

高強度PC鋼より線を使用した外ケーブル構造の性能照査型設計に関する研究

中日本高速道路(株) 正会員 博士(工学) ○酒井 秀昭
 中日本高速道路(株) 正会員 萩原 直樹

In Japan, it is common practice to use external tendons with design tensile strength of 1.85kN/mm^2 (JIS G 3536:SWPR7B) for Prestressed Concrete (PC) bridges. Recently, two manufacturers developed high-strength prestressing steel strand that is design tensile strength of 2.25kN/mm^2 .

In this study, performance-based design method of external tendons using high-strength prestressing steel strand was clarified from the analysis result of several standard specifications and technical reports. In addition, the safety of the high-strength prestressing steel strand at the deviator was verified by the fatigue test.

As a result, high-strength prestressing steel strand can be adopted in PC bridges.

Key words : External tendon , High-strength prestressing steel , Fatigue test , Performance-based design

1. 概要

わが国におけるPC橋の外ケーブル構造に使用される緊張材としては、JIS G 3536に規定するSWPR7BのPC鋼より線をマルチストランドとして使用しているケースが多くなっている。現在、わが国においては、引張強度がこの規格値より20%程度高強度となるPC鋼より線（高強度PC鋼より線）が開発され、一部の橋梁に採用されている。

本研究においては、この高強度PC鋼より線をPC道路橋の外ケーブル構造に使用する場合の性能照査型設計方法等について検討を行った。

2. 研究の目的および方法

本研究は、高強度PC鋼より線をPC道路橋の外ケーブル構造として適用した場合の要求性能およびその照査方法について明らかにすることを目的としている。

本研究は、以下に述べる手法で行っている。

第一に、高強度PC鋼より線の規格値および制限値等について、製造メーカーのデータやコンクリート標準示方書等の国内規準等をもとに明らかにする。第二に、高強度PC鋼より線およびこれを緊張材として用いた外ケーブル構造の緊張材システム（高強度緊張材システム）の要求性能およびその性能照査方法について、コンクリート標準示方書等の国内規準や海外の規準等を参考にし、その適切な手法を明らかにする。第三に、外ケーブルの防錆方法のうち、エポキシ樹脂を静電粉体塗装したPC鋼より線（エポキシ樹脂被覆PC鋼材）を緊張材として用いる方法の偏向部のフレット疲労等の疲労に対する安全性について、疲労試験を行いその安全性を検証する。

3. 高強度PC鋼より線の規格値および制限値

3.1 材料の機械的性質

高強度PC鋼より線は、国内で2社の製造実績があり、製造メーカーの保証値と国内のJIS規格および海外の代表的な規格とを比較すると表-1に示すとおりとなる。高強度PC鋼より線の保証値は、SWPR7Bの規格値と比較して、引張強度が約20%増大している。なお、高強度PC鋼より線の

表-1 高強度PC鋼より線の機械的性質

国名	高強度 ^{※1}		日本		アメリカ		イギリス	
規格番号	PC鋼より線		JIS		ASTM ^{※2}		BS ^{※3}	
呼び			G3536		A416		BS5896	
直径(mm)			SWPR7B		250	270	standard	super
引張荷重(kN)	15.2	15.7	15.2	15.2	15.24	15.2	15.7	15.7
0.1%永久伸びに対する荷重(kN)	314	335	261	240.2	260.7	232	265	265
0.2%永久伸びに対する荷重(kN)	—	—	—	—	—	197	225	225
	267	285	222	—	—	—	—	—

※1 高強度PC鋼より線の引張荷重等は、製造メーカーの保証値

※2 ASTM: American Society for Testing and Materials

※3 BS: British Standards

機械的性質については、JIS G 3536に規定する試験方法によりその引張強度等が、製造メーカーの保証値以上であることを確認している。(呼び径15.7mmはD社の保証値、15.2 mmはS社の保証値)

表-2 高強度PC鋼より線の引張応力度の制限値

照査項目	荷重状態	引張応力度の制限値	備 考
施工時における照査	緊張作業中	$0.8f_{puk}$ 又は $0.9f_{pyk}$ のうち小さいほうの値	f_{puk} : 緊張材の引張強度 f_{pyk} : 緊張材の降伏強度
	緊張作業直後	$0.7f_{puk}$ 又は $0.85f_{pyk}$ のうち小さいほうの値	
使用性に関する照査	永久荷重と変動荷重の組合わせ	$0.7f_{puk}$	

3. 2 引張応力度の制限値

高強度PC鋼より線の引張応力度の制限値は、コンクリート標準示方書と同様に疲労に対する安全性の照査や耐久性に関する照査を行うことから、表-2に示すように、コンクリート標準示方書と同様な値を用いることができるものと思料される。ただし、外ケーブル構造の偏向部においては、緊張材を比較的小さな曲率で偏向することから、曲げによる増加応力度も考慮する必要がある。

4. 要求性能および照査方法

4. 1 概要

高強度PC鋼より線およびそれを使用した高強度緊張材システムを用いたPC橋においては、一般のコンクリート構造物と同様に、安全性・使用性・耐久性について要求性能を設定し、設計耐用期間中に要求性能を満足することができるか照査する必要がある。本章においては、高強度PC鋼より線およびそれを使用した高強度緊張材システムを外ケーブル構造として用いた場合の重要な要求性能およびその性能照査方法について述べる。

4. 2 高強度PC鋼より線

外ケーブル構造に使用する高強度PC鋼より線の性能照査については、以下に述べるとおり安全性・使用性・耐久性について要求性能を設定し、設計耐用期間中に要求性能を満足することができるか照査する。本研究における高強度PC鋼より線の要求性能およびその性能照査の概要を表-3に示す。

表-3 高強度PC鋼より線の要求性能・性能照査

要求性能	照 査 内 容		
	限界状態	照査指標	考慮する荷重
安全性	破断	緊張材応力度	施工時荷重
	降伏		施工時荷重
	疲労破壊		永久荷重+繰返し荷重
使用性	機能維持	緊張材応力度	永久荷重+変動荷重
耐久性	設計耐用期間中に高強度PC鋼より線が腐食しない		
	設計耐用期間中に高強度PC鋼より線が遅れ破壊しない		

(1) 安全性に関する照査

外ケーブル構造に使用する高強度PC鋼より線の安全性に関する照査は、破断・降伏および疲労破壊の限界状態を設定し、緊張材として用いる高強度PC鋼より線が設定した限界状態に至らないことを確認することにより行う。

破断および降伏に対する照査は、コンクリート標準示方書¹⁾と同様に緊張作業中および緊張作業直後の施工時荷重による緊張材の応力度が、表-2に示した引張応力度の制限値以内であることを確認することにより行う。

疲労破壊に対する照査は、緊張材の設計疲労強度により照査するが、コンクリート標準示方書¹⁾によれば「PC鋼材の疲労強度は、実際に使用するPC鋼材および定着具を用いた疲労試験によって定めるのを原則とする」とされている。しかし、疲労試験の実施にあたっては、永久荷重と繰返し荷重による鋼材応力度を適切に定めて実施する必要があるため、個別の構造物の安全性の照査に用いるには設計と並行して疲労試験を実施する必要があると多くの時間を要することとなる。また、コンクリート標準示方書においては、一般のPC鋼より線の設計疲労強度の算定式が示されているが、高強度PC鋼より線への適用性に関する検討は行われていない。PC鋼より線の疲労破壊に対する安全性に関する規準としては、ISOにおいて規準化²⁾されている。これによれば、載荷上限引張応力度を $0.7f_{puk}$ 、変動応力度幅を $195N/mm^2$ として繰返し載荷試験を行い、繰返し回数200万回で破断しないこととしている。

したがって、高強度PC鋼より線の疲労破壊に対する照査は、実際に作用する応力度をもとに疲労試験を行うことが望ましいが、ISOの規準をもとに実際に使用される緊張材の疲労試験を行い、その安全性の照

査を行ってもよいものと思料される。この疲労試験については、製造実績のある2社の高強度PC鋼より線を用いた試験結果により、その安全性を確認した。ただし、ISO規準の試験時の変動応力度幅を超える場合は、実応力度をもとに試験を行う必要がある。

(2) 使用性に関する照査

外ケーブル構造に使用する高強度PC鋼より線の使用性に関する照査は、機能維持の限界状態を設定し、緊張材として用いる高強度PC鋼より線が設定した限界状態に至らないことを確認することにより行う。

機能維持に対する照査は、緊張材の引張応力度が弾性限界を超えると構造解析および応力度の計算における仮定が成立しなくなることから、コンクリート標準示方書¹⁾と同様に永久荷重と変動荷重を組み合わせた場合の緊張材の応力度が、表-2に示した引張応力度の制限値以内であることを確認することにより行う。

(3) 耐久性に関する照査

外ケーブル構造に使用する高強度PC鋼より線の耐久性に関する照査は、鋼材腐食および遅れ破壊の限界状態を設定し、緊張材として用いる高強度PC鋼より線が設定した限界状態に至らないことを確認することにより行う。

鋼材腐食に対する照査は、コンクリート標準示方書¹⁾と同様に、恒久的な防錆・防食処理を施した緊張材を用いることを前提とし、設計耐用期間中に腐食が生じないことが確認されたものを用いることにより行うが、従来のPC鋼より線の防錆方法の照査手法と同様な方法により設計施工時の照査を行うものとする。

遅れ破壊に対する照査は、対象となる緊張材の防錆方法・環境条件および供用時の応力度等により、適切にその安全性の照査を行い、設計耐用期間中に遅れ破壊が生じないことが確認されたものを用いることにより行う。高強度PC鋼より線は、引張強度が大きく、水素脆化感受性が一般のPC鋼材より高いものと推察されるため、試験等による照査が必要となる。遅れ破壊については、わが国ではその具体的な照査方法が規定されていないが、FIPの報告書に試験方法³⁾および判定基準⁴⁾が示されている。これによれば、試験方法としては、試験温度50℃で $0.8f_{puk}$ に相当する引張力を与えた高強度PC鋼より線の素線を腐食溶液(チオシアン酸アンモニウムの20%水溶液)に浸漬して素線の破断時間を計測するものである。試験の判定基準としては、最短破断時間が1.5時間以上で、50%破断確率に至る時間が4時間以上の場合合格としているので、高強度PC鋼より線についても同様な試験で合格すれば、必要性能を保持しているものと推察される。

したがって、高強度PC鋼より線の遅れ破壊に対する照査は、恒久的な防錆・防食処理を施した緊張材を用いることを前提とし、FIPの報告書による試験方法³⁾で試験を行い判定基準⁴⁾を満足しているか確認することにより行ってもよいものと思料される。この遅れ破壊試験については、製造実績のある2社の高強度PC鋼より線を用いた試験結果により、判定基準を満足していることを確認した。

4. 3 高強度緊張材システム

外ケーブル構造に使用する高強度緊張材システムの性能照査については、以下に述べるとおり安全性・耐久性について要求性能を設定し、設計耐用期間中に要求性能を満足することができるか照査する。本研究における高強度緊張材システムの要求性能およびその性能照査の概要を表-4に示す。

表-4 高強度緊張材システムの要求性能・性能照査

要求性能	部 位	照 査 内 容		
		限界状態	照査指標	考慮する荷重
安全性	定着部	破壊	定着体の耐荷力	緊張材の規格引張荷重
			定着具の接続効率	
	定着部 偏向部	断面破壊 疲労破壊	耐荷力 緊張材応力度	最大荷重 永久荷重+繰返し荷重
耐久性	定着部 偏向部	設計耐用期間中に定着具・偏向具が腐食しない コンクリート表面のひび割れ幅が限界値以下		

(1) 安全性に関する照査

外ケーブル構造に使用する高強度緊張材システムの安全性に関する照査は、定着部の破壊および定着部・偏向部の断面破壊と疲労破壊の限界状態を設定し、高強度緊張材システムが設定した限界状態に至らないことを確認することにより行う。

定着部の破壊に対する照査は、定着具が定着される緊張材の規格引張荷重以下で破壊したり、著しい変

形を生じることのないような構造および強さを有するものであること、定着具が所定の緊張力を保持できるものであることを確認することにより行う。これらの試験方法としては、「PC工法の定着具および接続具の性能確認試験方法」（JSCE-E 503-1999）が定められており、定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験において、定着体が緊張材の規格引張荷重の100%以上に耐えること⁵⁾、定着具の緊張材と組み合わせた性能試験において、付着のない状態での静的引張試験で、定着具の接続効率が緊張材の規格引張荷重の95%以上であること⁵⁾により確認することができる。この性能試験については、製造実績のあるD社製の定着具および高強度PC鋼より線を用いた試験結果により、その安全性を確認した。

定着部および偏向部の断面破壊に対する照査は、コンクリート標準示方書¹⁾と同様に、設計断面力の設計断面耐力に対する比に構造物係数を乗じた値が、1.0以下であることを確認することにより行う。

定着部の疲労破壊に対する照査は、定着部の緊張材の設計疲労強度により照査するが、高強度PC鋼より線の疲労破壊に対する照査と同様に疲労試験によって定める必要があるため、個別の構造物の安全性の照査に用いるには設計と並行して疲労試験を実施する必要があるため多くの時間を要することとなる。定着部の緊張材の疲労破壊に対する照査方法としては、FIPの報告書⁶⁾に試験方法および判定基準が示されている。これによれば、載荷上限引張応力度を $0.65f_{puk}$ 、変動応力度幅を 80N/mm^2 として繰返し載荷試験を行い、繰返し回数200万回で破断しないこととしている。

したがって、定着部の緊張材の疲労破壊に対する照査は、実際に作用する応力度をもとに疲労試験を行うことが望ましいが、FIPの報告書⁶⁾をもとに実際に使用される定着具と緊張材を組み合わせた状態での疲労試験を行い、その安全性の照査を行ってもよいものと思料される。この疲労試験については、製造実績のあるD社製の定着具および高強度PC鋼より線を用いた試験結果により、その安全性を確認した。ただし、試験時の変動応力度幅を超える場合は、実応力度をもとに試験を行う必要がある。

偏向部の疲労破壊に対する照査は、緊張材相互や緊張材と偏向具の接触部に繰返し荷重による応力振幅が発生することにより生じるフレッシング疲労による設計疲労強度により照査する。したがって、フレッシングが生じにくい構造や保護管内にPCグラウトを施したり、偏向部の緊張材を拘束する場合は、疲労破壊に対する照査を省略できるものと思われる。エポキシ樹脂被覆PC鋼材を緊張材として用いる場合などのように、偏向部の緊張材を拘束せずにフレッシング疲労の影響が懸念される場合は、偏向部の緊張材の疲労破壊に対する照査を適切に行う必要がある。エポキシ樹脂被覆PC鋼材を用いる場合の偏向部のフレッシング疲労等の疲労に対する安全性の検討手法については、高速道路技術センターの報告書⁷⁾に試験方法が記載されている。これによれば、載荷下限引張応力度を $0.60f_{puk}$ 、変動応力度幅を 50N/mm^2 で繰返し載荷試験を行い、繰返し回数300万回で破断しないことにより安全性の照査を行うこととしている。この報告書においては、永久荷重と変動荷重を組み合わせた場合の緊張材の引張応力度の制限値を $0.60f_{puk}$ としているため、載荷下限引張応力度を $0.60f_{puk}$ として試験を行うこととしたものと推察される。これに対して、本研究においては、コンクリート標準示方書と同様に引張応力度の制限値を $0.70f_{puk}$ としているため、定着部の緊張材の疲労破壊に対する照査と同様に載荷上限引張応力度を $0.65f_{puk}$ とする必要があると思料される。

したがって、偏向部の緊張材の疲労破壊に対する照査は、実際に作用する応力度をもとに疲労試験を行うことが望ましいが、載荷上限引張応力度を $0.65f_{puk}$ 、変動応力度幅を 50N/mm^2 として繰返し載荷試験を行い、繰返し回数300万回で破断しないことを確認することにより、その安全性の照査を行ってもよいものと思料される。ただし、試験時の変動応力度幅を超える場合は、実応力度をもとに試験を行う必要がある。ただし、一般的な外ケーブル構造においては、 50N/mm^2 を超える変動応力度幅には至らないものと推察される。

（2）耐久性に関する照査

外ケーブル構造に使用する高強度緊張材システムの耐久性に関する照査は、鋼材腐食の限界状態を設定し、定着具・偏向具およびこれらと接触している緊張材ならびに定着部・偏向部の鉄筋または必要に応じて使用されるPC鋼材が設定した限界状態に至らないことを確認することにより行う。

定着具・偏向具およびこれらと接触している緊張材の鋼材腐食に対する照査は、恒久的な防錆・防食処理を施すことを前提とし、設計耐用期間中に腐食が生じないことが確認されたものを用いることにより行う。定着部・偏向部の鋼材腐食に対する照査は、コンクリート標準示方書¹⁾と同様に、コンクリート表面のひび割れ幅が、鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値以下であることを確認することにより行う。

5. 偏向部の緊張材の疲労試験

5. 1 概要

中日本高速道路(株)においては、エポキシ樹脂被覆PC鋼より線を外ケーブル構造の緊張材として用いるケースが多くなっている。したがって、高強度緊張材システムの緊張材においても、同様にエポキシ樹脂被覆PC鋼より線を外ケーブル構造の緊張材として用いるケースが想定されること、前章で述べた荷条件で偏向部の緊張材の疲労試験を実施した実績がないこと等から、前章で述べた疲労試験の方法で偏向部の緊張材のフレット疲労に対する安全性の照査を行った。

5. 2 対象とする高強度緊張材システム

疲労試験の対象とする外ケーブル構造の高強度緊張材システムとしては、定着具を実績のあるD社製、緊張材を15.7mm7本よりのエポキシ樹脂被覆高強度PC鋼より線とし、19本のマルチケーブル(19S15.7)とした。緊張材の配置方法は、偏向部における最下層の緊張材に作用する腹圧力がパラレル配置よりツイスト配置のほうが大きくなるため、ツイスト配置として試験を行った。偏向部はJIS K 6761(一般用ポリエチレン管)に規定される呼び径100の2種管を保護管として使用した。使用するエポキシ樹脂被覆高強度PC鋼より線の防錆層としてのエポキシ樹脂被覆は、ASTM A 882の規格を満足しているものを使用した。

5. 3 試験装置

試験装置は、図-1~2に示すように、緊張材を鉄筋コンクリート製の偏向部(デビエーター)で偏向させた試験体を、変位制御でデビエーターを繰返し荷重することにより移動させて、緊張材に所定の変動応力度を作用させる構造とした。デビエーターは、緊張材の偏向角を $\theta=3.25^\circ$ (片側)とし、曲げ半径は $R=4,000\text{mm}$ とした。また偏向箇所をデビエーター内で2箇所設け、直線区間を中間部に設けた。

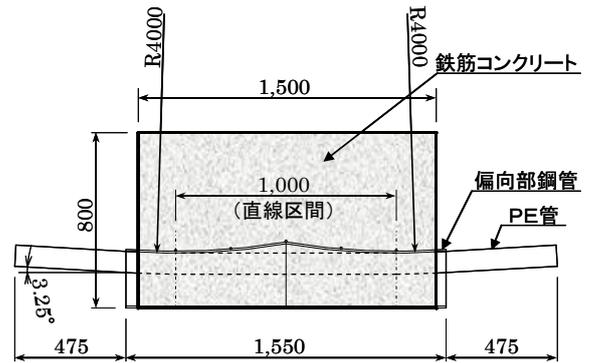


図-1 疲労試験の偏向部の構造

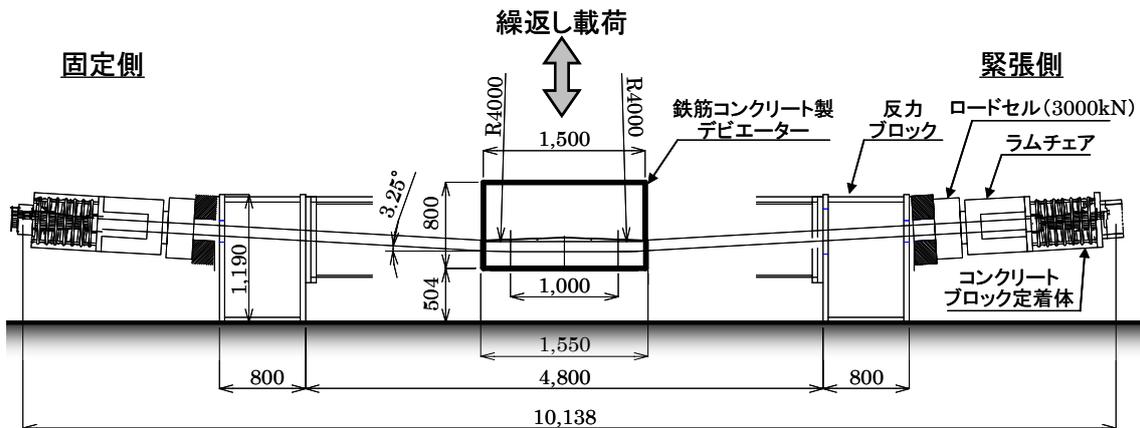


図-2 疲労試験装置の全体図

5. 4 荷重および判定基準

試験時の荷重は、荷重上限引張応力度を $0.65f_{pk}$ 、変動応力度幅を 50N/mm^2 として、300万回荷重した。試験の判定基準は、試験終了時までには緊張材が破断しないことおよび防食層(エポキシ樹脂)が損傷しないこととし安全性の照査を行った。

5. 5 試験結果

載荷試験後において、緊張材として用いた高強度P C鋼より線（15.7mm7本より）は、定着部および偏向部を含め、全長にわたり破断しなかった。防食層の健全性については、疲労試験後の緊張材のすべてについて、目視にて割れや剥がれがないことを確認した。

したがって、エポキシ樹脂被覆P C鋼より線による高強度緊張材システムの偏向部の緊張材は、載荷上限引張応力度 $0.65f_{pk}$ 、変動応力度幅 $50N/mm^2$ として300万回載荷しても、偏向部のフレッキング疲労による疲労破壊の限界状態に至らず、十分にその防錆性能も保持するものと推察される。

6. 結論

本研究により、以下に述べる事項が明らかになった。

第一に、高強度P C鋼より線は、呼び名で7本より15.2mmと15.7mmの製品が現在のところ国内2社で製造可能であり、その機械的性質についても、十分に実用に供することが可能であるものと思料される。

第二に、高強度P C鋼より線をP C道路橋の外ケーブル構造の緊張材として使用する場合の機械的性質を除いた安全性・使用性・耐久性に関する主な要求性能については、表-3に示した照査項目について照査する必要がある、本論文で述べた方法により照査することができる可能性を示した。なお、安全性に関する要求性能のうち疲労破壊に対する照査および耐久性に関する要求性能のうち遅れ破壊に対する照査については、製造実績がある高強度P C鋼より線において、本論文に示した照査方法でその性能を保持していることを確認しており、そのうちD社の結果は、本協会機関誌に掲載⁸⁾されている。

第三に、高強度緊張材システムをP C道路橋の外ケーブル構造として使用する場合の定着部および偏向部の安全性・耐久性に関する主な必要性能については、表-4に示した照査項目について照査する必要がある、本論文で述べた方法により照査することができる可能性を示した。なお、安全性に関する要求性能のうち定着部の破壊および疲労破壊に対する照査については、施工実績があるD社の外ケーブルシステム（19S15.7）において、本論文に示した照査方法でその性能を保持していることを確認した。

第四に、ASTM A882の規格を満足するエポキシ樹脂被覆による高強度P C鋼より線を緊張材として使用する高強度緊張材システムの安全性に関する要求性能のうち偏向部の疲労破壊に対する照査について、本論文で述べた方法により疲労試験を行い、その性能を保持していることを確認した。

これらのことから、高強度P C鋼より線およびこれを用いた高強度緊張材システムをP C道路橋の外ケーブル構造として使用したP C道路橋においては、本論文に示した要求性能および性能照査方法により設計することが可能であると思料される。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕，2007.
- 2) ISO 6934-4：Steel for the prestressing of concrete — Part 4: Strand, 1991.
- 3) FIP：Report on prestressing steel: 5. Stress corrosion cracking resistance test for prestressing tendons, 1980.
- 4) FIP：Tendons, Technical report, 1995.
- 5) 土木学会：プレストレストコンクリート工法設計施工指針，コンクリートライブラリー66，1991.
- 6) FIP：Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems, 1993.
- 7) (財) 高速道路技術センター：P C橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル:資料編-4. エポキシ被覆P C鋼材性能確認試験，平成13年10月.
- 8) 星野康弘，西野元庸，前川智哉，齋木俊英：高強度P Cストランドを用いた外ケーブルシステムの開発，プレストレストコンクリート，Vol. 51, No. 3, pp. 84-91, 2009.