

繊維補強セメント系複合材料の開発の動向

材料の持ち味を活かした適用を目指して

国枝 稔^{*1} 内田 裕市^{*2} 六郷 恵哲^{*3}

1. はじめに

繊維補強コンクリート(Fiber Reinforced Concrete, FRC)は、コンクリート中に長さ30～50mm、直径0.6mm程度の鋼繊維や有機繊維を体積比で0.5～2%程度混入したものが一般的である。トンネルの2次覆工やRC床版の増厚などに適用され、さらに、コンクリート構造物の剥落防止対策のために少量の繊維を混入したもの、環境負荷低減を目指した再生繊維の利用なども提案されている。

本稿では、1990年代以降の高性能化の代表例である2つの繊維補強セメント系複合材料にスポットをあて、適用事例も踏まえて、その材料設計コンセプトについて概説する。あわせて材料の性能を活かした適用の重要性を述べる。

2. 高性能化された材料の特徴と材料設計

2-1. 近年の材料開発の特徴

既存のFRCでは、繊維を混入することによって、もたらされる靱性を単なる付加価値として考慮するに留まっている事例が多く、繊維混入の効果を積極

的に性能として規定し、照査する枠組みが十分ではなかった。しかし、近年の繊維補強セメント系複合材料の材料開発によってもたらされる性能改善は、単なる付加価値として利用するにはもったいない。適切に評価され、構造物の性能に反映されるべきである。

近年、高性能化が進められている繊維補強セメント系複合材料の開発の方向性は、主に以下の2つに大別できるといえる。

①優れたひび割れ分散性とひずみ硬化挙動を特徴とする材料(SHCC)

Engineered Cementitious Composites(ECC)¹⁾のようなひずみ硬化型セメント系複合材料(Strain Hardening Cementitious Composites, SHCC)が代

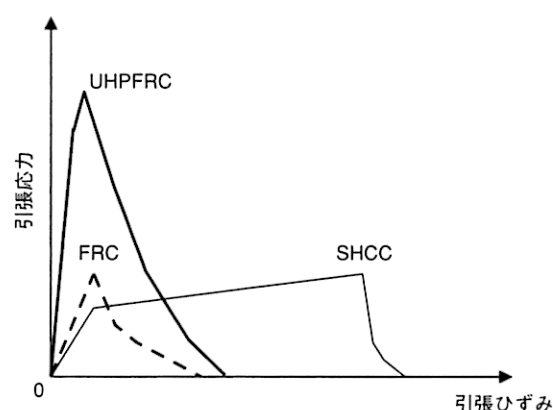


図1 各材料の引張応力-ひずみ関係のイメージ

*1 名古屋大学大学院工学研究科 准教授 工博

*2 岐阜大学総合情報メディアセンター 教授 工博

*3 岐阜大学工学部 教授 工博

RECENT DEVELOPMENTS OF FIBER REINFORCED CEMENT COMPOSITES -CHALLENGES TO PERFORMANCE BASED APPLICATIONS-(by Minoru KUNIEDA, et al.)

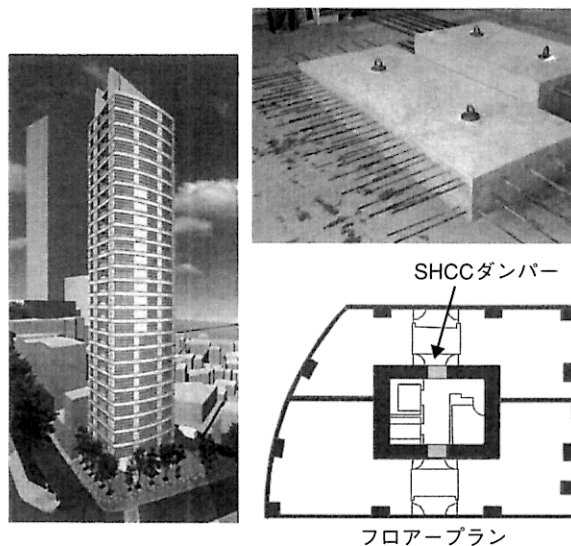


写真1 高層ビルのエネルギー吸収部材として適用されたSHCC

表的である。なお、SHCCは、High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC) に含まれる材料でもある。SHCCは、図1に示されるように、初期ひび割れ発生後も応力が漸増する、いわゆるひずみ硬化挙動を呈し、1～2%以上の引張ひずみを生じ、かつ複数微細ひび割れが生じることが特徴である。

特に、既往のRCの許容ひび割れ幅(例えば0.2mm程度)に対して、ひび割れ幅が0.05～0.1mm程度以下に抑制できることから、ひび割れを許容する構造物に利用する際のひび割れ部での耐久性の向上が期待されている。しかし、ひび割れ発生前の耐久性に関しては、この材料の水結合材比(W/B)が通常のコンクリートと同程度である場合が多く、マトリクス中の毛細管吸水量などで表わされる物質移動に対する抵抗性(材料の耐久性に大きく影響する)は、普通コンクリートと同程度である場合が多い。

これらの材料は、地震時のエネルギー吸収部材(写真1)、劣化したコンクリート構造物の表面補修(写真2)などへの適用実績がある。詳細は、要求される性能とともに文献²⁾にまとめられており、そちらを参照されたい。

②緻密なマトリクスによる高耐久性、高強度を特徴とする材料(UHPFRC)

Reactive Powder Concrete (RPC)³⁾のような高性

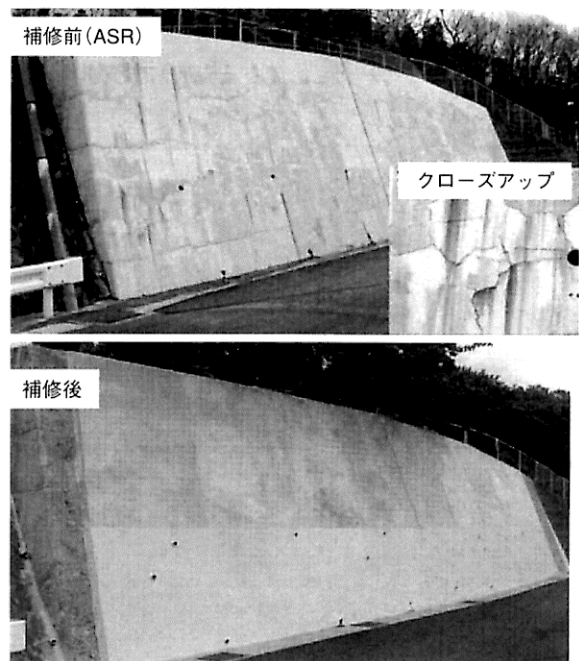


写真2 劣化したコンクリート擁壁の表面保護工として適用されたSHCC

能繊維補強コンクリート (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC) が代表的である。この材料は、超高強度(圧縮、引張、曲げ)、高靱性を実現した材料である。ただし、先の材料のような引張時にひずみ硬化挙動を示すことはまれであり、そのほとんどはひずみ軟化挙動を示す。超高強度化によってもたらされる緻密なマトリクスにより付与される優れた耐久性(物質移動に対する高い抵抗性)を活かすため、たとえば、土木学会の指針⁴⁾では、使用時にひび割れを許容しない設計思想を採用している。UHPFRCは、低水結合材比で粉体量も多いため、自己収縮が大きく、熱養生も必要とする場合が多いことから、プレキャスト部材を工場で作製し、引張特性よりむしろ圧縮強度が高いことを利用してプレストレスと組合せた構造物とする適用事例が多いのが現状である。UHPFRCの実構造物レベルへの適用は日本で特に進んでおり、本誌でもすでに紹介されているため、詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

また、この材料の優れた耐久性を期待し、UHPFRCを補修材として、しかも現場打ちで用いる試みもある。写真3は、スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)で開発されたUHPFRCを橋



写真3 橋梁の上面増厚に適用されたUHPFRC

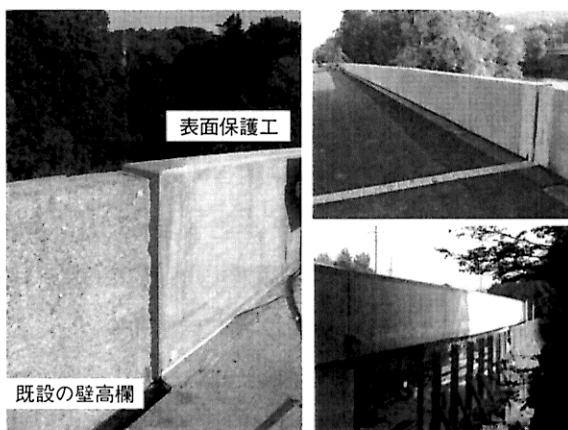


写真4 壁高欄の表面保護に適用されたUHPFRC

梁の上面増厚の材料として適用した事例であり、UHPFRCの高強度、緻密性(防水)を利用した適用事例である⁶⁾。写真4はUHPFRCを高速道路の壁高欄の表面保護工(塩害および中性化対策)として試験施工された事例である。

2-2. SHCCとUHPFRCの材料設計コンセプトの違い

(1) SHCCの材料設計コンセプトと使用材料の特徴

SHCCの材料設計コンセプトは、マトリクス特性、繊維特性および両者の付着を最適化することにある。これにより複数微細ひび割れおよびひずみ硬化挙動を得ることができる。Li¹⁾により提案されているECC(SHCCに分類される材料の1つ)の優れた特性は、マイクロメカニクスを用いた材料設計手法に裏付けられている。特に、体積比で2%程度以下の繊維量で、複数微細ひび割れおよびひずみ硬化

表1 SHCCとUHPFRCの物性の比較例

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
SHCC	30~60	3~5	10~15	15~20
UHPFRC	150~250	8~14	30~40	45~65

挙動を実現する点に特徴がある。式(1)は、ひずみ硬化挙動を得るために必要な繊維量を算定するものである。

$$V_f \geq V_f^{crit} = \frac{12J_{up}}{g\tau\left(\frac{L_f}{d_f}\right)\delta_0} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 V_f^{crit} はひずみ硬化挙動を得るための限界繊維量、 J_{up} はマトリクスの破壊靱性、 g は繊維の配向に関するパラメータ、 τ はマトリクスと繊維の付着強度、 L_f と d_f はそれぞれ繊維の長さおよび直径、 δ_0 は繊維の最大架橋力時のひび割れ幅(繊維の剛性や形状に関係)である。

この式は、繊維の架橋力とマトリクスのコンプリメンタリエネルギーに基づくエネルギー的な釣合いにより算出されているが、マトリクス、繊維および付着に関する実験的に計測可能なパラメータを用いている点に特徴がある。この式によると、より少ない繊維量 V_f でひずみ硬化挙動を得るためには、より小さなマトリクスの破壊靱性 J_{up} 、高い付着強度 τ 、大きな配向係数 g 、大きなアスペクト比(繊維直径に対する長さの比) L_f/d_f および大きなひび割れ幅 δ_0 が必要となる。

Naaman⁷⁾も、引張応力下でひずみ硬化挙動を得るための条件として、マトリクス強度と付着強度の比および繊維のアスペクト比、繊維の配向に関する係数を用いた式を提案している。

既存のSHCCでは、水結合材比 W/B が0.3~0.5の範囲にあり、既往のコンクリートのそれに近い。試験方法にもよるが、圧縮強度が30~60MPa、引張強度が3~5MPa、弾性係数が15~20GPa程度のSHCCが開発されている(表1)。なお、水和熱の低減を目的とし、フライアッシュ等の混和材が用いられることが多い。マトリクスの破壊靱性の低減と骨材の周辺に形成される欠陥の低減を目的として、通常は粗骨材は用いられない。繊維には、ポリビニル

表2 繊維の特性(公称値)^{*)}

	引張強度(MPa)	引張弾性係数(GPa)	密度(g/cm ³)	摩擦付着強度 ^{*)} (MPa)
ポリビニルアルコール(PVA)繊維 ^{*)2}	690~1500 (2000~2600)	11~36 (39~41)	1.30	2.2~4.4
高強度ポリエチレン(PE)繊維	2200~4800	88~120	0.97	0.9~2.1
鋼繊維	2000以上	200	7.85	2.4

*1 普通強度のマトリクスを対象

*2 カッコ内は高強度タイプの値

アルコール(PVA)繊維やポリエチレン(PE)繊維、鋼繊維が用いられる。繊維の直径は、0.01~0.04mm程度、繊維の長さは10mm前後のことが多い。各繊維の特性の公称値を表2に示す。これらの繊維の中でも、PVA繊維は、表面に存在する親水基の効果により、付着強度(化学付着強度および摩擦付着強度)が高いことが特徴である⁸⁾。マトリクスにもよるが、PE繊維の2~3倍以上の付着強度を有しているのでひずみ硬化挙動を容易に実現しうる繊維の1つである。一方、繊維の剛性に関しては、PE繊維の弾性係数(88~120GPa)は、PVA繊維の弾性係数(25~40GPa)の2倍以上であることが特徴である。また、繊維の分散性を確保するために、増粘作用のある特殊混和剤が使用される場合が多い。

(2) UHPFRCの材料設計コンセプトと使用材料の特徴

UHPFRCには、Densified Small Particle(DSP) Concrete⁹⁾、Reactive Powder Concrete(RPC)³⁾ならびにMulti-Scale Cement Composite^{10), 11)}などの材料が、ヨーロッパで開発されている。材料特性は、表1に示した通り、先述のSHCCとは大きく異なり、その材料設計コンセプトも全く異なる。例えば、超高強度マトリクス(圧縮強度:150~250MPa、弾性係数:45~65GPa)を実現するために、低水結合材比(W/B)の使用、パッキングモデルを用いた細密充填^{3), 12)}、さらには熱養生による物性発現の促進が行われる。

UHPFRCでも、繊維が混入されることで、SHCCのようにひずみ硬化を呈するほどではないが(図1)、破壊時のエネルギー吸収能は極めて大きく、構造部材に用いた場合には、部材耐力の向上に寄与する。マトリクスを極めて緻密にすることで、超高

強度、高い耐久性がもたらされるが、硬化時に大きな自己収縮が生じるため、構造利用の際には注意が必要となる。

具体的には、水結合材比が0.2以下であり、SHCC同様、細骨材(0.5~4.0mm程度)のみが使用される。また、混和材にはシリカフューム(SF)が使用され、使用量としてはセメントの約20%前後がSFに置換される。また、SFの使用により、繊維とマトリクスの付着が改善されることが知られており、UHPFRCでもこの効果を積極的に利用している。さらには、フレッシュ時のレオロジー的な性質も変化することに留意する必要がある。

UHPFRCにおける靱性は、体積比で2~3%程度以上の繊維により確保され、主に高強度鋼繊維(長さ:10~15mm、直径:0.2mm程度)が用いられるが、最近では、耐火性能(爆裂防止)の向上を目的に、有機繊維等を混入した仕様も開発されている。さらに、異なる長さの繊維を混ぜて高性能化することも提案されている¹⁰⁾。

3. 材料設計コンセプトを理解し、材料の持ち味を活かした適用の必要性

コンクリート構造物の設計に性能照査の考え方が取り入れられるようになりつつある現状では、構造物に要求される性能を材料開発レベルまでフィードバックすることで、材料の性能を最大限に活かした適用が可能となる。したがって、図2に示されるように、先述の①ひび割れを伴う高靱性化、②ひび割れを許容しない超高強度化(緻密化)、という近年の材料開発に関して、それらのさらなる高性能化は極めて重要であるが、「数%の引張ひずみ」や「200MPa以上の超高強度」があらゆる場面で必要

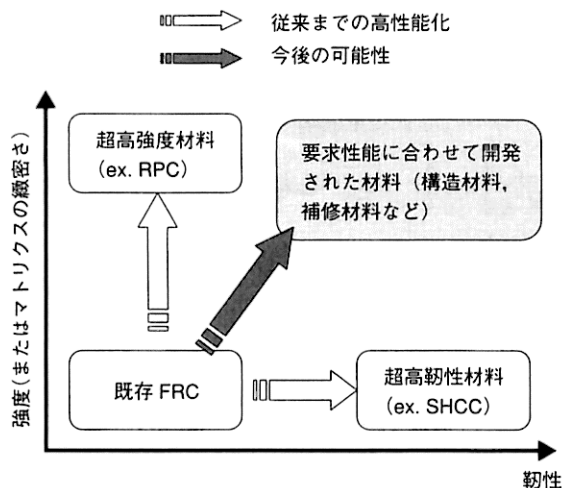


図2 材料開発の今後の可能性

とされるわけではなく、用途に合わせて最適化された材料が提供されるのが理想である。

繊維補強セメント系複合材料では、図2に示されるように、強度(耐久性)や靱性が大幅に改善された既往の材料開発に対して、両者の中間的な性能を目指す材料開発が期待され、その試みが行われている¹³⁾。

材料の性能が明確にされ、以下のようにその性能が適切に評価されるとともに、性能にあわせた適用が行われるべきである。

- ① 適用時に要求される性能を明確にし、それを満足させる材料開発(材料の持ち味は何か?)
- ② 材料の持ち味を適切に評価するための試験方法
- ③ 材料の持ち味を確実に発揮させるための設計、施工(ガイドラインの整備を含む)
- ④ 適切な維持管理および今後の材料開発へのフィードバック

このうち、②は、文献^{14),15)}に記載されているように、材料の持ち味(ひび割れ幅、靱性、強度、耐久性)を適切に評価するための試験方法の整備が必要不可欠となる。③は、材料の持ち味を活かした設計、施工のためのガイドラインが必要であり、例えば、土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」⁴⁾や「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)」¹⁶⁾などがそれにあたる。①と④については、材料開発者を含む関係者が互いに情報交換し、要求性能の明確化、ニ

ズとシーズをマッチングさせることが必要である。

4. 構造物全体としての性能

繊維補強セメント系複合材料を構造物に適用する際には、繊維補強セメント系複合材料の性能だけでなく、各種の荷重作用下における構造物全体としての性能が、要求を満たすものでなければならない。

繊維補強セメント系複合材料には、繊維は面(型枠面、仕上げ面、コンクリート面など)に沿って配向しやすく、面を超えては架橋しないという特徴がある。繊維補強セメント系複合材料を既存のコンクリート構造物の表面補修材や鋼材の被覆材として用いる場合に、繊維補強セメント系複合材料と既設部材との界面では繊維による架橋が無いことに加え、温度や乾湿の変化に伴う体積変化の影響が現れやすいため、一般に界面は弱点となりやすい。設計時にはこの点に関する注意が必要である。また、施工時には、繊維補強セメント系複合材料の打重ね部分に、繊維の架橋が少ない弱い層が生じないように、繊維を十分かき乱すなどの配慮が必要である。

5. おわりに

繊維補強セメント系複合材料の材料開発の動向を紹介し、各材料の持ち味について、特に材料設計のコンセプトを通して概説した。各材料の持ち味が理解され適切に利用されることで、持続可能なコンクリート構造物が構築でき、さらに新しい材料開発の可能性も膨らむものと期待したい。

〔参考文献〕

- 1) V.C. Li/From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, Vol.10, No.2, pp.37s~48s, 1993
- 2) 関田徹志他/複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRC)の研究の現状と構造利用の実例, コンクリート工学, Vol.44, No.3, pp.3~10, 2006
- 3) P. Richard and M. Cheyrezy/Composition of reactive powder concretes, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501~1511, 1995
- 4) 土木学会/超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004
- 5) 片桐 誠, 田中敏嗣/超高強度繊維補強コンクリート最近の技術

- 展開(ダクトルの技術開発と適用事例), セメント・コンクリート No.702, pp.9~14, 2005
- 6) E. Denarié and E. Brühwiler/Structural Rehabilitations with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete(UHPFRC), Restoration of Buildings and Monuments, Vol.12, No.5/6, pp.453~468, 2006
 - 7) A.E. Naaman/Strain Hardening and Deflection Hardening Fiber Reinforced Cement Composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Proceedings of the fourth international RILEM workshop, pp.95~113, 2003
 - 8) 日本コンクリート工学協会/高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書(高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う), 2002
 - 9) H.H. Bache/Introduction to compact reinforced composite, Nord. Concr. Res., Vol.6, pp.19~33, 1987
 - 10) P. Rossi, P. Acker and Y. Malier/Effect of Steel Fibers at Two Different Stages: The Material and Structures, Material and Structures, Vol.20, No.120, pp.436~439, 1987

- 11) P. Rossi/Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC): an Overview, Proc. of the Fifth International RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concrete(BEFIB' 2000), pp.87~100, 2000
- 12) F. Larrard and T. Sedran/Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model, Cement and Concrete Research, Vol.24, No.6, pp.997~1009, 1994
- 13) M. Kunieda et al./Challenges for strain hardening cementitious composites-deformability versus matrix density, Proc. of Fifth Int. RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC5), 2007(to be published)
- 14) 稲熊唯史他/複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性状の評価, コンクリート工学, Vol.44, No.7, pp.3~8, 2006
- 15) T. Kanakubo/Tensile Characteristics Evaluation Method for Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.3~17, 2006
- 16) 土木学会/複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー127, 2007

HOT NEWS on Cement & Concrete

■衝撃弾性波利用でCon強度を測定

三井住友建設(株)は、衝撃弾性波の伝播速度測定によってコンクリートの圧縮強度を推定する非破壊試験装置「聴強器」を開発した。

この装置は、圧縮強度と弾性波速度との高い相関関係を用いた同社開発の非破壊検査法「衝撃弾性波試験・表面2点法によるコンクリート強度測定法」を応用したもの。2つの振動センサを装備した振動検出器、振動計、データ処理用パソコンで構成される。

測定手順は、①打設するコンクリートであらかじめ円柱供試体を製作し、材齢7、28、56日の弾性波速度および圧縮強度試験を実施、②両方の試験データの相関関係をもとに、適切な圧縮強度推定式を作成、③振動検出器をコンクリート表面に接触させ、その近傍をハンマーで数回軽く打撃することで、衝撃弾性波が発生、④振動センサ間の距離および波動伝播時間差から算出した弾性波速度と、事前に算定済みの強度推定式から圧縮強度を推定し、瞬時にパソコン画面に表示する。測定誤差が約15%以内と、高精度な計測がその場で簡単にできるのが特徴で、適用強度も10~150N/mm²と広範囲。

施工中のコンクリート構造物の品質検査向けに最適で、価格は199万5000円。なお、製造・販売は同社の関連会社の(株)コスモプランニングが行う。

度6強、新潟県上越市、小千谷市、出雲崎町で震度6弱を記録した。地震の規模はM6.8と推定され、被災地では17日正午までに88回の余震を観測した。

被害は柏崎市を中心に死者11名、負傷者は新潟、長野、富山3県で1800名以上、新潟・長野両県での全半壊家屋は1600棟以上を数え、新潟県では12400名が避難所に身を寄せた。

この地震で、電気、水道、ガスの供給がストップ、交通網も北陸自動車道の一部で路面陥没が発生したほか、新潟県内の国道8号線、長野県内の国道405号線をはじめ両県の県道が土砂崩れなどで寸断された。また、JR信越・越後線も線路のゆがみで不通となった。一方、柏崎市中心部では土壁を使用した木造家屋が地盤の液状化現象による地面の横滑りにより全壊が多発し、大きな被害を与えた。柏崎港のセメント出荷SSも敷地内の陥没で出荷不能となったが7月中旬に復旧した。

新潟県中越地震(2004年10月23日)から3年弱、能登半島地震(2007年3月25日)から4か月弱という短期間で中越・北陸地区を直撃した今回の地震について、政府の地震調査委員会は、新潟から神戸まで帯状に延びている「ひずみ集中帯」での地盤のひずみの蓄積が、新潟付近の海底活断層のひとつを動かしたことが原因との見解を示した。

[21ページにつづく]

■新潟・長野を震度6強が直撃

7月16日、午前10時13分、新潟県の南西約60km、深さ約17kmを震源とする新潟県中越沖地震が発生、新潟県柏崎市、長岡市、刈羽村、長野県飯綱町で震

*

*

*