

## 物理的許容ひび割れ幅

土木学会コンクリート標準示方書では、許容ひび割れ幅は、構造物の使用目的、環境条件、部材の条件などを考慮して定めることを原則としている。

鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅は、鋼材の腐食に大きな影響を及ぼす部材表面の許容ひび割れ幅が、かぶり厚さによって変化することを考慮し、環境条件と鋼材の種類に応じて、かぶり厚さ(mm)の0.0035～0.005倍としている。

水密性に対する許容ひび割れ幅は、構造物の使用条件および作用荷重特性などを考慮し、要求される水密性の程度と卓越する作用断面力に応じて、0.1～0.2mmとしている。

### A:セメントの異常凝結によるひび割れ

- ・ **発生時期** :打設後数時間以内にコンクリートの水引に伴って発生する。
- ・ **パターン** :規則性のない表面ひび割れで、一般に開き幅が大きく、長さが短い。
- ・ **発生原因** :セメントの凝結は、始発1時間以上、終結10時間以内が正常であり、これ以外の凝結を異常凝結という。異常凝結には、瞬結、急結、偽凝結等があり、石膏無添加のセメントや、石膏の脱水により、アルミン酸三石灰( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ )が水と瞬時に反応して異常凝結を生じる。この反応により多量の熱が放出され、ひび割れの原因となる。尚、偽凝結の場合には注水後5～10分で軽にわびりを生じるが、繰り返しによりワーカビリティが回復し、正常な凝結現象に戻るため、ひび割れの主原因となることはない。
- ・ **抑制対策** :コンクリートの硬化前にひび割れが発生するので、すぐにタンピング等を施すことによりこのひび割れは消すことができる。なお、使用実績のない特殊な混和剤(材)などを用いる場合には、セメントとの反応性について凝結試験により異常凝結を起こさないことを予め確認してから用いるのが良い。

### B:セメントの異常膨張によるひび割れ

- ・ **発生時期** :発生原因により凝結硬化過程の初期材齢で発生する場合と、比較的長期材齢で発生する場合がある。
- ・ **パターン** :局部的に不規則な表面ひび割れが放射状に発生する。
- ・ **発生原因** :クリンカーの焼成が不十分で化合物組成を生成しきれなかった遊離石灰( $f\text{-CaO}$ )の過多による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成、酸化マグネシウム( $\text{MgO}$ )の過多によるペリクレーズ( $f\text{-MgO}$ )の生成、添加石膏量の過剰によるエトリンガイトの生成、およびこれらの相乗作用によって、異常な容積膨張を生じる。この容積膨張作用により、セメント効果体に局部的なひび割れや反り現象が発生する。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ やエトリンガイトの生成に起因するひび割れは初期材齢で発生し、ペリクレーズの生成に起因するひび割れは比較的長期材齢で発生することが多い。
- ・ **抑制対策** :セメントの安定性試験で「良」と評価されたセメントを用いれば、JIS規格値の範囲内で $\text{MgO}$ や $\text{SO}_3$ の多少があっても、このひび割れの原因となることは少ない。

### C:セメントの水和熱によるひび割れ(温度ひび割れ[Thermal Cracking])

- ・ **発生時期** :表面のひび割れの場合は打設後数日以内に、貫通ひび割れの場合は打設後1～2週以降に発生する。
- ・ **パターン** :部材軸と垂直方向に直線状のひび割れが、ほぼ等間隔で規則的に発生する。ひび割れは部材を貫通して発生するケースが多いが、表面だけに発生することもある。一般に温度ひび割れの開き幅は大きい。
- ・ **発生原因** :セメントの水和熱に伴うコンクリートの温度上昇または温度低下による部材の自由変形が拘束されると、内部拘束応力および外部拘束応力が生じ、これらの引っ張り応力により温度ひび割れが発生する。部材中心部の温度上昇により、表面部との温度差が大きくなると、表面部では内部拘束による引張応力が生じ、表面ひび割れが発生する。また、部材中心部のセメントの水和熱による温度上昇がピークに達した後、温度低下の速度と量が大きいと、温度変化に伴う自由な軸変形が拘束されて引張応力を生じ、貫通ひび割れが発生する。水和熱の大きいセメントの使用や単位セメント量の多い配合でマスコンクリートや外部拘束の大きい部材(連続壁や長い床版など)を打設した場合に温度ひび割れが生じやすい。
- ・ **抑制対策** :コンクリートの打設前に温度ひび割れ指数(ある材齢での引張応力に対する引張強度の比)について検討することにより、温度ひび割れの発生確率を推定することが出来る。温度ひび割れ指数が1.5以上となるように、材料、配合、部材寸法などを適切に定めることにより、温度ひび割れの発生確率を5%以内に抑えることができる。また、ひび割れの発生を許容するが、開き幅が過大とならないよう抑制したい場合には、温度ひび割れ指数を0.7以上とする。

### D:骨材中の粘土鉱物によるひび割れ

- ・ **発生時期** :湿潤養生後の比較的早期材齢で発生する。
- ・ **パターン** :網状の不規則で細かい表面ひび割れが発生する。
- ・ **発生原因** :骨材中に多量の粘土鉱物や泥分が含まれていると、コンクリートの単位水量が増加し、特に初期材齢での乾燥収縮が大きくなり、初期収縮ひび割れに類似した表面ひび割れが発生する。また、コンクリート中に、粘土鉱物や泥分の塊、あるいはそれらが多く含まれている部分が生じると、コンクリートの硬化が阻害され、局部的に不規則な表面ひび割れが発生する。また、粘土鉱物によっては、吸水や乾湿の繰り返し作用によって体積膨張を起こしたり、粉状化しやすいものもあり、ひび割れの原因となることもある。
- ・ **抑制対策** :骨材の有害物含有量(特に、粘土塊や洗い試験で失われるもの)が許容値限度内にある骨材を用いることにより、このひび割れを抑制することが出来る。また、ひび割れやポップアウトを生じた悪い事例のある物理的に不安定な粘土鉱物を含む骨材の使用は避けるのが良い。

#### E:沈下によるひび割れ(沈みひび割れ「Settlement Cracking」)

- ・ **発生時期** :コンクリートの打設後数時間以内に、ブリージングの過程に伴って発生する。
- ・ **パターン** :水平鉄筋や部材断面が変化する箇所の上面に、規則性のある直線状の表面ひび割れが発生する。
- ・ **発生原因** :ブリージングによるコンクリート面の沈下が、固定された水平鉄筋などによって局部的に妨げられることによってその上面に水平鉄筋に沿った沈みひび割れが発生する。また、部材断面が変化する箇所では、その部材高さの違いによっても、コンクリートの沈下量が異なるため、沈みひび割れが発生する。沈みひび割れは、単位水量が多く、ブリージングの多いコンクリートで、打込み速度が速い場合や、打込み高さ大きい場合に発生しやすい。
- ・ **抑制対策** :コンクリートの硬化前にひび割れが発生するので、すぐにタンピングなどを施すことにより、このひび割れは消すことができる。単位水量が少なく、ブリージングの少ないコンクリートを用い、打込みの速度や順序を配慮することで、このひび割れを抑制することができる。

#### F:打継ぎ処理の不適によるひび割れ(コールドジョイント「Cold Joint」)

- ・ **発生時期** :コールドジョイント部の打ち継ぎ強さの低下により、初期材齢でひび割れが発生する。また、コールドジョイント部は、比較的長期材齢で乾燥収縮などによるひび割れの起点となる場合が多い。
- ・ **パターン** :コールドジョイント部に沿って、直線状のひび割れが発生する。
- ・ **発生原因** :コンクリートを連続して打設する場合に、先に打った層のコンクリートと後に打った層とが一体化しないと、コールドジョイントとなる。コールドジョイントは、先に打ったコンクリートが、次の層が打設されるまでにある程度凝結した場合や、境界面の締固め作業が不十分な場合などに発生する。また、コールドジョイント部は、打ち継ぎ強さが弱いので、乾燥収縮などによるひび割れの起点となる場合が多い。
- ・ **抑制対策** :先に打ったコンクリートの始発以前(500psi以下)であれば、前後の層が一体化するよう再振動を行うことにより、コールドジョイントを防ぐことが出来る。コールドジョイントを防ぐための打ち継ぎ時間の程度の目安は、外気温が25℃以上で2.5時間程度、25～15℃で3.5時間程度、15℃未満で4.5時間程度である。

#### G:初期収縮によるひび割れ(初期ひび割れ「Plastic Shrinkage Cracking」)

- ・ **発生時期** :凝結の始まりからブリージング水が吸収される過程の初期材齢で発生する。
- ・ **パターン** :コンクリート表面の全体にわたって、比較的短い表面ひび割れが発生する。
- ・ **発生原因** :コンクリート打込み直後の、表面からの水分蒸発速度がブリージング速度より速いと、セメント粒子などが露出して生じたコンクリート上面のメニスカスの釣り合いが破れ、水平方向に収縮する。この自由収縮が、骨材の不均一な分布などによって拘束されることにより、引張応力を生じて、ひび割れが発生する。型枠からの漏水などでコンクリート表面の水分が流出した場合にも、同種のひび割れが発生する。
- ・ **抑制対策** :コンクリート表面からの水分蒸発速度が $0.1 \sim 1.5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ より大きくならないよう適切な養生を行うことにより、このひび割れを抑制することができる。気温の高い時や風の強い時には、打設後、できるだけ早い時期に通気性のないフィルムでコンクリートの露出面を覆うのがよい。

#### H:初期凍害によるひび割れ

- ・ **発生時期** :コンクリートの凝結硬化過程での凍結あるいは凍結融解作用により、初期材齢で発生する。
- ・ **パターン** :コンクリート表面の全体にわたって、不規則で、細かい表面ひび割れが発生する。型枠面では、脱枠時に表面が白っぽく、荒れて見えることが多い。
- ・ **発生原因** :コンクリートの凍結温度( $-0.5 \sim -2.0$ )より、コンクリート温度が低下すると、1～数回の凍結融解作用による膨張圧で、ひび割れが発生する。凍害によるひび割れでは、強度低下、ポップアウト、スケーリングなどを伴うことが多い。凍結した地盤上や氷雪が付着している型枠内にコンクリートを打設した場合にも、初期凍害によるひび割れを発生することがあるので注意が必要である。
- ・ **抑制対策** :早強性混和剤の使用や打設直後の保温養生などにより、早期に初期凍害を受けにくい所要の強度( $3.5 \sim 5.0 \text{ N/mm}^2$ )を得ることで、このひび割れを抑制することができる。また、防凍剤を用いてコンクリートの凍結温度を $-5$ ℃程度まで下げることで、初期の凍害をうけにくくすることもできる。

#### I:乾燥収縮によるひび割れ(乾燥収縮ひび割れ「Shrinkage Cracking」)

- ・ **発生時期** :打設時期や部材寸法によって異なるが、材齢2～3ヶ月以降に発生する。
- ・ **パターン** :部材の長手方向とはほぼ垂直に、規則性のある直線状の貫通ひび割れが発生する。また、開口部の周辺では放射状に、外壁部や隅角部では斜め方向に、ひび割れが発生する。ひび割れ発生時の開き幅は、 $0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ 程度で、材齢の経過とともに $1 \sim 3 \text{ mm}$ 程度まで開き幅が拡大することもある。
- ・ **発生原因** :セメントゲル細孔中の水分の蒸発に伴って、セメントペースト部分が収縮(乾燥収縮)する。この自由収縮が、コンクリート中の骨材や鉄筋、あるいは接合部材によって拘束されることにより引張応力を生じ、コンクリートに乾燥収縮ひび割れが発生する。乾燥収縮の大きさは、使用材料、配合、部材寸法、環境条件などによって異なるが、一般に $150 \sim 350 \times 10^{-6}$ 程度である。単位水量が多いほど、部材暴露面積が大きいほど、また環境条件の相対湿度が低いほど、乾燥収縮は大きくなり、その自由収縮に対する拘束度が大きい部材ほど、ひび割れが発生しやすい。
- ・ **抑制対策** :コンクリートの乾燥収縮試験における乾燥期間6ヶ月時の乾燥収縮率が $800 \times 10^{-6}$ 以下であれば、耐久性が確保できる(乾燥収縮ひび割れを生じにくい)との観点より、日本建築学会JASS5では、単位水量の上限値( $185 \text{ l/m}^3$ )が定められている。乾燥収縮を小さくするには、できるだけ小さな単位水量とすることが望ましいが、混和剤により単位水量を減少させた場合には、逆に初期の乾燥収縮が大きくなることもあるので注意が必要である。

### J:凍結融解によるひび割れ

- ・ **発生時期** : 冬期の凍結融解作用により、冬から春までの期間に発生する。
- ・ **パターン** : 不規則な細かい亀甲状の表面ひび割れが発生し、さらにその後の凍結融解作用により、開き幅が拡大する。昼夜の温度差が大きいほど、凍結融解作用を受けやすいので、寒冷地では日射側のコンクリート面や出隅部に発生することが多い。
- ・ **発生原因** : 寒冷地では、コンクリート中の水が夜間に凍結して膨張圧を生じ、この凍結が日中の日射で融解する繰返し作用(凍結融解作用)を受ける。この凍結融解作用による内部応力により、ポップアウト、スケーリング、ひび割れが発生する。特に、ひび割れ部では、コンクリート内部に水が浸透しやすいため、次の凍結により、さらに大きな膨張圧を生じ、ひび割れ部の開き幅拡大や損傷の原因となることが多い。
- ・ **抑制対策** : 気泡間隔係数が200  $\mu$  程度以下となるAEコンクリートとし、所要の空気量(日本建築学会JASS5では4.5  $\pm$  0.5%)を確保することで、凍結時の膨張圧を緩和させ、凍結融解に対する耐久性を高めることができる。また、コンクリートが密実になるよう打設し、吸水の小さなコンクリートとすることも有効である。

### K:環境温度の変化によるひび割れ

- ・ **発生時期** : 平均気温が最も低下する冬期や初期材齢の早期に発生しやすい。
- ・ **パターン** : 環境温度の低下による温度収縮と乾燥収縮は同時に作用するので、冬期に乾燥収縮ひび割れと同じパターンのひび割れが発生する。また、日内の環境温度の低下が大きいと、初期材齢でセメントの水和熱による温度上昇がピークに達した後の温度低下量を大きくするので、早期に温度ひび割れと同じパターンのひび割れが発生する。
- ・ **発生原因** : コンクリートの部材は外気温の低下に伴って、収縮するが、この収縮が拘束されると引張り応力を生じてひび割れが発生する。コンクリートの線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/$ 程度であり、夏期打設したコンクリートで冬期までの温度低下が30  $\times 10^{-6}$  である300  $\times 10^{-6}$ の温度収縮を生じる。この収縮量は、部材の乾燥収縮量に匹敵し、しかも乾燥収縮に加算されて作用する。また、初期材齢においては単位セメント量の多い配合を用いた拘束度の大きい部材では日内温度差が10 ~ 15  $\times 10^{-6}$ 以上大きい場合に、セメントの水和熱による温度上昇がピークに達した後の温度低下を増大させるので、日内温度が最も低下する早朝に、温度収縮による大きな引張り応力を生じ、温度ひび割れと同様のひび割れが発生する。
- ・ **抑制対策** : コンクリートの線膨張係数は、骨材の岩質の影響を大きく受けるので、線膨張係数の小さい石灰石などの骨材を用いることにより、環境温度の変化に伴う温度応力の蓄積を小さく抑えることができる。また、打設時からの温度低下量が大きいほど大きな引張り応力が部材内に蓄積されるので、コンクリートの練り上がり温度を低く抑えたり、夏期の日中時の施工を避けるのが良い。

### L:鉄筋の発錆によるひび割れ

- ・ **発生時期** : コンクリートの中性化深さが大きくなる。長期材齢でひび割れが発生する。
- ・ **パターン** : 鉄筋に沿ってコンクリート表面に規則性のある直線状の大きなひび割れが発生する。ひび割れ部では、水が侵入しさらに鉄筋の錆が促進されるので、かぶりコンクリートの剥落や錆汁の流出による変色(赤褐色)を伴うことが多い。
- ・ **発生原因** : セメントの水和物(主として $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )は、空気中の炭酸ガスと反応し、コンクリートのアルカリ性が低下(中性化)するとともに、炭酸化の過程で収縮傾向を示す。中性化が鉄筋位置にまで及ぶと、アルカリによる鉄筋保護の環境が崩れ、水分と炭酸ガスによって鉄筋は腐食する。特に炭酸による鉄の腐食では、炭酸カルシウムが存在するので、錆は急速に促進される。鉄筋が錆びると体積が膨張し、かぶりコンクリートを押し上げ、鉄筋に沿ったひび割れが発生する。一旦ひび割れが発生すると、そこから水が浸入したり、鉄筋付近のコンクリートの中性化が進むので、鉄筋の腐食が更に促進され、かぶりコンクリートの剥落や、錆び汁による変色の原因になる。
- ・ **抑制対策** : コンクリートの中性化の速度は、コンクリートの材料、配合、密度、均等性などと深い関係を有するが、特に水平鉄筋や骨材の下部空隙、打ち継ぎ目などの弱点部に沿って中性化が促進されることが多い。単位セメント量が多く(日本建築学会JASS5では単位セメント量の最小値270  $\text{kg}/\text{m}^3$ 以上)、水セメント比の小さい中性化しにくいコンクリートを密実で均等質になるよう入念に打設するとともに、十分なかぶりコンクリートの厚さを確保することで、このようなひび割れを抑制することができる。

### M:アルカリ骨材反応によるひび割れ

- ・ **発生時期** : 配合条件や函渠条件によっても異なるが、一般に出設後数年以上経過した長期材齢で発生する。
- ・ **パターン** : 表面に多くの不規則な亀甲状ひび割れが発生する。また、ひび割れ部にゼラチン状の部質や白い沈殿物を発生することや、ポップアウト現象を伴うことも多い。
- ・ **発生原因** : アルカリ含有量(Na, K)の高いセメントを用いた場合、水和によって生じたアルカリ成分( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )と、ある種の骨材中に含まれるシリカ鉱物とが化学反応を起こしアルカリシリケートを生成する。これがコンクリート中の水分を吸収して膨張し、ひび割れが発生する。アルカリ反応性鉱物としては火山ガラス、クリストバライトトリジマイト、オパール、結晶格子に歪のある石英などがある。アルカリ骨材反応には、アルカリシリカ反応、アルカリ炭酸塩反応、アルカリシリケート反応がある。また、鉱物と水との水和反応、酸化反応、液相を通してのセメント水和物との反応、湿度変化に伴う可逆的相変化、水和膨張反応などの骨材反応もある。
- ・ **抑制対策** : アルカリ骨材反応は、アルカリシリカ反応に関してJIS A 5308の区分A(無害)と判定された骨材の使用、低アルカリ形( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で0.6%以下)ポルトランドセメントの使用、コンクリート中のアルカリ総量の規制(3.0  $\text{kg}/\text{m}^3$ 以下)、あるいは、混合セメントの使用などの対策により、抑制することができる。