

中流動コンクリートを用いた覆工コンクリートの耐久性について

藤 倉 裕 介 三河内 永康 *

概 要

近年、特に公共工事ではコンクリート構造物の高品質化、長寿命化に関しての提案型発注が増加している。また、性能照査型設計への移行、環境負荷低減の観点から、各種の混和材料を組み合わせる使用ケースも増加している。このように使用材料の多様化が進む中、施工者は適切な材料選定を行うとともに、コンクリートの施工性、強度発現性および長期耐久性といった時間軸で要求される性能を満足することを計画段階で把握することが必要である。本稿では、トンネル覆工コンクリートの高品質化を目的として中流動コンクリートを試験的に現場適用した事例について報告する。また、中流動コンクリートを使用する場合の利点や現場採取したコンクリートの物性試験結果について示し、覆工コンクリートの表層品質、耐久性について考察を加える。

Durability of tunnel lining concrete using medium-fluidity concrete

Abstract

The ongoing progress of the shift towards performance-oriented design has allowed greater freedom in material selection and proportioning according to the performance requirements of the structures. In addition, the use of industrial byproducts as supplementary cementing materials (SCMs) has been increasing as waste disposal and reduction of CO₂ emissions become more important. Amid such changes in the environment for cementitious materials, contractors are required to select appropriate materials, and understand their effect on the performance of the concrete over time, including placeability, strength development, and long-term durability. In this paper, for the purpose of improving the quality of tunnel lining concrete, we report on an actual site that uses medium-fluidity concrete. In addition, we report on the physical properties of test results for medium-fluidity concrete, and we consider surface quality and durability of tunnel lining concrete.

キーワード：トンネル覆工コンクリート、坑門工、
中流動コンクリート、透気係数

* 建設本部土木エンジニアリングセンター

§1. はじめに

近年、公共工事をはじめコンクリート構造物の高品質化、長寿命化への要求が高まっている。コンクリート構造物の品質向上のためには、使用材料であるコンクリートの施工性能、力学性能、耐久性能といった時間軸で要求される性能を事前に照査することが重要である。特にかぶりコンクリートの耐久性を向上させるためには、まだ軟らかいフレッシュコンクリートを型枠の隅々に充填させ均一に締め固め密実なコンクリートを施工することが必要である。しかし、実際のコンクリート施工は現場で打ち込み、締め固めを行うため、コールドジョイント、ジャンカ、充填不足といった不具合が発生することが多々ある。施工によるコンクリートの不具合が生じる理由としては、施工条件や施工中のトラブル、作業員の経験や熟練度、品質管理上の問題によるものだけでなく、施工コストの削減や工期短縮の観点から品質管理の目が十分に届かない場合があること、高密度に鉄筋が配置されているにも関わらず硬練りの配合が採用されている背景、また構造形態が複雑でコンクリートの充填状況の目視確認が困難な部位を有する場合など複数の要因があり、施工者には高度な施工計画、施工管理が要求されている。

そのような背景から著者らはコンクリート施工による不具合を低減するとともにコンクリートの品質を向上させる目的で、適度な流動性と分離抵抗性を有する中・高流動コンクリートの適用、ブリーディング水に配慮した配合設計手法の提案、不具合を未然に防ぐためのセンサーの開発を行ってきた¹⁾。本稿では、トンネル覆工コンクリートの高品質化を目的として中流動コンクリートを試験的に現場適用した事例について報告する。また、中流動コンクリートの物性試験結果について示し、覆工コンクリートの表層品質、耐久性能について考察する。

§2. 中流動コンクリートの特徴

トンネル覆工コンクリートは、型枠の構造上から狭小空間へのコンクリート打設作業が行われ、特に天端部では片側からの吹き上げ方式によりコンクリートを充填するため、十分な締め固めが困難な場合が多い。そのため、一般の鉄筋を有する構造物と同様にコールドジョイントや充填不足といった施工による不具合を生じる可能性がある。そのような背景から、近年では覆工コンクリートのより一層の品質向上を目的として、従来のスランブ管理のコンクリートよりも高い充填性を有し、しかも安価に製造が可能な中流動コンクリートの適用が検討されつつある。

中流動コンクリートは、図 1 に示すように従来のスランブ管理の普通コンクリートと高流動コンクリートの中間に位置

するコンクリートである。普通コンクリートと高流動コンクリートについては、土木学会の基準や配合設計手法が確立されているが、中流動コンクリートについては、一部の管理機関で配合設計手法が提案²⁾されているものの、明確な管理基準や配合設計手法が確立されていない。中流動コンクリートの特徴、利点としては下記が挙げられる。

- ① 普通コンクリートと同様に一般の生コン工場で製造が可能である。
 - ② 高流動コンクリートのように型枠の大規模な補強を必要としない。
 - ③ 運搬、ポンプ圧送が通常の施工機械で行える。
 - ④ 振動締め固め機を併用することで高流動コンクリートと同等の高い流動性と充填性が得られ、ジャンカや充填不足といった初期欠陥の発生を大幅に低減できる。
 - ⑤ 高スランブのコンクリートよりも材料分離抵抗性に優れ、ブリーディングが少ないため、表面の美観が向上するとともに、均一なコンクリートとなりひび割れ抵抗性も高まる。
 - ⑥ 充填性が良好なため密実なコンクリートを打設でき、耐久性の向上が期待できる。
 - ⑦ 普通コンクリートと大きく配合が異なることはなく、同等の強度、品質を有する。また、高流動コンクリートのように強度上昇を生じることが少ない。
 - ⑧ 高流動コンクリートよりも安価である。
- また、デメリットとしては下記が挙げられる。
- ⑨ 施工性、流動性が良いために打設速度が早くなり、型枠への側圧が大きくなる。
 - ⑩ 普通コンクリートよりも若干のコスト上昇がある。

このように、中流動コンクリートは振動締め固め機を併用することで高流動コンクリートと同様な充填性が得られ、密実なコンクリートを打設できる。また、高い材料分離抵抗性を有しており、配合設計を工夫することでブリーディング水を極めて少なくでき、コンクリート表面の美観が向上する。

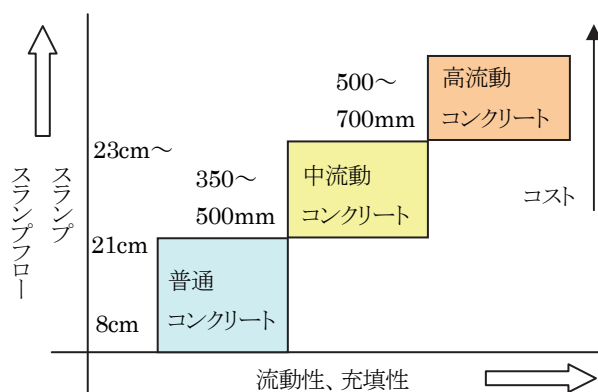


図 1 フレッシュコンクリートの分類、概念

§3. 中流動コンクリートの配合

3 つのトンネル現場 (A、B、C) で使用した中流動コンクリートの配合およびフレッシュ性状について示す。表 1 には中流動コンクリートの配合決定のための基準を示す。各現場の配合においてこの基準を満足するようなフレッシュ性状を有する配合を決定した。

表 2 にはトンネル現場 A において適用した中流動コンクリートの配合を示す。配合 I では高性能減水剤に増粘成分が含有された混和剤を使用しており、配合 II では高性能 AE 減水剤の一部と粉体である増粘剤を現場で後添加して中流動コンクリートとする配合である。これは、コンクリート製造プラントの出荷の都合により、増粘剤のプラント添加が不可能である場合を想定して、現場での後添加を検討したものである。

表 3 にはトンネル現場 B において適用した中流動コンクリートの配合を示す。覆工コンクリートに適用した配合は 2 種類であり、配合 I は増粘成分含有の高性能 AE 減水剤を用いたものであり、配合 II は粉体の増粘剤と高性能 AE 減水剤を使用した配合である。配合 III は海岸部に近い立地から耐久性の向上とひび割れ低減の観点から膨張材を使用した中流動コンクリートを坑門工に適用を試みたものである。混和剤の使用は配合 I と同様である。

表 4 はトンネル現場 C における配合を示す。配合 I は覆工コンクリートに適用する中流動コンクリートの配合を示すが、現地プラントの使用骨材の粒形や粒度などの状態が良好であり、粗骨材最大寸法 40mm においても表 1 に示す基準を満足するフレッシュ性状が得られた。配合 II は坑門工に使用する中流動コンクリートである。

表 1 中流動コンクリートの配合決定のための基準²⁾

項目	基準値	試験方法
材齢 28 日における 圧縮強度(N/mm ²)	設計基準強度	JIS A 1108
粗骨材最大寸法(mm)	20、25、(40)	—
スランプおよびス ランプフロー (cm)	21±2.5 35～50	JIS A 1150
加振変形試験(cm)	10 秒加振後のスランプ フローの広がり※10±3	JHS 733-208
U 型充填性高さ (障害無し) (mm)	280 以上	
空気量 (%)	4.5±1.5	JIS A 1128
最低単位セメント量 (kg/m ³)	270	—
単位水量 (kg/m ³)	175 以下	—
最大塩化物含有量 (Cl) (g/m ³)	300	—

※ 加振後の広がったコンクリートにおいて、中央部に粗骨材が露出した状態を呈することなく、周囲部に 2cm 以上のペーストや遊離した水の帯が無いこと

表 2 コンクリートの配合(トンネル現場 A)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤			
						①	②	③	④
普通コンクリート 24-15-40BB									
56	43.9	164	293	801	1053	2.93	—	—	—
中流動コンクリート 配合Ⅰ 24-45-20BB									
56	50.0	175	313	891	913	—	4.54	—	—
中流動コンクリート 配合Ⅱ 24-45-20BB									
56	50.0	175	313	891	913	—	—	2.19	—
(現場にて後添加分の混和剤)						—	—	0.70	0.05
セメント:高炉セメントB種(3.04g/cm ³) 細骨材:砕砂(2.69g/cm ³):砂(2.57g/cm ³)=50:50 粗骨材:砕石2005、4005(2.70g/cm ³) 混和剤①:AE減水剤、混和剤②:増粘成分含有高性能減水剤 混和剤③:高性能AE減水剤、④増粘剤									

表 3 コンクリートの配合(トンネル現場 B)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	膨張材	混和剤		
							①	②	③
普通コンクリート(覆工) 21-15-40BB									
57.2	39.7	170	297	710	1089	—	3.52	—	—
中流動コンクリート 配合Ⅰ 21-45-20BB									
55.0	51.0	175	318	895	871	—	—	3.98	—
中流動コンクリート 配合Ⅱ 21-45-20BB									
55.0	51.0	175	318	895	871	—	3.98	—	0.05
普通コンクリート(坑門工) 24-15-20BB									
52.8	46.7	172	326	793	957	20	1.97	—	—
中流動コンクリート 配合Ⅲ 24-45-20BB									
52.8	51.0	175	331	872	865	20	3.81	—	0.05
セメント:高炉セメントB種(3.04g/cm ³) 細骨材:砕砂(2.69g/cm ³)、粗骨材:砕石2005、4005(2.70g/cm ³)、混和剤①:高性能AE減水剤、混和剤②:増粘成分含有高性能減水剤、混和剤③:増粘剤(混和剤メーカーA社)									

表 4 コンクリートの配合(トンネル現場 C)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)						
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤		
						①	②	
普通コンクリート(覆工) 21-15-40BB								
59	41.6	168	285	752	1102	3.05	—	
中流動コンクリート 配合Ⅰ 21-45-40BB								
59	52.7	165	280	960	897	—	2.80	
普通コンクリート(坑門工) 24-12-20BB								
54	44.8	172	319	793	1017	3.41	—	
中流動コンクリート 配合Ⅱ 24-45-20BB								
54	50.1	175	324	880	914	—	3.24	
セメント: 高炉セメントB種(3.04g/cm³) 細骨材: 砕砂(2.69g/cm³) 粗骨材: 砕石2005、4005(2.70g/cm³) 混和剤①: 高性能AE減水剤 混和剤②: 増粘成分含有高性能AE減水剤(混和剤メーカーB社)								

写真 1、写真 2 には中流動コンクリートの品質管理試験として実施した U 型充填試験と加振変形試験の状況を示す。U 型充填試験では、コンクリートの流動性を確認する試験であり、仕切りの反対側へ所定の高さ(280mm)までコンクリートを充填できる性能が求められる。加振変形試験はスランプフローを測定後にパイププレートによる振動を 10 秒間与え、振動によるフローの広がり程度とコンクリートの分離抵抗性を確認する試験である。

§4. 中流動コンクリートの試験施工の結果

4.1 試験施工の概要

トンネル現場 A、B において中流動コンクリートを試験施工として適用した結果について示す。トンネル現場 A では、中流動コンクリートを終点側坑口付近の覆工 5 スパンに試験施工として適用した。5 スパンのうち 3 スパンは無筋区間、残りの 2 スパンは有筋区間である。写真 3 に混和剤を現場にて後添加して中流動コンクリートを製造している状況を示す。トンネル現場 B では、坑門工に加え覆工の有筋区間 4 スパンに中流動コンクリートの試験施工を実施した。写真 4 に坑門工の施工状況を示す。以下に試験施工時に採取したコンクリートを用いて調べた各物性について示す。

4.2 ブリーディング試験結果

試験施工時のフレッシュ性状として、表 1 に示す項目の試験に加え、ブリーディング試験 (JIS A 1123) を実施した。試験結果を図 2、図 3 に示す。図 2 より、増粘成分を含有した混和剤を使用した配合 I では、普通コンクリートよりも大幅にブリーディング率が増加していることが分かる。これは、中流動コンクリートでは、単位水量が普通コンクリートよりも増加する傾向にあり、それに伴ってブリーディングも大きくなる傾向を示すが、増粘成分を含んだ混和剤ではブリーディング水の低減に対しては効果が小さいためであると考えられる。一方、粉体の増粘剤を添加した配合 II ではブリーディング率が低下している。図 3 に示す現場 B の結果では、中流動コンクリートのブリーディング率は普通コンクリートと比較して低下する傾向にあることが分かる。トンネル覆工コンクリート、坑門工の施工では、下端から天端(上端)まで一回でコンクリートを打設するため、ブリーディング水が多い配合では特に天端(上端)付近のコンクリートの充填性、硬化後の品質に影響を及ぼすものと考えられる。覆工コンクリートの高品質化のためには、中流動コンクリートに限らず練り上がったコンクリートのブリーディング率を把握し、その量によっては配合設計、材料選定の段階で制御することが重要である。

仕切り閉



仕切り開



写真 1 U 型充填試験の状況

振動前



振動後



写真 2 加振変形試験の状況



写真 3 混和剤の後添加状況



写真 4 坑門工の施工状況

4.3 圧縮強度試験結果

図 4、図 5 に各配合における材齢 28 日および材齢 91 日における圧縮強度の試験結果を示す。中流動コンクリートの圧縮強度は、設計基準強度を十分に満足するとともに普通コンクリートと比べて同等以上の値が得られていることが分かる。

4.4 長さ変化試験および促進中性化試験結果

長さ変化試験 (JIS A 1129) および促進中性化試験 (JIS A 1153) の結果を図 6、図 7 に示す。長さ

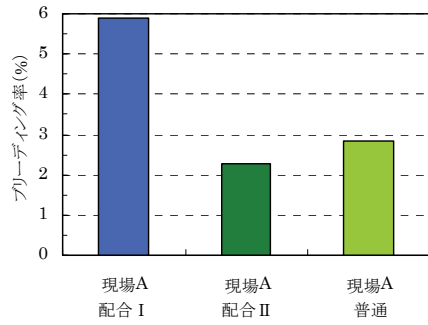


図2 ブリーディング試験結果（現場 A）

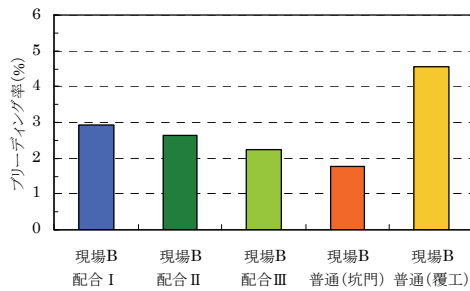


図3 ブリーディング試験結果（現場 B）

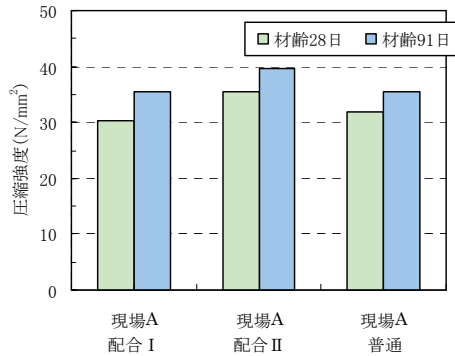


図4 圧縮強度試験結果（現場 A）

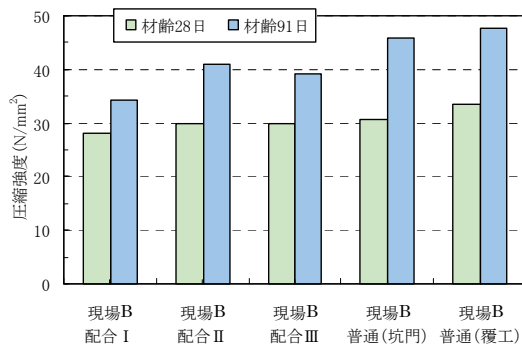


図5 圧縮強度試験結果（現場 B）

変化（乾燥収縮率）については、現場 B の配合の方が乾燥収縮率大きい傾向にあり、現場 A、B の配合ともに普通コンクリートと比較して中流動コンクリートでは乾燥収縮率が若干大きくなることが分かる。乾燥収縮率

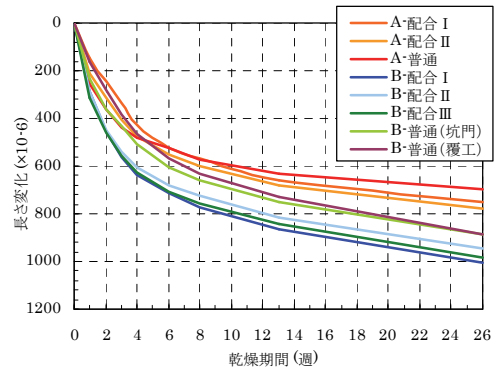


図6 長さ変化試験結果

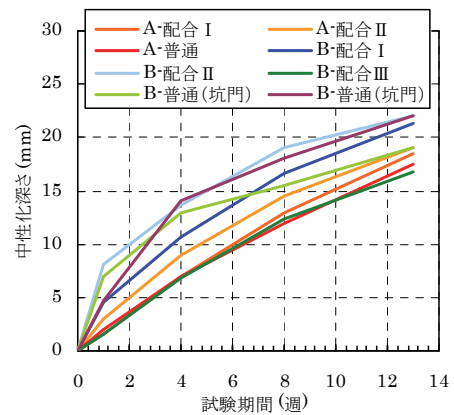


図7 促進中性化試験結果

は、粗骨材の最大寸法や単位水量の影響を受けるが、中流動コンクリートは普通コンクリートと同等の値であるといえる。図7に示す促進中性化試験の結果では、促進期間13週までの結果を示すが、耐久性の指標である中性化深さについても中流動コンクリートは普通コンクリートと同等であることが分かる。

4.5 透気試験結果

実際に打設された覆工コンクリート表面の緻密度合いを調べる目的でトレント法による透気試験を実施した。試験の実施はコンクリート打設後の材齢3ヶ月で行い、トンネル覆工の天端付近と側壁付近で実施した。トレント法による透気試験はコンクリート表面に吸引セルを設置し、セル内を真空ポンプで負圧にして、回復までの時間や圧力経時変化を測定して透気係数 $kT(m^2)$ を求める方法であり、100Vの電源が確保できれば現場でも手軽に行うことができる。透気試験の状況を写真5に示す。図8、図9に透気係数の測定結果を示す。現場Aでは、無筋区間および有筋区間での測定結果も示す。現場A、Bともに中流動コンクリートで打設した部位の透気係数は普通コンクリートと比較して小さくなることが分かる。特に天端部の透気係数が更に小さくなっており、コンクリートの充填性が良好で密実になっており品質が向上しているものと考えられる。



写真 5 透気試験の状況

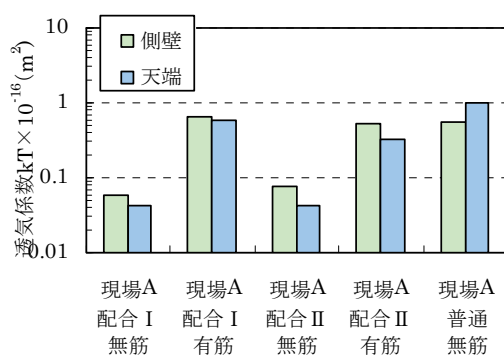


図 8 透気試験結果(現場 A)

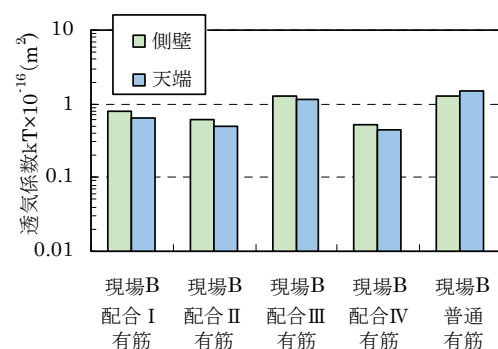


図 9 透気試験結果(現場 B)

§5. 耐久性に関する考察

中流動コンクリートの耐久性に関して、透気係数と中性化速度係数の関係を図 10 に示す。本研究で得られた中性化速度係数は促進期間 13 週での係数をプロットする。また、図中には既往の研究結果³⁾をプロットする。図より、透気係数の増加に伴って中性化速度係数は大きくなり、普通コンクリートおよび中流動コンクリートの試験結果に関しても、既往の研究の傾向と同様の範囲にプロットされることが分かる。中性化速度係数をはじめ耐久性は、同一の材料、配合で打設されたコンクリートであっても施工時の養生条件の影響を大きく受ける。トンネル覆工コンクリートでは、材齢 1 日で脱型されるため、脱型後の養生環境の影響を大きく受けるものと考えられる。今後、トンネル坑内と同一の条件で養生されたコンクリートの中性化速度係数、耐久性について定量的に評価することが必要であると考えられる。

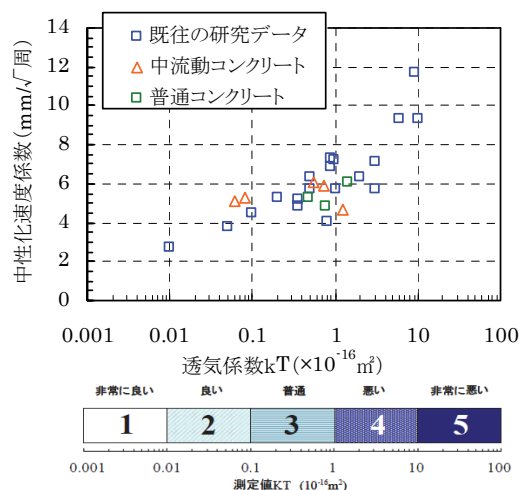


図 10 透気係数と中性化速度係数の関係

§6. おわりに

本稿では、トンネル覆工コンクリートの高品質化を目的として中流動コンクリートを試験的に現場適用した事例について報告した。トンネル覆工コンクリートでは下端から天端まで一回で打設するため、特にブリーディングに配慮した配合設計を行った。現場適用の結果、中流動コンクリートは品質、耐久性ともに良好な結果が得られた。中流動コンクリートは有筋区間や天端部の施工に有効であると考えられる。今後も適用現場を増やし、効果の検証を続けていく予定である。

参考文献

- 1) 藤倉裕介:コンクリート施工の高品質化、省力化の取り組み、フジタ技術研究報告 第 47 号, 2011.
- 2) 中日本高速道路株式会社:トンネル施工管理要領(中流動覆工コンクリート編)、2011.
- 3) 土木学会:コンクリート技術シリーズ 97、構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集、2012.

ひとこと

コンクリート構造物の高耐久化、高品質化に対する顧客のニーズは高い。また、構造物の要求性能によって多様なコンクリートが使用されている。今後も施工者として、コンクリートの施工性能のみならず硬化後の品質、長期耐久性を事前に見定めた上で使用していきたい。



藤倉 裕介