

コンクリート工学 第13回

耐久性(2)

- ・中性化
- ・火害
- ・アルカリ骨材反応

途中と最後に、小テスト有り！！

【中性化(Frost damage)】

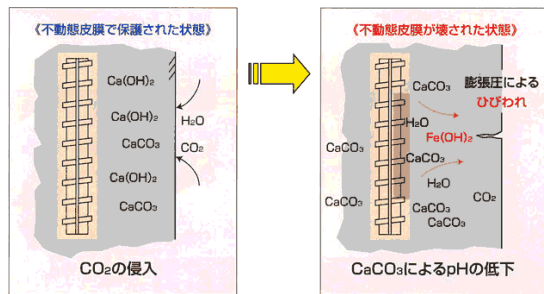
1.劣化事例



基礎コンクリートの中性化により鉄筋が腐食し、かぶり脱落

2. 中性化のメカニズム

中性化とは、セメント硬化体のアルカリ性が低下する現象

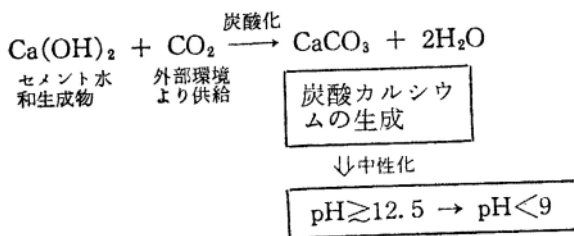


気中の炭酸ガス(二酸化炭素)が、水に溶解することで生成される炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)が、セメントの水和生成物であり、硬化体のアルカリを決定する水酸化カルシウムCa(OH)<sub>2</sub>と反応し、炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)が生成される。

この反応により、Ca(OH)<sub>2</sub>が消費され、コンクリートのpHが低下し、中性化が進行する。

炭酸ガスによる中性化は、コンクリート単体の耐久性を低下させないが、アルカリの損失により鉄筋周りの不動態皮膜が破壊され、鉄筋が発錆する(pH = 11以下)。

発錆が進行すると、膨張した鉄筋の膨張応力がコンクリートに伝達され、被りコンクリートのひびわれや、剥落を招きます。



3. 中性化を発生させる要因

3.1 材料

- (1) 水セメント比  
水セメント比が大きいと、中性化しやすい。
- (2) 混和材  
混和材の使用は、中性化しやすい。
- (3) コンクリートの乾燥具合  
コンクリートが著しく乾燥している場合は、中性化しにくい。

3.2 環境

- (1) 炭酸ガス濃度  
濃度が濃いほど、中性化しやすい。
- (2) 温度・湿度  
温度・湿度が高いほど、中性化しやすい。

4. 中性化の対策

4.1 配合

- (1) 水セメント比  
水セメント比を小さくする。
- (2) 混和材  
使用しない方が中性化速度を抑えられる。



密実なコンクリートとする。

4.2 被覆

- (1) かぶりを大きくしたり、気密性の吹付け材を施工する。
- (2) タイル、石張りなどの仕上げ施工をおこなう。

【火害(Fire damage)】

1.事例

表-2.2.1 我が国の交通トンネルにおける主な火災事故事例

No.	トンネル				火災				被害	
	場所	トンネル名	延長 (m)	発生年	火災種類、燃焼材料	原因	消火までの所要時間	死者数		被害車両
1	三重県鈴鹿市	鈴鹿トンネル	244.5	1967	270-4輪自動車 720kg-4輪自動車	コック	約11時間	死者2人、負傷者5人	7台/33台	18%の剥離
2	静岡県静岡市	日本坂トンネル	2,045	1973	合組機油、松機油	過失	7日間	死者7人、負傷者2人	188台	天井板の落下、掘工コックの剥離、1,120m区間
3	広島県加計町	横トンネル	459	1988	-	過失	-	死者5名、負傷者5人	11台	-
4	奈良県奈良市	水越トンネル	2,379	2008	電化2-3輪のバイク、おもちゃのバイク	内装に衝突	1時間40分	死者19人、負傷者19人	23台/37台	反白色化4m、亀甲剥きび割れアクリル4m
5	福井県敦賀市	北陸トンネル	13.8	1972	*	列車	食室	死者39人、負傷者174人	-	-
6	大阪府東大阪市	生駒トンネル	4,737	1987	ケーブル	高圧送電線	1時間	死者1人、負傷者49人	7台/9台	-

表-2.2.2 我が国の高架橋における主な火災事故事例

No.	構造物			火災				被害	
	場所	構造物名	寸法	発生年	火災物	原因	消火までの所要時間	死者	構造体・設備への被害
7	—	第1種町内高架橋	RC標準型高架橋	1972	ア13分製薬	作業場の火災	約25分	なし	スラブ下面の一部剥離、鉄筋露出など
8	神奈川県元町	元町高架橋	RC高架橋	1978	衣料品、家屋	たき火の不始末	1時間13分	なし	スラブ下面の剥離、鉄筋露出など
9	埼玉県和子	西浦和高架橋	RC高架橋	1980	古タイヤ約40万本	引越火災	約41時間	なし	スラブ下面の剥離、鉄筋露出、れ下がり、露出など

### 1.1 英仏海峡トンネル

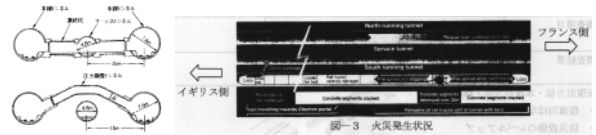


図-1 新地図

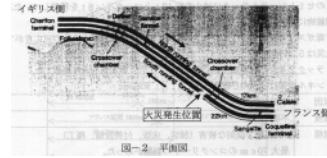


図-2 平面図

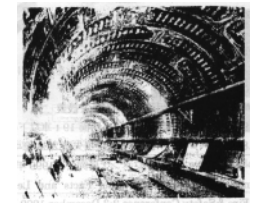


写真-1 損傷状況

### 1.1 英仏海峡トンネル

火災場所 : フランス側から18km地点  
 火災発生年 : 1996年11月18日 21:45  
 死傷者数 : 8名  
 火災車種・台数 : 貨物シャトル1編成

#### 出火状況:

- ・全長800mのシャトル列車が英国へ向かっていた。
- ・後ろから5両目の貨車から出火  
(トラック荷台のポリスチロールから出火と推定)
- ・走行していたため後部列車に急速に燃え広がった。
- ・車両5両と15台が全焼

火災温度:部分的に1000 以上

被害規模:500m区間コンクリートセグメントに亀裂・局所破壊  
 火源40m間は75%のセグメントで爆裂を起こし、鉄筋が露出。セグメント厚40cmの内、30cm剥離箇所もあった。

### 1.2 ゴットハルトトンネル



図-1 トンネル位置図

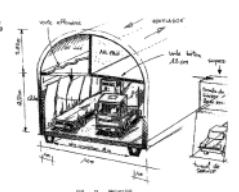


図-3 断面図

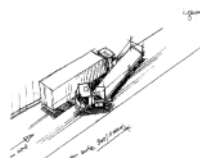


図-2 車両衝突状況



写真-1 火災状況

### 1.2 ゴットハルトトンネル



写真-2 損傷状況 (1) 写真-3 損傷状況 (2) 写真-4 損傷状況 (3)

### 1.2 ゴットハルトトンネル



写真-5 損傷状況 (4) 写真-6 損傷状況 (5) 写真-7 損傷状況 (6) 写真-8 損傷状況 (7)

### 1.2 ゴットハルトトンネル

火災場所 : 南口より1.5km  
 火災発生年 : 2001年10月24日 AM9:45  
 死傷者数 : 11名死亡  
 火災車種・台数 : トラック他40台

#### 出火状況:

- ・トラック(無免許でアルコール中毒者が運転)がバーストして反対車線に振られ、対向車線を走行中のトラックと正面衝突
- ・対向車線側のトラック荷台のタイヤに延焼
- ・火は300m間に広がり40台以上の車が燃えた。
- ・並行する換気用非常用トンネル(6m<sup>2</sup>)から100人以上が脱出

火災温度:トンネル坑内推定温度1200 以上

被害規模:天井版が200m区間崩壊

### 火災におけるコンクリートの劣化事例

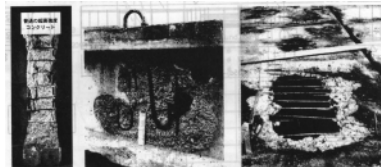


図-1.1.41 建築部材における腐蝕の例[24, 37]

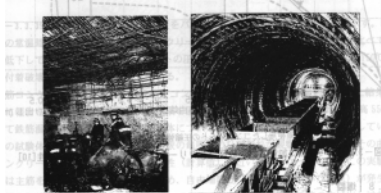


図-1.3.42 交通トンネルにおける腐蝕の例[37, 38]

爆裂

## 2. 爆裂のメカニズム

コンクリート中の水分が水蒸気となり、そのときの圧力により、コンクリートが急激に破壊、つまり爆裂する。



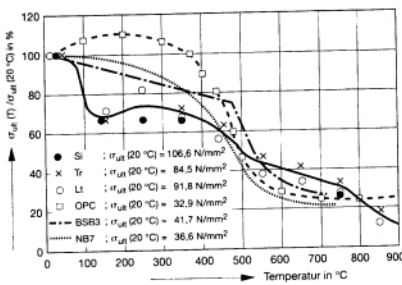
## 3. 高温下におけるコンクリートの材料特性

### 3.1 化学的変化

表-3.1.1 セメント硬化体や骨材の化学的変化[1, 2]

温度範囲 (°C)	変態反応または分解反応	反応の概要
30~120	物理的に解らえられた水の蒸発、蒸発	<ul style="list-style-type: none"> <li>大きな空間からの水分蒸発は、100°C以下の範囲から生じる。</li> <li>空間の大きさにより沸点（蒸発温度）が異なる。</li> </ul>
30~300	ゲル凝縮（硬化したセメントペーストの脱水の第一段階）	<ul style="list-style-type: none"> <li>C-S-H系水和物：結晶性の低いゲル状態で、100~130°Cで脱水するが、水和物の化学組成は一定していないため、個々の状態を明確に区分することはできない。</li> </ul>
120~600	化学構造の崩壊	<ul style="list-style-type: none"> <li>エトリンガイト：100°C以下および110°C、160~180°Cくらいに大きなピーク、240~270°Cに小さなピークを示し、段階的に脱水する。</li> <li>モルサルフェイト：50~150°Cおよび200°C、300°Cの3段階で脱水し、石こうアーウィン（Ca<sub>2</sub>S）とCaOになる。</li> <li>二水石膏（α型、β型）：脱水により、約130°Cで半水石膏、約160°Cで無水石膏になる。</li> <li>ポルトランドイト（α(III)）：400~500°CでCa(OH)<sub>2</sub>→CaO+H<sub>2</sub>Oの分解。</li> </ul>
570	石英の変態	<ul style="list-style-type: none"> <li>主に珪酸質骨材などに含まれる石英の結晶変態（α→β変態）</li> </ul>
600~700	C-S-H相の分解	<ul style="list-style-type: none"> <li>β-C-S-Hの生成</li> </ul>
600~900	硫酸カルシウムの分解	<ul style="list-style-type: none"> <li>石灰質骨材の主成分である硫酸カルシウムの分解（α<sub>1</sub>S→CaO+CO<sub>2</sub>）、S10<sub>2</sub>の含有量が多くなると分解温度は降下する。</li> </ul>
1100~1200	コンクリートの融解	<ul style="list-style-type: none"> <li>硬化セメントペーストの融点は、約1300°Cであり、化学組成により1300°Cよりも降下する。</li> <li>骨材の融点は、玄武岩が1640°C、珪岩が1700°C以上である。</li> </ul>

### 3.2 圧縮強度



残存率:  
500 約50%  
800 約10%

Si: 普通コンクリート+列柱  
Tr: 高炉灰分  
Lt: 普通コンクリート+珪砂  
OPC: 普通コンクリート

図-3.3.4 高温下における圧縮強度に及ぼす加熱前圧縮強度の影響[6]

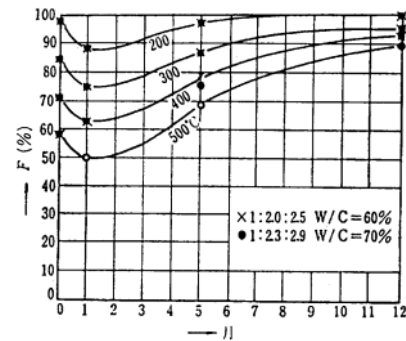


図-3.3.8 加熱されたコンクリートの圧縮強度の自然回復[11]

### 3.3 割裂引張強度

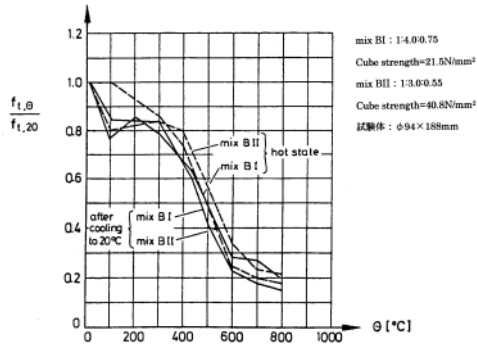


図-3.3.33 高温下および冷却後の引張強度（割裂試験）[28]

## 4. 火害に対する対策

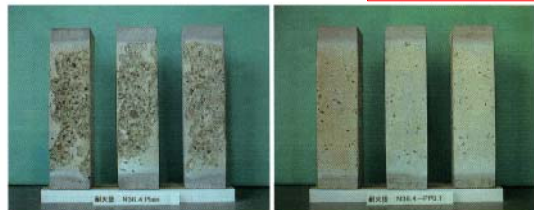
### 4.1 耐火被覆材

耐火被覆材で覆う。

### 4.2 合成繊維の混入

合成繊維（短繊維）の混入

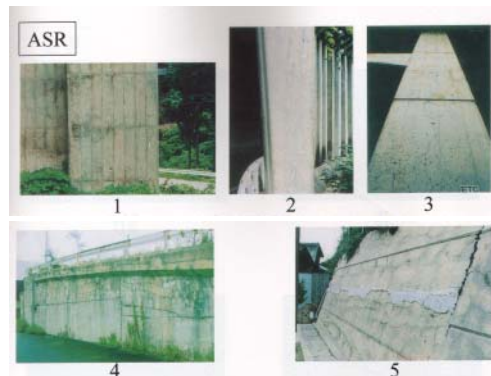
熱により繊維が溶け、  
圧力を逃がしてくれる。



通常のコンクリート（左）と、合成繊維を混入したコンクリート（右）をそれぞれ加熱した後の様子。合成繊維を混入したコンクリートでは表面にはく離が見られない

## 【アルカリ骨材反応 (Alkali Aggregate Reaction, AAR)】

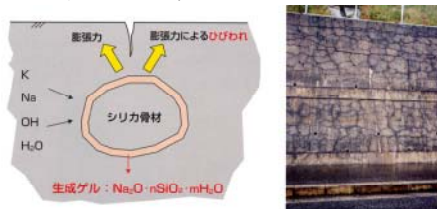
### 1. 劣化事例





## 2. AARのメカニズム

アルカリ骨材反応とは、コンクリート中の細孔溶液中における水酸化アルカリ(KOHやNaOH)と、骨材中のアルカリ反応性鉱物との間の化学反応をいう。反応生成物(アルカリ・シリカゲル)の生成や吸水に伴う膨張によってコンクリートにひび割れが発生する現象も含めてアルカリ骨材反応という場合も多い。



### アルカリ骨材反応の種類

**アルカリシリカ反応**  
アルカリイオン、水酸基イオンと骨材中に含まれる準安定なシリカとの間に起こる反応  
反応するシリカ骨材: オパール、クリストバライト、トリジマイト、火山ガラス、玉髄、隠微晶質石英、ひずんだ結晶格子構造をもつ石英

**アルカリ炭酸塩反応**  
アルカリとドロマイト質石灰岩が反応して、膨張を起こすもの

**アルカリシリケート反応**  
アルカリシリカ反応とほぼ同じであるが、長期間にわたって継続し、生成するゲルの量は少ない。

### アルカリ骨材反応が起きると...

コンクリート構造物には、ひび割れ、ゲルの染み出し、部材のずれや移動等の劣化が生じる。

無筋コンクリートでは、亀甲状のひび割れが生じ、鉄筋コンクリート構造物では主筋軸方向にひび割れが発生する。

ひび割れが生じてもコンクリート構造物や部材の耐力がただちに低下するわけではないが、凍害や化学的侵食に対する抵抗性が低下し、コンクリート中の鋼材が腐食する可能性が増大する。

## 3. AARの対策

### 3.1 AARが発生する条件

ある量の反応性骨材が存在すること  
細孔中に十分な水酸化アルカリ溶液が存在すること  
コンクリートが多湿または湿潤状態に保存されていること

### 3.2 対策

無害と判定された骨材を使用する。  
コンクリート1m<sup>3</sup>当たりのアルカリの総量をNa<sub>2</sub>O当量で3.0kg以下とする。例えば、1)低アルカリ形のポルトランドセメント(Na<sub>2</sub>O当量0.6%以下)を使用する。2)高炉セメント、またはフライアッシュセメントのそれぞれB、またはC種でAARの抑制効果が確認されたものを用いる  
外部からの水分の進入を防ぐ。