

米国におけるシリカフェームコンクリートを使用した 駐車場構造物の新設・補修工事

深 山 清 六*
武 部 陽**

1. ま え が き

米国における駐車場構造物は、都市内外のオフィス、病院、学校、ショッピングセンター、各種球技場、空港、等の主要構造物に付属する建物として建造されてきている。特に、1950年代後半に入ってから都市交通手段の自家用車依存が高まるにつれて、都市内および近郊の車両収納能力に限界が生じてきた。そして、駐車場構造物が都市機能の上で重要な役割を果たすようになり、また、建造される駐車場構造物の規模も次第に大型化してきた。

このように、構造物が大型化してくると、経済性、構造性能、そして使用性等の観点からプレストレス構造に大きな利点がある。このことから、駐車場構造物にプレストレス（プレテンション、ポストテンション）力を導入したものが急速に増えてきた。それらの形式は、場所打ちポストテンション床版、プレキャストフレームと場所打ち床版の組合せ、ワッフル床版、ダブルT版、ホローコア版等が多岐に及んでいる。

しかしながら、1960年代初期から、積雪や凍結にみまわれる地域では、道路面上の積雪や凍結防止のために塩化カルシウムなどの塩分を路面に散布するようになった。この塩分は駐車場の入口部分を除いては直接散布されることは稀であり、雪や雨水中の塩分が車両によって駐車場に運び込まれる。道路面や橋梁面は降雨によって多少は洗い流されるが、直接雨水のかからない駐車場構造物内部ではほとんどその可能性はない。また、駐車場構造物は排水設備もそれらに比べると不備で、側面から吹き込む雨水が排水施設付近で、かえって塩分の濃縮を図ることになる。

元来、コンクリートは通常の環境下では強靱で耐久性に富んだ半永久的な建設材料である。しかし、このような環境下では、表面に散布された塩分がコンクリート内に徐々に浸透し蓄積される。コンクリートに埋設された鋼材は少量の塩分（鋼材位置で $0.6 \sim 0.95 \text{ kg/m}^3$ ）⁵⁾ 存在下でも腐食が始まると言われることから、予め十分な

考慮を必要とすることは現在ではすでに周知のことである。しかしながら、15年から30年程度経過した構造物には鋼材の腐食に伴うコンクリートの劣化、剝離、クラック等が生じ、最終的に構造物の崩壊につながるようなケースもあり、切実な社会問題にまでなっている。

このような塩害を受けるような状況下の構造物にシリカフェームコンクリートは非常に有効である。ここで、シリカフェームコンクリートを使用した駐車場構造物の補修・新設工事の概要を記すものである。

2. シリカフェームの概要

シリカフェームはシリコン・フェロシリコンあるいはその他シリコン合金の製造過程から出る副産物であり、非晶質の二酸化珪素 (SiO_2) を 85% 以上含有する超微粉末である。超微粉末の粒子の大きさはおよそ $0.1 \mu\text{m}$ であり、比表面積はおよそ $22 \text{ m}^2/\text{g}$ である。主要な化学成分は表-1に示す。

コンクリート混和材としてのシリカフェームは、通常、乾燥型と水スラリー型がある。乾燥型にはコンパクト型とアンコンパクト型とがある。写真-1と写真-2は米国で生産される乾燥型のシリカフェームであ

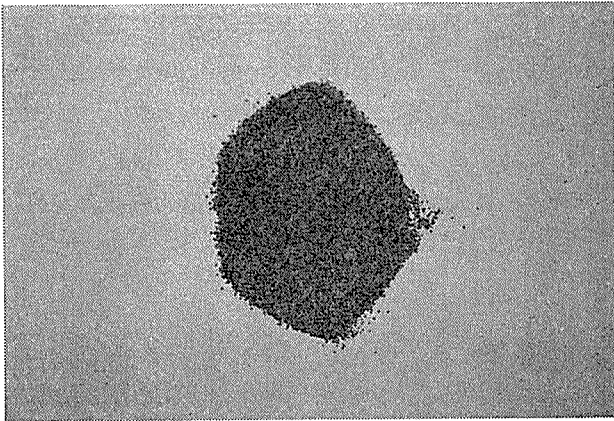
表-1 シリカフェーム品質

| 品 質 | 範 囲 (重量比) |
|-------------------------|-----------------------------------------------------|
| SiO_2 | 85% 以上 |
| C | 2% 以下 |
| Fe_2O_3 | 2% 以下 |
| Al_2O_3 | 2% 以下 |
| Na_2O | 1.5% 以下 |
| K_2O | 1.5% 以下 |
| MgO | 1.5% 以下 |
| S | 0.15% 以下 |
| Cl^{-1} | 0.15% 以下 |
| CaO | 0.65% 以下 |
| 強 熱 減 量 | 2.5% 以下 |
| 含 水 量 | 0.5% 以下 |
| 比 表 面 積 | $2.1 \sim 2.3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{gram}$ |

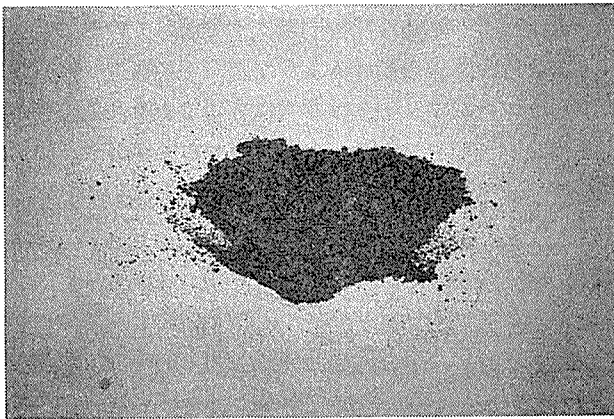
* ピーシー橋梁（株）技術部技術部長

** ピーシー橋梁（株）技術部技術開発課課長

* ノーセムコンクリートプロダクツ社材料分析表参照



写真—1 コンパクト型シリカフェーム



写真—2 アンコンパクト型シリカフェーム

る。アンコンパクト型シリカフェーム（単位重量 190～240 kg/m³）が原型であるが、ハンドリングおよび粉塵に問題がある。コンパクト型（560～640 kg/m³）は原型の持つ効果を保ちつつ、ハンドリングや粉塵の問題を解消した現在最も進んだ形体である。水スラリーは重量比で 50% 程度の水分を含むシリカフェームで、粉塵の問題は解消している。しかし、シリカフェームが水と反応してゲルを形成するため保存方法に問題があり、取扱いが困難である。また、コンクリート練混ぜ水の一部として考慮する必要があり、適切なワーカビリティを得るために余分な配合水を必要とする場合がある。

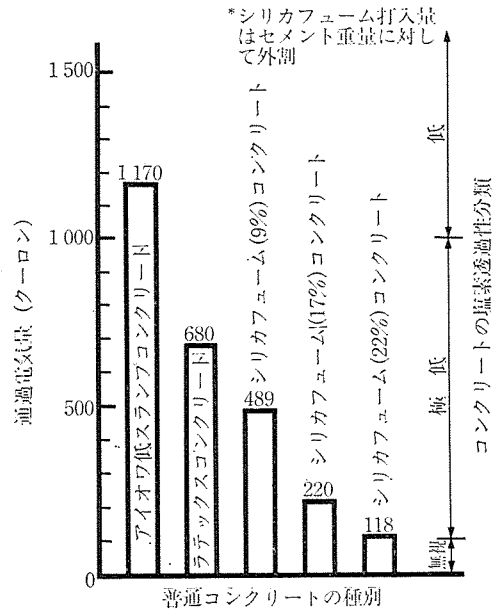
シリカフェームがコンクリートに与える影響については種々の文献があり、それを概略すると、1) 超微粉末であるシリカフェームがセメントペーストの隙間を埋める充填効果と遊離石灰との間のポズラン反応効果とがある。2) ポズラン反応により生じる C-S-H（カルシウムシリケートハイドレート）がセメントペーストと骨材との隙間を埋める働きをする。3) シリカフェームのこれらの効果により、コンクリートが均一かつ大きな遊離石灰結晶のない非常に密実なマイクロ構造を有す耐浸透性コンクリートを形成すること、などがある。

米国にはコンクリートの耐浸透性を計測する方法のひ

表—2 急速塩素透過試験による透過性分類

| 通過電気量 (クーロン) | 塩化物浸透性 | コンクリートの種類 |
|--------------|--------|-------------------------------------------|
| 4 000 | 高 | 高水セメント比 (>0.6) 通常のポルトランドセメントコンクリート |
| 2 000～4 000 | 中 | 普通水セメント比 (0.4～0.5) 通常のポルトランドセメントコンクリート |
| 1 000～2 000 | 低 | 低水セメント比 (<0.4) 通常のポルトランドセメントコンクリート |
| 100～1 000 | 極低 | ラテックスモディファイドコンクリート 内面的に密封されたコンクリート |
| 100 | 無視 | ポリマー含浸コンクリート ポリマーコンクリート |

* AASHTO T 277



図—1 急速塩素透過試験比較¹²⁾

とつとして、急速塩素透過法である AASHTO T 277 テスト法がある。本試験法は直径 10 cm、厚さ 5 cm の試験体に交流 60 V の電圧をかけ 6 時間の透過電気量クーロンを測定するものである。しかし、最終クーロン量には 12 種以上のパラメーターが関与するため、確実に再現可能なテスト測定はほとんど不可能に近い。そこで、表—2 に示すような塩素透過に関するカテゴリーを設けて対応している。

各種コンクリートの本試験方法による実験結果が図—1 と 図—2 に示してある。実験でのシリカフェーム投入量はセメント量に対して外割（例：外割 20% とはセメント 100 kg に対してシリカフェーム 20 kg）である。本実験結果が示すように、塩素イオンに対するシリカフェームコンクリートの耐浸透性の高さがわかる。図—3 は各種コンクリートの交流電気抵抗値を示したもので、通常、抵抗値が 60 kΩ・cm⁹⁾ 以上あれば塩素イオンに侵されたコンクリートであっても、埋設された鉄筋の腐食は起こらないといわれている。

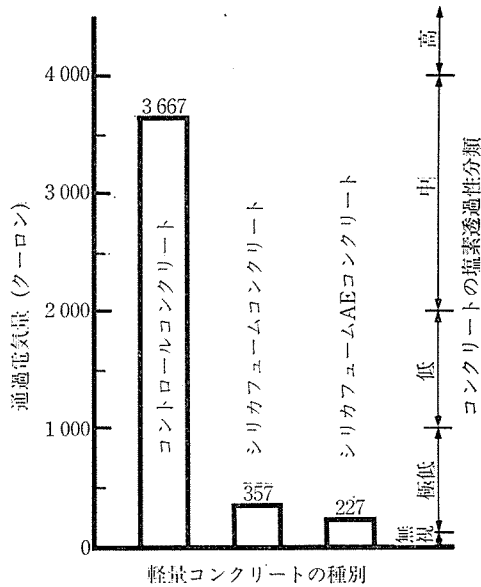


図-2 急速塩素透過試験比較¹²⁾

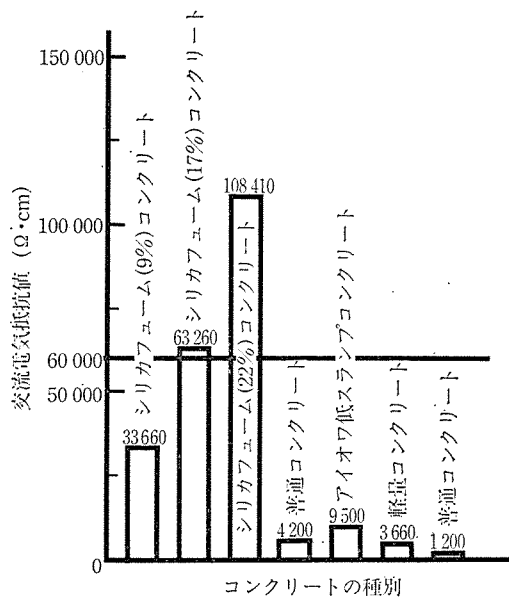


図-3 交流電気抵抗値¹²⁾

3. 補修工事

凍結防止のため塩を使用する地域の駐車場構造物は、塩分による鋼材腐食がはなはだしい。ここ数年の ACI その他の刊行物を見ても、駐車場構造物の補修工事に関する記事やそれに関する記事の投稿がよく目につく。

シリカフェュームコンクリートを使用した補修工事の代表例を下記に示す。

- 1) Post-tensioned parking deck structure repair for Germantown Saving Bank Parking Garage : ペンシルバニア州フィラデルフィア
- 2) Post-tensioned parking deck structure : マサチューセッツ州フランシス

3) Post-tension parking waffle slab repair for River Front Stadium Parking Garage : オハイオ州シンシナチ

4) Post-tensioned parking deck structure repair for University of Cincinnati Parking Garage : オハイオ州シンシナチ

補修面積は工事例-1 で 2800 m², 工事例-2 で 3070 m², 工事例-3 については構造物全体の劣化が激しいためコンサルタントによって各種の補修工法・補修材料を使用して比較検討が行われている。近い将来、公の場とその結果が発表されるであろう。

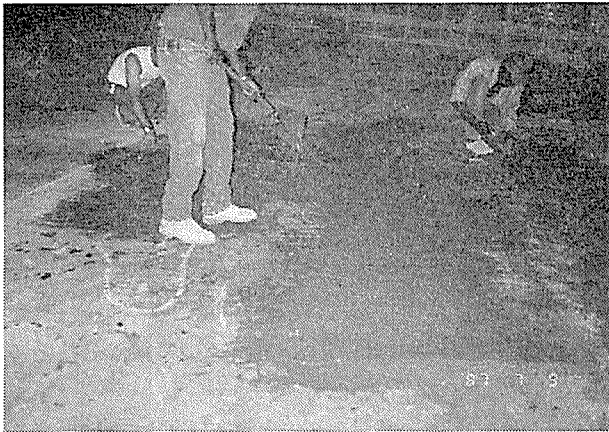
さて、ここに例をあげるオハイオ州シンシナチにある University of Cincinnati の駐車場は築 10 数年の場所打ちポストテンション床版であるが、伸縮継手付近や床版のところどころに異常が認められ、補修が必要となった。まず、補修箇所のマッピングを行い悪化したコンクリートを取り除く作業があるが、PC 鋼材があるため簡単な作業ではない。そのため補修時の PC 鋼材損傷を避けるために補修前の予備調査として PC 鋼材位置の探査が成された。除去されたコンクリートは 5~8 cm 厚程度で、その後サンドブラストにより鋼材および付近の劣



写真-3 劣化コンクリート除去



写真-4 エポキシ系ボンド剤塗布



写真—5 シリカフェームコンクリート打設

化したコンクリートを清掃し、エポキシ系のボンド材をコンクリート打設直前に既存コンクリート面および鋼材に塗布し、シリカフェームコンクリートを打設した。コンクリートの養生は濡れた養生マットとプラスチックラップで行った。

使用したコンクリートのセメント量は 445 kg/m^3 、シリカフェームは外割 20% で $W/C+S$ は 0.35、スランブは 20 cm であった。一箇所当りの補修面積は $0.3 \sim 2 \text{ m}^2$ 程度で合計約 600 m^2 の補修が行われた。写真—3～5 に施工状況を示す。

4. 新設工事

一般に、新規に駐車場構造物を建造する場合、次の項目について設計段階で考慮している。

- 1) 特殊な構造的特徴
- 2) 質量の変化
- 3) 耐久性
- 4) クラックの発生
- 5) ジョイントおよびジョイントシーラー
- 6) 表面水のコントロール
- 7) 特殊荷重および使用性

個々の内容については ACI 362 R-85 を参照していた。ここでは、特に耐久性の問題について取り上げる。

凍結防止用塩分を使用するような過酷な環境が予測される地域では、強度のみではなく、現在使用中の構造物の状況を考慮して耐久性が非常に重要視される。参考文献 5) にシリカフェームコンクリートを構造物に使用した場合としない場合の、構造物の寿命を考慮した米国における経済比較が記述されている。

コンクリート構造物の耐久性（特に、塩害に対して）にとって良質なコンクリートを使用することが、最も大切である。米国においては ACI 318 と ACI 357 に通

常の状態について規定されている。主な項目は水セメント比 0.4 以下、鋼材のかぶり、空気量、締固め、仕上げ、養生そして継手などである。日本国内にも同様な記述がある。ACI の記述は通常のコンクリートについてのものであり、塩害を受けるような厳しい環境下のコンクリートについては、構造物の生涯寿命と既存構造物の被害状況も考慮して検討する必要がある。

表—2 の AASHTO の区分によると、コンクリートの透過電気量が 1000 クーロン以下であれば、コンクリートの塩素透過性は大変低いとされている。言い換えれば、透過電気量 1000 クーロン以下のコンクリートをつくれば塩害による鋼材腐食は急速に抑えることが可能である。

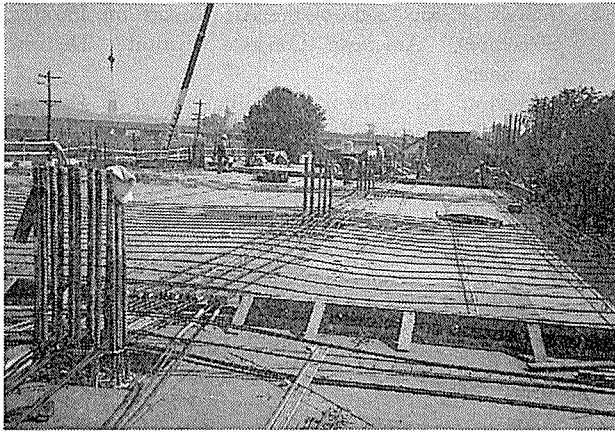
そこで注目をされたのが、シリカフェームコンクリートである。シリカフェームを目標クーロン数によりセメント量の外割で 7% から 20% 程度加えることで、容易に目標値が達成可能であるからである。

ミズーリー州のKansas City International Airport Parking Garage は、米国で初めてこの急速塩素透過試験結果がジョブスペックの中に規定された工事で、工事の規模は延べ面積にして 60400 m^2 、シリカフェームコンクリート量 9200 m^3 である。スペックの規定ではクーロン平均の最大値が 600 クーロン以下で、採取サンプル内に 700 クーロン以上があってはならないとされ、厳しい材料および施工管理のもとで施工された。

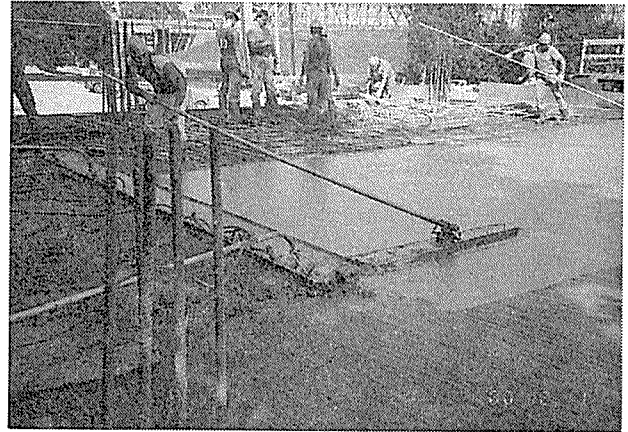
ここで採用されたコンクリートのセメント量は 390 kg/m^3 、シリカフェーム量は 42 kg/m^3 で、セメントの約 10.5% であった。百数十のデータ採取の結果、急速塩素透過試験結果の平均値はおよそ 300 クーロンであった。また、コンクリートの圧縮強度は 27.3 MPa (2 日) 43.1 MPa (7 日)、49.4 MPa (28 日) であった。

この工事の良好な結果に基づき、同様のスペックが Cincinnati International Airport Delta Parking Deck 工事においても採用され、現在施工が進められている。そのほか、特に、急速塩素透過試験規定はスペックにないが、同様の目的でシリカフェームコンクリートを採用した例として、以下に示す駐車場構造物がある。

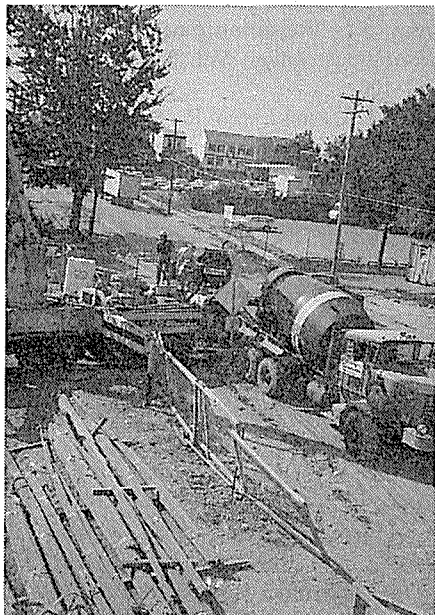
- 1) St. Gregory Street, Mt. Adams Parking Garage : オハイオ州シンシナチ
プロジェクトサイズ : 4100 m^2
シリカフェームコンクリート量 : 1000 m^3
シリカフェーム投入量 : セメント量の 9%
設計基準強度 : 35 MPa (56 日)
現場強度 : 29 MPa (2 日)
35 MPa (7 日)



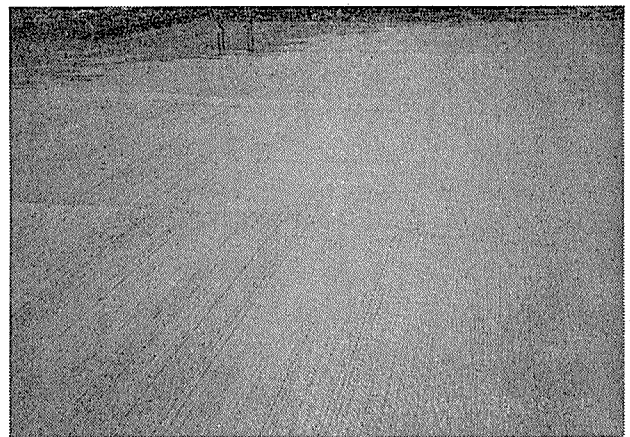
写真—6 PC 鋼材配置状況



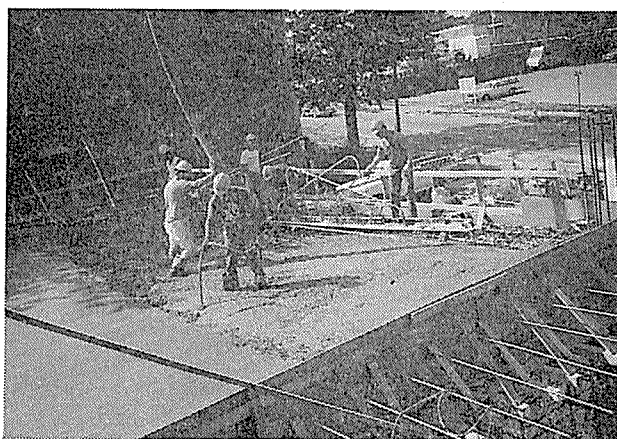
写真—9 コンクリート表面仕上げ状況



写真—7 シリカフェームコンクリート到着



写真—10 コンクリート打設完了



写真—8 コンクリート打設状況

59 MPa (28 日)

現場電気量データ：RCP-425 クーロン

2) Mulach Parking System：ニュージャージー州
ニューバーンズウィク



写真—11 養生状況

シリカフェームコンクリート量：600 m³

シリカフェーム投入量：セメント量の 13%

現場強度：30 MPa (24 時間)

47 MPa (7 日)

3) LaGuardia Hospital Parking Garage：ニュー
ヨーク州クイーンズ

4) etc.

写真—6 から 写真—11 は Newport Kentucky に建
設された、Riverfront Office & Parking Garage のシ

リカフュームコンクリート打設状況である。総延べ面積は 10 000 m²、シリカフュームコンクリート量は 2 300 m³であった。

ここにあげた駐車場構造物は、すべてプレストレスト構造を有するもので、シリカフュームコンクリートの使用目的は凍結防止用塩から埋設鋼材の腐食を保護するためである。

5. ま と め

ここで記載したシリカフュームコンクリートを用いた構造物の施工は、日本国内においては比較的事例が少ない。しかし、長い海岸線を持つ日本で、港湾構造物や海岸線付近の橋梁等の塩害を受ける可能性がある構造物の塩害対策の一つとして、シリカフュームコンクリートの適用について積極的に研究する必要があると考える。また、コンクリート構造物はやはり良質のコンクリートを良い施工技術のもとで施工することが原則であり、ここで紹介したシリカフュームコンクリートについても、効果を最大に引き出すには、この原則は同様である。

我が国においてもシリカフュームコンクリートの研究は進められているが、著者の知る範囲ではセメントの代替材料として、セメントの内割（例：内割 20% とはセメント量 80 kg に対してシリカフューム 20 kg）で添加した研究や高強度コンクリートが主流であるようで、耐久性コンクリートとしての研究は、セメント代替材料として内割添加した場合のものについてはあるが、外割添加でのものはないようである。今後、この分野の研究が進められることを期待する。

最後に、技術資料を提供して頂いた Wolsiefer 氏に深く感謝するものである。

参 考 文 献

- 1) ACI Committee 226, "Silica Fume in Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 2, March-April, 1987, pp. 158-166.
- 2) ACI 362 R-85, "State-of-the-Art Report on Parking Structures," American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- 3) Surendra, K. Ojha: "Rehabilitation of a Parking Garage," Concrete International: Design and Construction, Vol. 7, No. 12, April 1986, pp. 24-28.
- 4) Holland, T.C.: "Working with Silica Fume in Ready-Mixed Concrete...U.S.A. Experience," Proceedings, Third CANMET/ACI International Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, June, 1989, ACI SP-114, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, Vol. 2, pp. 763-781.
- 5) Berke, N.S., Pfeifer, D.W., and Weil, T.G.: "Protection Against Chloride-Induced Corrosion," Concrete International: Design and Construction, Vol. 10, No. 12, December 1988, pp. 45-55.
- 6) Bhuyan, S.: "Repairing concrete parking structures," Concrete Construction, Vol. 33, No. 2, February 1988, pp. 97-106.
- 7) Bickley, J.A., and Liscio, R.: "Repair and Protection Systems for Parking Structures," Concrete International: Design and Construction Vol. 10, No. 4, April 1988, pp. 21-28.
- 8) Whiting, D.: "Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete," Report No. FHWA/RD-81-119, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1981.
- 9) Zoob, A.B., LeClaire, P.J., and Pfeifer, D.W.: "Corrosion Protection Tests on Reinforced Concrete Containing Corrochem Silica Fume Admixture for Norcem Concrete Products, Inc.," Report No. WJE 840379, Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook, Illinois, August 1985.
- 10) Pfeifer, D.W., and Scali, M.J.: "Concrete Sealers for Protection of Bridge Structures," NCHRP Report No. 244, Transportation Research Board, Washington, D. C., 1981.
- 11) "POST-TENSIONING MANUAL," FOURTH EDITION, Post-tensioning Institute, Phoenix, Arizona, 1987.
- 12) "CORROCEM-PARKING DECK BULLETIN," NORCEM CONCRETE PRODUCTS, INC., Private Publication.

【1989年7月19日受付】