

コンクリートの凝結・硬化・乾燥による 収縮とキレツに関する諸研究の総合 (特に鉄筋コンクリート建築物の場合)

昭和32年7月

浜 田

稔

目 次 1 序

2 セメントペーストの収縮

3 コンクリートの沈みキレツ

4 硬化乾燥キレツの実例

5 コンクリートの硬化乾燥収縮

6 コンクリートの硬化乾燥キレツの機構

7 コンクリートの硬化乾燥キレツの防止問題

8 結 論

1 序 コンクリートの硬化・乾燥によるキレツ防止は今なお判然としない困った問題である。これが防止できないのに、凝結初期に生ずる沈みキレツなる新種のキレツが戦後問題とされ始めたが、これは硬化乾燥キレツより一足先きに一応の防止方法が得られた。本文はこれらを通じて過去の諸研究を集めて紹介し、合せてキレツ防止の各種の着想を分類的に述べ研究の一助とする。

2 セメントペーストの収縮 まずセメントペーストの凝結から硬化を通じての容積変化を説明する。

(1) セメントが水と反応するとき生ずる生成物の絶対容積は各成分の絶対容積の和よりも小さい。つまり収縮する。中条⁽¹⁾はゴムサックにセメントペーストを封じ水中に吊して浮力の経時変化を測りこの収縮を示す実験をして、容積収縮率は漸増4日で 400×10^{-4} 前後に及ぶことを知った。

セメントの鉱物組成と収縮との関係はGonne mann⁽²⁾以来研究され、中条⁽¹⁾によると、28日長さ収縮率(10^{-4}) $= 0.25C_3S + 0.16C_2S + 1.03C_3A + 0.28C_4AF$ 。即ち C_3A の影響が最大。

- (2) 水中での凝結のように過剰に水があると、一時膨脹することがある。これは結晶が互に挤出するためである。しかしこの膨脹は概して小で問題とならない。
- (3) 粉末度は細かいほど収縮が大きく⁽³⁾、拘束乾燥時のキレツ発生が早い。⁽⁴⁾
- (4) 硬化・乾燥時には何れも収縮する。⁽⁵⁾これは主に物理的結合水の蒸発によるゲルの収縮である。かくて凝結中の収縮と硬化乾燥後の収縮とは別に扱われる。

3 コンクリートの沈みキレツ

- (1) セメントの凝結時の容積変化はフローし易いからキレツに到らぬことが普通である。しかし軟練コンクリートの沈降は下に示すように沈みキレツの原因となる。
- (2) 軟練コンクリートの沈降については吉田彌七・中条鉄エ・田中一彦等多くの研究⁽⁵⁾がある。
- (3) 凝結中のコンクリートが水平筋（時に粗骨材によっても）で沈降を妨げられると、その水平筋の直上に筋にそってキレツを生ずる。これが沈みキレツであり、凝結が沈降に比し時間的に早く、また沈降が大きいほどキレツは顕著である。これは田中の研究等を経て、昭和29年秋から30年夏にかけて東大浜田研究室・東京都建築材料検査所・日本セメント技術協会の協力で4季各20現場（鉄筋コンクリート建築物）についての詳細な現場調査が行われた、⁽⁷⁾その結果約半数の現場に沈みキレツを認めセメントについては異状凝結・凝結始発の早いもの等、気象については夏季・風の吹きさらし等の場合にキレツ発生率が高い。その他軟練・振動機過度使用・打込速度の過早・表面活性剤・ポゾラン・ワーカビリティ極良のコンクリート・軽量コンクリート・レディミクストコンクリート等も沈みキレツを発生しやすいことが諸実験で知られておる。
- (4) 沈みキレツの原因は前項のように多種多様であり、中には他の目的でコンクリート技術上優れているものもキレツには悪いということもあり、その事前の防止法は困難である。
- (5) しかしこのキレツはコンクリート打込後45分以内に殆んど発生し終るし、その時期にはコンクリートはまだ固っていないから、打込後1時間頃に表面を再叩又は再仕上することによりキレツを簡単に消し得るし、これで再発の心配はない。これを施工の慣例とするのがよい。⁽⁷⁾

4 硬化乾燥キレツの実例

- (1) 硬化乾燥キレツの実例調査は東大工学部建築・土木の建物(1号館)を浜田・大野⁽⁸⁾等が調査したのが最初である。打込後約2ケ年、仕上前に行ったもの。続いて国立博物館⁽⁹⁾の工事について調査した。其後北海道における大野調査⁽¹⁰⁾・東京における角田⁽¹¹⁾・岩間⁽¹²⁾・永井調査等がある。重なる結果を総合すると、
- (2) 床版：桁行に直角に各パネルに殆んど例外なしにキレツがある。巾は0.1~0.3mmの多いが。打継部は2mmにも達する。
- 壁：これも殆んど各パネルにキレツを生ずる。縦または斜が多い。窓の隅や下端は特に多い。下階ほど多いが、最上階は温度応力のキレツが別に現われる。

5 コンクリートの硬化乾燥収縮

- (1) 硬化乾燥時に、コンクリート中のペーストは最も著しく収縮する。 $(16 \times 10^{-4}$ 程度)。骨材の収縮率は 2×10^{-4} 程度。この結果乾燥が進むと骨材圧縮応力度、ペーストは引張応力度を受けながら、全体として収縮する。大野⁽¹³⁾はこのような考え方からコンクリートの自由収縮率の計算式を導いた。

この自由収縮率は、ペーストに比し骨材が多いほど小さくなるが、養生について長期養生しても単に終局の時期がおくれるだけで、自由収縮率が殆んど同じであることは注目に値する。AEコンクリートは普通コンクリートと殆んど同じである。

かくてコンクリートの自由収縮率の実験値は、普通の調査で下の程度となる。

$$\text{硬練 } (3 \sim 4) \times 10^{-4} \quad , \quad \text{軟練 } (4 \sim 5) \times 10^{-3}$$

6 コンクリートの硬化乾燥キレツの機構

- (1) 拘束コンクリートの硬化乾燥キレツは次式による α が正の場合に生ずると考えてよい。

$$\alpha = \text{コンクリートの自由収縮率 } (\varepsilon_1) - \text{コンクリートの引張クリープ } (\varepsilon_2) \\ - \text{コンクリートの引張破断時の伸率 } (\varepsilon_3) - \text{拘束弛緩率 } (\varepsilon_4)$$

このうち ε_4 は一応0と考えると、 $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3$ の値がキレツを左右することになる。そして ε_1 と ε_3 とは今日相当の実験値があるが、 ε_2 については不詳である。

- (2) $\varepsilon_4 \div 0$ なる状態でコンクリート収縮キレツの試験をするには、矩形外割をもった鋼製枠の短辺両内側に多数のボルトを出したものの中へコンクリートを打込んで両端

固定とするか、鋼製円盤の外周囲にコンクリートを輪状に打込んで硬化乾燥させる。

- (3) 大野⁽¹³⁾によると普通コンクリートでは同じ寸法の試験体の自由収縮率が大体 4×10^{-4} の時期に拘束試験体は乾燥キレツを生ずる。狩野⁽¹⁴⁾によると $\varepsilon_3 = (1 \sim 1.5) \times 10^{-4}$ 程度であるから、いま $\varepsilon_3 = 1.5 \times 10^{-4}$ とすると上式から $0 = 4 \times 10^{-4} - \varepsilon_2 - 1.5 \times 10^{-4}$ $\therefore \varepsilon_2 = 2.5 \times 10^{-4}$ と逆算される。

- (4) 普通の軟練コンクリートで $\varepsilon_1 = 5 \times 10^{-3}$, $\varepsilon_2 = 2.5 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_3 = 1.5 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_4 = 0$ とすると、上式で $\alpha = 1 \times 10^{-4} > 0$ となり、キレツは必至ということになる。このように軟練コンクリートは必然的にキレツが生ずるという推論は、すでにこの推論式ができる前に、大野によって昭和の初めに実験的に証明された。

- (5) 例えば硬練のコンクリートで $\varepsilon_1 = 3 \times 10^{-3}$ とし、 $\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4$ は前項と同じとすると $\alpha = 1 \times 10^{-4} < 0$ となって、キレツの心配がない。

- (6) このようにコンクリートの硬化乾燥キレツは微妙であって、今日の建築の鉄筋コンクリートは殆んど全部キレツがあるというが、今日の慣習の場合に、 α が非常に大きいというなら別であるが、(4) のように $\alpha = 1 \times 10^{-4}$ で、もう少しの改善で $\alpha \leq 0$ になし得るように思えるところに、今日のキレツ防止の研究の焦点がある。

7 コンクリートの硬化乾燥キレツの防止問題

- (1) コンクリートの硬化乾燥キレツに対する鉄筋の影響は、大体小さいものと思われる。そこで、一応前提の式を基本としてこのキレツの防止方法を考える。それは ε_1 を減ずるか、 $\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4$ を増すかという点に解決のキーがある。いまこれを箇々に検討してみる。(特に鉄筋コンクリート建物について)。
- (2) 自由収縮率 (ε_1) の減少：軟度を減ずることはその一法、これには硬練又は中練コンクリートでの施工が可能にならねばならぬ。メタルフォームは従来の 19~22cm のスランプでなく 15cm でも建築施工が可能であるが、水分の逸散が木枠より少ないからどんな結果になるか？研究の価値がある。

日本のセメントは強度偏重主義から、粉末度高く高 CaO で何れも自由収縮率を大きくする傾向があるという。目下米国のセメント 10 種を輸入し比較試験をしている。

セメントペーストの収縮を少なくするために、硬化生成物を多少膨脹(収縮を幾分減ずる程度でよい)させる工夫が一つのキーである。欧米に膨脹セメントというのがある。種々の工夫⁽¹⁵⁾があり、硫酸石灰アルミナ塩の膨脹を利用する等がその一つである。

が、コスト高のため一部の實用にしかっていない。前掲の式からしてわかるように自由収縮率を20～30%減ずる程度の膨脹で一応十分であるから、いろいろな工夫があるだろう。浜田研究室では現在この研究を行っている⁽¹⁰⁾。

- (3) 引張クリープ (ϵ_2) の増加：“コンクリートのクリープは長期材令の方が著しい。

早強化した今日のセメントを昔と同じように養生するのではなく、養生を早く打切るようにすれば、クリープを増し得てキレッツが防げる”という普通とは逆説的なのが、大野の着想であっていろいろ裏付けの実験が行われている。これもある程度成功の見込みがある。浜田も前項の日米セメントキレッツ比較でこの点をも実験している。

- (4) 引張破断伸度 (ϵ_3) の増加：合成樹脂をコンクリートの中に分散させる等の着想がこの類である。

- (5) その他：

コンクリートを低温で施工し、硬化後乾燥収縮分を補うよう温度膨脹させるという夢のような工夫から、補強筋に引張の prestress を加えてコンクリートを打ち、乾燥収縮の応力を補償させるとか、その他構造的手法で目的を達せさせる工夫もある。

また異型鉄筋を要所に使って、キレッツを分散させる工夫は実際の建物について試験中である（浜田）。

8 結 論 鉄筋コンクリート（特に建築物）造の硬化乾燥キレッツは厄介な問題である。この防止研究の途上で新種のキレッツとして登場した沈みキレッツは一足先きに防止が再叩法で可能となった。

硬化乾燥キレッツは自由収縮・クリープ・引張破断時の伸等に関係があり、定量的には極く僅かな改善でよいように見えるが、これが確定されない現状である。自由収縮の減少・クリープまたは引張破断時の伸の増加等各種の工夫がある。

本文はこれらに関し従来の研究の概要を述べ、キレッツ防止の各種着想を分類して述べたものである。完成の日が待たれる。

文 献

- (1) 中条鎮エ：コンクリートのキレッツ防止，最新コンクリート技術，昭和29年
- (2) Gonnermaun：ASTM 1934, Part II
- (3) 中条鎮エ：セメント技術年報，1951

- (4) Brewer・Burrows: ACI, 1951
- (5) この実験例は極めて多く“最新コンクリート技術”“建築コンクリート技術”に多数の文献がでている。
- (6) 田中一彦: コンクリートのキレツ防止(硬化前), 最新コンクリート技術
- (7) 浜田稔・幸田太一等の研究 諸報告, 例えば最新コンクリート技術
- (8) 大野和男: 建築学会大会論文集, 昭和10年4月
- (9) 全上 昭和12年3月
- (10) 大野和男: 全日本建築技術協会講習会テキスト, 昭和30年3月
- (11) 角田栄: 建築技術, 昭和31年4月
- (12) 岩間正宅: " 昭和31年7月 8月
- (13) 大野和男: 北海道大学工学部研究報告第9号, 昭和28年12月
- (14) 狩野春一: 建築学会大会論文集, 昭和15年4月
- (15) 藤井光蔵: セメント工業の現状と諸問題, 建築コンクリート技術
- (16) この初期のものに, 田中一彦: 日本建築学会論文集, 昭和30年3月