

温度ひび割れのメカニズムと対策

近未来コンクリート研究会 特別講演
十河 茂幸

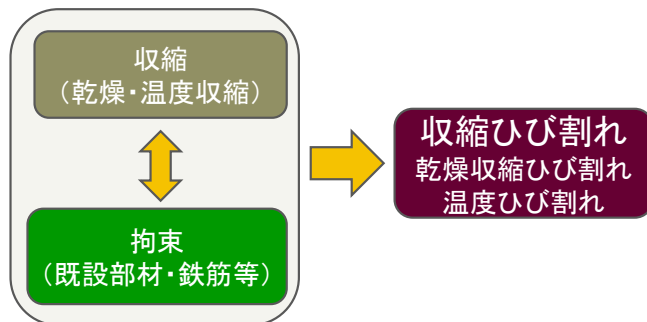
温度ひび割れの発生メカニズム

コンクリートは、材料の特性として収縮する。

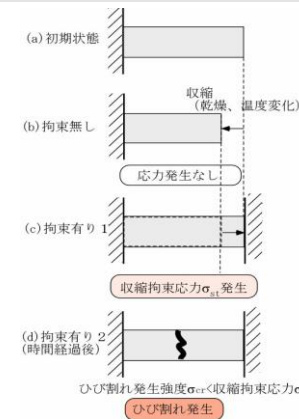
↓
構造物を構築する際に、段階的施工を行う。

↓
先に施工された構造物が後の施工で構築されるコンクリートの収縮を拘束すると、引張応力が発生。これに対して引張強度が小さい(伸び能力が小さい)ためひび割れが生じる。

➤ 初期ひび割れは収縮が主要因



収縮を拘束された場合のひび割れ発生メカニズム



- コンクリートは収縮する。
セメントの硬化収縮
乾燥して収縮
水和発熱が放熱して収縮
- 既設物などが収縮を拘束
拘束されると引張応力発生
- 引張強度は極端に小さい
⇒ ひび割れ発生

初期ひび割れ(温度ひび割れ)

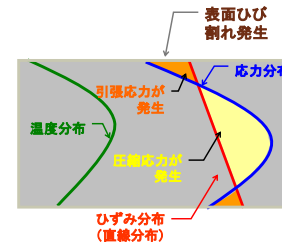


温度ひび割れの二つのパターン

表面ひび割れ

(内部拘束卓越)

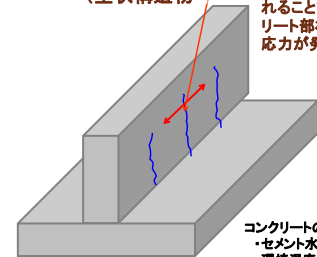
部材断面の厚い構造物
(スラブ状構造物等)



貫通ひび割れ

(外部拘束卓越)

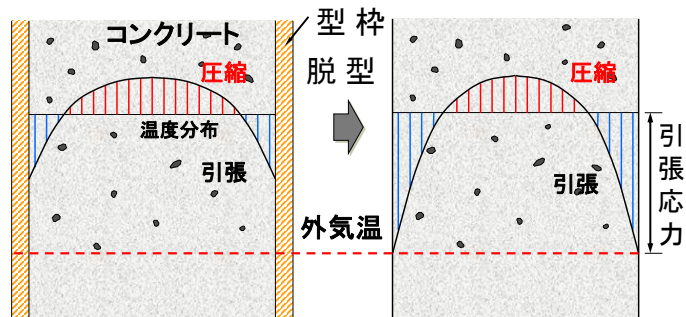
部材断面の薄い構造物
(壁状構造物)



コンクリートの収縮を拘束体により拘束されることで、コンクリート部材内に引張応力が発生

コンクリートの収縮の原因
 ・セメント水和熱
 ・環境温度の変化
 ・自己収縮
 ・乾燥収縮
 ・日射等

内部拘束温度ひび割れ



表面にひび割れが発生する危険性

温度応力についての考え方

温度応力: σ 応力ひずみ: ε ヤング率: E

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

ヤング係数 E は、時間経過に伴い大きくなる。 E が小さいと σ は小さく、 E が大きくなると σ も大きくなる。逐次計算すると、 σ の変化が計算できる。クリープについては、有効ヤング係数で評価する方法がある。

$$\sigma(t) = \int [\varepsilon(t) \times E(t)]$$

応力ひずみとは

自由ひずみ $\varepsilon_f: \Delta l / l$

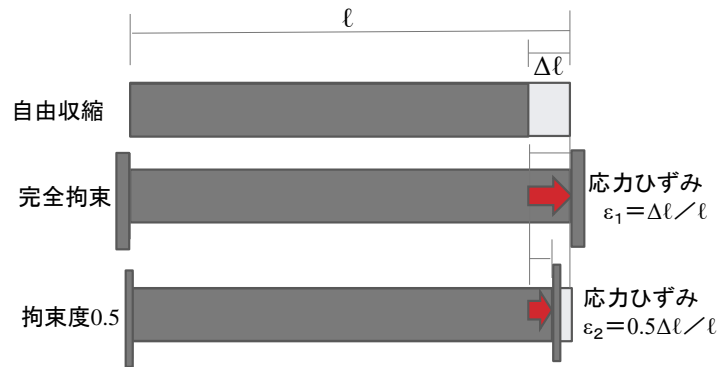
完全拘束の場合 変形率 = 0

応力に関するひずみ $\varepsilon_1 = \Delta l / l$

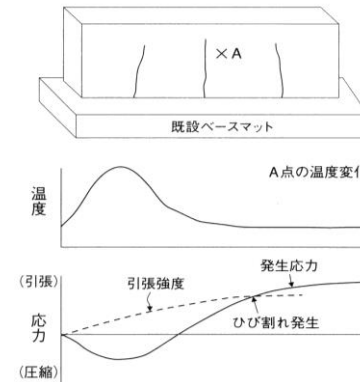
拘束度 0.2 の場合 変形率 = $0.8 \times \Delta l / l$

応力ひずみ $\varepsilon_2 = 0.2 \times \Delta l / l$

応力ひずみの考え方

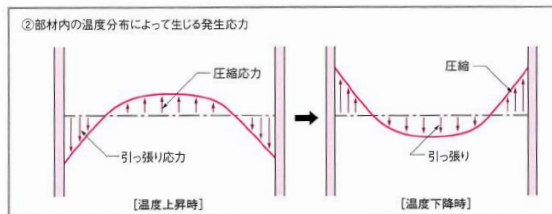


外部拘束温度ひび割れの発生メカニズム



- 水和熱で温度上昇
- 次第に放熱して収縮
- 既設物が収縮を拘束
拘束されると引張応力発生
- 引張強度は極端に小さい
⇒ ひび割れ発生

内部拘束による温度ひび割れ

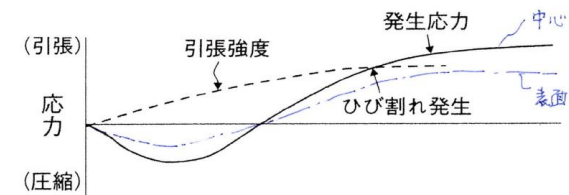


温度応力: σ ε : 応力ひずみ E : ヤング率

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

ヤング係数 E は、時間経過に伴い大きくなる。
 E が小さいと σ は小さく、 E が大きくなると σ も大きくなる。
 逐次計算すると、 σ の変化が計算できる。

外部拘束に内部拘束が加算され他場合の温度応力



温度応力: σ ε : 応力ひずみ E : ヤング率

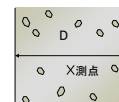
$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

ヤング係数 E は、時間経過に伴い大きくなる。
 E が小さいと σ は小さく、 E が大きくなると σ も大きくなる。
 逐次計算すると、 σ の変化が計算できる。

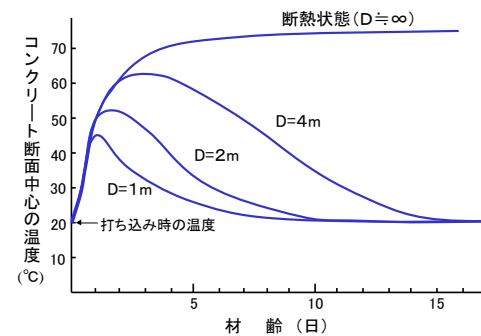
温度ひび割れの抑制対策

- ✓ 単位セメント量の低減
 - ⇒ 単位水量の減じられる材料・配合
- ✓ 低発熱セメントの使用
- ✓ 温度上昇の抑制
 - ⇒ プレクーリング、夜間打設など
- ✓ ゆっくりとした温度低下
 - ⇒ 保温養生、長期間の型枠存置など

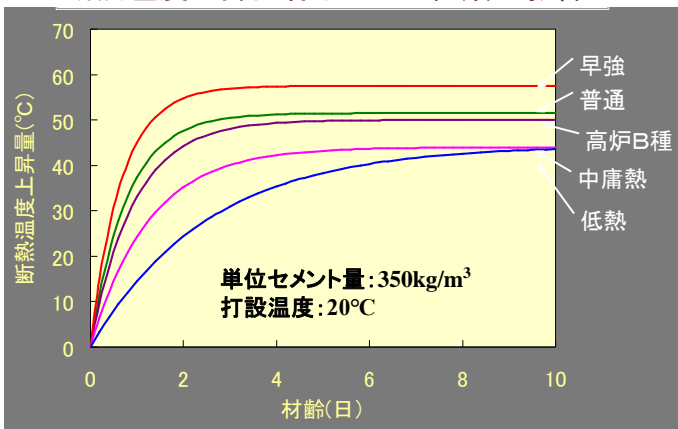
コンクリート部材の温度上昇



コンクリート部材の厚さより、内部の発熱状況は異なる



断熱温度上昇曲線 (セメント種類の影響)



配合要因とひび割れの関係

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	T _∞ (°C)	乾燥収縮	温度収縮	自己収縮
65	165	254	44	大	小	小
55		300	51	↑	↑	↑
45		367	62	↓	↓	↓
35		471	79	小	大	大

流動性を高める ⇒ 絶対粗骨材容積を減じる
⇒ 収縮因子が増大 ⇒ ひび割れ発生確率増大

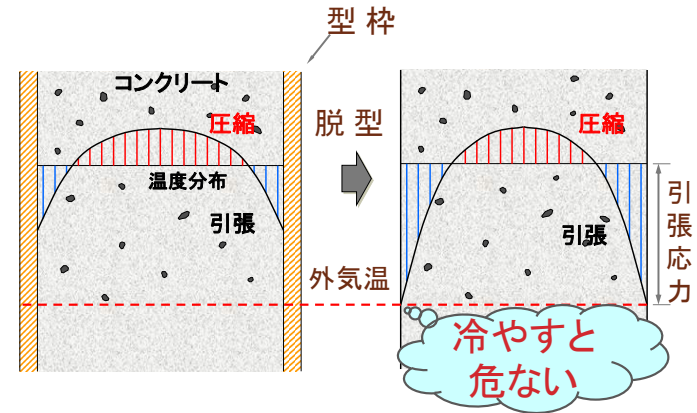
施工に影響される初期ひび割れ

メカニズムは理解できても、
初期ひび割れの抑制は困難

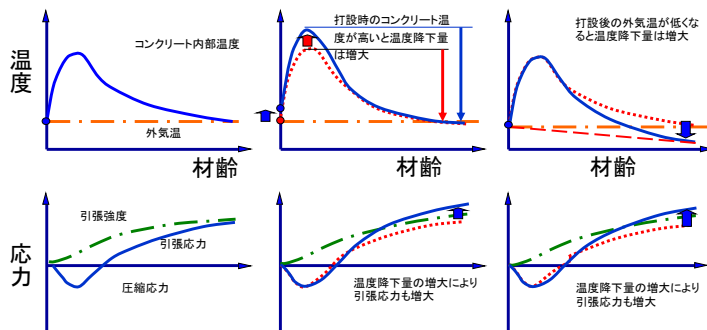


施工時期の影響、施工方法の影響
材料・配合・製造・施工の管理方法
設計で考慮しても、**制御は困難**

内部温度の勾配で表面ひび割れ

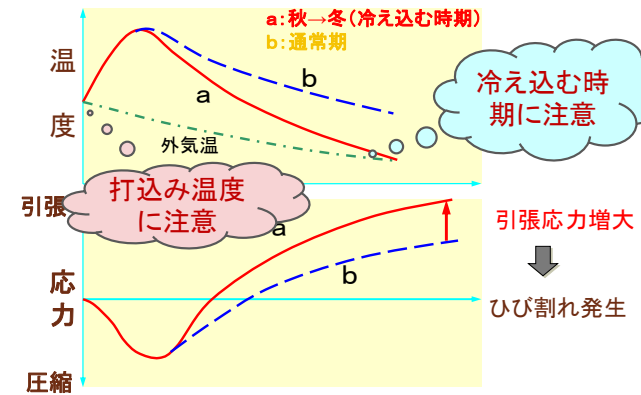


コンクリートの温度上昇と発生応力



打込み温度が高い場合、脱枠時に温度が低い場合は要注意

打込み温度と外気温の変化に注意



➤ ひび割れ抑制の施工面での対応

- ✓ 温度ひび割れの対応
 - ⇒ 外気の影響から保護(シートの利用)
- ✓ 事前の予測の範囲を認識
 - ⇒ 施工管理の意識(計画との違いを把握)

対策が困難な場合



- 1) 誘発目地の利用
- 2) 許容ひび割れ幅を明確にする
- 3) 補修を前提とする

温度ひび割れ以外の初期ひび割れの補足

- 乾燥収縮ひび割れは、部材が厚いと検討しなくてよいか？
- 自己収縮の評価はどのようにすればよいか？
- 鉄筋の補強でひび割れは低減できるか？
- トンネル二次覆工のひび割れはどのような考えればよいか？

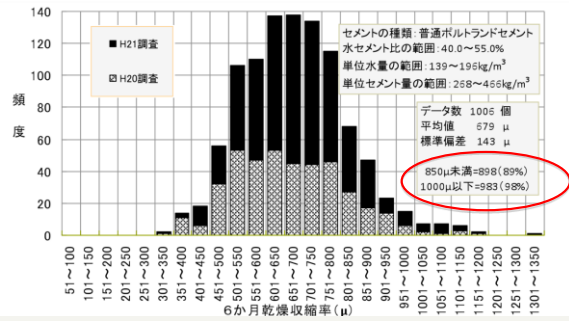
乾燥収縮による初期ひび割れ

- ✓ 乾燥はコンクリートの表面から。
- ✓ 部材の厚さが小さい場合に発生。
- ✓ 内部拘束が卓越する。
- ✓ 乾燥するには時間がかかる。
- ✓ 建築では漏水が問題となる場合が多い。

乾燥による収縮のメカニズム

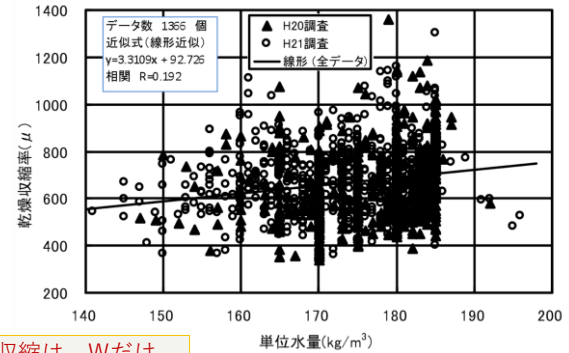
- ✓ セメントペーストの収縮(乾燥収縮・自己収縮)
セメントゲル、未水和のセメント粒子、毛細管空隙、ゲル空隙等の毛細管空隙の収縮
- ✓ セメントペーストの収縮を拘束する骨材
骨材のヤング率が小さいと収縮が増加
- ✓ 骨材の乾燥収縮
骨材中の毛細管空隙の水分逸散による収縮

乾燥収縮率の分布



分布域：300~1200 μ、平均679 μ、標準偏差143 μ
(特異な配合、A1129以外の方法を除外)

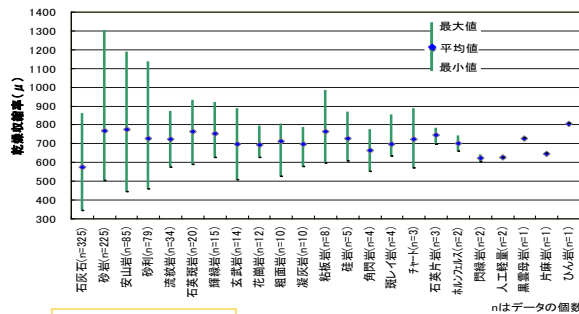
単位水量と乾燥収縮率



収縮は、Wだけ
では決まらない

材料、配合を特定すると相関

粗骨材の岩種と乾燥収縮率



石灰石：平均値は小
変動範囲は大きく、
他の岩種より収縮が
大きいものもある



岩種を固定しても
収縮は決まらない。

乾燥収縮ひび割れの抑制対策

- ✓ 乾燥収縮率の抑制 → 単位水量の低減ではない。
 - ⇒ 良質の骨材の使用
 - ⇒ 良質の混和剤の使用
 - ⇒ 変動の少ない品質管理
- ✓ 乾燥による逸散水の抑制
 - ⇒ 十分な湿潤養生
 - ⇒ ゆっくりと反応させる

乾燥収縮ひずみとひび割れ

コンクリートの収縮ひずみの許容値・・・ 800 μ

乾燥環境による乾燥収縮ひずみ・・・400 μ

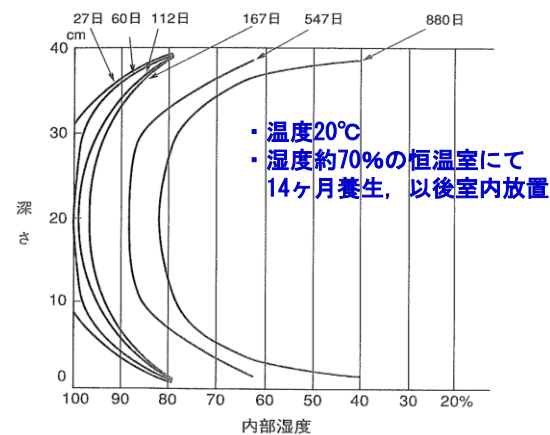
収縮を拘束する構造物の拘束度・・・200 μ



コンクリートの伸び能力(クリープを含む)・・・200 μ

⇒ 大きなひび割れは生じない基準値

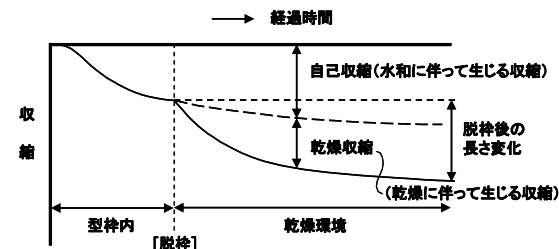
内部湿度分布の推移 (厚さ40cm)



硬化収縮(自己収縮)は伏兵

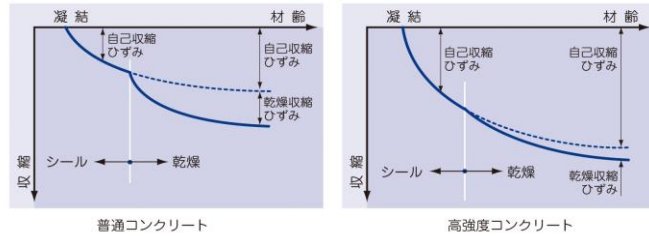
- ✓ 自己収縮だけではひび割れは生じない。
- ✓ 自己収縮率は、単位セメント量に依存。
- ✓ 乾燥収縮率は自己収縮を含む。
- ✓ セメントの効果速度が速いと大きくなる。
- ✓ つまり、セメントの種類の影響がある。

自己収縮と乾燥収縮



材齢7日程度では水和が完了していないため、脱枠あるいは水中養生終了後の長さ変化試験では、乾燥収縮と自己収縮の両方が測定値となる。

自己収縮によるひび割れへの影響



出典：土木学会 コンクリート標準示方書 設計編 2002 年度版

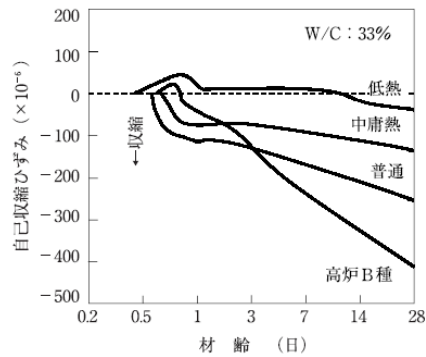
乾燥収縮と区別した測定が困難

コンクリートの自己収縮 (×10⁻⁶) (土木学会 コンクリート示方書)

水セメント比 (%)	材 齢* (日)					
	1	3	7	14	28	90
50	0	30	80	90	100	120
40	0	70	100	110	120	170
30	50	100	170	210	250	280
20	100	320	360	380	400	470

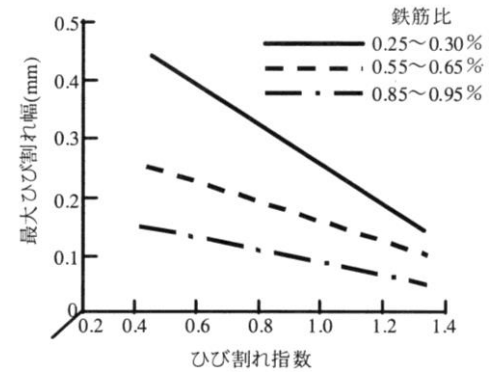
* 凝結時を原点とする

セメントの種類で異なる自己収縮



鉄筋比のひび割れ幅抑制効果

最大ひび割れ幅とひび割れ指数との関係



➤ 収縮を減じるには、WとCを削減

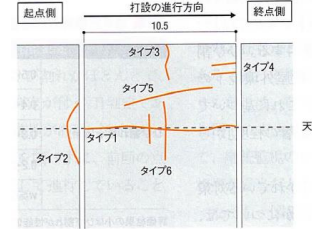
- ✓ 乾燥収縮を減じるには ⇒ 乾燥収縮率の低減
- ✓ 自己収縮を減じるには ⇒ C低減
- ✓ 温度応力を減じるには ⇒ C低減

同一W/Cなら、単位水量の低減が効果的

コンクリートの自己矛盾
⇒強度発現を求めると
ひび割れが発生

トンネル二次覆工 ひび割れの主原因

【変状展開図 (代表的な初期ひび割れの形態)】



日経コンストラクション2021年11月8日号：
道路トンネルの診断より引用

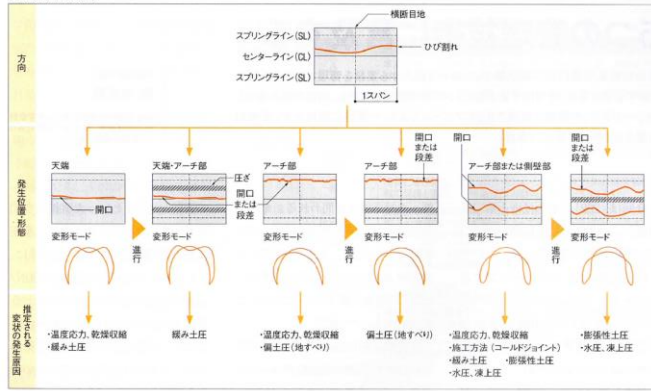
【主な発生要因】

ひび割れの種類	主な発生原因
タイプ1 トンネル天端軸方向のひび割れ	無筋区間のトンネルに多く発生する事例で、有筋区間でも発生することがある。最終的には1mmを超えるひび割れに発展する。覆工を横断的に1つのブロックと考え、天端付近はブロックの中間地点に当たり、乾燥収縮や温度収縮によるひび割れが集中しやすい。さらにトンネル天端部の拘束度が低いところや充填不足のころは、これらが助長される。層一側壁のコンクリートは、収縮が背面に拘束され、その収縮量は少ない。
タイプ2 覆工端部の三日月形のひび割れ	セトルのセッ時、脱型時の過度な押し上げによって生じるひび割れ。セトルは打設済みの覆工端部にラップさせ、もう一方は本製矢部の裏面を設置し、その閉鎖空間内にコンクリートを打設する。覆工コンクリートの打設は、コンクリートの材齢3日程度の若材齢で行われる。セトルセッは油圧のジャッキを用いるが、均等に昇降できないと、若材齢のコンクリートに局所的な荷重が作用し、これによって三日月形のひび割れが生じる。当初は微細なひび割れであったものが時間の経過とともに顕在化することがある。
タイプ3 インバートの接合部から横断方向に生じるひび割れ	インバートを拘束体とし、その後に打設される覆工の温度収縮、乾燥収縮によって、発生するひび割れ。
タイプ4 コンクリート打設時のフリージング水の滞留によるひび割れ	コンクリートの横流しやバイブレーターのかけ過ぎによって、コンクリート表面にフリージング水が生じ、それが裏面に滞留することで生じるコールドジョイント。
タイプ5 吹き上げ口からコンクリートの流れに当たったひび割れ	検測窓から吹き上げ口打設に切り替えることで生じるコールドジョイント。配管の切り替え、先頭ホースの取り回しに時間を要し、時間が経過することによる配管内の閉塞などのトラブルに起因してコールドジョイントが生じる。
タイプ6 覆工天端横断方向のひび割れ	セトル内の保湿度差による外部拘束。

(資料:JTA保守管理小委員会、トンネルと地下道50巻第5号、2019年5月号)

トンネル二次覆工のひび割れ(縦断方向)

【縦断方向のひび割れ】



トンネル二次覆工のひび割れ(横断方向)

【横断方向のひび割れ】

