

(144) 超高強度コンクリートを用いたP R Cはり部材のたわみ量

関西大学大学院 工学研究科 ○木場貴之

関西大学 土木工学科 正会員 豊福俊英

1. はじめに

近年、コンクリート材料の技術が著しく発達し、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末等の混和材、高性能 AE 減水剤等の混和剤の開発により、圧縮強度が 100N/mm² 以上の超高強度コンクリートの製造が可能となってきた。コンクリート工学編集委員会が、コンクリート工学分野の研究者、技術者を対象とし、アンケート調査を行った結果報告¹⁾によると、20年後に実用化されているコンクリート圧縮強度の最大値は、約 120N/mm² であった。このような背景を受け、今後超高強度コンクリートの使用は、益々増加すると考えられる。また、高強度コンクリートの使用の増加に伴い断面の縮小化が図られているが、断面の縮小化は、部材の剛性が低下し、たわみ量の検討が必要と思われる。

本報告はコンクリートの圧縮強度が 40~140N/mm² の超高強度コンクリートを用いた、P R Cモデルはり供試体を、同一の曲げ耐力、緊張率、鋼材比として、コンクリートの圧縮強度の変化による断面寸法、たわみ量の変化について検討した。

2. 対象モデルはり供試体

P R Cモデル供試体は、断面形状を矩形断面とする。供試体幅 b=600mm で一定として、コンクリートの圧縮強度の増加と共に、曲げ耐力が一定となるように供試体高さ h を縮小させた。供試体は、コンクリートの圧縮強度が 40N/mm² の供試体を基準とし、140N/mm² までの計 6 種類、スパン長を 20m、設計曲げモーメントを 5000kN・m として P R Cはり部材を設計した。たわみ量の算定は、せん断スパン 5m、純曲げスパン 10m として行った。

供試体の算定に用いた式を以下に示した。

緊張率 λ は、式(1)に示す。

$$\lambda = \frac{A_p \cdot f_{py}}{A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_{sy}} \quad (1)$$

ここに、 A_p : P C 鋼材断面積 (mm²)、 A_s : 鉄筋断面積 (mm²)、 f_{py} : P C 鋼材の降伏点強度 (N/mm²)、 f_{sy} : 鉄筋の降伏点強度 (N/mm²)

鋼材指数 q は、破壊モードを表し式(2)に示す。

$$q = p_p \cdot \frac{f_{py}}{f'_c} + p_s \cdot \frac{f_{sy}}{f'_c} \quad (2)$$

ここに、 p_p : P C 鋼材比、 p_s : 鉄筋比、 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

P R Cはり部材の曲げ耐力は、それぞれ図-1 および図-2 に示した P C 鋼棒、鉄筋の応力-ひずみ曲線を用い、断面のひずみの適合条件と力の釣合条件から算定した。破壊時の断面のひずみ分布と応力分布を図-3 に示した。コンクリートの圧縮応力度の分布を長方形圧縮応力度の分布(等価応力ブロック)と仮定して算定を行った。

曲げ破壊時の中立軸位置を x とするとコンクリートの圧縮合力 C 、P C 鋼材の引張力 T_p 、鉄筋の引張力 T_s をそれぞれ式(3)、式(4)および(5)に示す。P C 鋼材と鉄筋の応力-ひずみ関係は、それぞれ $\sigma_p = F_p(\epsilon_p)$ および $\sigma_s = F_s(\epsilon_s)$ の関数で表した。

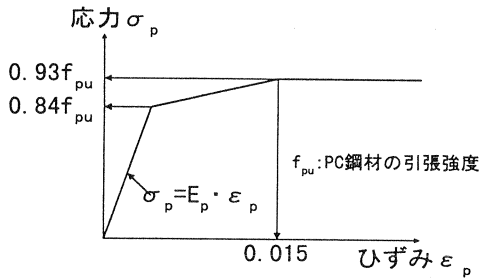


図-1 PC鋼材の応力-ひずみ曲線

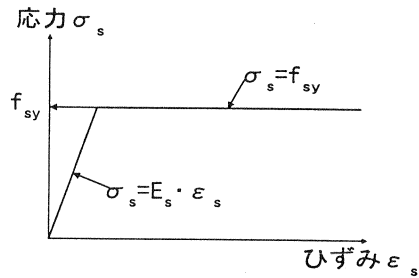


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

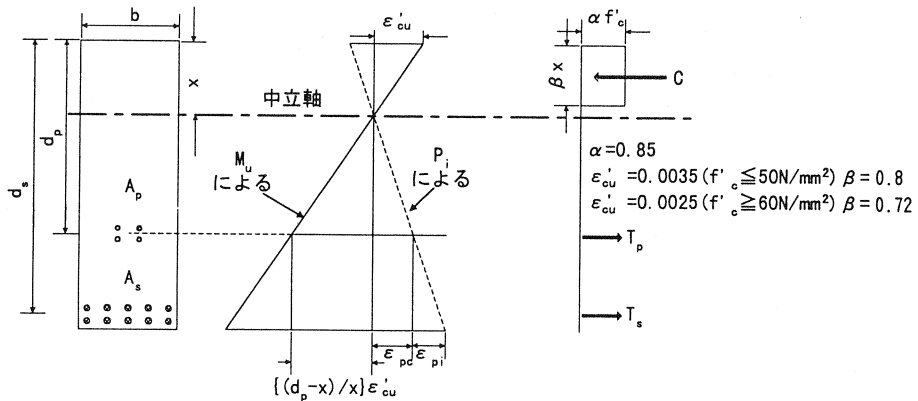


図-3 曲げ耐力算定時の断面、ひずみ、応力分布図

コンクリートの圧縮合力

$$C = \alpha \beta b x f'_c \quad (3)$$

PC鋼材の引張力

$$T_p = A_p \cdot F_p \left(\epsilon_{pi} + \epsilon_{pc} + \frac{d_p - x}{x} \cdot \epsilon'_{cu} \right) \quad (4)$$

鉄筋の引張力

$$T_s = A_s \cdot F_s \left(\frac{d_s - x}{x} \cdot \epsilon'_{cu} \right) \quad (5)$$

中立軸位置を x は、軸方向の力の釣合条件式 $C = T_p + T_s$ を用いて、式(6)より求める。

$$\alpha \beta b x f'_c = A_p \cdot F_p \left(\epsilon_{pi} + \epsilon_{pc} + \frac{d_p - x}{x} \cdot \epsilon'_{cu} \right) + A_s \cdot F_s \left(\frac{d_s - x}{x} \cdot \epsilon'_{cu} \right) \quad (6)$$

ここに、 ϵ_{pi} : 導入プレストレス力 P_i によるPC鋼材の引張ひずみ $\epsilon_{pi} = P_i / E_p \cdot A_p$

$$\epsilon_{pc} : P_i \text{ による PC 鋼材位置のコンクリートひずみ } \epsilon_{pc} = \frac{1}{E_c} \left(\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e_p^2}{I_c} \right)$$

式(6)より x を求め、曲げ耐力 M_u は、式(7)で求めた。

$$M_u = A_p \cdot F_p \left(\varepsilon_{pi} + \varepsilon_{pc} + \frac{d_p - x}{x} \cdot \varepsilon'_{cu} \right) \left(d_p - \frac{\beta}{2} \cdot x \right) + A_s \cdot F_s \left(\frac{d_s - x}{x} \cdot \varepsilon'_{cu} \right) \left(d_s - \frac{\beta}{2} \cdot x \right) \quad (7)$$

長期たわみ量の算定は、土木学会標準示方書²⁾に準じて、有効曲げ剛性式を式(8)に示した。

$$E_e I_e = \left(\frac{M_{crd}}{M_{d \max}} \right)^3 \frac{E_e I_g}{1 - \frac{\Delta M_{csg}}{M_{d \max} - P(d_p - c_g)}} + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{crd}}{M_{d \max}} \right)^3 \right\} \frac{E_e I_{cr}}{1 - \frac{\Delta M_{cscr}}{M_{d \max} - P(d_p - c_{cr})}} \quad (8)$$

ここに、 E_e :有効弾性係数で式(9)で求めた。

$$E_e = \frac{E_{ct}}{1 + \phi} = \frac{E_{ct}}{1 + (E_{ct}/E_c)\phi_{28}} \quad (9)$$

$\Delta M_{csg}, \Delta M_{cscr}$: ΔM_{csg} は全断面、 ΔM_{cscr} はひび割れ断面における収縮および鋼材の拘束に起因する見掛けの曲げモーメントで、式(10)で求めた。

$$\Delta M_{cs} = E_s \left\{ \frac{I'_s}{c - d'_s} - \frac{I_s}{d_s} - \frac{I_p}{d_p - c} \right\} \varepsilon'_{cs} \quad (10)$$

I'_s, I_s, I_p :全断面、ひび割れ断面の図心まわりの断面二次モーメントでそれぞれ圧縮鉄筋、引張鉄筋、P C鋼材によるもの(mm⁴)、 c :圧縮縁から全断面、ひび割れ断面までの距離(mm)、 ε'_{cs} :収縮ひずみ、 E_{ct} :死荷重作用時の弾性係数(N/mm²)

長期たわみ量の算定に用いたクリープひずみ、収縮ひずみは、土木学会標準示方書に準じた。以下、クリープ係数 ϕ 、クリープひずみ ε_{cc} 、収縮ひずみ ε'_{cs} の算定式をそれぞれ式(11)、式(12)および式(13)に示した。

$$\phi = \frac{\varepsilon_{cc} \cdot E_{ct}}{\sigma_{cp}} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{cc} = \left[1 - \exp\{-0.09(t - t')^{0.06}\} \right] \cdot \varepsilon'_{cr} \quad (12)$$

$$\varepsilon'_{cs} = \left[1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\} \right] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (13)$$

ここに、 σ_{cp} :作用する圧縮応力度、 t, t', t_0 :材齢、載荷時材齢、乾燥開始材齢(日)、 ε'_{cr} :単位応力当たりのクリープひずみの最終値($\times 10^{-10}$ /(N/mm²))、 ε'_{sh} :収縮ひずみの最終値($\times 10^{-5}$)

長期たわみ量 δ_l は、活荷重に対して式(15)、死荷重に対して式(16)で算定した。

$$\delta_l = P \cdot l_3 \left(3l_1^2 - 4l_3^2 \right) / (48E_e I_e) \quad (15)$$

$$\delta_l = 5 \cdot w_d \cdot l_1^4 / (384E_e I_e) \quad (16)$$

また、長期たわみ量を近似的に求める式(17)を示した。

$$\delta_l = (1 + \phi) \delta_{ep} \quad (17)$$

ここに、 P :活荷重(N)、 l_1, l_3 :それぞれスパン長(mm)、せん断スパン長(mm)、 δ_l :長期たわみ量(mm)

δ_{ep} : 短期たわみ量 (mm)

高強度コンクリートの弾性係数 (New RC) ³⁾ は式(18)で求めた。

$$E_c = 33500 \times k_1 \times k_2 \times (\gamma/2.4)^2 \times (f'_c/60)^{1/3} \quad [k_1 = k_2 = 1, \gamma = 2.4] \quad (18)$$

表-1(a)の供試体諸元は、緊張率、導入比をそれぞれ約0.420および約0.130としたものである。表-1(b)の供試体諸元は総鋼材比、導入比をそれぞれ約0.0160および約0.130としたものである。長期たわみ量の算定時に用いたクリープひずみ、収縮ひずみは、100N/mm²を超えるような超高強度領域において、実用的な式が確立されておらず、本報告においては、土木学会式それぞれ式(12)および式(13)より求めた。図-4は、H40AとH140AおよびH40BとH140Bは圧縮強度の増加にともない断面が縮小化した様子を表す。

表-1(a)モデルはり供試体諸元

モデル 供試体名	高さ h mm	鉄筋の有効高さ d _s mm	鉄筋比 P _s	PC鋼材比 P _p	総鋼材比 P _{sp}	鉄筋断面積 A _s mm ²	PC鋼材断面積 A _p mm ²	PS導入量 P kN	導入応力 f' _{pc} N/mm ²	導入比 f' _{pc} /f' _c	鋼材指数 q	緊張率 λ	曲り筋力 M _u kNm
H40A	1800	1704	0.0128	0.0034	0.0162	12300	3217	2770	5.13	0.128	0.215	0.420	9340
H80A	1500	1388	0.0189	0.0051	0.0240	14774	4021	3462	7.69	0.128	0.215	0.430	9513
H80A	1290	1178	0.0263	0.0069	0.0332	17522	4624	3981	10.29	0.129	0.222	0.422	9628
H100A	1160	1048	0.0337	0.0087	0.0424	20042	5198	4476	12.86	0.129	0.226	0.418	9855
H120A	1060	948	0.0401	0.0110	0.0511	21576	5899	5079	15.97	0.133	0.229	0.431	9855
H140A	970	858	0.0498	0.0130	0.0628	24324	6346	5464	18.78	0.134	0.239	0.419	9923

表-1(b)モデルはり供試体諸元

モデル 供試体名	高さ h mm	鉄筋の有効高さ d _s mm	鉄筋比 P _s	PC鋼材比 P _p	総鋼材比 P _{sp}	鉄筋断面積 A _s mm ²	PC鋼材断面積 A _p mm ²	PS導入量 P kN	導入応力 f' _{pc} N/mm ²	導入比 f' _{pc} /f' _c	鋼材指数 q	緊張率 λ	曲り筋力 M _u kNm
H40B	1800	1704	0.0128	0.0034	0.0162	12300	3217	2770	5.13	0.128	0.215	0.420	9340
H60B	1740	1650	0.0107	0.0052	0.0159	9566	4624	3981	7.63	0.127	0.163	0.572	9427
H80B	1680	1593	0.0086	0.0072	0.0159	7128	5976	5145	10.21	0.128	0.140	0.699	9470
H100B	1620	1536	0.0066	0.0096	0.0161	5000	7238	6232	12.82	0.128	0.129	0.800	9607
H120B	1580	1506	0.0041	0.0121	0.0162	2865	8456	7280	15.36	0.128	0.122	0.891	9699
H140B	1540	1475	0.0011	0.0152	0.0163	713	9650	8309	17.98	0.128	0.120	0.974	9618

注) PC鋼材の配置位置は2/3hとし、導入PS量はPC鋼材の断面積×PC鋼材の引張強度×0.7である。

総有効高さd=(d_s+A_pd_p)/(A_s+A_p)とし、鉄筋比はP_s=A_s/bd、PC鋼材比はP_p=A_p/bdとする。

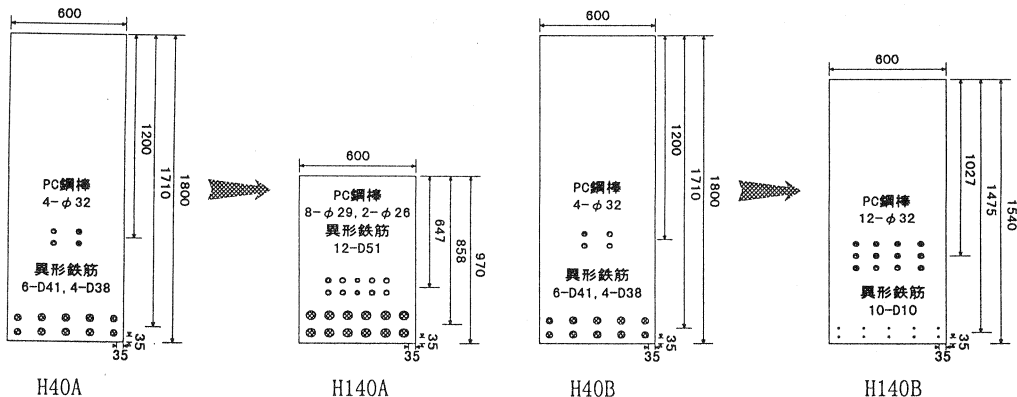


図-4 モデルはり供試体断面図例

3. 算定結果

3.1 寸法変化率と短期たわみ量の変化

コンクリートの圧縮強度と寸法変化率について図-5に示した。寸法変化率は、H40A・Bで高さ1800mmを1.00とした時のコンクリートの圧縮強度が増加するにつれ部材高さが低くなる割合である。緊張率、導入比を固定したAシリーズでは、コンクリートの圧縮強度を40N/mm²から140N/mm²にすることによって約0.54倍にコンクリート断面を縮小化できた。総鋼材比、導入比を固定したBシリーズでは、圧縮強度を40N/mm²から140N/mm²にすることによって約0.86倍にコンクリート断面を縮小化できた。

コンクリートの圧縮強度と短期たわみ量について図-6に示した。たわみ量の比とは、H40ABの短期たわみ量を1.00とした時のたわみ量の増加(減少)した量の割合である。図中では、活荷重と死荷重別々に比較している。Aシリーズは、コンクリートの圧縮強度を140N/mm²にすることによってたわみ量が活荷重で約2.98倍、死荷重で約1.61倍となった。Bシリーズは、活荷重で約0.65倍、死荷重で約0.39倍となった。また、短期たわみ量を図-7に示した。

3.2 長期たわみ量

長期たわみ量の算定は、クリープ係数が有効曲げ剛性に直接的に関わってくるため、クリープ係数が重要なものとなってくる。土木学会式(11)で算定したクリープ係数の経時変化を図-8に示した。なお、湿度は日本の平均湿度である60%で算定した。

A・Bシリーズの5年後までのたわみ量の経時変化を図-9(a)(b)に示した。たわみ量の増加割合が小さくなってきた材齢730日のたわみ量を比較した。H40A・BとH140A・Bとを比較すればAシリーズで約1.48倍、Bシリーズで約0.36倍であった。

載荷時材齢のたわみ量を1.00とした時の有効曲げ剛性式を用いて求めた材齢720日でのA・Bシリーズのたわみ量の伸び率、近似式(17)を用いてのたわみ量の伸び率を図-10に示した。近似式は、短期たわみ量と、それにクリープ係数を乗じて求めたたわみ量の和であるため、クリープ係数と有効曲げ剛性式を用いて求めたたわみ量の伸び率との関係と比較するのに有効であると思われる。有効曲げ剛性式を用いて求めたたわみ量、近似式を用いて求めたたわみ量は、双方ともクリープ係数に直接起因するところが大きいので、コンクリートの圧縮強度が大きいほどたわみ量の伸び率が小さくなる傾向が認められた。

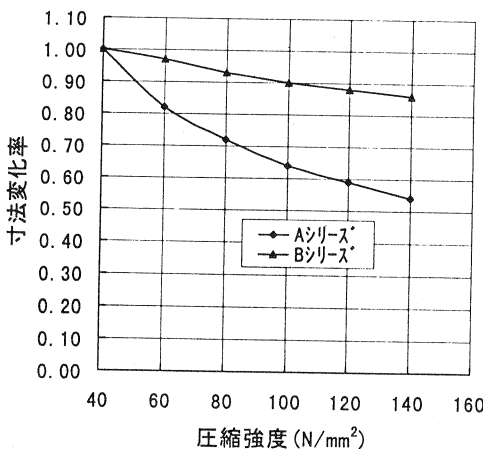


図-5 寸法変化率-圧縮強度関係

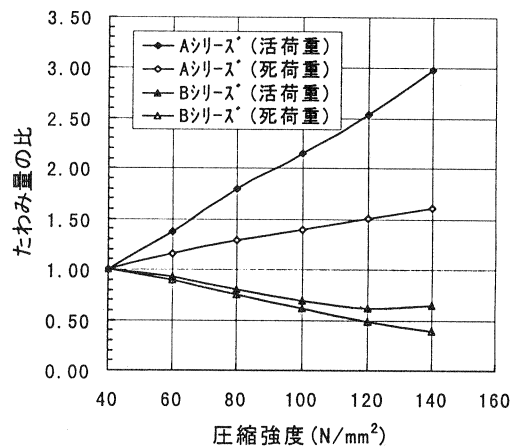


図-6 たわみ量の比-圧縮強度関係

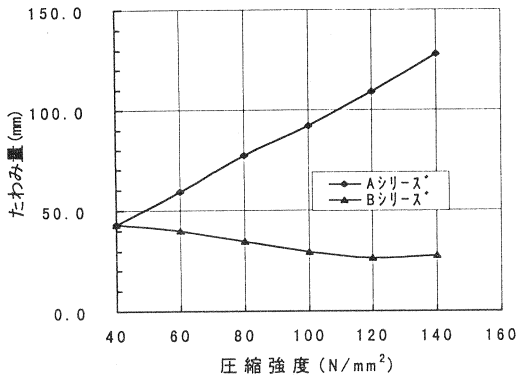


図-7 短期たわみ量-圧縮強度関係

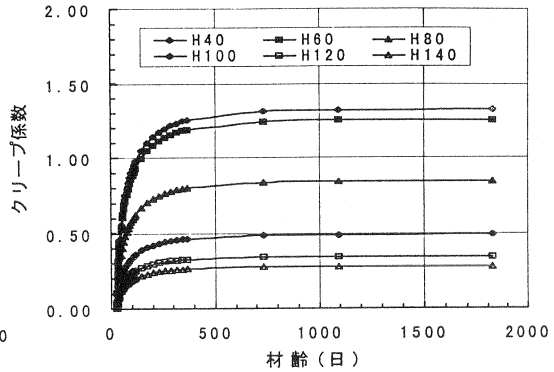


図-8 クリープ係数-材齢関係

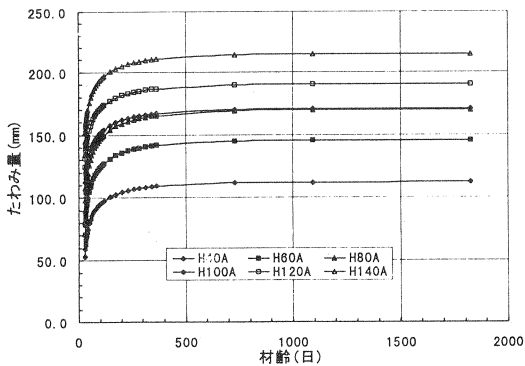


図-9(a) 長期たわみ量-材齢関係(Aシリーズ)

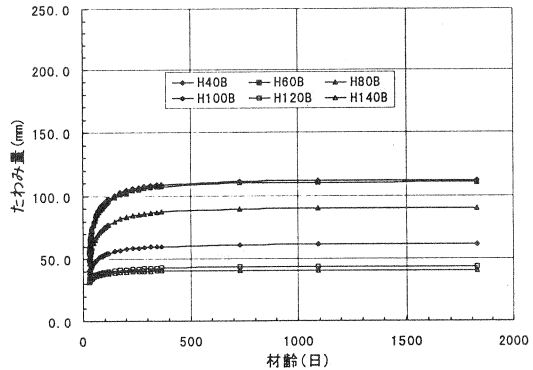


図-9(b) 長期たわみ量-材齢関係(Bシリーズ)

4. まとめ

本報告で得られた結果をまとめると次の通りである。

- ① H40A・B と H140A・B とを比較すれば、A シリーズでは約 0.54 倍に、B シリーズでは、約 0.86 倍にコンクリート断面を縮小化できた。
- ② H40A・B と H140A・B とを比較すれば、短期たわみ量は、A シリーズでは活荷重で約 2.98 倍、死荷重で約 1.61 倍に、B シリーズでは、活荷重で約 0.65 倍、死荷重で約 0.39 倍であった。
- ③ H40A・B と H140A・B とを比較すれば、材齢 730 日のたわみ量は、A シリーズで約 1.48 倍、B シリーズで約 0.36 倍であった。
- ④ 載荷時材齢から材齢 730 日までのたわみ量の伸び率は、クリープ係数に直接起因するところが大きいいため、コンクリートの圧縮強度が大きいほど伸び率が小さくなる傾向が認められた。

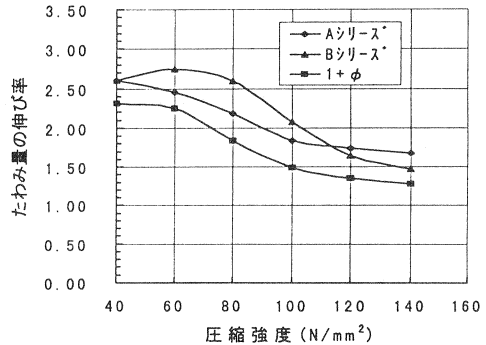


図-10 たわみの伸び率-圧縮強度関係

参考文献

- 1) コンクリート工学編集委員会:「続 20 年後のコンクリートを考える」アンケート調査結果報告, コンクリート工学, Vol. 37, No. 1, pp. 98~108, 1999. 1. 1
- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書設計編, 1996. 4
- 3) 超高性能コンクリート構造物設計施工指針に関する委員会:超高性能コンクリート構造物設計施工指針(案), 1996. 7. 10