

報告 阪神地域の構造体コンクリートの品質

木村芳幹*¹・平澤一郎*²・秦 邦晃*³・大嶋 章*¹

要旨：阪神地域の建物14棟から合計562体のコンクリートコアを採取し、気乾単位容積質量、圧縮強度および静弾性係数を試験した。各物性値を部材で比較すると、壁で単位容積質量が小さく圧縮強度の変動係数が大きいことが、床で圧縮強度が大きいことが認められた。これは施工方法が時代とともに推移していることと関連し、軟練りコンクリートの横流しによる充填の影響が要因の一つとして考えられる。

キーワード：阪神地域、構造体コンクリート、単位容積質量、圧縮強度、静弾性係数

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震から2年以上経過し、被災調査は現地調査に基づく事実の記録段階から、調査結果を詳細に分析して今後の技術に展開する段階となっている。その中で、コンクリートの材料・施工に関する調査報告は文献[1~3]にみられるが、被害を受け解体あるいは補修・補強された建物が相当数あることを考慮すると報告件数はきわめて少ないといえる。一方、実構造物におけるコンクリートの品質に関する研究調査は、欠陥コンクリートが社会問題となった1970年代後半に積極的に行われていた[4]。しかし、その多くは1960年代以前に建設された構造体を対象としていることから、結果は当時と使用材料・施工方法が異なる現在にも適用されるとは限らないと考えられる。

本報告では、兵庫県南部地震により被災し、解体あるいは補修・補強することとなった阪神地域の建物14棟を対象として行ったコンクリートコアによる構造体コンクリートの品質調査のうち、竣工年および部材の違いが気乾単位容積質量、圧縮強度、静弾性係数に与えた影響について述べ、構造体コンクリートの品質と施工方法の推移との関連について考察する。

2. 調査概要

2. 1 調査対象

調査建物の概要および調査数量を表1に示す。調査建物の竣工は1963~1987年であり、構造は10棟が鉄筋コンクリート(RC)造、4棟が鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造である。設計基準強度(以下 F_c)は6棟で不明であるが、明らかとなっている建物では $18\sim 24\text{N/mm}^2$ である。なお、調査期間は1995年3月~1996年3月であり、記号Aの建物は地震後に火災を受けている。

2. 2 調査方法

コンクリートコアは直径を10cmとし、ひび割れおよびコンクリートの剥落が観察されない柱、梁、壁および床スラブ(以下床)から採取した。採取位置は、柱は高さ方向の中央部付近、梁はスパンの中央部付近、壁は高さ1.0~1.5m程度とした。採取方向は、柱、梁、壁は打込み方向に対して垂直とし、床は平行とした。コアの採取方法、供試体寸法の測定方法および圧縮強度の試

*1(株)新井組 技術本部 技術研究部 主任部員(正会員)

*2(株)新井組 建築本店 工務部 課長

*3(株)新井組 技術本部 技術研究部 主任研究員(正会員)

表1 調査建物概要および調査数量

記号	竣工(年)	建物概要			コンクリート		調査数量																
		所在地	構造	階数	用途	被災 ^{*1}	Fc ^{*2} (N/mm ²)	粗骨材	単位容積質量				圧縮強度				静弾性係数						
									柱	壁	梁	床	計	柱	壁	梁	床	計	柱	壁	梁	床	計
A	1963	西宮市	RC	5	学校	中破	18	砂利	-	3	39	2	44	6	3	39	6	54	1	-	-	-	1
B	1966	西宮市	RC	5	集合住宅	小破	不明	砂利	-	21	5	16	42	-	21	5	16	42	-	12	4	-	16
C	1967	西宮市	RC	3	集合住宅	小破	不明	砂利	9	9	7	12	37	9	9	7	12	37	7	3	0	-	10
D	1968	西宮市	RC	7	集合住宅	倒壊	不明	砂利	2	28	12	6	48	2	28	11	6	47	2	0	10	-	12
E	1972	西宮市	SRC	8	事務所	小破	21	砂利	-	12	6	15	33	-	11	6	13	30	-	-	6	-	6
F	1973	兵庫区	RC	5	店舗・住宅	小破	21	砂利	-	12	3	9	24	-	12	3	9	24	-	-	3	-	3
G	1973	東灘区	RC	4	事務所	小破	不明	碎石	-	8	3	-	11	-	8	3	-	11	-	-	3	-	3
H	1973	芦屋市	RC	7	集合住宅	大破	22.5	碎石	-	-	8	-	8	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-
I	1974	中央区	SRC	10	事務所	大破	21	碎石	-	30	-	-	30	-	29	-	-	29	-	-	-	-	-
J	1977	長田区	RC	5	事務所	小破	21	碎石	8	48	-	6	62	7	48	-	6	61	6	16	-	2	24
K	1978	中央区	SRC	9	店舗	中破	18	碎石	-	36	-	-	36	-	36	-	-	36	-	15	-	-	15
L	1978	西宮市	RC	5	店舗・住宅	中破	不明	碎石	3	42	11	8	64	3	42	11	8	64	2	3	11	-	16
M	1984	東灘区	SRC	11	集合住宅	中破	不明	碎石	-	15	-	-	15	-	11	-	-	11	-	-	-	-	-
N ^{*3}	1987	灘区	RC	8	集合住宅	中破	24	碎石	18	17	22	21	78	18	17	22	21	78	12	6	17	-	35
N'	1987	灘区	RC	8	集合住宅	中破	21	碎石	9	7	11	3	30	9	7	11	3	30	7	1	2	-	10
合計									49	288	127	98	562	54	282	126	100	562	37	56	56	2	151

*1 被災度:日本建築学会宮城県沖地震災害報告書判定基準による。*2 Fcは設計基準強度,ただし設計図書に記載はkgf/cm² *3 記号N,N'は同一建物

験方法はJIS A 1107 (コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法) に準じた。供試体は20cmを超えない範囲で最も長くなるように切断したコアとし、両端面を研磨により仕上げた。各試験は、研磨後3時間以上経過した供試体を気乾状態とみなして行った。単位容積質量は、気乾質量を供試体の平均直径と平均高さから求めた容積で除した値とし、圧縮強度は最大荷重を供試体の平均直径から求めた断面積で除した値に、供試体の高さとの比(h/d)による補正係数を乗じた値とした。なお、鉄筋が貫通した場合の圧縮強度の補正は行っていないが、D13以上または5本以上の鉄筋がコアを貫通した場合は、測定値として扱っていない。静弾性係数の試験方法はJIS原案に準じ、高さ方向のひずみの測定にはコンプレッソメータを用いた。静弾性係数は、ひずみ50μ時点の応力と1/3圧縮強度の割線係数として求めた。

3. 構造体コンクリートの品質

3.1 単位容積質量

図1に、建物の竣工年による気乾単位容積質量の平均値の推移を示す。同図より、気乾単位容積質量は用いられる粗骨材が碎石となった1973年以降で、各部材ともそれまでより小さいことが分かる。図2に単位容積質量の度数分布を粗骨材の種類に分類して示したが、平均値は砂利のもので2.24kg/l、碎石のもので2.17kg/lである。また、図2には(1)式による正規分布曲線を併記しているが、分布形状は粗骨材が砂利のものでは正規分布曲線に添った形状であるのに対し、碎石のものでは最頻値が平均値よりやや大きい。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

ここにf(x): 正規分布の確率密度関数

μ: 平均値

σ: 標準偏差

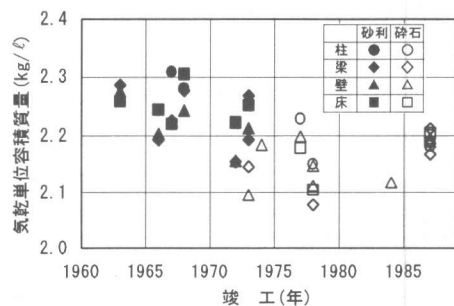


図-1 竣工年による単位容積質量の推移

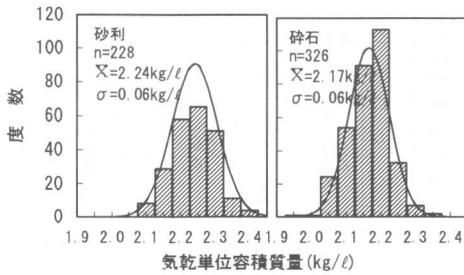


図-2 単位容積質量の度数分布

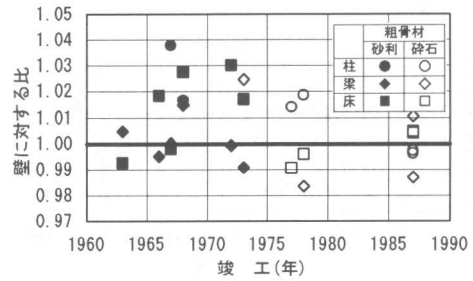


図-3 壁に対する単位容積質量の比の推移

図3に、各部材の壁に対する気乾単位容積質量の比の推移を示す。同図によると、1987年に竣工した建物では比の範囲が0.99～1.01であり、部材間の気乾単位容積質量に明確な差異はみられないが、1978年以前では比の範囲が広いことが分かる。1978年以前に竣工した建物の壁に対する気乾単位容積質量の比は、柱で1.01～1.04、床で0.99～1.03、梁で0.98～1.01程度である。梁および壁の気乾単位容積質量は柱および床よりやや小さい傾向にある。

3. 2 圧縮強度

圧縮強度の度数分布を図4に、相対度数を図5にそれぞれ建物の竣工年を10年ごとに分類して示す。なお、建物記号Aは火災による影響が考えられるため、同図および以下の検討から除外する。

図4より、全試料の圧縮強度の平均値は23.1N/mm²、標準偏差は6.73N/mm²であり、全体の分布形状はほぼ正規分布曲線に添った形状であるといえる。しかし、圧縮強度の分布状況は建物の竣工年代により異なり、図5において強度が18N/mm²以下となる割合は竣工年が新しくなるにつれて低くなる傾向がみられる。また、1960年代竣工建物では18N/mm²を下回るものが25%存在する一方、30N/mm²を超えるものも1970年代より多い18%あり、強度のばらつきが大きいといえる。

図6に各建物各部材の圧縮強度の平均値の推移を、図7に各部材の壁に対する圧縮強度比の推移を示す。図6より、圧縮強度は竣工年とともに緩やかに大きくなる傾向にあることが分かる。これは、竣工年とともに設計基

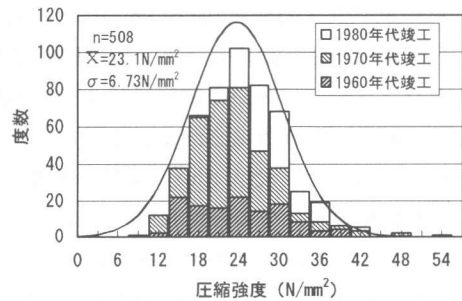


図-4 圧縮強度の度数分布

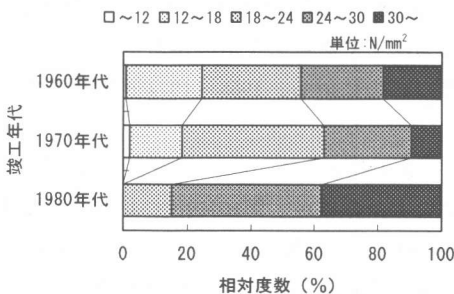


図-5 圧縮強度の相対度数

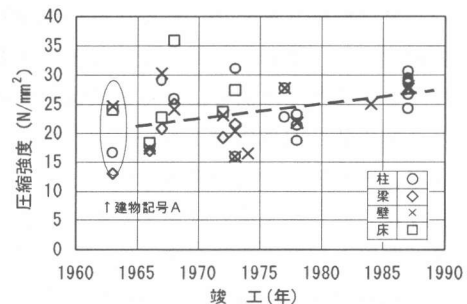


図-6 圧縮強度の平均値の推移

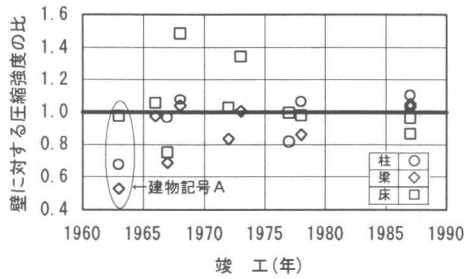


図-7 各部材の壁に対する圧縮強度比の推移

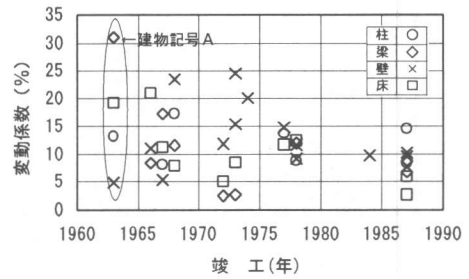


図-8 圧縮強度の変動係数の推移

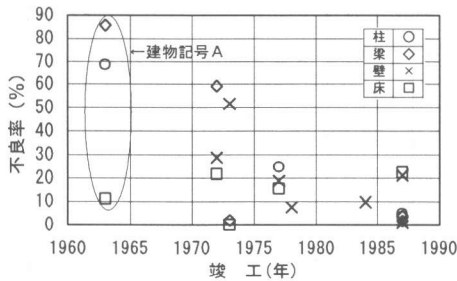


図-9 圧縮強度の不良率の推移

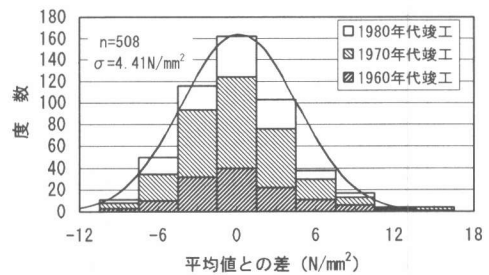


図-10 圧縮強度の平均値との差の度数分布

準強度が徐々に大きくなっていることが反映されているものと考えられる。また、図7より、1977年以後に竣工した建物では、壁に対する各部材の圧縮強度比の範囲が0.8~1.1であるのに対し、1967~1973年では0.7~1.5であり部材間の強度比が大きいことが分かる。この年代における各部材の壁に対する強度比は、床で0.8~1.5、梁で0.7~1.0、柱で0.9~1.1であり、圧縮強度は床で大きく梁で小さい傾向にある。柱の圧縮強度は壁とほぼ同等である。

他部材と比較して床の圧縮強度が大きい一因として、床は降雨や上階のコンクリートからの水などで湿潤養生される機会が多いこと[5]、および試験結果に対するJIS A 1107の(h/d)による補正係数の値が短いコアで大きい可能性があること[4]が指摘されている。しかし、今回の調査範囲では、1977年以後は床の圧縮強度が他部材と比較して必ずしも大きいとはいえず、養生条件や補正係数による影響以外にも構造体コンクリートの圧縮強度に及ぼす要因が存在すると考えられる。

図8に、各部材の圧縮強度の変動係数の推移を示す。なお、同一建物においても施工季節によりコンクリートの調合強度が異なる場合が考えられることから、同図の変動係数は各階の平均値で示した。同図より、圧縮強度の変動係数は竣工年とともに小さくなる傾向にあり、生コンクリートの品質管理体制が整うこととなった1968年のJIS A 5308 (レディーミクストコンクリート)改訂以後は、柱、壁および床の圧縮強度の変動係数は15%以下であることが分かる。また、1977~1987年竣工建物では部材による変動係数の差が明確でないのに対し、1968~1974年竣工建物では壁の変動係数が他の部材より5~15%大きい。

つぎに、 F_c が明らかな建物についてコアの圧縮強度の不良率を求め、その推移を図9に示す。なお、各コアの圧縮強度と各建物各部材の平均値との差の度数分布が、図10に示すように正規分布曲線に添った形状となることから、不良率は各建物各部材ごとに求めた。図9より、竣工年とともに各部材の圧縮強度の不良率は低くなり、1975年以後ではおおむね20%以下で推移していることが分かる。部材で比較すると、床は竣工年にかかわらず不良率は他の部材より低く、柱、壁

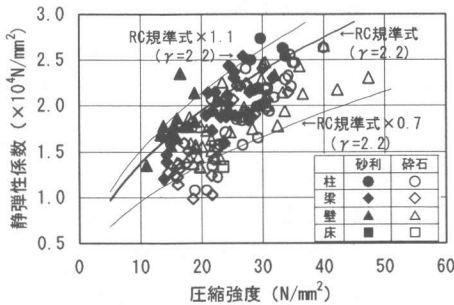


図-11 圧縮強度と静弾性係数との関係

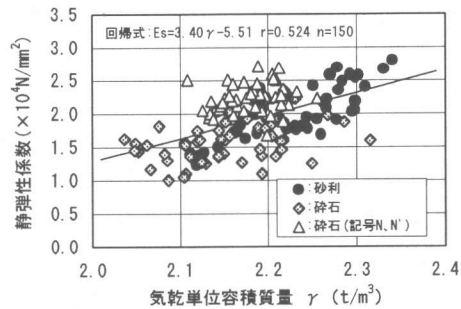


図-12 単位容積質量と静弾性係数との関係

および梁では竣工年とともに小さくなる傾向にある。

3. 3 静弾性係数

図11に、圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。なお、同図には、単位容積質量 γ を全試料の平均値である 2.20t/m^3 とした日本建築学会・鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説による式（以下RC規準式）[6]による値、およびその0.7倍、1.1倍の値を併記した。同図より、構造体コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係は、RC規準式による値の0.7~1.1倍程度に分布しており、粗骨材が砂利のものは、碎石のものと比較して同一圧縮強度時の静弾性係数が大きい傾向にあることが分かる。また、静弾性係数は、図12に示した気乾単位容積質量と静弾性係数との関係より、粗骨材の種類にかかわらず気乾単位容積質量に比例して大きくなる傾向にある。しかし、粗骨材が碎石のものについては同一気乾単位容積質量における静弾性係数の範囲が広い。同図において粗骨材が碎石のものうち建物記号N、N'については別途分類して示しているが、建物によって分布域が異なることが示唆される。これは、用いられている碎石の岩種の違いによるものと考えられる。

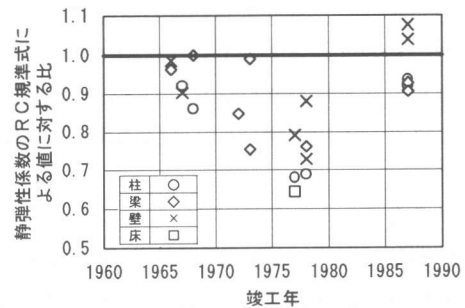


図-13 RC規準式による値に対する比の推移

図13に、コアの静弾性係数のRC規準式による値 (F, γ :測定値) に対する比の平均値の推移を部材に分類して示す。RC規準式に対する比を建物の竣工年で比較すると、1977~1978年で0.65~0.90と小さい傾向にある。また、同一建物の部材で比較すると、柱および梁で壁より小さい傾向にある。これは、柱や梁から採取したコアの一部に地震による微細なひび割れが存在していた可能性がある。

図13に、コアの静弾性係数のRC規準式による値 (F, γ :測定値) に対する比の平均値の推移を部材に分類して示す。RC規準式に対する比を建物の竣工年で比較すると、1977~1978年で0.65~0.90と小さい傾向にある。また、同一建物の部材で比較すると、柱および梁で壁より小さい傾向にある。これは、柱や梁から採取したコアの一部に地震による微細なひび割れが存在していた可能性がある。

4. 施工方法の推移と構造体コンクリートの品質との関連

本調査の範囲では、1978年以前、とりわけ1968~1974年に竣工した建物で部材によるコンクリートの品質に違いが大きいことが明らかとなった。部材で比較すると、壁で単位容積質量が小さく圧縮強度の変動係数が大きいことが、床で圧縮強度が大きいことが認められた。

構造体コンクリートの品質は、垂直部材の打込み高さ、養生条件、打込み時期、施工方法などさまざまな要因により影響される。これらのうち、コンクリートの品質が施工年代により異なる大きな要因として、施工方法が推移していることが考えられる。本調査における建物の竣工は

1960年代の高度成長期以後であり、この時期はコンクリート構造物が構築されるようになってから最も施工方法が推移した。特に、コンクリートポンプは1960年代後半から、パイプレータは1970年代から急速に普及[7]し、大量のコンクリートを短時間に、密実に打ち込むことが可能となった。その反面、軟練りコンクリートを振動させて打ち込むことが一般化し、横流しとなった場合には、流した距離が長いほど分離したコンクリートとなる可能性が高い。

壁のコンクリートは、梁下から自由落下で充填される他に、柱から横流しによって充填される場合が考えられる。特に、軟練りコンクリートの場合には、横流しで充填される割合が高くなり、分離したコンクリートで充填された部分が存在すると考えられる。このことが壁のコンクリートの単位容積質量を小さく、圧縮強度の変動係数を大きくした一つの要因であると考えられる。床のコンクリートは、軟練りでも横流しで充填されることはほとんどないことから、圧縮強度のばらつきが小さく、平均値が他部材と比較して全般に大きくなったものと推察される。

なお、1977年以後に竣工した建物でコンクリートの部材間の品質の差が小さいのは、スランプおよび単位水量の規制が強化されるとともに、コンクリート技士などの教育資格制度の制定によりコンクリートの品質に関する認識が深まったことによるものと考えられる。

5. まとめ

阪神地域の建物14棟を対象とした構造体コンクリートの品質調査より、以下の傾向がみられた。

1)気乾単位容積質量は、用いられる粗骨材が砕石となった1973年以降でそれまでより小さい。平均値は砂利のもので2.24kg/l、砕石のもので2.17kg/lである。

2)圧縮強度は建物の竣工年とともに緩やかに大きくなる傾向にある。部材別にみると、床で大きく梁で小さいが、1977年以後は部材間の強度の差は小さい。

3)壁を除く各部材の圧縮強度の変動係数は、1968年以後は15%以下で推移している。壁の変動係数は、1968～1974年で他部材より5～15%大きい。

4)静弾性係数はRC規準式による値の0.7～1.1倍程度に分布し、粗骨材が砂利のものは砕石のものと比較して、同一圧縮強度時の静弾性係数が大きい。

5)構造体コンクリートの部材間の品質変動は1968～1974年で大きい。壁で単位容積質量が小さく圧縮強度の変動係数が大きい一因として、軟練りコンクリートの横流しによる充填の影響が推察される。1977年以後で部材間の品質の差が小さいのは、スランプおよび単位水量の規制が強化されるとともに、コンクリートの品質に関する認識が深まったことによるものと考えられる。

参考文献

- [1]日本建築学会近畿支部材料施工部会：1995年兵庫県南部地震材料・施工に関する被害調査報告書、pp.1～pp.95、1996.7
- [2]大野義照、木村芳幹：震災を受けた学校建築における材料・施工状況、G B R C、Vol.85、No.1、pp.4～14、1997.1
- [3]日本建築学会材料施工委員会：施工における品質管理－阪神・淡路大震災における鉄筋コンクリート造建物の被害状況をふまえて－、pp.2～35、1996.9
- [4]日本建築学会：構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点、日本建築学会、pp.199～216、1987.11
- [5]梶田佳寛、友沢史紀、矢島義麿：実際のRC造建築物におけるコンクリートの品質－その2 主として部位別・階別の圧縮強度について－日本建築学会論文報告集、第317号、pp.155～163、1982.7
- [6]日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、丸善、pp.43、1990
- [7]横須賀誠一：運搬・打込みの変遷、コンクリート工学、VOL.30、No.5、PP.97～101、1992.5