

21世紀のPC技術の未来予想

以後 有希夫*

1. はじめに

本報告は、21世紀を迎えるにあたり、PC技術の方向性を知るために、将来を担う若手技術者を対象に「21世紀のPC技術の予想、PC技術の展望」についてアンケート調査を行い、その結果を報告するものである。

アンケートは、(株)プレストレスト・コンクリート建設業協会の加盟会社41社に所属する35歳以下の若手社員を対象とし、前述のアンケートを実施し、130人以上の技術者から約650件の回答を得た。

2. アンケートの分析

2.1 概況

アンケートの回答を「材料」、「技術」、「環境・景観」、「維持管理」、「その他」の5項目に大別し、「5年後」、「10年後」、「25年後」、「50年後」、「100年後」の5段階に分類して集計を行った。分類ごとの未来予想アンケート数を図-1に示す。各時代を通じて、「材料」と「技術」に関する回答が多い。

2.2 「材料」に関して

「材料」について、さらに「コンクリート」、「鋼材・緊張材」、「グラウト」に細別した集計を図-2に示す。

(1) 「コンクリート」に関して

時代にかかわらず、「軽量コンクリート」、「高強度コンクリート」、「高耐久コンクリート」の開発、実用化という回答が多く、2025年までにある程度の目標が達成され、その後更なる進展を予想する回答が多い。また、2050年以降は、コンクリートに代わる新材料の開発の予想が多い。「コンクリート」の内容に関する回答数を図-3に示す。

コンクリートに関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 5年後

- 水和熱抑制混和剤の開発
- 極寒地用寒中コンクリート「シバレナイコンクリート」と高温地用暑中コンクリート「バテナイコンクリート」の開発
- レディーミクストコンクリートの種類に低流動、中流

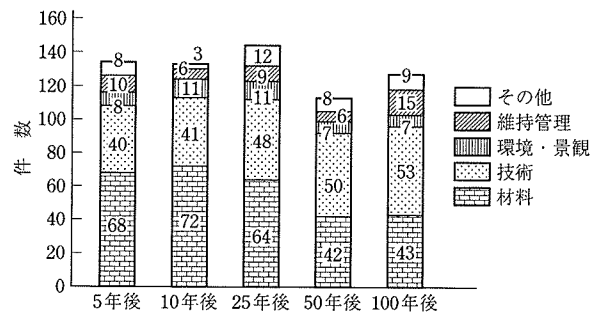


図-1 未来予想アンケート数

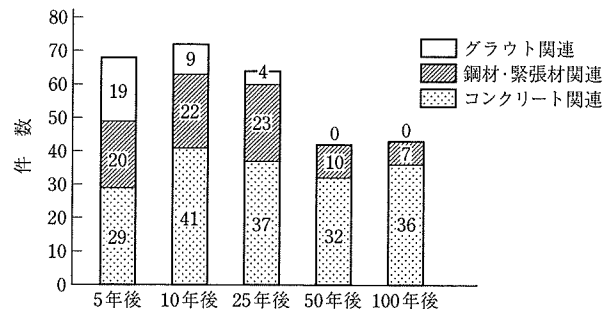


図-2 材料の分類

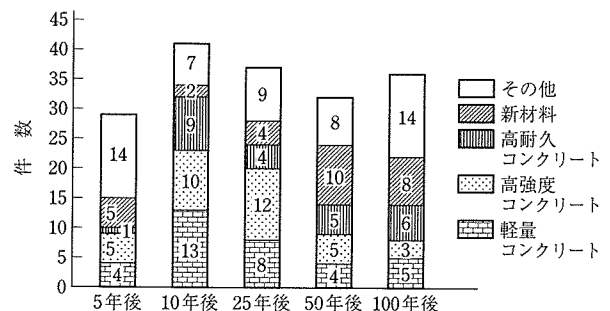


図-3 コンクリートの分類

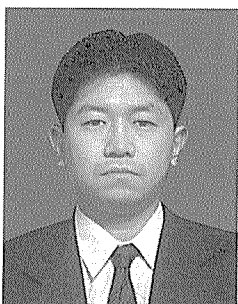
動、高流動の区分追加

② 10年後

- フレッシュコンクリートに特殊ビーズ混入またはコンクリート硬化後に特殊シートを貼付した応力対応変色コンクリートが開発され、さながらFEM解析時のコンター図のように応力を確認することができ、施工ならびに維持管理に有効
- 高強度カラーコンクリートの開発
- 鋼繊維の形状や配置を工夫し、引張強度を向上させ鉄筋を不要とした鋼繊維補強コンクリートの実用化
- 体積が2倍以上となる超膨張性コンクリートによるケミカルプレストレスの実用化

③ 25年後

- 半透明コンクリートの開発（施工管理や維持管理が容



* Yukio IGO

(株)プレストレスト・コンクリート建設業協会

易となり、景観にも優れる)

- カラーコンクリートの一般化

④ 50年後

- 地球温暖化対策に有効な吸熱発電コンクリートの開発
- 地震時に大変形を生じて、地震後に元の形状に復元する形状記憶コンクリートの開発
- クリーブや乾燥収縮を生じないコンクリートの実用化
- 塩害対策用混和剤の開発
- コンクリートの代替品として超硬質プラスチックや硬質ゴムの開発

⑤ 100年後

- フレッシュコンクリートのワーカブルな時間を任意に設定できる装置あるいは材料の開発
- 塩分と反応して保護被膜を形成し、耐久性を向上させる材料の開発
- セメント分子間にプレストレスを導入する分子間緊張ミクロ技術により、超高張力コンクリートの開発

(2) 「鋼材・緊張材」に関して

2025年までは、高強度鋼材、高耐久（非腐食）鋼材に関する回答が多いが、2010年以降は鋼材・PC鋼材に代わる新素材の開発が活発になる予想が多い。「鋼材・緊張材」の内容に関する回答数を図-4に示す。

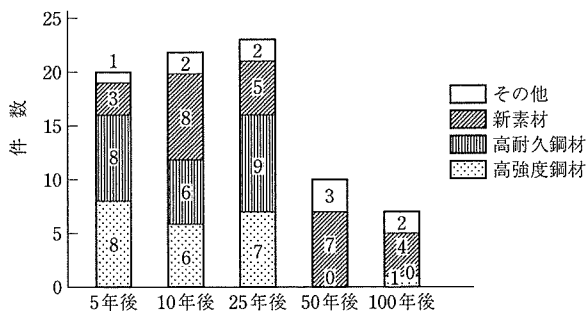


図-4 鋼材・緊張材の分類

鋼材・緊張材に関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 5年後

- 六角形シースと六角形PC鋼より線を組み合わせ、空隙率の効率化により、グラウト充填性能が改善

② 10年後

- 鋼板に代わるFRPが開発され、波形メッシュFRPウェブPC橋が出現

③ 25年後

- 高強度化に伴い極細緊張材が実用化し、内ケーブルでも必要断面積が縮小
- 再緊張可能な緊張材が実用化し、維持管理に活用
- コンクリート打設後に緊張材が自己収縮する自己緊張タイプ緊張材が開発され、緊張作業が不要

④ 50年後

- 極薄緊張材が開発され、テープを貼る感覚で補修作業が可能
- メッシュ形状緊張材が開発され、四方八方からプレストレスを同時に導入可能
- 形状記憶合金を適用した緊張材によるプレストレス力の導入

の導入

(3) 「グラウト」に関して

2005年にはプレグラウトPC鋼材ならびにノングラウトPC鋼材に関する意見が大半であり、2010年には約半分減るものの、プレグラウトPC鋼材およびその代替技術に関する回答である。2025年には少数の回答があるものの2050年以降はまったく回答がなくなる。これは、耐久性に優れた緊張材やグラウト材およびシステムが開発され、グラウトに起因する耐久性問題は解決すると予想する回答が多いためである。「グラウト」の内容に関する回答数を図-5に示す。

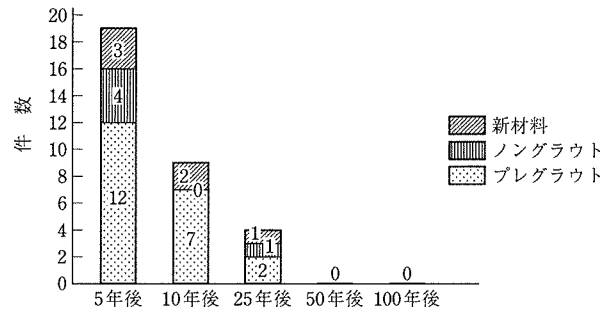


図-5 グラウトの分類

グラウトに関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 5年後

- 大容量プレグラウトPC鋼材の開発
- 温度履歴に依存しないプレグラウト樹脂の開発
具体的には、① 湿気反応型、② 時間制御型、③ 温度降下反応型、④ 微弱電流反応型、⑤ 導入緊張力感応型、など
- (粉末、固形、ゲル状の) グラウト基材があらかじめシース内面に付着しており、緊張後に水を注入すると、反応して完全に充填されたグラウトとなる材料とシステムの開発

② 10年後、25年後

(5年後と同様の内容であるため省略)

2.3 「技術」に関して

「技術」について、さらに「施工」、「設計」、「オートメーション化」、「プレキャスト化」、「外ケーブル・複合構造」に細別した集計を図-6に示す。

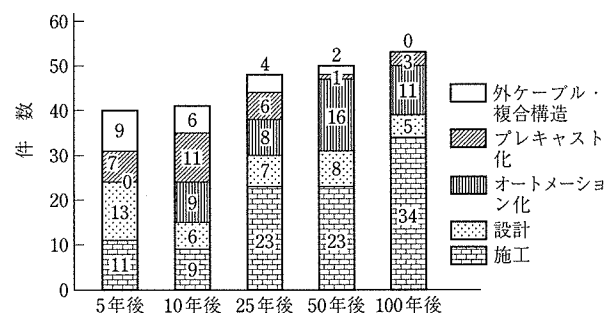


図-6 技術の分類

(1) 「施工」に関して

2010年までの予想は、現在直面している問題に対する解決案が多い。2010年以降は、橋梁以外の構造物（海洋構造

物、地下構造物等)への展開を予想する回答が多い。2025年以降は軽量高強度コンクリートを適用した長大橋の実現予想が多い。2050年以降は、宇宙空間へのPC技術の適用を予想する回答が急増する。「施工」の内容に関する回答数を図-7に示す。

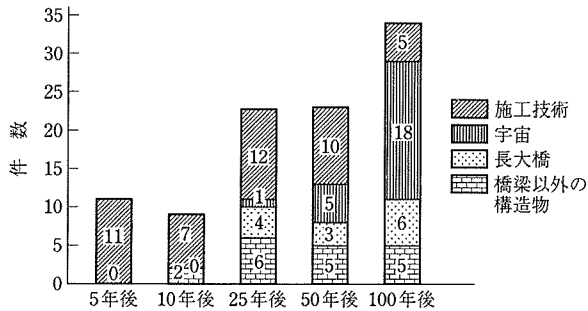


図-7 施工の分類

施工に関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 5年後

- ・ 結束線やクリップに代わり、溶接並みの強度が得られる鉄筋の結束接合方法の開発
- ・ 磁気を利用した鉄筋の結束接合方法の開発
- ・ 航空機を用いた桁の運搬および架設
- ・ 緊張ジャッキとポンプの統一(定着工法に無関係)
- ・ 緊張ジャッキの軽量化

② 10年後

- ・ 緊張用油圧ジャッキと油圧ポンプの小型軽量一体化
- ・ 環境保護面から軽薄PC板による埋設型枠の普及
- ・ PC大型核シェルターの普及

③ 25年後

- ・ 躯体表面塗装剤によるコンクリート表面劣化防止技術の確立
- ・ PCメガフロート(浮体式空港)の実用化

④ 50年後

- ・ 水密性コンクリートによるPC船の実用化

⑤ 100年後

- ・ 超軽量高強度コンクリートを適用した支間2000mのPC橋梁が、高層ビルを支点として架設され、都市部を二重三重の高速網で整備
- ・ 宇宙空間での無重力施工の技術を流用し、地球上で無重力空間を作り出すことに成功(PC橋の運搬架設が非常に容易となる)
- ・ 月面上にPCドームを建設(3000人規模の住居)
- ・ PC原子力発電施設を宇宙空間に建設
- ・ 脚光を浴びる低重力空間でのグラウンドアンカー技術
- ・ 地球崩壊のリスクに備えPC人工星計画の開始

(2) 「設計」に関して

2005年までにJIS桁や標準設計の見直しが行われる予想が多い。2025年以降は設計手法や解析技術の進化に伴い、設計自体のあり方も変化していくと予想している。「設計」の内容に関する回答数を図-8に示す。

設計に関する特徴的な回答を以下に列記する。

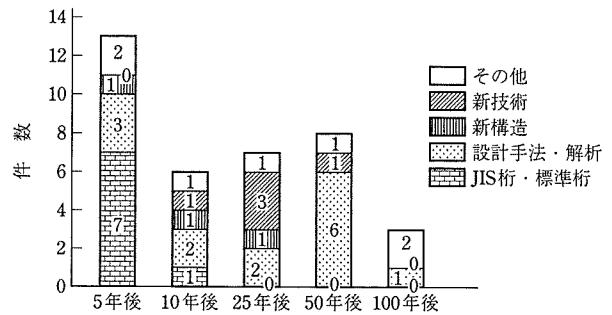


図-8 設計の分類

① 5年後

- ・ プレテンション方式PRC桁の標準化
- ・ PC橋脚の標準化
- ・ 限界状態設計法と性能照査型設計の普及
- ・ ダンパー機能を有する伸縮継手を開発し、耐震・免震性能が向上

② 10年後

- ・ PC鋼材の高強度細径化と定着具の小型化に伴う設計構造細目の変更
- ・ 内外ケーブルの合理的な使い分け手法の確立

③ 25年後

- ・ 解析技術が進歩し、現在の鋼橋並みのレベルでの解析が可能となり、終局状態のPC橋の挙動を正確に把握することが可能となり、より経済的なPC橋を製作することが可能

④ 50年後

- ・ 解析技術の進歩により道路橋示方書等は不要となり、すべて独自に解析・設計を実施
- ・ コンクリート材料および緊張材や鋼材の変化に適合した新しい構造形式の発案
- ・ 定着具が不要のポストテンション方式の考案
- ・ 落橋防止装置がなくとも落橋しない構造の考案
- ・ PC船の標準設計が完成

⑤ 100年後

- ・ かなりの精度で地震の予知が可能となり、それに伴い免震、耐震、制震技術が向上し、技術として確立
- ・ 車両走行音の無音化技術の開発(住宅地に近接して橋梁が建設される)

(3) 「オートメーション化」に関して

5年後に実用化される予想はまったくないが、10年後に現場での緊張作業や測量など一部の工程についてオートメーション化が行われ、25年後には工場でのオートメーション化が開始され、50年後には工場は完全オートメーション化が達成される予想である。また、100年後には現場でも完全ロボット施工を実現し、災害・事故を撲滅する予想である。「オートメーション化」の内容に関する回答数を図-9に示す。

オートメーション化に関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 10年後

- ・ 緊張ジャッキとポンプをコンピュータで制御し、緊張および定着の作業と管理を自動化

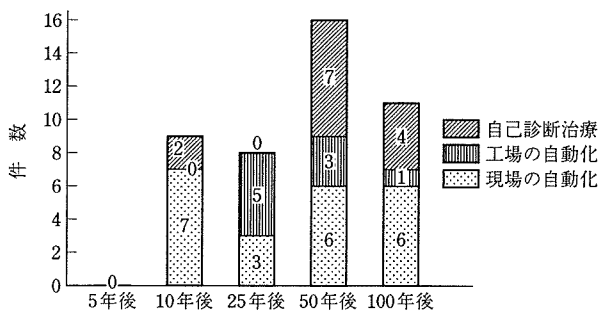


図-9 オートメーション化の分類

・センサー技術や通信技術を利用して、PC構造物の状況を集中管理センターで常時監視するシステムの構築

② 25年後

・工場のオートメーション化の開始

③ 50年後

- ・工場の完全オートメーション化が達成され、工場での災害事故が皆無
- ・損傷を受けた場合、自ら判断して治療するPC構造物の登場
- ・現場も多数の工程にロボットが投入され、省人化が一気に進行
- ・塩害、凍害、中性化、アルカリ骨材反応などの劣化を常時モニターし、さらに導入プレストレスや鉄筋応力等も測定し、電気防食の制御など、ある程度の劣化対処処置を自動的に行う技術の確立

④ 100年後

- ・完全ロボット化施工が可能となり、災害・事故がPC業界で撲滅
- ・アクティブプレストレス技術の確立（過積載車両や地震荷重などの荷重に対応して瞬時にプレストレス量を制御することが可能となり、より経済的なPC構造物を製作することができ、応力変動を減少させることにより、疲労が低減でき、より高耐久な構造となる）

(4) 「プレキャスト化」に関して

現在進化中であるプレキャスト化技術は、最終的には全プレキャスト化へと発展すると予想している。2025年には、PC構造物の全プレキャスト化をほぼ達成し、その後は全プレキャスト化技術の適用拡大が行われると予想している。「プレキャスト化」の内容に関する回答数を図-10に示す。

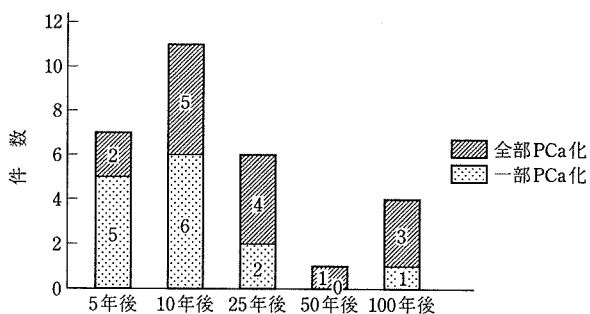


図-10 プレキャスト化の分類

プレキャスト化に関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 10年後

- ・ほとんどの構造物が全プレキャスト化で施工
- ・多主版桁橋のプレキャスト化が普及

② 25年後

- ・規格化された数種類のユニットをおもちゃのブロックのように組み合わせて構造物を施工する「規格プレキャスト工法」の普及

③ 50年後

- ・プレキャストPC一戸建て住宅が流行

(5) 「外ケーブル・複合構造」に関して

20世紀終盤に考案された全外ケーブル構造や波形鋼板ウェブ構造ならびに合成トラス構造等の複合構造形式の橋梁は、2025年まで多数施工されると予想している。2050年以降は、構造革新やデザイン思想の変化が予想されるものの、具体的な新構造形式の予想はなかった。これは若手技術者たちが柔軟に新構造や新素材を取り入れ、プレストレスング技術を活用する意向を反映したと思われる。「外ケーブル・複合構造」の内容に関する回答数を図-11に示す。

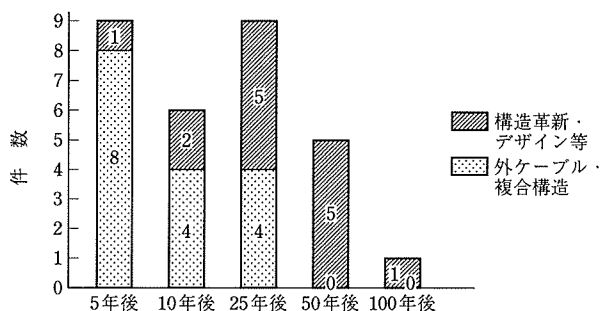


図-11 外ケーブル・複合構造の分類

外ケーブル・複合構造に関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 5年後

- ・小規模複合構造橋梁が規格化され、多数の橋梁を施工

② 10年後

- ・FRPコンクリート複合構造を開発
- ・新素材や新材料に適合した、新たな構造形式の提案

③ 50年後

- ・構造革新が起こり、より景観性に優れた構造が一般化
- ・幾何学的デザインの複合構造の提案多数

2.4 「環境・景観」に関して

環境については、とくに再利用に関する回答が多い。PC構造物は一般に高強度コンクリートを使用するため、良質の骨材を必要とする。そのため、撤去解体されたPC構造物の再利用に関する回答が大部分である。

景観についての回答は少数であり、若手技術者たちの関心が低いと思われる。

「環境・景観」の内容に関する回答数を図-12に示す。

環境・景観に関する特徴的な回答を以下に列記する。

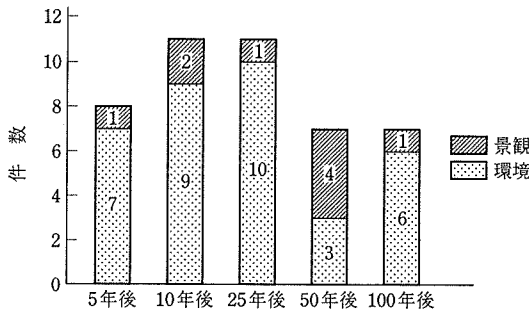


図-12 環境・景観の分類

① 5年後

- PC枕木をリサイクルした再生骨材コンクリートをPC橋に利用
- 産業廃棄物を利用した円筒型枠の実用化
- 設計, 施工, 維持管理, 撤去, 再利用までの一貫したシナリオデザインの構築を実現

② 10年後

- コンクリート構造物を溶解する技術が開発され, 溶解した材料を再利用
- 表面処理技術が発達 (コンクリートとは思えない外見を有するようになる)
- 粉碎ゴミを高密度集積加工して, 枯渇した骨材の代替品として利用

③ 25年後

- すべてリサイクル材を使用したPC橋の実現

④ 50年後

- 自在な着色が可能となり, 「彩り鮮やかPC橋」が実現

⑤ 100年後

- 活荷重による橋梁の振動や支承および伸縮装置に作用する活荷重衝撃を電気エネルギーに変換する技術の確立
- 二酸化炭素を炭素と酸素に分解する機能をもったコンクリートの開発

2.5 「維持管理」に関して

今後, 維持管理分野については業務が拡大し, 関心が高まるという予想が多かった。

維持管理に関する特徴的な回答を以下に列記する。

① 5年後

- PC橋の劣化予測技術が確立
- ライフサイクルコストを最小化するミニマムメンテナンス橋の実現
- 箱桁橋内部に維持管理用照明が必要となり, 新設橋はウェブに (廃ペットボトル等を再利用した透明な) 採光用部材の設置が義務化
- 将来の維持管理を想定した構造が多数考案され, 実用化

② 10年後

- 推進されてきたCALS/ECの効果が顕著化。既設構造物データベースを利用し, 補修時期の把握が容易となり, データベースで保管されている図面や設計図書を活用して, 効率的な維持管理が実現
- 多数のコンクリート診断士が活躍

③ 25年後

- コンクリートの劣化機構が解明され, 化学的補修方法が主流
- 劣化機構とその対策が解明され, PC構造物の100年補償技術はほぼ確立
- 非破壊検査手法が進歩し, PC橋の診断が本格化

④ 50年後

- 完全メンテナンスフリーPC橋が開発。設計耐用年数は1000年
- PC技術はもはや補修補強技術が主流

⑤ 100年後

- 計画の時点で想定した供用期間に関しては, 完全にメンテナンスフリーのPC構造物が実現可能になり, 施工した橋梁を半永久的に残すことが可能

3. おわりに

日本でのコンクリートの歴史は100年余である。コンクリート史に残る三大事件として, コンクリートの癌とも呼ばれたアルカリ骨材反応, 海砂の使用に端を発した塩害問題, メンテナンスフリーと信じられていたコンクリート構造物を蝕む中性化問題が挙げられる。これらの事件は100年余の歴史の中でも, 直近の四半世紀に発生した。

現在のコンクリートの施工は, プラント製造の生コンをミキサー車で運搬, ポンプ車で打設, バイブレーターで締め固める。コンクリート材料は, 早強セメントを用いて, 高性能AE減水剤を使用している。構造物の設計は, 高性能電子計算機を用いて複雑な計算や高度なシミュレーションに基づいて行われている。しかし, これらの機械・材料・技術は直近の四半世紀に開発・進歩したものである。

土砂や木材や石材などの非常に長い歴史を有する材料と比較すると, コンクリートの歴史は非常に短く, ある意味では開発 (発見) されて間もない材料で, その適用について試行錯誤を始めたばかりとも言える。

それにもまして, 日本でのプレストレストコンクリートの歴史は半世紀にも満たない。しかし, プレストレストコンクリートは歴史が短いと同時に, 将来の可能性は計り知れない潜在能力を有している。

最後に, 無限の可能性を秘めたPC技術について「夢と希望に満ちた未来予想」を数多く回答していただいた若手技術者の方々に深く厚く御礼申し上げる次第である。

【2000年11月6日受付】