

コンクリートの耐久性向上に 貢献する鉄

東京を中心に、日本の各地で建設ラッシュが起こっている。新しいビルや道路が建設される一方で、高度経済成長期に建設された社会インフラの老朽化が進み、維持補修が進んでいないのが現状だ。日本の社会インフラを支えている鉄とコンクリート。材料の特徴を生かして開発された新たな技術の例を紹介する。



老朽化の進む鉄筋コンクリート構造物

私たちの生活や社会、産業の活動は、道路、鉄道、港湾、空港などの社会インフラによって支えられている。しかしその多くが高度経済成長期に建設されており、高齢化が進行している。

例えば、道路橋(2m以上)のうち建設後50年経過したものの割合は、2013年には全体の18%であったが、2023年には43%、2033年には67%にまで高まると予測される。トンネルも同様な傾向であり、2013年には20%、2023年には34%、2033年には50%とされている(図1、国土交通省資料より)。

社会インフラは、長期間の使用によって重大事故が発生する可能性が高まっているうえ、維持補修費の増大は大きな社会問題となっている。社会インフラは、建設時には個別に設計、施工されるものであり、建設後の使用環境や劣化のスピード、老朽化の度合いもそれぞれに異なるため「50年経っていないから安全」のように、単純に安全性を判断することはできないことも維持補修を難しくしている。

社会インフラの多くはコンクリート構造物である。コンクリートは、セメント、水、砂、砂利を混ぜたもので、液状の材料を固めるため自由な形状を作ることができる、火や地震に強い、圧縮力が

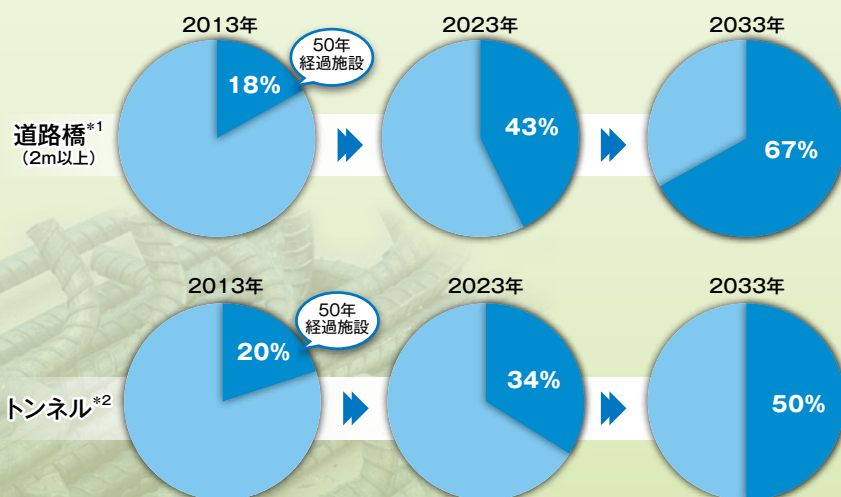
強い、などの特長を持つが、引張力に弱いという欠点がある。これを解決する効果的な方法が、引張力に強い鉄筋を補強材として使用することである。コンクリート構造物に不可欠な材料として、鉄筋は安定的に使用されている(図2)。

しかし、長い年月の間に鉄筋コンクリートは徐々に劣化する。主な劣化状態は、コンクリート内部の鉄筋が腐食し、体積が膨張して、コンクリート内部に破壊が起こることだ。

劣化の主な原因には、塩害と中性化が挙げられる。

コンクリートはアルカリ性が高く、コンクリート中の鉄筋の表面には緻密な不動態皮膜が生じるので腐食しにくい。塩害とは、塩分がコンクリート中に侵入することにより、

●建設後50年以上経過施設の割合の推移(図1)



*1: 橋長2m以上の橋約70万のうち約40万橋(建設年度不明の約30万橋については計算から除外)

*2: 約1万本(建設年度不明の約250本については計算から除外)

(国土交通省資料を元に作成)

不動態皮膜が部分的に破壊され、鉄筋が腐食することである。

もう一つが中性化である。空気中の二酸化炭素の作用により、コンクリート中の水酸化カルシウムが徐々に炭酸カルシウムに変化すると、コンクリートのアルカリ性が低下する。コンクリートが中性化すると鉄筋の不動態皮膜が破壊され、水や酸素の浸透により鉄筋が腐食する。

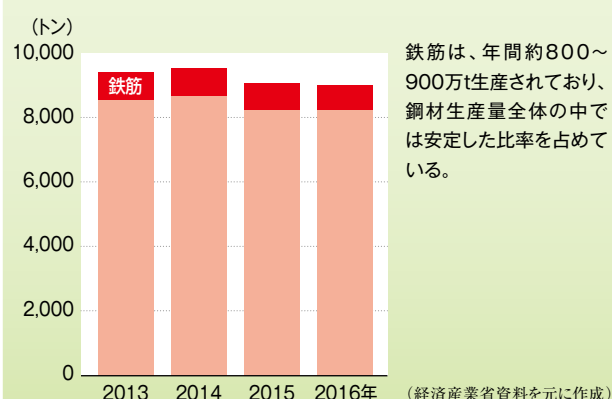
鉄筋コンクリートの劣化を防ぐために、耐食性の高い鉄筋であるステンレス鉄筋や塗装鉄筋が開発されている。しかし、ステンレス鉄筋は価格が高い。また塗装鉄筋は施工時の曲げ加工や溶接時に塗膜が破壊されるという問題がある。このような理由からこれらの鉄筋はあまり使用されていないのが現状だ。

鉄筋コンクリート内部を知るセンシング技術

塩害や中性化が起こるのを予測するには、コンクリート内部の鉄筋がどのような環境にあるのかを正確に知ることが必要となる。そこで開発されたのが、鉄筋周辺の環境を把握するためのセンシング技術*1である(物質・材料研究機構の西村俊弥氏による。詳細は連携記事参照)。

従来、このような環境調査は実物からコアサンプルを採取し、劣化状況を測定していたため、多くの手間がかかっており、また経時変化を測定するのが難しかった。そこで今回は、コンクリート内部に挿入できるマイクロセンサーを独自に開発した(図3)。コンクリート内部の所定の位置に細孔を作成し、マイクロセンサーを

●鋼材生産量と小型鉄筋用棒鋼の生産高の推移(図2)



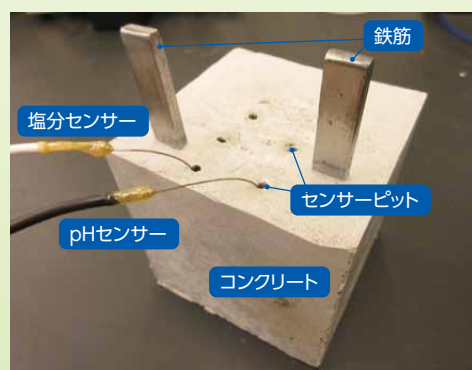
挿入して、塩分やpHをそれぞれ測定するのである。この方法で、模擬溶液(3%NaCl溶液)を用いて試験したところ、時間とともに塩分が増加し、pHが下がる環境であることが確認できた。

また、電気化学インピーダンス法(EIS)を用いて腐食抵抗値を測定し、鉄筋の腐食の進行と塩分とpHとの関係を調査した。その結果、塩分とpHはある「しきい値」を超えると腐食が進むが、「しきい値」を超えないかぎり腐食はほとんど進行しないことが明らかになった。

*1 本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)インフラ維持管理・更新・マネジメント技術によって実施された。

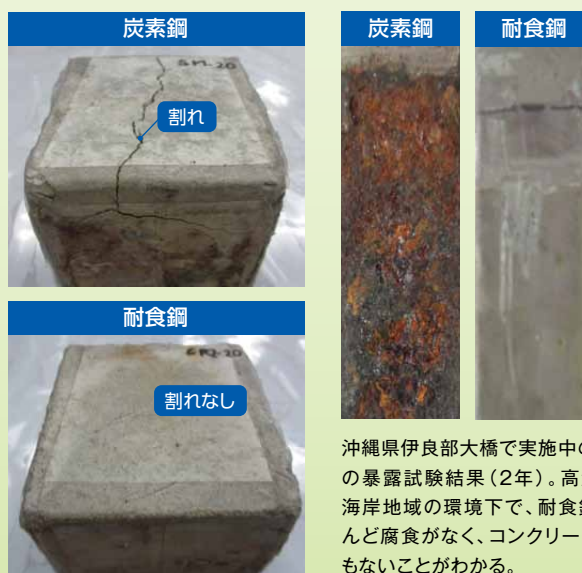
高耐食性鉄筋の開発

●開発したセンサーによる鉄筋コンクリート内部の測定のようす(図3)



細いセンサーピット内にpHセンサーおよび塩分センサーを挿入し測定を行う。

●高耐食性鉄筋を使用した鉄筋コンクリートの暴露試験結果(図4)



沖縄県伊良部大橋で実施中の耐食鋼の暴露試験結果(2年)。高温多湿、海岸地域の環境下で、耐食鋼はほとんど腐食がなく、コンクリートの割れもないことがわかる。

(資料提供: 物質・材料研究機構)

耐候性鋼の発想が生かされた高耐食性鉄筋

次に、これらの知見をもとに、鉄筋コンクリートに最適な、耐食性に優れた鉄筋の開発が進められた。

コンクリート内部で鉄筋の腐食が進行するのは、鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されるためである。そこで、不動態化を高める元素としてクロムに注目し、最適クロム量を見出すことができた。

また、実際に橋梁が建設されるような乾湿を繰り返すような環境では、塩分濃度が高くなり腐食しやすくなる。それを防ぐために添加したのがケイ素である。ケイ素の添加により、さびの内部でクロムとケイ素が濃化して複合鉄酸化物を形成し、塩素イオンの透過を防ぐ働きをすることが推測された。この複合鉄酸化物で形成されたさび層は、防食の作用を発揮する。「さびでさびを制する」という考え方で高い耐食性を発揮する材料としては耐候性鋼^{*2}が知られており、鉄骨構造物などに使用されている。開発鋼では同様な発想で、複合鉄酸化物のさび層を活用し、高い耐食性を得ることができた。この耐食鋼を使用した高耐食性鉄筋の暴露試験では、炭素鋼に比べ腐食が極めて少なく、コンクリートが健全であることが確認された(図4)。またフェロクロムやフェロシリコンなど純金属でない材料を使用することにより、資源の有効活用とコストダウンを図ることができた。

こうして開発された高耐食性鉄筋は、今後の実用化に向けて各種試験のデータを蓄積する段階を迎えている。従来の鉄筋と同等の機械的特性や加工性を発揮することから、幅広く代替することが可能と考えられている。

物質・材料研究機構では、現在、さまざまな構造材料の研究を進める組織として「構造材料つくばオープンプラザ(TOPAS)」を設置し、インフラ構造材料についても産官学連携で実用化への推進を図っている。多様な研究者が意見を出し合うことにより、社会や産業が求める構造材料の研究がさらに加速することが期待される。

鋼繊維を活用してコンクリートを補強する

コンクリートは、材料となる水とセメントおよび骨材の混合比によってさまざまな用途に適応する。例えばダム、橋梁、超高層ビルでは、水とセメントの混合比、骨材の量は異なっており、これを工夫することにより、さまざまな構造物に適用できるようになっている。

^{*2} 耐候性鋼: 適量の合金元素を含有し、大気中での適度な乾湿の繰り返しにより表面に緻密なさびを形成する鋼材。緻密なさびが鋼材表面を保護し、さびの進展が時間の経過とともに次第に抑制される。

前述のとおり、鉄筋コンクリートの鉄筋には、引張力を補強する役割がある。これと同様な役割を鋼繊維に持たせたコンクリート材料が、超高強度繊維補強コンクリート(UFC: Ultra high strength Fiber reinforced Concrete)である。

UFCはもともと海外で開発された材料で、日本に技術導入され、2004年には土木学会で「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」が制定され、従来のコンクリートにはなかった「引張強度を負担できる材料として設計を行うことができる」ことが認められた。このメリットに着目し、その後日本でも独自にUFCが開発された。

開発された新UFCに混和される鋼繊維は、一般的なスチールコードと同様な鋼種で、長さ22mmと15mmの2種類、いずれも直径0.2mmのものである(図5)。鋼繊維は、セメント系材料に曲げ強度、つまり引張強度と靱性を付与する目的で使用される。繊維が長い方が曲げ強度は高くなるが、長すぎると繊維同士が絡みやすく、流動性が損なわれる。そのため2種類の繊維を最適比率で混合することにより、少ない繊維量でも、UFCの設計・施工指針に適合する高い曲げ強度(実施例として30.9N/mm²)を実現することができた。

耐久性向上のポイントは、セメント系マトリクスの緻密化であった。これは、外から侵入してくる酸素や塩分などから内部の鋼繊維を守るためだが、コンクリートでは水とセメントの反応だけでは埋めることができない微細な空隙ができてしまう。新UFCでは、コンクリートの水和初期段階でのエトリンガイト(鉱物の一種)の生成などのコントロールにより、緻密化が図られている。これにより、80N/mm²高強度コンクリートに比べ透気係数は1000分の1、透水係数は100万分の1、塩化物イオンの拡散係数は100分の1と極めて小さく(表1)、100年以上の耐久性が保証されている。このような特徴を生かし、橋梁やダム、海浜地域や寒冷地など、過酷な環境下への適用が進められている。

PC構造に適したUFCの特徴

最近注目されているのが、UFCのプレストレストコンクリート(PC)構造への適用である。UFCはそれ自体が高い曲げ強度を持つが、PC構造に適用することにより、さらに高い曲げ強度が得られる。これにより、部材サイズを細く、薄くすることができ、部材の軽量化を図ることができる。コンクリート組織が緻密なので、PC鋼材を腐食から守る作用も大きく、耐久性に極めて優れている。

適用例の一つに、羽田空港D滑走路の栈橋部床版がある(図6)。海上に建設された滑走路の栈橋部の一部に、UFCを使用したPC床版が採用された。この床版は優れた耐食性を

新UFC(Ultra high strength Fiber reinforced Concrete)の開発

●新UFCに使用された鋼繊維(図5)

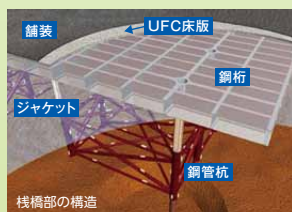


長さ22mmと15mmの2種類の鋼繊維を混合して、1.75vol.%を混和している。

●新UFCの物質移動に関する諸物性(表1)

項目	新UFC	高強度コンクリート
圧縮強度	180N/mm ²	80N/mm ²
水結合材比	0.15	0.3
透気係数	$4.5 \times 10^{-20} \text{m}^2$	$1.0 \times 10^{-20} \text{m}^2$
透水係数	$4 \times 10^{-17} \text{cm/s}$ 程度	$1.0 \times 10^{-11} \text{cm/s}$
塩化物イオンの拡散係数	0.0017cm ² /年	0.14cm ² /年

●羽田空港D滑走路栈橋(ジャケット式栈橋)への適用例(図6)



この栈橋は既設の埋立て部と接続しており、高強度により強く薄い床版ができること、耐食性に優れることが求められた。工場製作によるプレキャストPC床版であり、工場で製作され、打設、一次養生、プレストレス導入、蒸気養生などの工程を経て、現場搬入された。軽量なため、運搬の手間も削減できた。

●高速道路の取替え用UFC床版の例(図7)



高度経済成長期に建設された高速道路の床版取替えにおいて、以前より厚いと支持部の負担増などの問題があるため、軽量で薄い床版が求められている。UFC取替え床版は平板形状で、RC床版の約2分の1に軽量化された。100年を大きく上回るレベルの载荷に対して、高い疲労耐久性があることが試験により確認されている。

(資料提供: 鹿島建設(株))

持ち、海岸地域でも長期間使用できる。しかも、高強度であることから、例えば50N/mm²のコンクリート床版に比べ重量は約60%低減できる。これにより、床版を支持する鋼管杭やジャケットが少なくて済むというメリットもある。

また、インフラ構造物のリニューアル工事への適用も期待されている。例えば高速道路の床版の取替えにUFCを使用した場合である(図7)。旧来の設計で建設された床版は厚さ170～180mmであるが、床版の重量が増えると、鋼桁や下部構造などの支持部の負担が増え、地震対策も必要となる。そこで、支持部の補強をせずに、耐荷力や耐久性を向上させたUFC床版が開発された。取替え用のUFC床版は、橋軸直角方向をプレテンション方式、橋軸方向をポストテンション方式^{*3}とした平板形状で、最大で従来RC床版の約2分の1まで軽量化が可能となっている。疲労耐久性試験では、設計で想定する

供用年数である100年をはるかに超えるレベルの载荷に対しても十分な疲労耐久性があることが確認されている。また土木学会から安全性および使用性に問題がないとの評価を受けており、普及に向けた取り組みが進められている。

コンクリート構造物の長寿命化やリニューアルは、今すぐにも取り組まなければならない重要な課題である。しかし、50年前に建設された橋が損傷した場合、従来と同じものを再び作るのではなく、次は二度と壊れないような長寿命な橋を作ることが求められている。それを支えるのが、最適な材料や工法の開発である。

社会インフラの老朽化への対応は、いずれ東南アジアなど世界各国でも顕在化するだろう。日本がこれまで蓄積してきた高度な技術やノウハウが、今後さらに世界各国の社会インフラの維持、保全に貢献できることを期待したい。

^{*3} プレテンション方式とポストテンション方式: PC構造物材製作時のプレストレスのかけ方で、プレテンション方式はPC鋼材をコンクリートが固まる前に引っ張る方式で、ポストテンション方式はコンクリートが固まった後に引っ張る方式。

●取材協力 物質・材料研究機構、鹿島建設(株)

●文 杉山香里