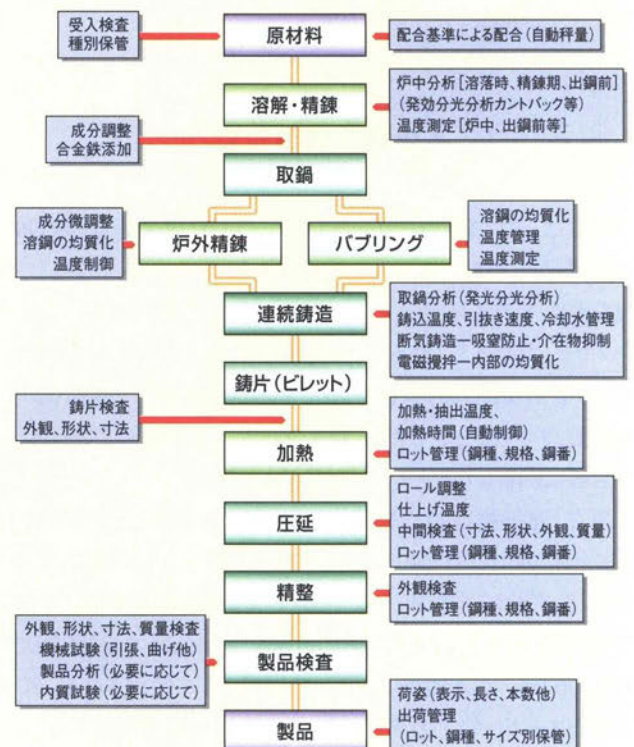


■各サイズの鉄筋の例

異形鉄筋のサイズは、Dの後ろにおおまかな径を表す数字が付いた記号で表される。D6～D51の13種類があり、建築物の規模などによって使い分けられる。



■鉄筋の製造工程と品質管理



(普通鋼電炉工業会資料より)



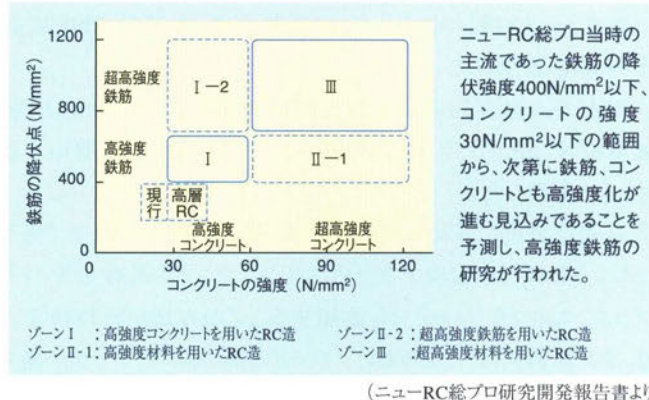
高層建築で求められる高強度鉄筋

以前は、高層建築といえば鉄骨造(柱や梁などの構造体を鉄骨で組んだ構造)や鉄骨鉄筋コンクリート造(鉄骨造に鉄筋コンクリートを合せて使用した構造)が一般的で、高度経済成長期以降に建設された多くの高層建築がこの構造を採用していた。しかし1980年代ごろから、超高層(一般的には高さ60m以上、20階以上の建築物を超高層という)住宅への鉄筋コンクリート造の適用が検討されるようになった。鉄筋コンクリート造は、鉄骨造に比べ、地震時に揺れにくい、断熱性が高いなど居住性を向上できるうえ、建設コストの低減や工期の短縮が図れるという効果が期待でき、マンションなどで多く適用されている。これに対し鉄骨造は、鉄骨が他材料に比べ強度が高いため、建築物の軽量化、省スペースを図ることができ、オフィスビルに多く適用されている。

1988年から、当時の建設省により「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術開発」総合技術開発プロジェクト(ニューRC総プロ)が実施された(1988～1992年度実施)。当時の鉄筋コンクリート造の大部分に使用されていた鉄筋は、降伏点 400N/mm^2 以下であった。また、コンクリート強度は 30N/mm^2 以下であった。ニューRC総プロでは、高層建築物へのニーズが高まり、建築物の軽量化、高耐久化が進むことを想定し、高強度鉄筋の研究が行われた。そして、柱・梁の主筋(材軸方向筋)用としてSD685及びSD980、横補強筋(材軸と直角方向筋)用としてSD785及びSD1275の開発研究が行われた。

その一方で、高層鉄筋コンクリート造の設計技術が進歩し、さらにより高強度なコンクリート材料開発、建築工法の開発などもあいまって、徐々に高層鉄筋コンクリート造が建設されるようになった。

■鉄筋及びコンクリートの材料強度範囲と建築物のゾーン



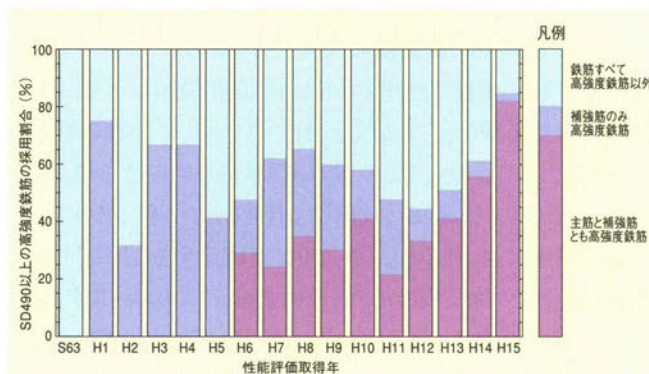
■SD490の化学成分及び機械的性質(JIS G3112による)

種類の記号	化学成分 %					
	C	Si	Mn	P	S	C+Mn/6
SD490	0.32 以下	0.55 以下	1.80 以下	0.040 以下	0.040 以下	0.60 以下

種類の記号	降伏点又は 0.2%耐力 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	引張 試験片	伸び %	曲げ性	
					曲げ角度	内側半径
SD490	490～625	620以上	2号に準ずるもの 3号に準ずるもの	12 以上 14 以上	90° 90°	D25以下 2.5d* D25以上 3.0d

※: dは公称直径を示す。

■SD490以上の高強度鉄筋が採用された性能評価取得建築物の割合
高層あるいは免振構造などにより性能評価を取得した建築物のうち、主筋と補強筋ともSD490以上の高強度鉄筋を用いた建築物は、全体の8割以上を占めるまでになっている。



(日本建築学会資料より)

用途や目的に合わせた各種の鉄筋

構造物の種類によって、使用される鉄筋に求められる特性は多様化し、各種の鉄筋製品が使用されている。

たとえば耐食性を高めた防錆鉄筋としては、塩害などによる鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上のために使用される。防錆性能を高めるため、鉄筋の表面に亜鉛めっきを施したり、エポキシ樹脂塗装を施したものなどがある。

またステンレス鉄筋も徐々に普及しており、海岸部などへの適用が進んでいるが、最近ではビ

ル建築への適用が可能な建築基準法認定を取得した製品もある。

特殊用途では、LNGタンクでは、極低温のLNGを保存するタンクを下から支える箇所に低温用鉄筋が使用されている。これは低温下での引張強度が高いという特徴を持つ。またリニアモーターカー関連施設や医療施設など、磁気の影響を嫌う施設では、オーステナイト系ステンレス鋼や高マンガン鋼などを使用した非磁性鉄筋などが用いられている。



ステンレス鉄筋の例
(写真提供: (株)三和、ステンレス鉄筋製造: 愛知製鋼(株))

高層の鉄筋コンクリート造のニーズに対応するために、鉄筋に要求される材料性能としては、高強度化、太径化、機械式継手の適用などがある。

現在の高強度鉄筋の主流はSD490である。SD490は圧縮強度 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートの使用が増加するとともに普及した。

高強度鉄筋に求められる特性は、強度と靱性の両立である。このような特性を実現するため、シリコンマンガン系合金やバナジウム、ニオブなどの成分を添加するなどの方法が行われている。また原料には、できるだけグレードの高い鉄スクラップが多く配合される。さらに精錬工程での不純物元素（リン、硫黄など）除去、連続鋳造工程や圧延工程での冷却速度コントロールなどの方法があり、鉄筋メーカーは独自のノウハウを生かした製品開発を進めている。

また構造設計法の進歩に伴って、鉄筋の性能として重要な降伏点については、規格降伏点の1.1倍程度の狭い範囲に降伏点があること、十分な降伏棚長を持つことなどが求められている。



建築業界の要請に応えた技術開発

また、高層建築では鉄筋の太径化も求められている。鉄筋を太径化すると、細径に比べ1本あたりの負担荷重が大きいため、鉄筋の本数を減らすことができ、柱のスリム化や建物の軽量化が図れる。建設会社では、多くの細径鉄筋を使用する場合に比べコンクリートの流し込みが効率よく行えるという利点がある。

鉄筋継手では、鉄筋が高強度化、太径化することにより継手性能の優れた方式が求められ、機械式継手へのニーズが高まっている。従来の鉄筋コンクリート造ではガス圧接が一般的である。職人が行うガス圧接は、高層化により作業がしにくくなるだけでなく、継手品質の安定が難しい、抜き取り検査が必要なので施



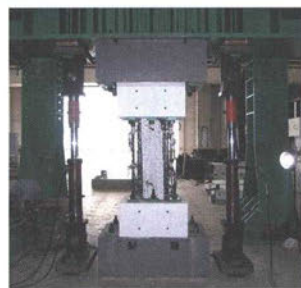
機械式継手の例（カプラーとナットで接合し、グラウト材を注入することにより固定する方式）



■鉄筋コンクリート造超高層マンションの例



パークシティ武蔵小杉の1棟（地上59階建て、右側の建物）では、圧縮強度 150N/mm^2 の高性能コンクリートを採用し、耐火性能、大地震時のひび割れ低減、靱性の増大を実現している。鉄筋（主筋）には太径（D41）の高強度鉄筋（SD685）が採用されている。（写真提供：三井不動産（株））
（右）最近では、高強度コンクリートに合成繊維や鋼繊維を混ぜることにより、 200N/mm^2 までの高耐火・高強度コンクリート技術が開発されている。（資料提供：（株）竹中工務店）



工時間がかかる、などの点が指摘されていた。これに比べ機械式継手では熟練工でなくとも継手性能が安定し、施工時間の短縮が図れる利点がある。機械式継手には、ねじ式、モルタル充填式などの種類がある。

建築基準法では、高さ60mを超える高層建築物及び免震構造や制震構造を備えた建築物では、指定性能評価機関で構造安全性能評価を受けなければならない、と定めている。この評価を受けた建築物の中で、SD490以上の高強度鉄筋を用いた建築物の割合は、すでに80%を越えている（2003年）。

最近では、設計基準強度 100N/mm^2 を超える高強度コンクリートや降伏点 $590\sim 685\text{N/mm}^2$ の高強度鉄筋が、実際の建築に使用されている。また日本建築学会「高強度コンクリート施工指針（案）・同解説」（2005年）では、設計基準強度 36N/mm^2 を超え 120N/mm^2 以下の高強度コンクリートと、降伏点 490N/mm^2 以上の高強度鉄筋が適用範囲とされている。

最近の都市圏では、超高層マンションが続々と建設され、その多くが鉄筋コンクリート造となっている。すでにニューRC総プロから10年以上が経過した。建築高層化のニーズの高まりに呼応し、鉄筋もコンクリートも確実に進化を続けていくことだろう。

- 取材協力 普通鋼電炉工業会、東京鉄鋼（株）
- 取材・文 杉山 香里