

RC, SRC から SRF へ

五十嵐 俊一^{*1}

概要：SRF(Super Reinforcement with Flexibility)は、包帯補強とも呼ばれる。ポリエステル繊維をベルト状あるいはシート状に織製した高延性材を柱、壁等の部材表面にウレタン系一液性無溶剤接着剤で貼り付ける工法である。2002年から2007年に掛け、(財)日本建築防災協会の技術評価を取得し、2008年には(財)土木研究センターから審査証明を授与された。既に6000本余りの柱、200枚近い壁に適用されている。コンクリートに対する補強効果は、トラス・アーチ機構等の力学モデルを背景とした評価式を用いて評価できるが、コンクリートの圧縮ストラットの応力状態を乱すことが少なく、補強材が塑性化しないなどの特徴があり、かぶり部分も含めて補強することで、高軸力下でも軸力支持能力及び靱性を維持する効果が極めて大きい。鉄筋には不可能であった変形しても潰れない性質(超靱性)を持つコンクリート建造物を造ることができる。RC, SRC から SRF への移行が求められる。

キーワード：せん断補強, 軸耐力, かぶり, 高延性材, 一液性無溶剤接着剤, ポリエステル

1. RC, SRC の弱点の直接補強

鉄筋(鉄骨)コンクリート(RC, SRC)は、形成が容易であり、鉄とコンクリートがお互いの材料的な弱点を補い合う優れた構造であるとされ、世界中で膨大な数の建造物を生んでいる。しかし、鉄を保護すべく設けられたかぶりコンクリートは、大地震で、繰り返し変形を生ずると必ず崩落し、鉄筋等がむき出しになり、部材が崩壊する構造的な弱点になっている。現在のRC, SRCの設計法は、実験的に確認されるこのような破壊性状に対して、想定地震における部材の最大変形を一定値以下に抑えることで対処する規定となっているが、実際の地震動の規模が想定を超えた場合、特に、繰り返し回数が想定を超えた場合の崩壊の危険性には、ほとんど対処できていない。そもそも、コンクリート部材のせん断強度と靱性、及び軸力支持能力に関しては研究途上であり、旧基準の建造物や、基準を無視して作られた物が極めて脆弱で危険であることが、最近の数々の大震災で多くの犠牲とともに衆目に晒されている。我が国においては、1980年以前の旧基準の建築物は、取り壊すか、壁やブレースに頼るか、免震装置などを導入するなどで補強せざるを得ず、所有者にとって多大な負担を強いる結果となっている。さらに、かぶりは、力学的な弱点になっていると同時に、経年的に中性化し鉄筋を腐食から保護する役割を全うできなくなる宿命を持つ。RC, SRC 建造物は当初想定されていたよりも相当危険で短命な代物になりつつある。

SRF(Super Reinforcement with Flexibility)は、包帯補強とも呼ばれる。ポリエステル繊維をベルト状あるいはシート状に織製した高延性材をウレタン系一液性無溶剤接着剤で、コンクリート表面に貼り付ける補強工法である。巻きたて補強という点では、鉄板巻き及び連続繊維補強と一見同じであるが、使用材料、設置法、補強効果が全く異なる。補強材である高延性材は、引張剛性以外は無視できる程小さく、大きなひずみまで破断せず概ね靱性を維持する。これを、高靱性接着剤で、コンクリート表面に接着する。含浸は、不要である。接着力は、表面の破壊強度より小さいことが大きな違いである。SRFは、かぶりを含めたコンクリートの圧縮ゾーンを過度に拘束したり破壊したりせず、局部的に高延性材が剥離しても周囲が定着力を負担しながらひび割れを跨いで応力を伝達するので、極めて多数の繰り返し変形を受けてもコンクリートと補強材による曲げ及びせん断抵抗機構を維持する機能がある。以上の諸性能は要素実験、構造実験で確認され、(財)日本建築防災協会の技術評価¹⁾を取得し、(財)土木研究センターから審査証明²⁾を授与され、各種の建造物、目標性能に対する総合的な設計施工指針と解説書が刊行されている^{3), 4)}。

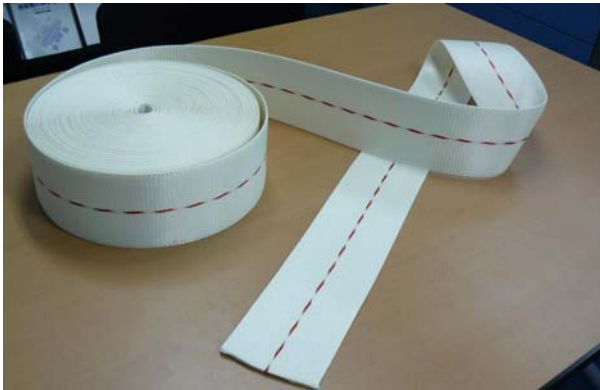
2. SRF の使用材料

2.1 高延性材

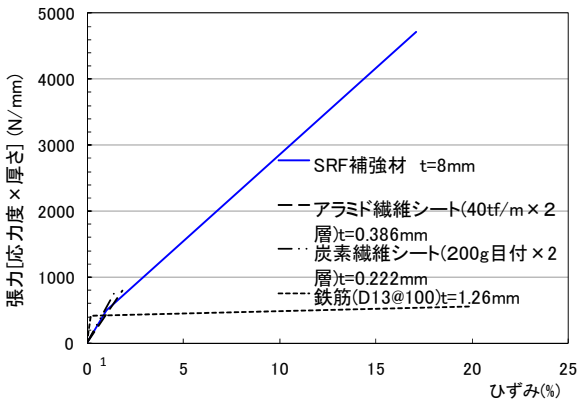
SRFの補強材を、引張変形能力が大きい材料との意味を込めて高延性材と呼んでいる。1980年代に開発された

*1 構造品質保証研究所株式会社 工博(正会員) 〒101-0061 東京都千代田区三崎町2-7-10

炭素繊維等を用いる連続繊維補強は、炭素繊維、アラミド等の高機能繊維に現場で樹脂を含浸し樹脂硬化プラスチック (FRP) として用いる方法である。これらは、1974年に特許出願され現在でも標準工法とされている鉄板巻きの延長線上的方法で、「固める」補強である。一方、SRFは、固めるのではなく、コンクリートと協力して外力に抵抗する方法である。工場で製品として検査を完了したベルト状やシート状の高延性材を部材に設置することで所要の補強効果を発揮する。下地の平滑化や面取り、樹脂を含浸、あるいは溶接作業は必要ない。この点では、鉄筋に近い補強法であるが、鉄筋よりもはるかに効果が大きい。



写真—1 ベルト状高延性材



図—1 各種補強材の単位幅当たりの張力とひずみ

高延性材は、ポリエステルを素材としており、引張弾性係数は、コンクリートより小さい。鉄や炭素繊維とはオーダーが違う。一般に、部材表面に設置した補強材の補強効果は、弾性係数そのものではなく、これに断面積を乗じた剛性に依存するので、ポリエステルのようなコンクリートに比べて弾性係数が小さい材料であっても、しかるべく厚さを用いることで、鉄筋等と同等の補強効果を得ることができる。図—1に各種補強材の単位幅当たりの張力 (ヤング率×ひずみ×平均厚さ) とひずみの関係を描いた。これを見ると、SRFの補強材であるポリエステル製高延性材8mmと鉄筋D13@100mm等は、0.7%前後のひずみで同じ張力を発揮することが分かる。ひず

みが0.2%を超えると鉄は降伏し、1%程度を超えると炭素繊維等が破断し、張力を失うが、SRFは、ひずみに比例して張力(補強効果)を増大させる性質があることが分かる。「柔らかい材料だから、大きくひずまない」と効かないということはない。大きくひずんでも破断せず、比例して負担力が増えるという性質は、SRFの高延性材だけに表れる特徴であり、変形しても壊れない構造物を生む重要な要素である。

2.2 高靱性接着剤

SRFの接着剤には、ウレタン系一液性無溶剤接着剤を用いている。要求性能として、接着強度だけでなく靱性も問題にするので、製品規格値に界面剥離エネルギーを加え、この規格値を1.0N/mm²としている。平均接着強度の規格値は、1.0N/mm²であり、連側繊維補強に用いるエポキシ樹脂の数分の1である。しかし、それでも、10cm四方の接着範囲で1tfの接着力を負担でき、1m四方であれば、100tfの力となるので構造補強として十分の大きさである。むしろ、エポキシ樹脂のように1m四方で1000tfの接着力があると言ってもこのような力ではコンクリートが破壊してしまう。SRF接着剤は、接着界面で剥離し下地のコンクリートを抉ることがほとんどないので、剥離しても構造系が大きく変わることがなく、周囲のまだ剥離していない部分が定着力を発揮する結果、大きな変形まで無理なく安定した補強効果が得られる。

接着剤が、剥離する限界のひびわれ幅は、概ね界面剥離エネルギーを平均接着強度で除したものの2倍になるので、SRF接着剤では、約2mm程度のひび割れ幅まで剥離しない。エポキシ樹脂系接着剤では、これが、0.2mm程度に留まってしまうので、これ以上のひび割れ幅では、剥離して周囲のコンクリートを抉って壊してしまい脆性的に破壊する。以上は、弾性補強材と有限な界面剥離エネルギーを持った接着層から成る力学モデルで容易に解析できる他、多数の実験で検証されている⁵⁾。このような特徴をもつ接着剤を高靱性接着剤と呼んでSRFに用いている。

3. 補強法

3.1 包帯あるいは絆創膏的に

SRFは、コンクリート部材表面にポリエステル製のベルト状、シート状、あるいはテープ状の各種の補強材をウレタン系の接着剤で貼り付ける補強法である。この他、ボルトとプレート等による機械的な定着法を併用したり、直交壁や入り隅部については、貫通ボルトとアングル等により機械的に補強材を連結して閉鎖型にする方法を併用できる。ベルト状補強材を用いて柱を巻き立てる包帯のような使用法と壁板に貼り付ける絆創膏的な使用法のいずれも有効で、設計式が理論的に導かれ、実験で検証されている。

3.2 巻き立て補強

従来は、柱のせん断補強鉄筋が不足していたり、軸力比が制限値を超えた場合には、鉄板等で巻き立て補強を行っていた。しかし、仕上げモルタルを剥がし、目荒らししてグラウトするか、面取りして平滑化するなど既存のコンクリートと補強材を一体化させることを要求していた為、工数が多く施工に費用と時間が掛り、騒音、粉塵が発生することが避けられなかった。苦勞して補強材と既存躯体を一体化したつもりでも、外力により柱が変形しようとする時、補強材と既存躯体の剛性が異なるので双方がばらばらに動こうとする結果、躯体の一部が破壊するか補強材が破壊して補強効果が一気に無くなるのが常であった。この結果、鉄板を巻いた柱でも、高軸力になったり、変形がある程度大きくなると破壊するので、建築物の柱では、耐震設計基準で、軸力比は最大 0.7 までに制限されているし、連続繊維では RC と変わらない値(0.4 あるいは 0.5)である。

SRF は、既存躯体と補強材を無理に一体化させようとせず、既存躯体の表面破壊強度より小さい強度の接着剤で貼り付けながら巻きつける補強法である。接着が一部剥離しても既存躯体を壊さず周囲の接着層が効くので、柱が変形したときに、コンクリートと補強材がたくみに協力し、理想的なトラス機構が形成され、優れたせん断補強効果が発揮されることが実験で確認されている。長時間に渡って行われた柱の繰り返し載荷試験のビデオを超早送りすると高延性材が最適な方向に微妙に動いて張力を伝達している様子が、恰も生きているように見える。その結果、コンクリートの性能を十二分に引き出し、鉄板等で固めた柱には見られない靱性と軸力支持能力を示す。これは、短柱であっても変わらない。この結果、SRF で補強した建築物の RC 柱の終局変形角の算定における軸力比と内法高さ／柱せいの制限はない。また、せん断変形にも靱性を付与できるので、補強後にせん断柱であっても補強量に応じて終局変形角が増大する算定式になっている。写真一 2 に代表的な実験例を示す¹⁾。

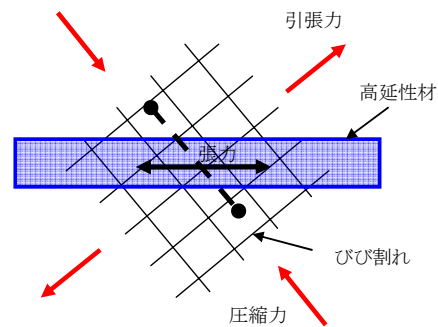


写真一 2 RC 柱 (左) の崩壊と SRF 柱

SRF は、連続繊維、鉄板等で固める補強に比べ、施工的にも、設計的にも無理がなく効果が大きい。現在の鉄板等による巻き立て補強は大変な割に補強設計上の効果が少ないというイメージを定着させてしまっているが、SRF は、これを覆す。後述するように、柱を SRF で巻き立てることは、現行の設計・診断基準が評価する以上に重要である。主要な柱は SRF で巻き立てるようにしたい。

3.3 貼り付け補強

SRF は、絆創膏のように貼り付けることで、ひび割れを跨いで応力を伝達する機能を発揮し、コンクリートと協力してトラス機構を形成できる。高延性材が設計強度を発揮することに必要な定着長さは、剛性、界面剥離エネルギーと平均接着強度から理論的に計算され、約 $100\sqrt{t}$ (t :厚さ) であるので、厚さ 4mm の高延性材に対しては、200mm 程度でよい。高延性材を、RC の壁板部分のみの片側に貼った実験でも、剥離限界強度を用いて鉄筋に換算し、靱性保証型設計指針のせん断強度式で評価した通りの強度上昇があることが実験で確認されている。高延性材に多数のひずみゲージを貼り付けた実験でひび割れと高延性材ひずみの関係も理論通りであることが確認されている。SRF は、補強構造が単純であるので、設計式はすべて物理ディメンジョンを持った理論式であり、これを実験で検証して用いていることも従来の補強法にない特徴である。



図一 2 高延性材とコンクリートによるせん断力の伝達

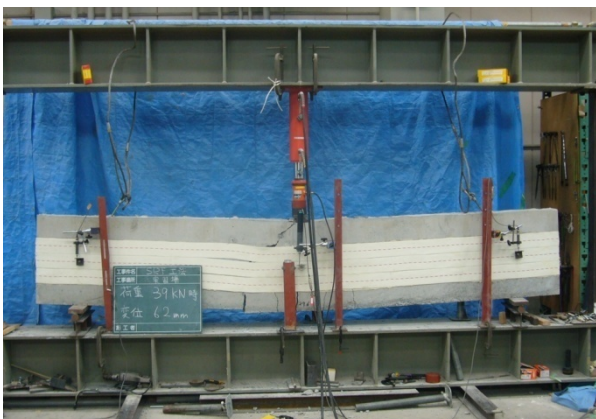
図一 2 に、コンクリート表面に高延性材を貼り付けたところに面内せん断力が作用し、ひび割れに沿った斜め圧縮力とこれに直交する斜め引張力が生じているところを模式的に描いている。高延性材は、引張剛性以外の靱性を殆ど持たないので図に太い破線で描いた斜め圧縮力を受け流しながら、引張力を伝達することができる。これまで、鉄板や炭素繊維を壁板や梁の底面、側面に貼り付けたせん断補強や曲げ補強の実験が多数行われたが、結局、貼り付けるだけでは効果が余りなく、機械的な定着が必要であるとの結論になっている。これは、鉄板等では図の斜め圧縮力に抵抗しようとする為剥がれてしまい引張力を伝達することに必要な定着力が取れないからである。写真一 3 と写真一 4 に無筋の梁の側面を炭素

繊維とSRFで補強して単純載荷した実験を示す。炭素繊維は中央部のひび割れ発生後一気に破壊したが、SRFで補強した梁は大きな靱性と耐力を示し写真のように大変形を生じても破壊しなかった⁶⁾。

SRFは、絆創膏のように局所的なひび割れ補強を可能にしている。鉄筋が欠損したところに処置したり、せん断補強鉄筋の不足した壁板に貼る補強効果が実験で実証され、実施例も増えている。



写真一三 炭素繊維補強した無筋梁の実験

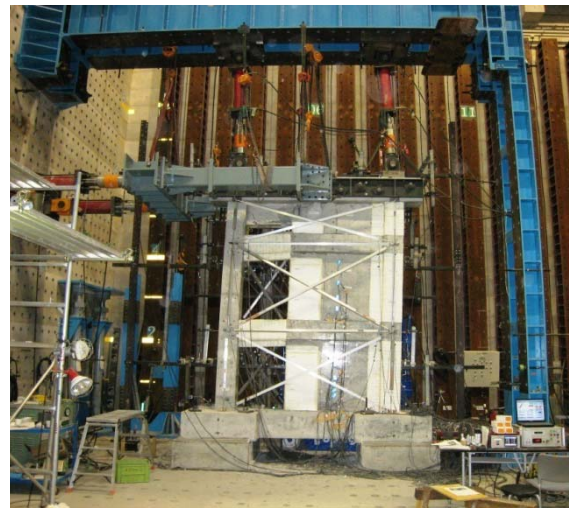


写真一四 SRF補強した無筋梁の実験



写真一五 鉄筋の欠損部にSRF補強した梁の実験⁷⁾

写真一五は、鉄筋の腐食を想定し、鉄筋をいも継ぎにした部分をSRF補強した実験。写真一六は、偏在開口を有する連層壁の繰返し実験である。いずれも、理論式で計算した値と整合する結果を得ている。

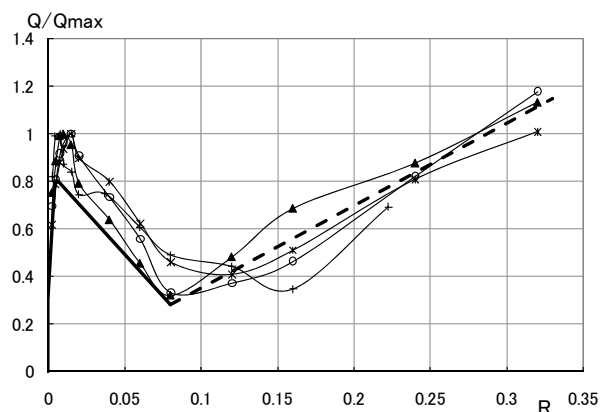


写真一六 偏在開口連層壁繰返し載荷実験⁸⁾

4. 軸耐力補強

4.1 超靱性型復元力の活用

SRFは、RC、SRCでは実現できない大きな靱性をコンクリートに付与することができる。



図一三 SRF補強したせん断柱の荷重変形関係

図一三は、写真一二に示したような、RC柱にSRFで巻き立て補強を行って一定軸力を加えながらくり返し水平荷重を載荷した複数の実験の荷重変形関係の包絡線である。縦軸は、それぞれの実験の最大荷重で無次元化して示している。図は、補強後もせん断柱であるものを集めたが、0.3以上の変形角でも破壊せず鉛直荷重を支持しながら水平力に抵抗していることが分かる。曲げ柱でも同様である。RC、SRCでは、せん断柱は脆性的に破壊し、軸力支持能力を失うが、図に示すように、SRFでは、そのようなことはなく、変形しても壊れない柱を造ることができる。この様な復元力特性を超靱性型と呼んでいる。

従来は、コンクリート構造物は、大きく変形すると柱が軸破壊して構造系が崩壊するので、部材や構造物の変形を小さくすべく、固める補強が中心であった。いわば、弱点をかばう間接的な補強であった。しかし、実際の地

震動による構造物の変形は、人間の予測を、少なくとも倍半分は裏切るし、場合によっては数倍違うこともあり得ることは、地震という自然現象のスケールから見れば当然であるが、近年、特に、震災の分析、実大震動台実験、高密度地震記録などにより、専門家の間では、はっきり認識されるようになった。従って、変形を小さくするように強度型で設計して弱点をかばったつもりでも、実際の変形が倍から数倍大きくなり、弱点が暴露されて崩壊することは覚悟すべきである。SRF の超靱性を利用し、変形しても壊れない構造を造る以外に、安心できる補強は考えにくい。

4.2 構造物の軸耐力補強

軸耐力補強という、通常は、下階壁抜け柱の断面を増やしたり、鉄板を巻くなどの個々の柱補強を意味する。ほとんどの耐震補強工事には、必ずこのような軸耐力補強が何本かは含まれる。現行の耐震設計法では、柱は、せん断破壊や曲げ圧縮破壊する場合だけでなく、曲げ降伏した後にもある程度変形すると軸耐力を失うので、柱補強だけでは倒壊を防止できないと考えられており、壁の新增設やブレースの設置などの措置が中心となり、柱補強はわき役である。

SRF で柱を巻き立てると軸力比 1.0 に近い高軸力で繰り返ししても曲げ圧縮破壊を生じず、曲げ引張破壊時の強度を発現し、部材角が 10%を超えても軸力支持能力を十分保持していることが実験で確認されている⁹⁾。また、せん断柱であっても、図-3 に示したように、破壊せず軸力を支持する。SRF 補強した柱の残存軸耐力を安全側に評価する式として、内部が粒状体になったと仮定した理論式が使えることが、10%から 30%という部材角で繰り返し載荷し、内部を粉々にした後の鉛直載荷実験で確認されている¹⁰⁾。SRF のこのような特徴を利用して、柱に十分な軸耐力を柱に付与して変形しても倒壊しない架構を造る補強法を、構造物の軸耐力補強、あるいは単に軸耐力補強と呼んでいる。

SRF の軸耐力補強の設計指標としては、倒壊危険度と損傷度を用いる。

$$I_f(R_l) = \max\left(\frac{N_s}{N_{ul}}\right) < I_{f0} \quad (1)$$

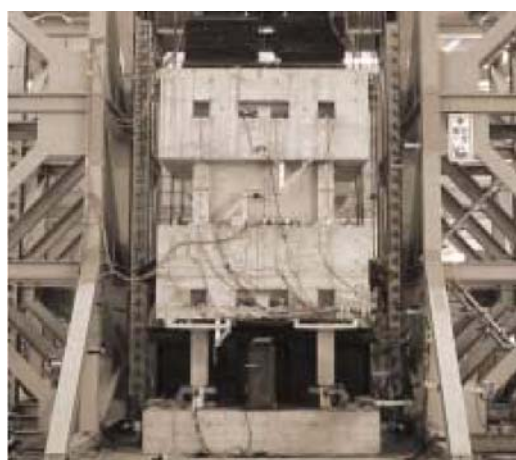
倒壊危険度 (I_f 値) は、式 (1) に示すように、ある変形角 R_l における構造物の注目する層の各柱に作用する地震時軸力 N_s と補強後の軸耐力 N_{ul} の比の最大値であり、これが基準値 I_{f0} を下回ることをもって柱が建物を支持し続けるので、倒壊しないとする指標である。倒壊危険度の計算における地震時軸力は、梁スラブ等による柱の軸力再配分を考慮して計算する。構造物の一部分についての安全性を検討する場合には、地震時軸力を構造物が一部破壊した後にその柱が負担する軸力 N_1' として式 (1) の N_s の代わりに用いて計算する。これを、軸破壊危

険度指標 (N_f 値) と呼んでいる。

損傷度 I_d は、式 (2) に示すように、大地震による注目層の履歴吸収エネルギー W_E と許容限界値 W_l の比であり、地震動による構造物の損傷が許容限界値 I_{d0} 以内に収まるかどうかを判定する指標である。

$$I_d = \frac{W_E}{W_l} < I_{d0} \quad (2)$$

注目層の履歴吸収エネルギー W_E は、エネルギー法の「極めて稀に発生する地震による入力エネルギーの速度換算値」に、実効繰り返し倍率を乗じて計算することができる。また、許容限界値は、耐震診断基準の保有性能基本指標と靱性指標等から計算した単位吸収エネルギーに限界繰り返し倍率を乗じて計算する方法がある¹¹⁾。



写真—7 大型震動台実験全景

軸耐力補強の有効性と上記の各指標の精度は、2001 年に 2 日間に渡り、偏心ピロティ RC 建物模型 2 体を並べ、一方を SRF 軸耐力補強し、同時に、過去の大地震を 8 回相次いで加える大型震動台実験により検証されている¹²⁾。RC 建物模型は、現行基準並みの耐震強度 ($I_s=0.69$) を持っていたが、神戸海洋気象台波で終局に達し、その次のチリ地震波で柱がかぶりを落とし倒壊した。SRF 補強した建物模型は、RC 倒壊後、鷹取波 ($V=125\text{kine}$) を加え、チリ波を 2 回加えても倒壊しなかった。鷹取までは残留変形はほとんどなく、最後のチリ波後もごく僅かであった。



写真—8 RC 建物模型の倒壊とその時点の SRF 模型

表—1 に、両模型の性能評価指標値を掲げた。構造耐震指標 I_s 値は、両者とも 0.6 以上であり、大地震で安

全であると判定されているが、倒壊危険度は、RC 試験体は、250 分の 1 の変形角で、1.0 を上回り、倒壊する危険性が生じ、30 分の 1 では完全に倒壊すると判定している。また、損傷度は、JMA 神戸までは、両者とも 1.0 以下で、損傷が許容値に収まるが、次の地震では RC の損傷が許容値を超えるが、SRF は十分余裕があり、チリ 3 回目後も許容値以内であると判定している。いずれも、実験と整合する結果である¹¹⁾。

表—1 性能評価指標値

指標 (パラメータ)	RC	SRF
構造耐震指標 I_s	0.69	0.70
倒壊危険度 I_f ($R_f=1/250$)	1.35	0.54
倒壊危険度 I_f ($R_f=1/30$)	∞	0.72
損傷度 I_d (JMA 神戸まで)	0.35	0.05
損傷度 I_d (チリ 1 回目まで)	1.08	0.14
損傷度 I_d (鷹取まで)	(2.12)	0.27
損傷度 I_d (チリ 3 回目まで)	(7.44)	0.95

現行の耐震設計法、及び、これらに被災事例の分析結果を加えた現行の耐震診断法と補強設計法は、RC、SRC の性質を色濃く反映している。特に、入力地震動の繰り返し回数の多寡を考慮することができないという問題を抱える。しかし、RC、SRC は、繰り返し回数が増えると必ず崩壊する性質があるので、繰り返しの影響を明示的に評価しようとするすべての構造物が危険と判定されてしまうことになる。東南海・南海地震の連発など、神戸の地震等に比べて繰り返し回数のはるかに多い海洋型の大地震の切迫性が指摘される中、RC、SRC のこのような性質が現実の被害となって露呈する危険性は極めて大きい。現在の壁とブレースに頼る間接的な補強法では長時間に渡り多数の繰り返しを伴う巨大地震には効果が薄い。RC、SRC から SRF への転換を急がねば、壊滅的大災害を免れない。

4.3 経済的な合理性

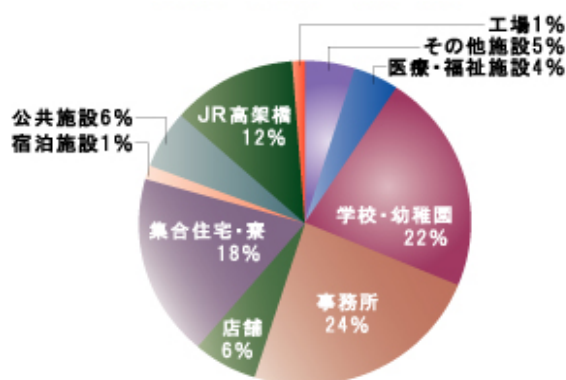
現在は、耐震補強と言えば、耐震強度を現行基準並みに引き上げる補強を意味する。補強をしてほしいと専門家に頼んでも、まず、調査と診断をしないとイケない。費用は数百万円で、今は立て込んでいるのでしばらく待ってくれと言われる。何とか、費用を工面し、頼み込んで診断を行って、結果を説明されてまた驚かされる。「お宅のビルは、耐震強度が基準値の半分以下なので、取り壊すか、補強対策と言っても免震くらいしかなく、工事費は新築費用とあまり変わりません」と言われる。あるいは、別のビルでは、工事費は、新築の 2 割程度ですが、壁とブレースがそこら中に入りますので、数か月、出て行ってくださいという場合もある。そんなことは出来ないと言うと、貴方は職員や来訪者の命を考えていないのかと、地震の被害写真を見せられて脅かされる。公共事

業であれば、予算が大きくなって良いのかも知れないが、民間では、困り果てて、何もできなくなるオーナーがほとんどである。

そもそも、地震で倒壊する危険があると言っても、築数十年のビルに、今すぐに数百万の診断費用とその何十倍もの補強工事費を支出する経済的な合理性があるのか。仮にあったとしても、この費用をどうやって工面するのか。誰が払うのか。最近の経済情勢は、地方自治体に対してさえこの問いに真っ向から答える必要を突き付けている。現行の耐震補強法は、性能面だけでなく、経済的な合理性の面からも抜本的な見直しを強く求められている。

4.5 実施例

SRF は、2001 年から現在まで、600 件以上の耐震補強工事に用いられた。SRF の柱は 6000 本を超え、壁は、200 枚近くに及ぶ。この内約 6 割は、 I_s 値等の公的性能評価指標が基準値をクリアする補強の一部として用いられたものであるが、SRF で主要な柱を補強し倒壊を防止する軸耐力補強が 3 割で用いられている。図—4 に SRF 補強した施設用途の内訳を示す。



図—4 SRF 補強工事実績の用途別内訳

最近では、庁舎、学校等で耐震基準値をクリアすることに拘らず SRF で、安全確保を行う事例が増えている。基準値をクリアする補強には、一棟当たり、耐震診断と補強設計で 1000 万円以上と 1 年以上の期間、補強工事には、1 億円単位の費用が必要であり、予算確保が困難であること、耐震強度が基準値の 50% 未満になると補強設計が難しくなり、免震等の特殊工法で 10 億円単位の費用が要求されることが要因である。耐震強度が基準の 50% であると判定された校舎から、プレハブ校舎に引っ越しでの授業を余儀なくされた例も報道されている。

神奈川県のある自治体で、耐震強度が低い校舎について、将来の取り壊しを決定し、SRF の軸耐力補強で安全確保を行い当面の使用を継続した例がある。費用は一校舎 500 万円で、通常の補強に比べれば 10 分の一以下である。また、愛媛県には、基準値をクリアする耐震補強で

はなく、SRF の軸耐力補強を全面的に採用し、市内の数十校舎の安全確保を行っている自治体がある。2010 年の夏には、全国で 50 校の学校校舎と 10 の事務所ビルの耐震補強に SRF が用いられた。この中で、東京都板橋区の中学校校舎の補強工事は、読売新聞に取り上げられている。



写真-9 大学研究室内の補強工事状況

SRF の補強作業は、手作業で材料も一人が手で運べる大きさである。写真-9 に大学研究室内の窓付き柱の工事状況を示すが補強する柱から 1 m 以内で余裕を持って作業できる。この外には、影響しない。

東京都新宿区の総務省第二庁舎の耐震補強は、SRF で安全確保を行った典型的な事例である。この建物は、1968 年に竣工した地上 8 階、地下 2 階、延べ床面積 35,024m² であり、入居官署は、統計局他で、2,500 人が常時働いている。国土交通省が耐震診断を行った結果、耐震強度が低く、補強には、免震等で 40 億円近い費用を要するとの結論であった。また、将来の移転計画があり、この費用確保が困難な状況であった。しかし、職員の安全確保は必要であり、対策を模索している中で、まず、柱炭素繊維補強案が提案されたが、すべての柱を曲げ柱にするというもので、補強本数が多く、施工中の臭気等の問題で実施が困難であった。



写真-10 軸耐力補強で安全確保した総務省統計局



写真-11 SRF 補強工事の様子

2008 年 7 月に、NHK で SRF が報道されたことなどから、検討の結果、SRF 補強工事の実施の決定が下った。総務省が SRF 工法で耐震補強を実施するに当たっては、国の庁舎等の建設・改築等を担当している国土交通大臣（担当：官庁営繕部）と大臣協議が行われている。施工期間は、H21.1.17～H22.9.30 の四期に分けたが、工事实働は、金曜夜と休日のみの合計 40 日間、工事費用 9,400 万円であり、延べ床面積当たり、約 2,700 円/m² である。免震案に比べれば、実に、40 分の 1 である。

写真-10 以下に建物の全景と施工中の写真を掲げるが、閉庁期間のみの工事で、執務室はもとより、食堂、サーバー室、診療所など、施設の稼働に一切影響していない。炭素繊維等の従来工法に比べて SRF が採用された主な理由は、以下の通りである。

- ・材料が無臭気性で、人体への影響がない。
- ・作業が短時間で終わるので、業務に影響しない。
- ・地震時の安全性を定量的に評価するので、補強本数が少なくて済む。
- ・炭素繊維補強案と比較してコストが 2 分の 1 以下で済む。

5. RC、SRC から SRF へ

RC は、19 世紀に地震のないヨーロッパで生まれ、20 世紀後半には、世界中の都市を埋め尽くし、今世紀には、途上国でさらに急拡大している。SRC は、鉄骨を内蔵することで、RC に比べて、軸力支持能力と靱性に優れるとされる関東大震災を契機に日本で独自に発達した構造形式であるが、かぶりコンクリートをむき出しにしている限り、地震動の繰り返しが許容値を超えれば崩壊する弱点を抱えていることには変わりはない。

我が国では、1968 年の十勝沖地震以降、フープを巻くことの重要性が認識され、制度化され研究も盛んに行われた。しかし、鉄を用いたフープでは限界がある。特に、かぶりを補強しないのでは繰り返しには耐えられない。高強度コンクリートを用いた高層 RC、SRC では、なおさらである。

写真-12 は、1995 年の阪神淡路大震災で 6 階部分が水平に 1.5m 移動して潰れた神戸市庁舎である。RC、SRC はこのような変形には耐えられないので潰れたが、このような変形を起こさないように補強するには、巨額の費

用が掛かるし、実際の地震の揺れ方の特徴によっては補強してもこのような変形を生ずる可能性が必ず残る。



写真—1 2 阪神淡路大震災神戸市庁舎の被害

第3章以下に示した通り、SRFを柱に用いれば、10分の1以上の変形角を生じたり、極めて多数の繰り返し大変形を受けた場合でも、横抵抗及び軸耐力を維持するコンクリート柱、梁を造ることが可能である。壁に用いれば、ひび割れ間隔をほぼ均等に保ち、壁板自体に圧縮ストラットの終局ひずみに相当する程度のせん断変形能力を付与することができ、万一破壊しても崩落せず一体性を保持し、エネルギー吸収効果の持続を期待できる。これらの特徴を生かして、せん断柱、下階壁抜け柱、せん断壁等の構造物の弱点を直接補強することが可能であり、壁、ブレース等の新たな構造要素を持ち込む従来の補強に比べて工事を縮減し、構造物の使用性を損なうことが減る上、想定を超える震動に対する安全性の余裕を確保することができる。主要な柱を補強する軸耐力補強の設計思想を採用すれば、従来の固める補強の10分の1以下のコストで安全確保が行える。さらに、高延性材の上には、各種の仕上げを容易に設置することができるので、これを工夫し、中性化の進行等の劣化を抑える効果も期待できる。かぶりコンクリートの上にSRFの補強層

と適宜の仕上げを置くことで、現在コンクリート部材が抱える構造的な諸問題を解決することができる。

コンクリートと、軸方向の鉄筋（鉄骨）と、若干の周方向の鉄筋と、高延性材によるせん断補強と仕上げとを適切に組み合わせて、今より軽量で、力学的にも経年的にも優れた構造物を安価に造ることが可能である。RC、SRCからSRFへ、新しい構造への移行が求められる。

参 考 文 献

- 1) 構造品質保証研究所：SRF工法設計・施工指針 同解説 日本建築防災協会技術評価版，2007.12
- 2) (財)土木研究センター：建設技術審査証明報告書（建技審証 第0707号）高延性材によるコンクリート構造物の補強方法「SRF工法」，2008.3
- 3) 構造品質保証研究所：建築物のSRF工法設計施工指針と解説，2010.7
- 4) 五十嵐 俊一：包帯補強 (ISBN4-902105-21-7)，2009.4
- 5) 3)と同じ，pp26-36
- 6) 4)と同じ，pp16-19
- 7) 永尾 直也：RC隅角部配筋設計の合理化と主筋破断による部材損傷評価，東京大学大学院修士論文，2004年3月
- 8) 藁科，森，土井，坂下，河野，田中，渡辺：偏在開口を有する連層RC造耐震壁のせん断性状に関する研究（その4～その5），2008年建築学会講演概要
- 9) 1)と同じ，pp5-16～5-17.
- 10) 1)と同じ，pp5-51～5-66
- 11) 3)と同じ，pp83-98
- 12) 壁谷澤 寿海，金 裕錫，五十嵐 俊一，加藤 敦，小川 信行：鉄筋コンクリート偏心ピロティ壁フレーム構造の震動破壊実験，第11回日本地震工学シンポジウム，2002.11

(原稿受理年月日：2010年12月6日)

SRF from RC and SRC

By Shunichi Igarashi

Synopsis: Super Reinforcement with Flexibility (SRF) covers the concrete of structural members with high-ductility material made of polyester and with high-ductility adhesive of urethane, providing the concrete with sufficient shear reinforcement and confinement. The Japan building Disaster Prevention Association has evaluated SRF as a valid and reliable new technology. The Public Works Research Center also has granted a technical certificate to SRF. SRF has been applied to more than 6000 columns and almost 200 walls in Japan. The shear strength of SRF members can be calculated using design equations of Reinforced Concrete based on the truss-arch theory. SRF gives by far larger ductility to columns compared with reinforcement using steel re-bars, even under high longitudinal stress. SRF can realize concrete structures which never fail due to huge earthquakes. RC and SRC will be replaced by SRF.

Keywords: Shear-reinforcement, high longitudinal-stress, cover-concrete, polyester, urethane
