

正会員 ○ 中 根 淳 (大林組 技術研究所)

正会員 高 橋 久 雄 (同 上)

1. 緒 言

震災建物や欠陥生コンに関連した最近の調査結果によると、健全と思われていた建物の中にも意外にコンクリート強度の低いものがあることが明らかとなり、コンクリートの強度管理をめぐるテクノロジーアセスメントの機運が急速に盛りあがってきた。構造体コンクリートの強度発現に関する研究としては、古くは 1910 年から 1940 年代にかけて、Berndt・Preuss, Edwards, Jackson・Kellermann, Richart・Brown 等の研究があり、また戦後では Hognestad, Kennedy, Price, Bloem, Petersons, 大野, 笠井・松井などの研究がある。しかし、この種の研究は、多大の費用を要するので研究の対象が限定されたものが多く、加えて製造・施工過程などの不確定な条件を伴うので、未だ総合的な体系化がなされていないのが実状である。このような状況をふまえて筆者らは、昨今の構造体コンクリートの実態を把握すべく調査を行い、既にその結果の一部を報告してきた。それによればシリンダーによる管理結果と異なって、実際の構造体中のコンクリートの強度発現の差は、きわめて大きいことが判った。本報告は、構造体コンクリートの強度管理に関する一連の研究のうち、強度差を生ずるメカニズムを解明するための前段階として、構造体強度に影響を及ぼすすべての要因をひろい出し、分類・整理したものである。

2. 要因相互の関係

2.1 表現上の定義

右図は通常我々が強度と呼んでいるところの構造体コンクリートの見掛け強度をTreeの形式で表現したものである。ここで表現上の約束事として次のように記号の定義をする。

○ : 強度に及ぼす事象の影響が積の関係にあるゲート

∧ : 強度に及ぼす事象の影響が変動の和の関係にあるゲート

□ : 事象一般

◇ : 更に分解可能な事象

⊕ : 事象間の関係が不明確なゲート

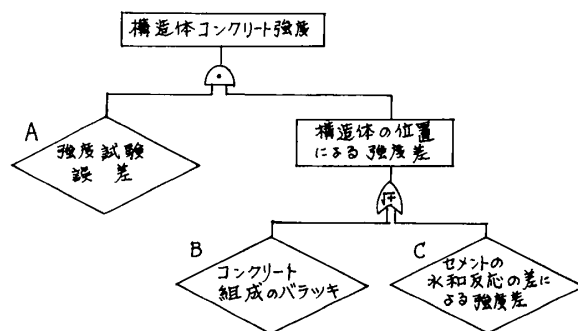


図-1 構造体コンクリート強度のデータ構造

従って図-1は、構造体コンクリート強度の評価に際して強度試験による試験誤差とサンプリングの採取位置がどの程度構造体を代表しているかを考慮すべきことを意味し、更に採取位置による強度差をコンクリートの組成自身のバラツキによるものとセメントの水和反応の差によるものとに分けて考える必要があることを示している。

2.2 強度試験による誤差

構造体コンクリートの強度は、必ず何らかの試験を行って数値化される。試験の方法には各種非破壊試験も含まれているが、強度を精度よく推定するためには構造体からコアを抜取って試験を行うのが最も確かな方法とさ

れている。そこで抜取りコアによつて強度試験を行う場合を採りあげ、試験誤差に関する要因をTreeにして分解すると図-2のようになる。この系統図の特徴は、試験誤差を生む主要因(A₁~A₈)が強度試験値に及ぼす影響を、各要因による変動の和というより各要因による影響の積によつて表わしている点にある。従つて試験による誤差Eは、各要因の影響度eの関数として次式によつて表わすことができる。

$$\text{試験誤差 } E = (1+e_{A1})(1+e_{A2})(1+e_{A3})(1+e_{A4})(1+e_{A5})(1+e_{A6})(1+e_{A7})(1+e_{A8}) - 1 \quad \dots\dots (1)\text{式}$$

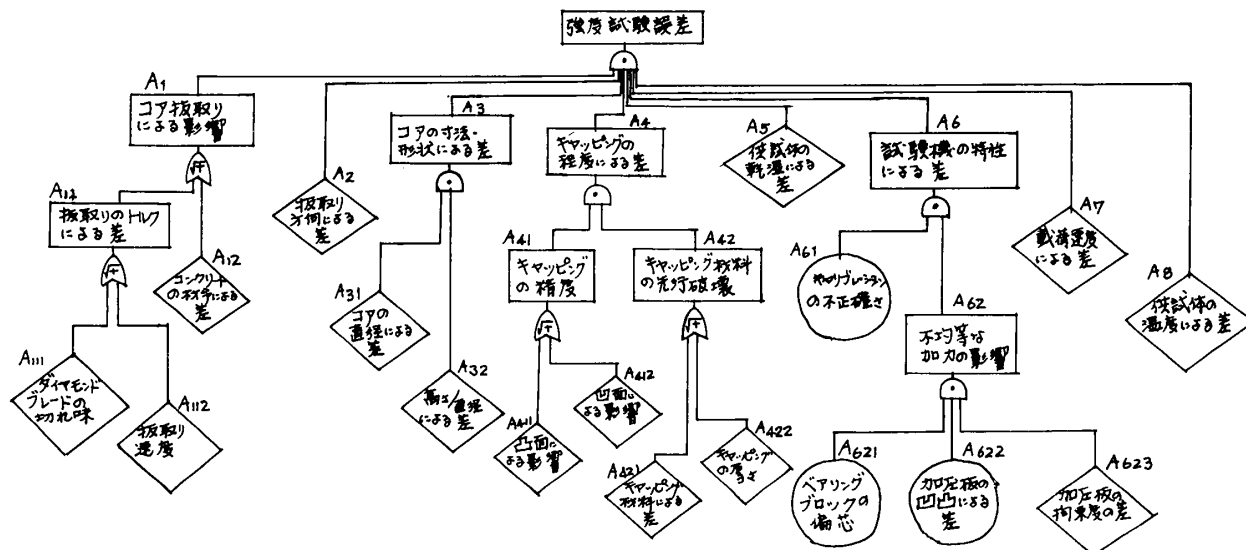


図-2 コア供試体による強度試験誤差の構造

2.3 コンクリート組成のバラツキ

図-1で述べたコンクリート組成のバラツキに影響を及ぼす要因を大きく分類すると図-3のようになる。これらの要因は更に、図-4~6のように細かく分解することができる。図-4中の計量誤差は、更に計量器固有の誤差と操作誤差とに分解することが可能であるが、ここでは一つの要因として扱っている。

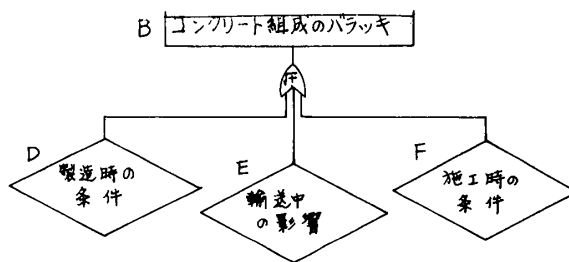


図-3 コンクリート組成のバラツキの大分類

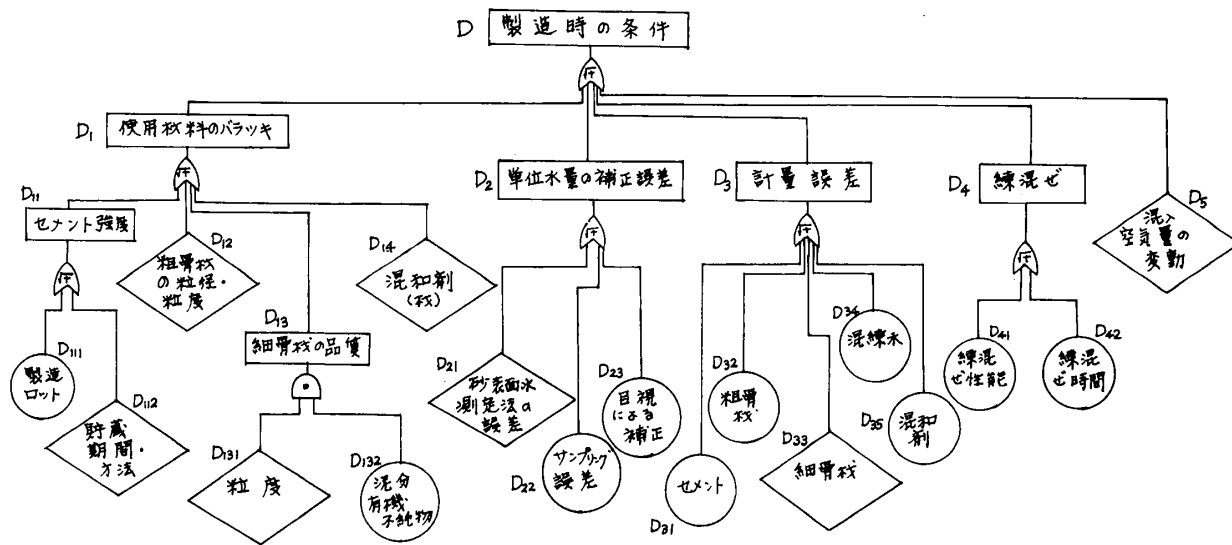


図-4 製造時に介在するバラツキの要因構造

図-3～6の系統図によれば、製造・輸送・施工各段階のコンクリート組成のバラツキに及ぼす要因の影響は、各主要因の変動の和で表わせることになる。この仮定に立つとコンクリート組成の変動 S_B は次式で表現できる。

$$S_B = S_D + S_E + S_F = (S_{D1} + S_{D2} + S_{D3} + S_{D4} + S_{D5}) + (S_{E1} + S_{E2}) + (S_{F1} + S_{F2} + S_{F3} + S_{F4} + S_{F5}) \dots \dots \dots (2) \text{式}$$

ここに添字をつけた S は図中の各要因による変動を示す
 しかしながらこの関係は、厳密には正しくない。というのは生コンのような半製品においては、例えば製造時に受けた影響は一義的に固定しえず、引続く輸送・施工段階の影響と複合され、施工が完了した時点ではじめて組成のバラツキとして固定されるからである。従つて図-3～6は、影響要因を概

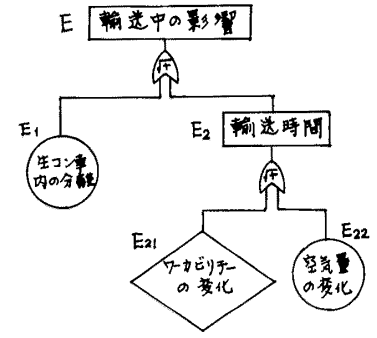


図-5 輸送中の影響要因

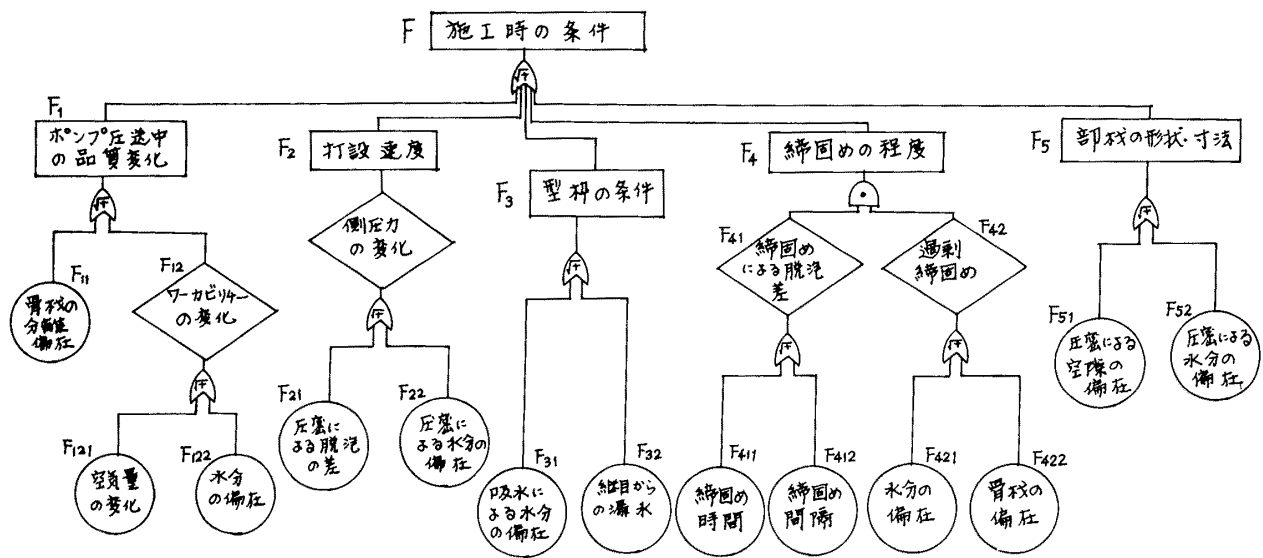


図-6 コンクリート組成のバラツキに影響を及ぼす施工時の諸要因

念的に整理するのには有用であるが、定量的な関係として把握のには今のところ無理がある。図-4～6は、製造から施工までの時間の流れに沿って影響要因を分類したものであるが、物理現象としては互いに独立したものではない。そこで異った物理現象毎のグループとして再分類をしてみると概ね下記のようなになる。

(水分の偏在から生ずるもの) :

$D_2, D_{34}, E_{21}, F_{122}, F_{22}, F_3, F_{421}, F_{52}$

(空隙の偏在から生ずるもの) :

$D_{131}, D_{14}, D_{35}, D_5, E_{22}, F_{121}, F_{21}, F_{41}, F_{51}$

(上記外の構成材料の偏在から生ずるもの) :

$D_1, D_{31}, D_{32}, D_{33}, D_4, E_1, F_{11}, F_{422}$

2.4 セメントの水和反応の差

コンクリート強度に関するポテンシャルが同じであつても、セメントの水和反応の差によつて見掛け上の強度差が現われる。図-7はセメントの水和反応の進行に影響する要因を図解したものである。コンクリート組成のバラツキに影響を及ぼす要因が、製

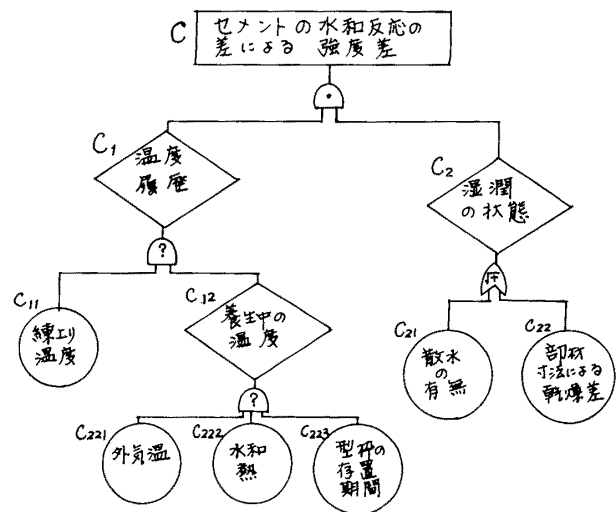


図-7 セメントの水和反応に影響を及ぼす要因

造から施工の過程に集中しているのに対し、水和反応の進行に影響を与える要因はコンクリート打設が完了した後に関係するのが特徴である。

3. 各要因の影響程度の評価

これまでのところで、構造体コンクリートの強度差に影響を及ぼす要因が非常に多く存在し、かつ複雑に介在していることを述べた。しかしそれらの各要因の影響度については、定量的に把握されていないものも多い。要因の影響度に関して既往の文献に示されたものをまとめて一覧表にすると概略以下の通りである。

表-11 構造体コンクリートの強度差に影響を及ぼす各種要因の影響度

各種影響要因		コンクリート強度に対する各種要因の影響度 (%)	グレード
強度試験による誤差(コヤの場合)	A ₁ コア採取による影響	-5 (Murphy) -4 (戸田技研) -1 (大林組技研)	
	A ₂ 採取方向の差 (垂直-水平)	8 (Sangha, Dhier) 3~12 (Petersons) 4~6 (大林組技研)	*
	A ₃ コアの寸法・形状	A ₃₁ 直径の差 10φに対する15φ: -2 (Blanks, Mc Namara) A ₃₂ 高さh/直径比 $h/d = 2.0 \sim 1.2$ の変化: 0~7 (JIS 補正値)	
	A ₄ キャッピング	A ₄₁ キャッピング精度 -10 (児玉他) -10 (丸富) $\frac{0.13}{0.13}$ 凹面 -5 (Gonnerman) A ₄₂ キャッピング材料 15% キャッピング: -3 (青木・中村) -2~-5 (Werner) 0 (大林組技研)	*
	A ₅ 供試体の乾燥の程度 (湿試験-乾試験)	-20~-40 (Wadde) -17 (Bloem) -16 (Sangha, Khir) -10 (Butcher) -20~-40 (Gilkey) -25 (丸富) -15~-17 (TT中技研) -25~-30 (清水建研) -13 (大林組技研)	**
	A ₆ 試験機・試験機・の特性	A ₆₁ キャリブレーション誤差 ± 2 (Cole) A ₆₂ 加圧面凹面 Max. -5 (Gonnerman) A ₆₃ 加圧板の厚さ 10 (Sigro/dason) 15 (雙葉・小阪) 3%拘束 16 (Duke 他)	*
	A ₇ 載荷速度	標準速度に対して生じる誤差 ± 3 (Neville)	
	A ₈ 供試体温度 (20℃基準)	10℃: 15 35℃: -8 (Neville)	
	D ₁ 使用材料のバラツキ	D ₁₁ セメント強度のバラツキ max 20 (Plum) 10 (Himsworth) 0~10 (Billig) max 25 (Taylor) 6 (Wadde) -10~20 (Walker, Bloem) 8 (Wright) $\pm (8 \sim 10)$ (杉田) D ₁₂ D ₁₃ 骨材の粗度 0~20 (Taylor) 0~20 (Billig) Max. 20 (Sparkes) 2.5 (Davey)	*
	D ₂ 単位水量の補正	$\pm (6 \sim 8)$ (杉田)	*
製造時の条件	D ₃ 計量誤差 (重量計量)	0~8 (Billig) 0~8 (Taylor) Max 8 (Sparkes)	
	D ₄ 練混ぜ	Max 7~15 (Abrams) 7 (Orchard)	
	D ₅ 空気量の変化 (1%の変化に於て)	6 (Taylor) 5~6 (Sangha) 5 (Price) 4~6 (丸富)	*
	E ₂ 輸送時間	Max 15 (Kaymakci) 3hr 30	
	F ₁ ポンプ圧送による変化	無視しうる範囲 (AIJ ポンプ指針)	
施工条件	F ₃₂ 型枠からの漏水	7~13 (漏水割合) (大林組技術研)	
	F ₄ 締固めの程度	0~50 (Billig) 0~50 (Taylor) Max 50 (Sparkes) 15 (Higginson) 硬練り Max 30 (一本)	**
	F ₅ 部材寸法形状 (打設速度含む)	径の高さ方向: 20 (大野) 14 (渡) 21 (窪井) 8 (TT中技研) 12 (大林組技研)	**
	C ₁ 温度履歴	C ₁₁ 練り温度 Max 16 (Neville) 但し養生温度一定 概90日 C ₁₂ 養生中の温度 非常に大きな影響があるが単純な数値化は難しい	*
セメントの水分状態	C ₂ 湿度の状態	11~31 但し養生温度同一 概90日 (大林組技研)	**

備考: ** 影響の程度が非常に大である
* 影響の程度がかなり大きい

これより各要因間のおおよそのグレード付けをすることができる。表中の数値は考えられる影響の最大限界を示すものが多く、実際の工事で生ずる確率密度を考えると更に小さな数値となろう。一方、要因個々の影響度は不明であるが、実態としてどの程度の強度差が生ずるかについては別のデータがある。東京都材検の調査によれば、製造・輸送段階での強度のバラツキは $2.5 \sim 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の範囲にあり、また筆者らの調査によると構造体コンクリート強度のバラツキは、更にその1.6~2.3倍程度という値を得ている。強度試験時の誤差については、試験条件によってかなり大きな値になると推測されるが、これについては既報にて報告しているので省略する。

4. 結 言

構造体コンクリートに強度差を生じさせる要因の分類とその影響度を現時点で整理することによって、強度に関わる要因の全体像を明確にし、コンクリートを製造・施工するうえで留意すべき要因のグレード付けをすることができた。しかしながらそれらの評価は定性的な範囲にとどまっており、今後の課題としては、より定量的な関係として把握するとともに、要因が強度に影響を及ぼすメカニズムを更に解明していくことが望まれる。

参考文献

(非常に多数の文献を引用しているが紙面の都合で割愛する)