構造体コンクリートから採取したコア供試体の 圧縮強度レベルと確率分布形状

PROBABILITY DISTRIBUTION CORRESPONDING TO COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE CORE SPECIMENS IN STRUCTURES

鈴木澄江*, 梶田佳寛**, 佐藤幸恵***

Sumie SUZUKI, Yoshihiro MASUDA and Sachie SATO

The probability distribution of compressive strength class of any kinds of concrete was defined as normal distribution in quality control even in structure concrete. It is clear that the peak of distribution is higher than the mean value of strength in high strength concrete, nevertheless the mean value is equal to the peak of distribution in ordinary strength class of concrete. In this report, it was clarified that the shape of probability distribution of compressive strength of core specimens in high strength concrete structures was not normal distribution. So, if the probabilistic property of concrete strength is assumed to follow a normal distribution in quality control, it makes the strength lower than the design strength in structure concrete.

Keywords: Strength of concrete in structure, Compressive Strength, Shape of probability distribution, Normal probability distribution

構造体コンクリートの強度、圧縮強度、確率分布形状、正規分布

1. はじめに

日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS5鉄筋コンクリート工事(以下 JASS5と略す)に定められているコンクリートの品質管理の方法は、コンクリートの圧縮強度の分布は強度レベルにかかわらず正規分布であるとみなして、不良率に対する正規偏差を1.73としている¹⁾。筆者らは、前報²⁾で管理用供試体におけるコンクリートの強度レベルと確率分布形状の関係を検討し、コンクリートが高強度化するとその確率分布形状は正規分布を示さず、最大頻数が最大値側に移行し、また、下限値側の分布のすそが広がる傾向を示すことを解析し、報告した。本研究では、設計基準強度36N/mm²以上のコンクリートを用いて実施された実大施工実験において構造体コンクリートから採取したコア供試体の圧縮強度を対象として、その強度レベルと確率分布形状について解析し、分布の特性と品質管理上の問題点について検討を行った。

2. 対象とした資料の概要

本論文では、日本建築センターの高層鉄筋コンクリート造技術指導委員会(旧技術検討委員会)で1986年以降に実施された46件の技

術指導(技術検討)のうち、実大施工実験の報告書で構造体から採取した個々のコア供試体の圧縮強度、調査条件、採取位置等の諸元がそろっている41件の報告書³⁾、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(略称、NewRC 総プロ)の実大施工実験の報告書³⁾および筆者らが関係した80~100N/mm²級高強度コンクリートの実大施工実験の結果^{4)~11)}を検討対象とした。対象とした実験の諸元を表-1に示す。検討対象としたコンクリートの水セメント比の範囲は、19.0%~52.5%(圧縮強度の平均値の範囲は31.4N/mm²~119.3N/mm²)である。コンクリートに用いられた結合材の種類は、圧縮強度の平均値が70N/mm²未満(強度レベルの区分60N/mm²)までは普通ポルトランドセメントであり、それ以上の強度レベルのものは、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント(ハイフローセメント)およびセメントの一部を混和材で置換したもの(エトリンガイト系混和材、シリカフューム等)である。コア供試体の圧縮強度試験結果を解析するにあたり、強度レベルを表-2に示す4つの区分に分け、1部材から採取したコア供試体(1部材から採取したコア供試体の数 N=2~44)の圧縮強度の平均値でふり分けた。なお、

* 鋼建材試験センター中央試験所材料グループ 専門職
(宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程
生産・情報工学専攻 大学院生)

** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*** 宇都宮大学工学部建設学科 研究員・工博

Expert Official, Materials Testing Group, Central Laboratory, Japan Testing Center for Construction Materials
(Graduate Student, Department of Production and Information Science, Doctor's Degree Course, Graduate School of Engineering, Utsunomiya Univ.)
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.
Research Engineer, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

表-1 高強度コンクリート実大柱部施工実験概要

番号	施工実験 実施時期	実験場所	部材数	材齢28日				材齢91日			
				供試体数 (N)の範囲	圧縮強度の 平均値の範囲 (N/mm ²)	標準偏差 の範囲 (N/mm ²)	変動係数 の範囲 (%)	供試体数 (N)の範囲	圧縮強度の 平均値の範囲 (N/mm ²)	標準偏差 の範囲 (N/mm ²)	変動係数 の範囲 (%)
1	1986.4~1986.5	神奈川県大和市	4	6~18	37.8~47.4	1.52~4.06	4.0~8.6	—	—	—	—
2	1986.4~1986.5	愛知県豊川市/横浜市	4	5~27	42.8~47.2	1.38~3.02	3.0~6.4	27	51.1~52.1	2.23~2.97	4.4~5.7
3	1986.9	横浜市	4	6	39.2~45.2	1.86~5.98	4.5~13.6	—	—	—	—
4	1986.1~1986.9	千葉県流山市	5	6~18	53.1~65.1	2.46~4.62	4.0~8.7	9	77.3~86.6	2.80~3.80	3.6~4.4
5	1987.2	埼玉県与野市	3	18	50.4~56.3	2.83~5.43	5.0~10.8	18	58.5~65.1	3.28~4.39	5.1~7.5
6	1987.1~1987.9	千葉県東葛飾郡関宿町	6	6~20	38.9~47.4	1.88~3.19	4.7~7.1	—	—	—	—
7	1986.4~1987.10	東京都青梅市	11	5~10	40.4~53.2	0.84~4.24	2.1~9.4	—	—	—	—
8	1987.4~1987.12	神奈川県厚木市	8	6~9	46.8~54.6	1.72~5.09	3.2~9.4	3~9	53.3~63.8	1.11~7.72	1.8~12.9
9	1987.11~1988.3	茨城県取手市	8	8~25	40.8~50.1	2.29~5.44	4.7~12.5	—	—	—	—
10	1987.12~1988.4	神奈川県愛甲郡愛川町	3	4~16	51.3~52.8	1.45~2.74	2.8~5.2	—	—	—	—
11	1988.8~1988.11	埼玉県入間郡大井町	5	6~27	44.9~52.6	2.12~5.48	4.2~10.4	—	—	—	—
12	1988.12~1989.9	茨城県古河市	3	18	43.5~46.1	1.70~2.84	3.9~6.2	9	50.8	4.02	7.9
13	1989.9	千葉県印旛郡白井町	3	18~27	49.6~54.8	1.76~2.57	3.5~5.0	—	—	—	—
14	1989.9	大阪市	2	12	49.7~51.8	3.60~5.15	6.9~7.6	—	—	—	—
15	1989.11	東京都	4	20	62.8~86.7	4.07~5.81	6.0~8.0	16~17	64.9~85.3	3.17~4.78	4.6~6.0
16	1988.11~1990.2	埼玉県南埼玉郡白岡町	14	2~14	41.9~51.6	0.87~5.49	2.0~12.3	—	—	—	—
17	1989.9~1990.7	兵庫県西宮市	8	8~10	48.0~59.5	3.02~5.14	5.7~10.7	10	56.6~64.3	3.20~5.50	5.0~9.7
18	1988.9~1991.1	千葉県市川市	16	3~12	46.1~64.1	1.35~7.61	2.6~12.7	3~12	49.5~76.5	0.29~6.58	0.4~11.0
19	1989.12~1991.3	埼玉県入間郡日高町	9	3~28	36.2~49.3	2.66~6.87	6.5~18.6	8~18	42.0~53.0	3.97~8.30	9.0~19.8
20	1990.7~1991.3	千葉県成田市	6	15~26	44.1~57.3	3.14~4.32	6.1~8.2	—	—	—	—
21	1989.12~1991.7	茨城県猿島郡総和町	16	7~14	38.5~58.9	2.23~5.29	3.8~12.5	3~9	44.5~60.7	1.14~8.55	2.1~15.7
22	1991.10	茨城県つくば市	13	9~18	61.9~107.0	2.79~14.61	3.7~14.1	8~9	65.5~108.3	2.57~9.32	3.5~8.7
23	1991.12	栃木県河内郡南河内町	3	10	50.5	2.93	5.8	8~20	71.6~74.5	4.16~4.77	5.6~7.9
24	1991.1~1992.1	大阪府門真市	15	10~12	37.5~62.0	2.62~5.78	4.4~13.7	—	—	—	—
25	1991.8~1992.3	神奈川県厚木市	5	10~18	43.8~55.6	1.19~3.53	2.6~8.1	10~18	49.3~64.2	1.54~5.68	2.8~11.5
26	1990.9~1992.11	千葉県東葛飾郡関宿町	11	9~30	45.7~67.9	1.18~7.83	1.9~13.8	9~15	54.5~72.9	2.64~8.20	3.6~15.0
27	1993.3	東京都府中市	4	18	57.4~63.0	2.03~4.87	3.3~8.1	18	69.0~73.5	1.90~4.07	2.7~5.5
28	1992.6~1993.3	新潟県青海町	6	10	70.8~110.7	2.07~7.79	2.2~9.3	10	80.6~119.3	2.16~6.54	2.1~6.0
29	1992.6~1993.6	千葉県印旛郡印西町	8	8~24	47.5~58.7	2.31~5.51	4.0~11.0	8	59.7~65.9	3.48~5.19	5.6~8.1
30	1991.9~1993.8	埼玉県大宮市	15	3~19	42.4~63.2	0.80~5.05	1.6~15.9	3~19	49.5~66.7	1.06~4.91	1.8~9.9
31	1992.1~1993.8	千葉県富津市	11	6~10	50.8~62.6	1.75~3.27	3.4~5.5	2~14	54.1~73.1	0.99~4.53	1.8~6.9
32	1993.2~1994.2	横浜市	22	6~18	32.7~63.9	0.98~4.89	1.8~14.8	4~18	35.6~68.1	1.45~6.49	2.4~12.9
33	1993.10~1994.4	神奈川県相模原市	3	12	61.5~74.2	2.39~7.35	3.2~11.4	12	67.0~77.5	2.76~6.87	4.1~10.1
34	1993.11~1994.10	千葉県船橋市	3	14~16	43.2~59.4	2.93~3.45	4.9~7.4	14~16	48.0~64.5	3.54~4.86	6.4~8.7
35	1994.10	東京都世田谷区	1	—	—	—	—	21	53.8	4.78	8.9
36	1994.6~1994.11	千葉県印旛郡印西町	8	8~24	45.3~50.6	1.88~5.53	4.2~11.0	7~22	53.1~60.1	1.87~6.26	3.4~10.7
37	1994.11	千葉県習志野市	2	17	54.8	2.46	4.5	18	60.8	3.35	5.5
38	1993.12~1994.12	埼玉県上尾市	5	9	53.4~59.1	2.11~2.69	2.4~5.0	8~18	55.3~59.4	2.47~4.17	4.5~7.0
39	1993.9~1995.7	千葉県市原市	15	11~42	40.0~51.4	1.18~4.47	2.3~10.5	11~42	41.4~61.0	1.57~7.18	2.7~17.3
40	1994.8~1995.10	茨城県稲敷郡美浦村	10	8~20	46.1~76.1	1.31~4.28	2.8~9.0	8~44	52.3~78.7	1.76~5.38	3.0~8.8
41	1990.8~1995.12	大阪府茨木市/東京都東大和市	12	3~12	35.8~65.0	1.74~4.63	3.3~9.2	6~12	39.4~62.7	1.47~4.94	3.7~10.2
42	1994.10~1996.5	兵庫県三田市	14	10~18	31.4~60.3	2.83~7.50	5.4~19.6	9~18	40.2~63.2	1.73~7.39	3.1~12.5
43	1996.6~1996.12	東京都八王子市	10	6~23	64.0~83.3	2.94~9.76	3.8~13.0	6~25	77.1~98.3	1.45~6.31	1.6~8.2
44	1997.5	山形県上山町	3	—	—	—	—	5~18	111.6~112.8	3.97~4.36	3.6~3.9
45	1997.4~1998.1	大阪府大東市	6	2~6	69.4~79.1	0.85~3.35	1.1~6.3	3~8	70.7~81.3	2.69~7.17	3.6~8.9
46	1998.10	茨城県つくば市	3	28	109.9	5.31	4.8	10~26	114.0~116.5	4.02~6.22	3.5~5.3
47	1998.4~1999.3	千葉県印旛郡白井町	6	3~21	39.9~57.5	1.46~3.55	2.8~7.3	5~21	51.4~65.7	0.86~5.36	1.4~9.0

表-2 圧縮強度の区分

強度レベルの区分 (N/mm ²)	圧縮強度の平均値 の範囲(N/mm ²)	データの個数(個)	
		材齢28日	材齢91日
40	30以上50未満	1989	519
60	50以上70未満	1860	1676
80	70以上90未満	254	404
100	90以上	101	191

対象としたコア供試体は、採取高さ、構造体断面での位置での影響が比較的小さいことが示されているデータ¹²⁾であるので、解析においてはそれらの影響を考慮しないものとした。試験材齢は材齢28日及び91日の2種類とした。コア供試体の圧縮強度試験結果は、各部材ごとに求めた圧縮強度の平均値(N=2~44)と個々のコア供試体の圧縮強度について、平均値からの偏差(ΔX)と偏差を標本標準

偏差で除した比(V1)を各材齢ごとに求め、それらの分布により各圧縮強度レベルにおけるバラツキの傾向を確認した。なお、偏差(ΔX)及び偏差を標本標準偏差で除した比(V1)の求め方の詳細は、前報³⁾で記述した。

3. 検討結果と考察

3.1 圧縮強度レベルと偏差ΔXの関係

図-1に各強度レベルにおける平均値からの偏差(ΔX)の分布を示す。強度レベルが60N/mm²までは、コア供試体の材齢にかかわらず、平均値からの偏差は正規分布を示している。これに対して、強度レベルが60N/mm²を超える領域になると平均値からの偏差の分布はその最頻値が強度の高い(+側)方へ移行し、なおかつ最低強度の分布のすそのが広がる形状を示しており、また、偏差全体

注) F28: 材齢28日, F91: 材齢91日を表す。

図-1 コア供試体の圧縮強度(材齢28日及び91日)の平均値からの偏差の分布

の分布の幅も強度レベルが高くなるほど広がる傾向を示した。構造体コンクリートから採取したコア供試体について解析した結果においても、前報²⁾で記述した管理用供試体（鋼製型枠を用いて作製した供試体）とほぼ同様の傾向を示す結果となった。

材齢とコア供試体の圧縮強度試験結果の分布を詳細に見ると、強度レベルが40、60N/mm²においては、40N/mm²の材齢91日でやや強度が高い領域に頻度が多い傾向があるが、いずれもほぼ正規分布を形成していることが確認された。強度レベルが80N/mm²では、最頻値が強度の高い領域に移行し、分布のすそが広がる形状となっている。強度レベルが100N/mm²では、最頻値が強度の高い領域に移行し、最低強度の分布のすそが広がる傾向がより鮮明に認められた。これらの結果から、強度レベルが高くなると、その分布形状は正規分布を示さない可能性があることが確認された。また、強度レベルが高くなることにより、分布の幅が広がる形状を示しており、これは平均値よりも圧縮強度が低い側にバラツキが大きくなることを示唆するものといえる。

また、個々の施工者別のデータについて解析したところ、強度レベルが40N/mm²では、いずれの施工者が作製した構造体コンクリートから採取したコア供試体もその圧縮強度の分布形状はほぼ正規分布を示しているが、強度レベルが60N/mm²以上では、施工者によりその分布が異なる傾向が認められた。図-2に強度レベルが60N/mm²（圧縮強度の平均値50～70N/mm²）の材齢28日および91日の施工者別の偏差（ ΔX ）の分布の一例を示す。施工者A社は、いずれの材齢においても最頻値が平均値よりも高い側（+側）に位置しており、かつ、分布形状は正規分布となっていない。また、最低強度の分布のすそが大きく広がる形状を示すものとなっている。一方、施工者B社は、 ΔX の分布がほぼ平均値を中心に正規分布を示しており、図-1に示した強度レベルが60N/mm²までの分布と同様の形状を示すものとなっている。強度レベルが60N/mm²までは、多くの施工者が施工者B社のタイプの分布を示している。し

かし、強度レベルが80N/mm²あるいは100N/mm²になると施工者A社の偏差の分布傾向へと移行する特徴が認められた。これらの傾向が異なる原因としては、コンクリートの破壊特性、試験機の特性（剛性、秤量、レンジ、球座、載荷板等）、試験方法あるいは供試体の整形といった要因が密接に関係しており、その結果、圧縮強度の確率分布形状が異なるものと考えられる。特に、強度特性は構造敏感性を示すといわれており、高強度となるほど微細な欠陥が強度に大きな影響を及ぼすと考えられる。しかし、現段階においてはその要因の特定は難しく、今後、要因を抽出して特定する必要があるといえる。また、強度レベルが60N/mm²クラスであっても強度レベルが100N/mm²クラスの分布形状を示す場合もあり（図-3のA社の例）、これらの相違についても要因を特定する必要があり、今後の課題と考えている。

3.2 圧縮強度レベルと偏差を標本標準偏差で除した比V1の関係

図-3に各強度レベル別に偏差（ ΔX ）を標本標準偏差で除した比（V1）の分布を示す。各強度レベルと偏差を標本標準偏差で除した比から各試験値が平均値に対して分布する可能性の傾向が示されているが、これによると偏差の分布同様に、強度レベルが60N/mm²までは正規分布を示すことが確認されたが、強度レベルが80N/mm²以上になると正規分布の形状とは異なる形状を示すことが確認された。特に強度レベルが100N/mm²においては最頻値が平均値より高い側（+側）に移行し、平均値よりも高い強度となる確率が大きくなる一方で、平均値よりも大幅に強度が下回る可能性があることも示唆する分布形状となっていることが明らかとなった。

3.3 圧縮強度レベルと確率分布形状について

前報²⁾および本解析結果より各強度レベルにおける偏差（ ΔX ）及び偏差を標本標準偏差で除した比（ ΔV ）の頻度分布を求めたところ、図-4に示すような圧縮強度分布の傾向を示すことが示唆さ

注) F28: 材齢28日, F91: 材齢91日を表す。

図-2 強度クラス60N/mm²の施工者別圧縮強度試験結果(偏差 ΔX)の分布の一例(材齢28日及び91日)

注) F28: 材齢28日, F91: 材齢91日を表す。

図-3 コア供試体の圧縮強度(材齢28日及び91日)の平均値からの差を標本標準偏差で除した比の分布

れた。最頻値と平均値との偏差をみると図-1では80および100 N/mm²クラスで3~5N/mm²、最頻値が平均値より大きくなる傾向を示している。また、図-3においては同クラスの標準偏差が0.5~1σ程度、強度が高い側に移行することが確認された。この結果、現行のJIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に従い、鋼製の型枠を用いて作製したコンクリート供試体あるいは構造体コンクリートから採取したコア供試体で圧縮強度試験を行った場合、強度レベルが高いコンクリートになると、その試験結果は必ずしも正規分布にならない可能性があることが明らかとなった。現行の品質管理においては、いずれの強度レベルにおいても圧縮強度の試験結果が正規分布を示すと仮定して調査（配合）設計ならびに品質管理が行われているため、平均値を中央値として設計、管理を行った場合には、管理規準からはずれる（不合格）試料が発生する可能性があることを示唆するものである。これは、これらの強度レベルのコンクリートではJASS5の設計基準に基づく方法あるいはレディーミクストコンクリートの管理規準に基づく方法では所定の品質を確保できない確率が発生することとなるため、管理手法や設計基準、管理規準等の見直しが必要と考えられる。

4. 結論

構造体コンクリートから採取したコア供試体の圧縮強度における確率分布を検討した結果、本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 構造体コンクリートから採取したコア供試体の強度レベルが60 N/mm²（圧縮強度の平均値が50~70 N/mm²）までは圧縮強度の平均値からの偏差の分布は、ほぼ正規分布を示すことが確認された。
- (2) 構造体コンクリートから採取したコア供試体の強度レベルが80 N/mm²（圧縮強度の平均値が70~90 N/mm²）および100 N/mm²（圧縮強度の平均値が90 N/mm²以上）の圧縮強度の平均値からの偏差の分布は正規分布を示さず、強度レベルが高くなるほど圧縮強度分布における最頻値が最大値側に移行し、分布のすそが広がる形状を示すことが確認された。また、強度レベルが高くなるほど、分布領域の幅が広がる形状となった。
- (3) コア供試体の圧縮強度の偏差を標本標準偏差で除した比の分布については、偏差の分布と同様に強度レベルが60 N/mm²までは正規分布となるが、強度レベルが80 N/mm²以上になると正規分布の形状とは異なる形状を示すことが確認された。特に強度レベルが100 N/mm²においては頻度が平均値より高い側（+側）に移行し、平均値よりも高い強度が出現する確率が大きくなる一方で、平均値よりも大幅に低い強度が出現する確率も大きくなることが示唆された。
- (4) 圧縮強度レベルが高いコンクリートになると、その試験結果は必ずしも正規分布しない可能性があり、現行の品質管理においては、いずれの強度レベルにおいても圧縮強度の試験結果が正規分布すると仮定して設計ならびに品質管理が行われているため、平均値を中央値として設計、管理を行った場合には、管理規準からはずれる（不合格）試料が発生する可能性が生じる。このような分布を示す強度レベルのコンクリートではJASS5の設計基準に基づく方法あるいはレディーミクストコンクリートの管理規準に基づく方法では所定の品質を確保できない確率が生じることとなるため、管理手法

あるいは基・規準等の見直しが必要と考えられる。

図-4 圧縮強度の分布の概念

参考文献

- 1) 日本建築学会建築工事標準仕様書5鉄筋コンクリート工事（JASS5）2003
- 2) 鈴木澄江，榊田佳寛：コンクリートの圧縮強度レベルと確率分布形状，日本建築学会構造系論文集，第578号，pp.1-6，2004.4
- 3) 榊田佳寛，佐藤幸恵，友澤史紀：高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調査強度，日本建築学会構造系論文集，第537号，pp.13-20，2000.11
- 4) 渡邊芳春，坂井悦郎，友澤史紀，川瀬清孝，清水昭之，榊田佳寛，阿部道彦，安田正吉：エトリンガイト系混和材を用いた現場打ち高強度コンクリートの性質，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A，pp.697-698，1993.9
- 5) 小菅啓一，渡邊芳春，友澤史紀，川瀬清孝，清水昭之，榊田佳寛，阿部道彦，安田正吉：エトリンガイト系混和材を用いた現場打ち高強度コンクリートの実大柱試験による検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A，pp.699-700，1993.9
- 6) 小菅啓一，渡邊芳春，松永嘉久，友澤史紀，川瀬清孝，清水昭之，榊田佳寛，阿部道彦，坂井悦郎：エトリンガイト生成混和材を用いた現場打ち高強度コンクリートの性質，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），A，pp.249-250，1994.9
- 7) 荒川総一郎，友澤史紀，榊田佳寛，清水昭之，阿部道彦，野口貴文：高強度コンクリートの実用化に関する研究 その1全体計画，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），A-1，pp.203-204，1996.9
- 8) 呉相均，友澤史紀，荒川総一郎，大村陳庭：高強度コンクリートの実用化に関する研究 その2フレッシュコンクリートの性質，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），A-1，pp.205-206，1996.9
- 9) 佐野寛，榊田佳寛，古川雄二，山本幸雄：高強度コンクリートの実用化に関する研究 その3温度履歴と強度性状，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），A-1，pp.207-208，1996.9
- 10) 金森誠治，渡部聡，櫻井重英：高強度コンクリートの実大施工実験（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），A-1，pp.833-836，1998.9
- 11) 和田利之，榊田佳寛，中村成春，上西隆，河野政典，起橋孝徳：100 N/mm²級高強度コンクリートを用いた構造体の強度特性及び発生応力（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），A-1，pp.21-24，1999.9
- 12) 佐藤幸恵，榊田佳寛：高強度コンクリートの構造体中での圧縮強度の変動，日本建築学会構造系論文集，第562号，pp.9-14，2002.12

（2004年11月8日原稿受理，2005年3月2日採用決定）