超硬練り貧配合コンクリートの圧縮 および引張強度に関する実験的考察[†]

徳 田 弘* 加 賀 谷 誠**
川 上 洵** 船 木 論***

Experimental Considerations on Compressive and Tensile Strengths of Extremely Stiff Consistency and Lean Mix Concrete

by

Hiroshi TOKUDA*, Makoto KAGAYA*, Makoto KAWAKAMI**
and Satoshi FUNAKI*

Prismatic concrete specimens were manufactured by surface vibrating compaction and cube test pieces cut from its upper and lower parts were prepared. The compressive and tensile strengths of the pieces were measured by applying load parallel or perpendicular to the placing direction. Furthermore, compaction mechanism was examined on the basis of the mix analysis test results and the compaction process observed through a transparent side panel of the specimen mould, and the maximum depth of voids contacted with upside and underside of each coarse aggregate was measured.

The same tendency was observed on the relation between compaction time and compressive strength regardless of loading direction. At the time of 15 seconds, the strength in the upper part was considerably higher than that in the lower part, because the upper part was changed into relatively dense by sharp subsidence of specimen surface coincided with commencing compaction while the other was in the porous state as yet. Subsequently the strength increased and reached the maximum at the time of 120~180 seconds. At this stage, air bubbles were dissipated and the voids were filled up by cement paste transferred downward. If compaction was continued moreover, the strength decreased. This resulted from the effect that the transfer direction was turned to upward.

The relation between compaction time and tensile strength showed the same tendency as that observed on compressive strength. But, the ratio of cube strength to standard strength was lower than that of compressive strength on the whole, and the tensile strength loaded in parallel to the placing direction was higher than the others in case that crushed stones were used. It was thought that these resulted from the effects of void and bond property between coarse aggregate and mortar. キー・ワード: 超硬練り貧配合コンクリート, 圧縮強度, 引張強度, 載荷方向

1 緒 言

近年, コンクリートダム¹⁾の施工法として, 超硬練り貧配合コンクリートを振動ローラにより締固める RC D 工法^{2)~6)}が注目されている。本工法に関するいくつかの報告によれば, 1 リフトの高さ方向における圧縮強度分布に不均一性が認められること, この種のコンクリートの締固め機構が明らかにされていないことなどの問題点が指摘されている。

本研究では, これらの問題点を解明し, さらにこの種のコンクリートの強度特性をより詳細に把握するため, まず, 超硬練り貧配合コンクリートを表面振動機

により締固めて角柱試験体を作製し, その上・下部から立方体供試体を切り出し, これにコンクリートの打込み方向ならびにこれと直角方向に載荷して圧縮および引張強度を測定した。つぎに, 型わくの側壁せき板の一枚を透明プラスチック板とし, これを通して締固め過程を観察するとともに, 締固め過程における上・下部の各組成成分量の変化を配合分析により測定し, 両結果から締固め機構を明らかにした。さらに, 硬化コンクリートの内部構造を実体顕微鏡により観察し, その結果と締固め機構に基づき, 強度試験結果に対し若干の考察を試みた。

[†] 原稿受理 昭和61年10月16日 Received Oct. 16, 1986

* 正 会 員 秋田大学鉱山学部 秋田市手形学園町, Mining College, Akita University, Tegatagakuen-cho, Akita

** 秋田大学鉱山学部 秋田市手形学園町, Mining College, Akita University, Tegatagakuen-cho, Akita

*** 秋田大学大学院 秋田市手形学園町, Graduate Student, Akita University, Tegatagakuen-cho, Akita

2 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

普通ポルトランドセメント (NPC), フライアッシュを30%混和した中庸熱ポルトランドセメント (FAC), 天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤 (AEA), リグニンスルホン酸塩を主成分とする減水剤 (WRA) を使用した。骨材は川砂 (RS), 川砂利 (RG), 砕砂 (CS) および砕石 (CG) であり, それらの物理的性質を Table I に示す。

Table I. Physical properties of aggregates.

Kinds of aggregate	Specific gravity	Water absorption (%)	Fineness modulus F.M.
River sand (RS)	2.54	2.71	2.61
River gravel (RG)	2.56	3.30	7.28
Crushed sand (CS)	2.57	2.67	2.62
Crushed stone (CG)	2.59	2.16	7.35

Table II に, コンクリートの配合と材令 28 日における圧縮および引張強度を示す。Mix No.1 では NPC, RS, RG, AEA を使用し, Mix No.2 では, FAC, CS, CG, WRA を使用した。

コンクリートの練りまぜには容量50 l の強制練りミキサーを使用し, 全材料投入後90秒間練りまぜた。

2.2 圧縮強度, 引張強度および密度の測定

断面 15×15 cm, 高さ約 35 cm の角柱試験体を作製し, 標準養生を行った後, 材令26日でその上・下部からカッターにより $15 \times 15 \times 15$ cm 立方体供試体を切り出した。両供試体の中心点間の距離はおよそ 20 cm であり, これらを材令28日における圧縮および引張強度の測定に供した。また, 供試体の体積と重量から密度を求めた。

試験体の締固めには, 重量 38 kgf, 振動数 50 Hz, 振幅 0.18 cm, 締固め板 14.5×14.5 cm の試作した表面振動機を用い, 一層で締固めた。締固め時間を15, 60, 120, 180 および 300 秒に変化させた。

強度試験における載荷方向をコンクリートの打込み方向およびこれに直角方向とし, 破壊荷重から圧縮強度と引張強度をそれぞれ求めた。ただし, 円柱供試体による圧縮強度に換算するため, 得られた強度を 0.8 倍した。引張強度は, $1 \times 1 \times 15$ cm 鋼製分布板を用い

た割裂試験からこれを求めた。供試体の個数は同一条件について2個とした。なお, $\phi 15 \times 30$ cm 標準供試体を作製し, 材令28日で強度試験を行った。

2.3 配合分析試験

締固められた前記試験体の上・下部における配合を明らかにするため, 同一締固め条件について2個の試験体を作製し, 一方を各材料の単位量の測定, 他方を空気量の測定に用いた。締固めが終わってから約2時間経過後, 強度試験用供試体に対応する位置から断面 15×15 cm, 高さ約 8 cm の試料を採取した。試料の重量を測定後, その一部から 5 mm ふりを用いた湿式ふるい分けにより約 50 g のモルタルを採取した。これを高周波加熱により脱水した後, 塩酸溶解および水酸化ナトリウム溶液による滴定試験から単位水量と単位セメント量を求めた。残りの試料について洗い分析試験を行い, 単位細・粗骨材量を求めた。他方, 試験体から形状を乱さないように試料を採取し, これを水で満たしたワシントン型エアメータの容器に入れ, あふれ出た水量から試料の体積を求めた。さらに, かく拌により試料中の空気泡を消散させ, 容器内の水位低下分に相当する水量から空気量を求めた。以上の測定結果から試験体の上・下部における配合を求めた。

2.4 締固め過程および硬化コンクリートの内部構造の観察

角柱試験体用型わくの側壁部せき板の一枚を透明プラスチック板とし, これを通してビデオカメラにより締固め効果の伝ば過程を録画した。その再生画像から, 時間経過に伴う空気泡, セメントペーストなどの移動傾向とコンクリート表面の沈下状況を観察した。締固め時間を 300 秒とした。

材令28日で試験体の上・下部から立方体供試体を切り出し, さらにこれをコンクリートの打込み方向に切断して $7.5 \times 15 \times 15$ cm 試験片を作製した。この試験片の切断面 (15×15 cm) を研磨仕上げし, 倍率40倍の実体顕微鏡により主として粗骨材粒周辺の空げきの分布状況を観察した。空げきはその大部分が骨材粒の上面, 下面あるいは上・下両面に接して形成され, 半月形ないし三日月形を呈していた。そこで, 切断面に認められるすべての粗骨材粒に接する空げきの高さ方向 (コンクリートの打込み方向) における最大長さ

Table II. Mix proportions and strengths at the age of 28 days of concrete.

Mix No.	Gmax (mm)	VC value (sec)	Air content (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					Strength (kgf/cm ²)	
						W	C	S	G	Admix-ture	σ_c	σ_t
1	40	20 $\pm$ 5	5 $\pm$ 0.5	79.9	33.0	115	144	679	1346	0.101	106	12.3
2			1.5 $\pm$ 0.5	73.0	46.2	135	185	932	1096	0.463	137	17.2

(d) をその上面と下面についてそれぞれ測定し、各々の合計を骨材個数 (n) で除した値 ($\sum d/n$) を求めた。これによって粗骨材粒の上面あるいは下面に接する空げきの大きさの平均を評価することとし、これを空げき指標と呼ぶことにした。測定の対象となった骨材個数は70~80個であり、測定には上記顕微鏡と最小目盛 0.1 mm のスケールを用いた。

3 実験結果および考察

本章では、まず、試験体の上・下部における圧縮および引張強度に及ぼす振動締固め時間と載荷方向の影響程度を明らかにする。つぎに、締固め過程における各部の組成成分量の変化傾向と締固め効果の伝ば状況から締固め機構を明らかにし、さらに、硬化コンクリートの内部構造の観察結果について述べる。最後に、締固め機構と内部構造に基づき、上記強度試験結果について考察する。

3・1 締固め時間と強度の関係

Fig. 1 に、Mix No. 1 のコンクリートを用いた試験体の締固め時間 (VT) と上・下部における圧縮強度比 (σ_{cv}/σ_{cs} , σ_{ch}/σ_{cs}) および引張強度比 (σ_{th}/σ_{ts} , σ_{tv}/σ_{ts}) の関係を示す。 σ_{cv} および σ_{ch} は、それぞれコンクリートの打込方向およびこれと直角方向に載荷

したときの圧縮強度であり、 σ_{th} および σ_{tv} は同様に引張強度である。また、 σ_{cs} および σ_{ts} は標準供試体による圧縮および引張強度である。

同図から、締固め時間と圧縮強度比の関係は、載荷方向によらずほぼ同様な変化傾向を示すことが認められる。すなわち、15秒では上部ですでに標準強度のほぼ95%に達しているが、下部ではその60%程度である。締固め時間をさらに長くすると上部でわずかに増加、下部で著しく増加し、両者の差は徐々に小さくなり、それぞれおよそ 120 秒および 180 秒で最大値 (=標準強度) に達する。その後両者ともに減少傾向に転じ、300 秒では上部で 80%、下部で 90% 程度になり、大小関係は逆転する。

また、同図から、締固め時間と引張強度比の関係も載荷方向によらずほぼ同様な変化傾向を示すことが認められる。すなわち、15秒では上・下部でそれぞれ標準強度の65%および40%程度であり、締固め時間をさらに長くすると上・下部ともほぼ同じ割合で増加し、それぞれおよそ 120 秒および 180 秒で最大値 (=標準強度) に達する。その後両者ともに減少傾向に転じ、300 秒では上部で75%、下部で85%程度になり、大小関係は逆転する。

Fig. 1. Relation of vibrating compaction time VT versus compressive and tensile strength ratio of concrete Mix No. 1; σ_{cv} and σ_{ch} denote compressive strength of the pieces loaded in parallel and perpendicular to the placing direction, respectively, σ_{th} and σ_{tv} denote tensile strength similarly, and σ_{cs} and σ_{ts} denote standard compressive and tensile strengths.

Fig. 2. Relation of vibrating compaction time VT versus compressive and tensile strength ratio of concrete Mix No. 2.

Fig. 3. Relation between vibrating compaction time VT and each constituent material ratio of concrete Mix No. 1; for example w_i denotes unit volume of water in upper or lower part of specimen and w_0 denotes that in specified mix.

Fig. 2 に, Mix No. 2 のコンクリートを用いた試験体の締固め時間と上・下部における圧縮強度比および引張強度比の関係を示す. 両強度比ともその変化傾向は前図に示したものとほぼ同様であるが, 引張強度比の値に荷重方向による差異が認められる. すなわち, コンクリートの打込み方向に荷重した場合の強度比よりもこれと直角方向に荷重した場合の方が全体的にみて10~20%小さく, 最大値は標準強度の80~85%である.

Mix No. 1 のコンクリートを用いた試験体の上・下部の密度は, 締固め時間15秒でそれぞれ標準供試体の場合の98%および92%であって, それぞれおよそ120秒および180秒でほぼ100%に達する. さらに, 300秒では上部で98%に低下するが, 下部では変化しない. Mix No. 2 のコンクリートについてもこれとほぼ同様な変化傾向が認められる.

3・2 締固め過程の検討

Fig. 3 に, 一例として, Mix No. 1 のコンクリートを用いた試験体の締固め過程における各組成成分量の変化状態を示す. これは配合分析試験により求めた結果であって, 締固め時間と空気量, 水セメント比ならびに水, セメント, 細骨材および粗骨材の単位量比の関係がその上・下部について示されている. 単位量比は, 各部におけるある材料の単位量と示方配合におけるそれとの容積比である.

同図から認められる各組成成分量の変化傾向は次のとおりである. すなわち, 空気量は上・下部とも締固め時間とともに減少傾向を示すが, 下部では上部より約1%多い. 単位水量比と単位セメント量比の経時変化傾向はほぼ同様であって, 約180秒まで下部の方が大きく, 時間とともに上・下部でそれぞれ減少および増加の傾向を示し, 両者の差は徐々に大きくなるが, その後, 増減関係は逆転し, 上部の方が大きくなる. 水セメント比の経時変化傾向は水およびセメントの場合とはほぼ同様である. 単位細骨材量比の経時変化傾向は水およびセメントの場合とはほぼ同様であるが, 単位粗骨材量比ではその増減傾向がこれらの場合と逆になる. また, 単位細・粗骨材量比の変化範囲は, およそ0.9~1.1であり, 他の組成成分の場合よりも小さい.

以上の配合分析試験結果と締固め過程を可視化し, これを観察した結果に基づき, 締固め機構について定性的な考察を試みる.

締固め終了後の試験体の高さを35cmとするため, 初めにコンクリートを高さおよそ45cmに打込む. 締固め開始と同時に, コンクリートの表面は数cm急速に沈下し, 表層部分に高密度層が形成される. その後表面の沈下は徐々に進行する. 空気泡は締固め作業中終始上昇傾向を示すが, この密な層を通過して逸散

するのが難しく, その一部はコンクリート内部に留まる. 締固め時間とともに高密度層の厚さが大きくなるので, これより下方の空気泡の逸散はさらに困難となり, 下部ほど多くの空気泡が残留することになる.

締固め過程において, 水とセメント(セメントペースト)の動きが顕著に認められる. すなわち, セメントペーストは, 締固め開始後およそ180秒まで下降傾向を示すが, その後上昇傾向へと転ずる. また, 水セメント比は, およそ180秒まで上・下部でそれぞれ漸減および漸増傾向を示すが, その後この傾向も逆転する. このような現象は次のように説明される. 締固めにより形成される高密度層の下方は締固め程度が未だ不十分であるため, 空けきの多い状態にある. 高密度層が形成される過程で, 締固め力により絞り出されたセメントペーストは, このポーラスな部分に留まり空けきを充てんするが, その一部はこれを通過して下方へ流動する. 締固め効果が最下部付近に達すると, それまで底部に溜っていたセメントペーストに圧力が加わるため, 上方へ移動を開始するのである. また, Fig. 3 より, 各締固め段階で, 試験体の上・下部における単位セメント量比と単位水量比の変化程度をそれぞれ比較すると, 水の場合の方が大きいことがわかる. これは, セメントペーストの水セメント比が高いため, 締固め作用による流動時に水の一部がセメントペーストから分離することに起因すると考えられる. つまり, 粘性の低い水はセメントペースト部分よりも容易に流動するため, その動きはセメントの場合より大きく, したがって, 同図に示したような水セメント比の経時変化が得られることになる.

締固め過程における細骨材の動きは, その程度は小さいものの水およびセメントの場合とはほぼ同様な傾向を示す. これは細骨材中の微細粒子がセメントペーストの下降流あるいは上昇流により搬送されるからであろうと考えられる. 一方, 粗骨材量比の経時変化傾向は, 水, セメントおよび細骨材の場合と全く逆であることがわかる. これは, 締固め時間180秒程度まで, セメントペースト量が減少する上部で粗骨材の占める割合は増加し, これが增加する下部ではその割合は減少するからである. つまり, 見掛け上, 粗骨材は上昇したことになる. その後粗骨材粒はわずかに時間がともに徐々に沈降し, セメントペーストあるいはモルタルと置き換えるため, 粗骨材量は上部で減少し, 下部で増加の傾向に転ずると考えられる.

以上のように, 締固め過程における水, セメント, 細骨材および粗骨材の挙動の間には相互に密接な関連があるが, 空気泡はこれらの成分とは独立に上昇傾向のみを示すことがわかる.

なお, 締固め開始後60秒程度で試験体のおよそ上半

分が高密度化する。セメントペーストが上昇傾向に転じたとき、全高さにわたって十分な締固め状態に達したと仮定すれば、下半分の締固めに要する時間はおよそ 120 秒であることから、試験体の下方ほど締固め効果が伝わりにくいことがわかる。

Mix No. 2 のコンクリートを用いた試験体の締固め過程においても、上述と同様な各組成成分量の経時変化傾向が認められるが、その変化過程は Mix No. 1 のコンクリートの場合より若干小さ目である。

3・3 締固め時間と内部構造の関係

Fig. 4 に、一例として、Mix No. 1 のコンクリートを用いた試験体の上・下部における内部構造を締固め時間ごとに示す。同図から認められるように、粗骨材粒の長径はコンクリートの打込み方向とほぼ直角に位

Fig. 4. Internal structure of concrete Mix No.1 at each vibrating compaction time VT; the minimum graduation equals 0.1 mm.

置している場合が多く、また、空げきは主として粗骨材粒の上面、下面あるいは上・下面に接して形成され、半月形ないし三日月形を呈している。これらは、締固めが不十分なためセメントペーストやモルタルが粗骨材粒の周囲に十分行きわたらないときに形成されるし、また、下降あるいは上昇するセメントペースト中の水や空気が骨材粒の上面あるいは下面に捕捉されて形成され则认为られる。そこで、これらの空げきに着目し、その大きさと締固め時間の関係を検討する。

Fig. 5 は、締固め時間と空げき指標 ($\sum d/n$) の関係を示す一例であって、Mix No. 1 のコンクリートについて測定した結果である。同図から、締固め時間 180 秒程度まで、時間とともに骨材粒の上・下面における空げき指標はいずれも減少傾向を示すが、その後増加傾向に転ずること、骨材粒の上面における空げき指標は、試験体の上・下部ともに各締固め段階で下面におけるそれより小さいこと、試験体の上部における空げき指標は、骨材粒の上・下面ともに各締固め段階で下部におけるそれより小さいことが認められる。

Fig. 5. Relation between vibrating compaction time VT and average void depth ($\sum d/n$) of concrete Mix No. 1; d denotes the maximum depth of upside or underside voids contacted with coarse aggregate particles and n denotes the number of the particles.

このような結果が得られた原因は、次のとおりであると考えられる。まず、締固め時間 180 秒以上で空げき指標が増加傾向に転ずるのは、後述

のように締固め過剰の段階に入ったからであると思われる。この段階では、締固め作用によって移動する空気が相互に合体して大きな空気を形成するのであって、Fig. 3 から認められるように、コンクリート中の空気量はほとんど変化していないのである。また、骨材粒の上面における空げき指標が下面におけるそれより小さいのは、モルタルあるいはセメントペーストがその下面まで十分に行きわたりにくいこと、締固めが終ってから凝結時間までの間にセメントペーストから分離したセメント粒子が沈降して骨材粒の上面に堆積するし、これに伴って生じた浮き水が下面に水げきを形成するからである。さらに、試験体の上部よりも下部で空げき指標が大きいのは、前節で述べたように下方ほど締固め効果が伝わりにくいこと、下方ほどコンクリートの空気量が多いことによる。

Mix No. 2 のコンクリートを用いた試験体の締固め時間と空げき指標の関係は、Fig. 5 に示した Mix No. 1 のコンクリートの变化傾向とはほぼ同様である。しかし、空げき指標は各締固め段階でこれより小さく、その40～80%程度である。これは両コンクリートの配合の差に起因すると考えられる。すなわち、Table II に示すように、Mix No. 1 のコンクリートの空気量は5%であるのに対し、Mix No. 2 のコンクリートでは1.5%と少ないために大きい空げきは形成されにくいし、セメントペーストおよびモルタルの単位量は Mix No. 2 のコンクリートの方が多いので、締固めによってより容易に粗骨材粒の周囲に行きわたるからである。

3・4 強度試験結果に対する考察

Fig. 1 および 2 にそれぞれ示す Mix No. 1 および 2 のコンクリートの締固め時間と圧縮強度比の関係をみると、既述のように、いずれも載荷方向によらずほぼ同様な変化傾向を示すことがわかる。すなわち、締固め時間15秒では試験体の上部ですでに標準強度の90～95%に達しているが、下部ではその50～60%である。これは、締固め開始直後コンクリートの表面が急速に数 cm 沈下して締固められ、上層部分の密度がかなり高くなるからであり、また、これより下方では未だ締固め程度が不十分なためである。その後コンクリートの表面は徐々に沈下し、これに伴って上・下部の強度比はそれぞれおよそ120秒および180秒まで増加傾向を示すが、上部の増加程度はごく小さいのに対し、下部では著しい。これは上部では空気量が徐々に減少するが、その程度はわずかであるのに対し、締固め効果が下方へ伝ばする過程でセメントペーストの下降流が生じ、これにより空げきが充てんされ、徐々に高密度層が形成されるからである。さらに締固めを継続すると、上・下部の強度比はともに減少傾向に転じ、300秒では上部の方が小さくなる。この原因として、締固

めによりコンクリート内部に強度上の欠陥となる大きな空げきが形成されること、この段階でセメントペーストは上昇流に転ずるので下部ではその量が少なくなること、セメントペーストから分離した水は著しい上昇傾向を示すので上部の水セメント比が大きくなることなどが考えられる。

つぎに、締固め時間と引張強度比の関係をみると、その変化傾向は上述の圧縮強度比の場合とはほぼ同様であるが、各締固め段階における両強度比の値に差異が認められる。すなわち、Mix No. 1 のコンクリートを用いた試験体の上・下部における引張強度比は、締固め時間15秒で対応する圧縮強度比よりそれぞれ30%および20%程度小さく、同様に、Mix No. 2 のコンクリートでは40%および25%程度小さい。その後両コンクリートの引張強度比は増加傾向を示し、上部ではおよそ120秒、下部ではおよそ100秒で最大値となるが、Mix No. 2 のコンクリートに対し打込み方向と直角に載荷した場合のみその最大値は100%にならず、対応する圧縮強度比より20%程度小さい。さらに締固めを続けると引張強度比は減少傾向に転じ、300秒では、Mix No. 1 のコンクリートを用いた試験体の上・下部で圧縮強度比より5～10%小さく、同様に、Mix No. 2 のコンクリートでは、打込み方向に載荷したとき10～15%、これと直角方向に載荷したとき25～30%小さい。このように各締固め段階における引張強度比は一部を除いて対応する圧縮強度比より小さいことがわかる。これは、引張強度に及ぼす空げきの影響程度が圧縮強度に対するよりも大きいからであって、とくに大きい空げきが形成される段階でその影響が顕著に現れることがわかる。

上述のように、Mix No. 2 のコンクリートの引張強度は、打込み方向に載荷した場合よりもこれと直角方向に載荷した場合の方が各締固め段階で10～20%小さい。この現象は次のように説明される。コンクリートをモルタルと粗骨材からなる二相材料と仮定すると、その引張強度はモルタル自身の引張強度が大きく、両者の界面における付着性状が良好なほど大きい。打込み方向に載荷した供試体の破断面における粗骨材粒を観察すると、その抜け出しが多く認められるのに対し、これと直角方向に載荷した場合、このような形跡は少なく骨材表面と破断面がほぼ同じレベルにある。このことから、前者では骨材粒の抜け出し部分の空げきに接していない界面に付着破壊が生じるのに対し、後者ではその上面あるいは下面の空げきに接していない界面に付着破壊が生じると考えられる。つまり、前者の方が破壊に関与する付着面積が大きく、したがって、付着性状がより良好なため高い引張強度が得られたと思われる。

なお、Fig. 1 および 2 から、両コンクリートを十分に締固めるための適切な締固め時間は 180 秒程度であり、これ以上締固めを行ってもかえってコンクリートの強度を低下させることがわかる。

4 結 言

川砂・川砂利あるいは砕砂・砕石を用いた超硬練り貧配合コンクリートを表面振動機により締固めて角柱試験体を作製した。その上・下部から立方体試験体を切り出し、コンクリートの打込み方向あるいはこれと直角方向に載荷して圧縮および引張強度を測定した。さらに、コンクリートの締固め機構と内部構造に基づき、上部測定結果に対し考察を加えた。これらを要約すると次のようになる。

(1) 締固め時間と圧縮強度の関係は、両コンクリートとも載荷方向によらずほぼ同様な変化傾向を示す。すなわち、15秒では上部で標準強度の 90～95%、下部で 50～60% であり、その後、上・下部とも増加傾向を示し、それぞれおよそ 120 秒および 180 秒で最大値（＝標準強度）に達する。続いて減少傾向に転じ、300 秒では上・下部でそれぞれおよそ 80% および 90% となり、大小関係が逆転する。したがって、適切な締固め時間はおおよそ 180 秒と判断される。

(2) 締固め過程と(1)で述べた圧縮強度の変化傾向を対比考察すると、締固め開始と同時にコンクリート表面は急速に大きく沈下し、表層付近に高密度層が形成されるが、これより下方では未だ締固め程度が不十分である。このため、15秒で上部の強度は下部におけるより大きくなる。その後、コンクリート表面の沈下に伴い高密度層の厚さは徐々に大きくなるが、その過程で空気泡が逸散し、下降するセメントペーストにより空気が充てんされるので強度は増加する。最大強度に達した後、減少傾向に転ずるのは、この段階でセメントペーストが上昇流に転ずることによる。

(3) 硬化コンクリートの内部構造を見ると、粗骨材粒の長径方向とコンクリートの打込み方向はほぼ直角をなしている場合が多く、また、空けきは主として粗骨材粒の上面、下面あるいは上・下面に接して形成され、半月形ないし三日月形を呈している。空けきの大きさはおよそ 180 秒まで時間とともに減少するが、その後増大傾向に転ずる。この変化傾向は(1)で述べた圧縮強度の変化傾向に対応している。各締固め段階で、骨材粒の上面における空けきは下面におけるより小さく、試験体の上部における空けき是对應する下部におけるものより小さい。

(4) 締固め時間と引張強度の関係は、両コンクリートとも(1)で述べた圧縮強度の変化傾向とほぼ同様である。しかし、両強度を標準強度との比率で比較すると、とくに空けきが大きい段階で引張強度比の方が小さい。また、砕砂・砕石を用いたコンクリートの引張強度にのみ異方性が認められる。すなわち、打込み方向に載荷した場合よりもこれと直角方向に載荷した場合の方が各締固め段階で 10～20% 小さい。これは粗骨材粒とモルタルの付着性状に起因すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 上阪恒雄, 塩入淑史, コンクリート工学, **7**, 74 (1985).
- 2) 広瀬利雄, 志水茂明, 竹村公太郎, 土木学会論文集, **303**, 93 (1980).
- 3) 根上義昭, 嶋田 洋, 奥村忠彦, セメントコンクリート, **420**, 26 (1982).
- 4) E. K. Schrader, Concrete International, **10**, 15 (1982).
- 5) T. Hirose and Y. Yanagida, Concrete International, **5**, 4 (1984).
- 6) (財)国土開発技術研究センター, RCD 工法によるダム施工, p. 32 (1981).
- 7) 加賀谷誠, 徳田 弘, 川上 洵, 材料, **32**, 161 (1983).