論文　鋼･コンクリート合成床版における真空脱水工法の適用性に関する実験的および解析的研究

服部　宏己[*1]・和藤　浩[*2]・三島　直生[*3]・畑中　重光[*4]

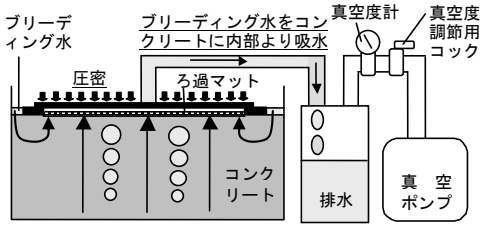
要旨：筆者らは，真空脱水工法で得られるコンクリートについて品質評価の更なる精度向上を目指して，これまで一連の実験を行ってきた。本報では，真空脱水処理の開始時期および継続時間を要因とし，実際の合成床板に近い型枠・配筋条件を用いて真空脱水処理が鉄筋下部のコンクリートに及ぼす影響を把握するとともに，真空脱水処理の最適な条件を検討した。その結果，スラブ筋を設置したコンクリート床スラブの真空脱水処理は，施工時間も考慮すると，ブリーディングがほぼ終了した時点で開始し，5 分間継続するという従来の方法が望ましいという結果を得た。また，この傾向を圧密理論を用いた解析モデルによって検証した。

キーワード：真空脱水，スラブ筋，ブリーディング，貫入抵抗値，反発度，圧縮強度分布，圧密理論

1. はじめに

筆者らは，真空脱水工法で得られるコンクリートについて品質評価の更なる精度向上を目指して，これまで一連の実験を行ってきた[1), 2)]。**図－1** に真空脱水工法の概要を示す。過去の実験によれば，コンクリートスラブにスラブ筋が配置されている場合，スラブ筋より上部のかぶり部分では，真空脱水処理による圧縮強度の改善がみられるものの，スラブ筋より下部では，鉄筋により真空脱水による圧密圧力が加わらないため，圧縮強度の改善はほとんど期待できない[3)]という結果を得ている。コンクリートの表層部の品質を改善する点では真空脱水工法の有効性は変わらないと言えるが，真空脱水処理を過剰に行うと，鉄筋よりも下部に空隙をつくる可能性も指摘されている[4)]。

そこで本研究では，まず真空脱水処理の開始時期および継続時間を要因とし，実際の合成床板に近い型枠・配筋条件を用いて真空脱水処理が鉄筋下部のコンクリートに及ぼす影響を実験によって把握するとともに，圧密理論を用いた解析を行い，真空脱水処理の最適な条件について検討する。



図－1　真空脱水工法の概略図

表－1　実験の要因と水準

呼び強度 (N/mm^2)	真空脱水			
	真空度 (%)	処理開始の貫入値(N)	継続時間 (分)	真空脱水
30	60±5	200 300 450	3 5 7	有 無

注)アンダーラインは基本水準を示す。
凡例 2005R:200(貫入値)5(継続時間)R(スラブ筋)，P:真空脱水無し

表－2　使用材料の性質

種類	性質
セメント	普通ポルトランドセメント、密度3.15g/cm^3
細骨材	川砂，寸法2.5mm、表乾密度：2.60g/cm^3
粗骨材	砕石，寸法20-5mm、表乾密度：2.72g/cm^3
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
AE剤	ポリカルボン酸系
膨張剤	表乾密度：3.16g/cm^3

表－3　コンクリートの調合表

Fc (MPa)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位質量(kg/m^3)							SL (cm)
				W	C	S	G	SP	AE	EA	
30	48	45	4.5	154	301	822	1042	2.41	2.57	20	12

注)Fc：呼び強度，W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，Air：目標空気量，W：水＋SP＋AE，C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材，SP：高性能 AE 減水剤，AE：AE 剤，EA：膨張材，SL：目標スランプ

2. 実験概要

2.1 実験要因およびコンクリートの調合

本実験における要因と水準を**表－1** に，使用したコンクリートの使用材料を**表－2** に，調合表を**表－3** に示す。

2.2 試験体の作成方法

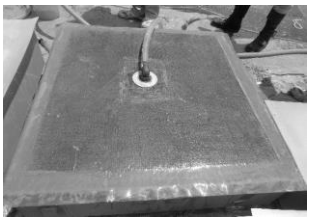
(1) 型枠

型枠には，1000×1000×260（高さ）㎜の鋼製型枠（板厚 6 ㎜）を用いた。**写真－1(a)**に，本実験に使用した型枠および配筋状況を示す。本型枠は道路橋埋込み型枠の一部を模したものである。スラブ筋は，種類 D22，格子幅 250mm，かぶり厚さ 40mm とし，スラブ筋を配置した様子を**写真－1(b)**に示す。なお，真空脱水処理の開始時

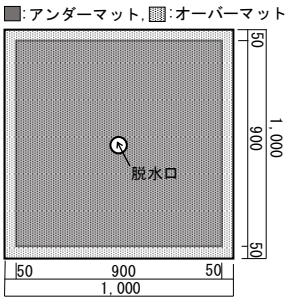
*1 岐阜市立女子短期大学　生活デザイン学科　教授　博士（工学）　(正会員)
*2 三重大学大学院工学研究科建築学専攻　技術専門員　(正会員)
*3 三重大学大学院工学研究科建築学専攻　准教授　博士（工学）　(正会員)
*4 三重大学大学院工学研究科建築学専攻　教授　工博　(正会員)

(a)　型枠　　(b)　スラブ筋

写真－1　実験で使用した鋼製型枠と配筋



写真－2　真空脱水の処理マット



図－2　処理マットの寸法

期を判定するため，改良型プロクター貫入試験装置 5)を用いた。貫入抵抗値を測定する場合も試験体と同じ型枠を用いた。

ブリーディング試験用試験体には，試験体高さに合わせφ300×260(深さ)㎜の鋼製容器を用いた。

(2) コンクリートの打設

コンクリートは，トラックアジテータのシュートを用いて，そのまま型枠に一層で打設し，締固めは小型の棒状バイブレータで行った。打設後は，水分が蒸発しないようにビニルシートで試験体表面を覆った。

(3) 真空脱水処理

真空脱水処理の開始時期は，改良型プロクター貫入試験装置 5)を用いて，貫入抵抗値が，200，300，450N になった時点で行った。

写真－2 に処理マットの設置の様子を，**図－2** に処理マットの寸法をそれぞれ示す。**図－2** 中の，アンダーマットは水だけを通しセメント粒子を通さないマットである 2)。オーバーマットはアンダーマットよりも周辺が 5cm ほど大きい気密性の高いマットであり，上から覆うことにより減圧状態を保持する。真空脱水処理の際は，真空度(吸引圧/大気圧)を，ホースに接続されている真空度計で 1 分毎に測定した。真空脱水処理後は，木ごてで下押えを行った後に，金ごて押さえを行った。

(4) 養生方法

養生は，現場での散水および湿布養生の養生方法に合わせるために，打設後 7 日間は散水養生を行った後に，ビニルシートで覆って湿潤養生を行った。それ以降は暴露養生とした。

(5) コア試験体

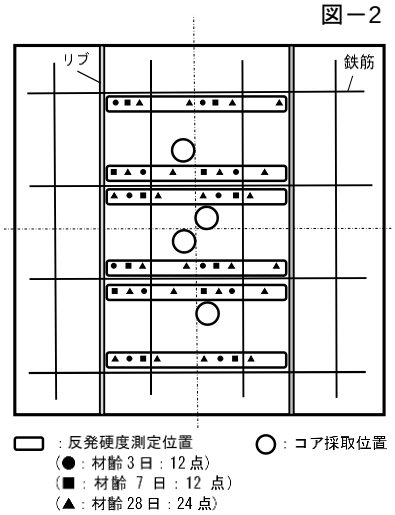
圧縮強度分布を測定するために，材齢 21 日に，すべての試験体より，φ6 ㎝のコアを**図－3** に示す位置(反発硬度の測定位置については後述)で 4 本ずつ採取した。

採取したコンクリートコアは，**図－4** に示すように，コンクリートカッターでそれぞれ高さ 6 ㎝ずつに 4 分割した。その後，圧縮強度試験用に端面の研磨を行った。

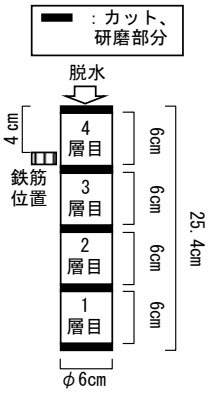
2.3 実験方法

(1) 測定方法

1) フレッシュ時



図－3　コアの採取位置および反発硬度の測定位置



図－4　コア試験体の概略図

ブリーディング試験は, 15 分間隔で行い, その他は JIS A1123 に準拠して行った。貫入抵抗値の時刻歴は，改良型プロクター貫入抵抗試験装置 5)を用いて測定を行った。真空度の時刻歴は，真空脱水処理を行った時の真空度の時刻歴を 1 分毎に測定した。

2) 硬化後

反発硬度は，材齢 3，7，28 日に，P 型テストハンマを用いて，前述の**図－3** に示した材齢 3 日と 7 日は 12 点ずつ，材齢 28 日は 24 点ずつ測定した。圧縮強度は，材齢 28 日の圧縮強度を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 ブリーディング試験

図－5 に，ブリーディング水量の時刻歴を示す。図によれば，60 分後からは 15 分間隔で測定することができなかったが, 120 分後のブリーディング水量が 0 g だったため，グラフの推移から推測すると，ブリーディングは打設終了後から 100 分経過するまでには終了していたと考えられる。

3.2 貫入抵抗値の時刻歴

図－6 に，改良型プロクター貫入試験器による貫入抵抗値の時刻歴を示す。上記のブリーディング試験の結果から本実験で使用したコンクリートのブリーディングがほぼ終了したと考えられる時点の貫入抵抗値は, 300N 前後～330N 程度といえる。なお，100N を超えると急激に

値が上昇する傾向がある。これは，通常の RC スラブを用いた既往の研究 [5]と同様な傾向となった。鋼・コンクリート合成床板は，**写真－1** に示すように，型枠下部に鋼製アングルが設置されているため，スラブ上面から施工する真空脱水では，その効果の違いが見られなかったものと思われる。なお，後述する真空度等においても，両者の顕著な違いは見られなかった。

3.3 真空度の時刻歴

図－7 に，真空度の時刻歴を示す。図によれば，真空度は継続時間が経過するにしたがって，低下する傾向となった。この理由として，オーバーマットとコンクリート表面の間に空気の通り道が形成され，気密性が低下していくこと，また，真空脱水により排水されたブリーディング水が真空ポンプ内で水温が上がると真空度が下がることなどが考えられる。

なお，試験体 2003R は，真空脱水処理開始時に真空度が 60%に達しなかったため，散水の処置を施して 60%に達してから，真空脱水処理を 3 分間継続した。

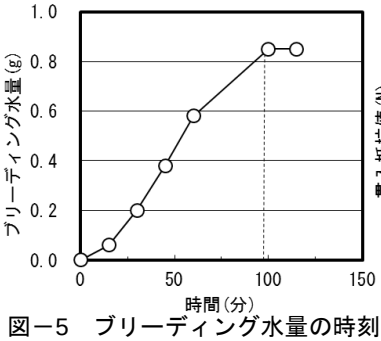
3.4 反発度

図－8 に，P 型テストハンマによる反発度と材齢の関係を示す。

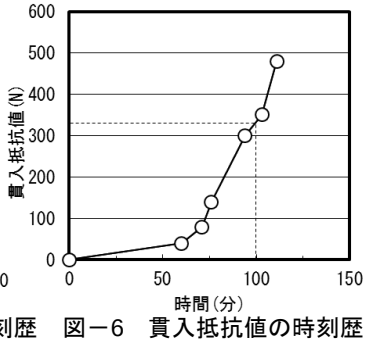
図によれば，真空脱水処理を行った試験体は，開始時期にかかわらず，無処理試験体の材齢 28 日の反発度を材齢 3 日でほぼ発現している。真空脱水処理を行った試験体では，開始時期にかかわらず，真空脱水処理継続時間 3 分間より継続時間 5 分間のほうが，推定強度は大きくなる傾向となった。なお，試験体 2003R の推定強度が試験体 2005R より大きくなったのは，試験体 2003R は，真空脱水処理開始時に真空度が上昇しなかったため，真空度を上昇させる目的で継続時間を長くしたことおよび真空度が若干高くなったことが主な理由と考えらえる。ただし，継続時間が 7 分間と長い場合は，表層の反発硬度は，継続時間 5 分間の試験体より小さくなった。この理由として，真空脱水処理を長く行うことによって空隙が増加している可能性があることが考えられる [4]。

3.5 圧縮強度分布

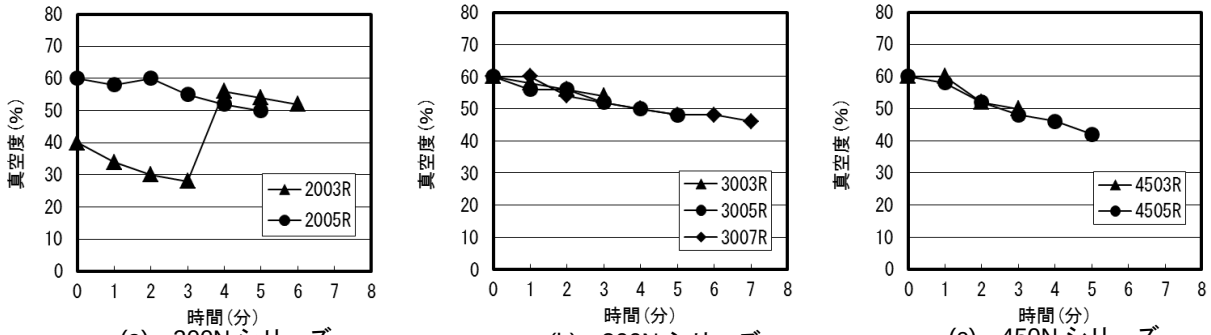
図－9 に，高さ方向の圧縮強度分布を示す。図によれば，スラブ筋を設置した試験体は，真空脱水処理の開始時期にかかわらず，スラブ筋より上部の圧縮強度の改善効果が明確に見られた。スラブ筋より下部の圧縮強度の改善効果は相対的に小さくなるものの，圧縮強度が低下する傾向は見られなかった。ただし，無処理の試験体 P が最下部の第 1 層において，真空脱水処理を行った試験体より強度が若干大きくなっている。試験体 P の第 1 層



図－5　ブリーディング水量の時刻歴

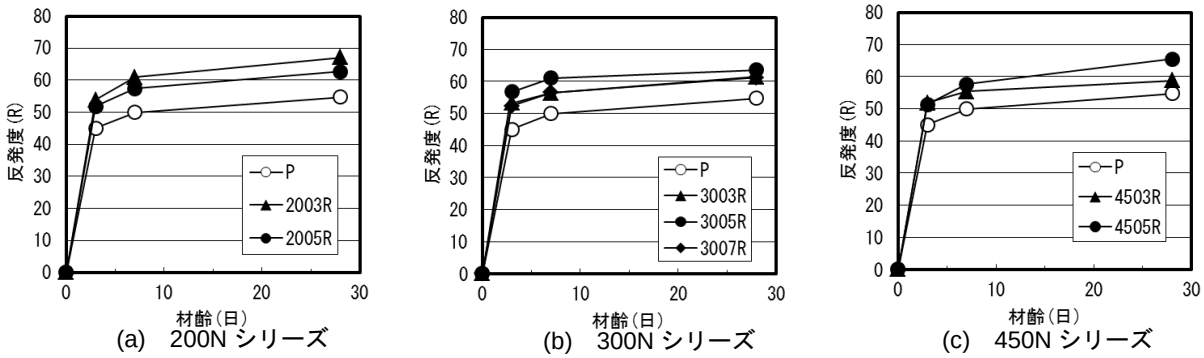


図－6　貫入抵抗値の時刻歴



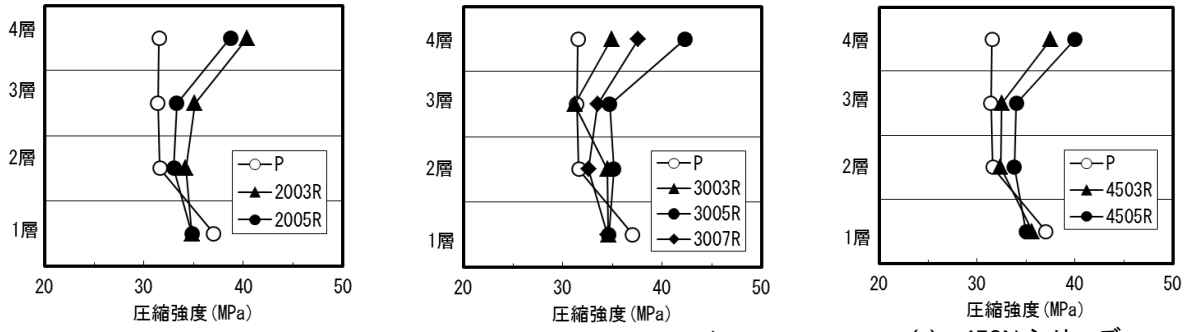
(a)　200N シリーズ　(b)　300N シリーズ　(c)　450N シリーズ

図－7　真空度の時刻歴



(a)　200N シリーズ　(b)　300N シリーズ　(c)　450N シリーズ

図－8　反発度と材齢の関係



(a) 200N シリーズ　(b) 300N シリーズ　(c) 450N シリーズ

図－9　圧縮強度分布

が大きくなっているのは，打設時の締固めの影響によるものと考えられる。一方，真空脱水処理を行った試験体の第 1 層の強度は，処理開始時期および処理継続時間にかかわらずほぼ同じ値となっていることから，真空脱水処理の影響による強度低下ではないと考えられる。また，上層の圧縮強度は，処理継続時間が 3 分，5 分の順で大きくなるが，継続時間が長い 7 分では，5 分より小さくなる傾向となった。この理由として，反発度の場合と同様に空隙の影響が考えられる[4]。

4. 圧縮強度分布の解析的検討

4.1 解析手順

本実験により得られた圧縮強度分布について，圧密理論を適用した解析手法[6]を用いて，実験値と解析値の比較検討を行う。圧縮強度分布の推定フローを図－10 に示す。なお，解析の対象とする実験条件は，処理開始の貫入抵抗値：300N および 450N，真空脱水継続時間：3 分（180s）および 5 分（300s）の計 4 ケースとする。

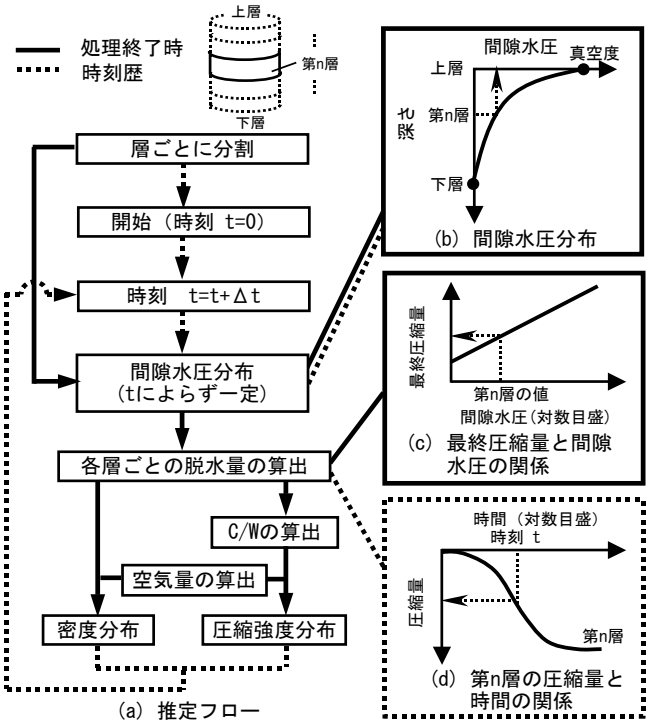
(1) 間隙水圧分布

式(1)に，間隙水圧の算定式を示す。ここでは，圧縮強度分布を推定することを目的として実験式で示している。表層で真空度と同値となるものとし，深さ z(cm)における間隙水圧の値を算出する。ここで，間隙水圧は，層の厚さ方向の平均値とし，式(2)によって表すものとする。

$$u = u_0 \times e^{(-a \cdot z)} \qquad (1)$$

$$u_{ave} = -\frac{u_0}{a}[e^{(-a \cdot z)}]_i^j / (i-j) \qquad (2)$$

ここで，u　：間隙水圧(MPa)　（絶対値を示す），
u_{ave}：層ごとの間隙水圧の平均値(MPa),
u_0　：真空度(MPa),
z　：深さ（cm），
a　：係数,
i, j　：層の下層深さおよび上層深さ(cm)
（なお，$[]_i^j$ は，定積分を示す。）



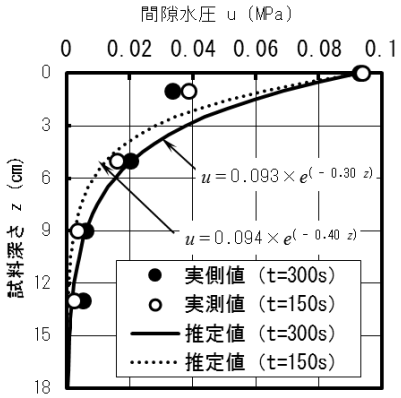
図－10　密度分布および圧縮強度分布の推定フロー[6]

図－11 に，脱水時間 t におけるコンクリート内部の間隙水圧分布を示す。図中の●および○はそれぞれ文献[7]の実測値（t = 300s および 150s）を示し，実線および破線はそれぞれ推定値を示す。本推定では，真空度は実測値である u_0 = 0.054MPa を用い，係数 a は，文献[7]の結果から，t = 300s 時では a = 0.30 とし，t = 180s 時では直線補間し a = 0.38 とする。

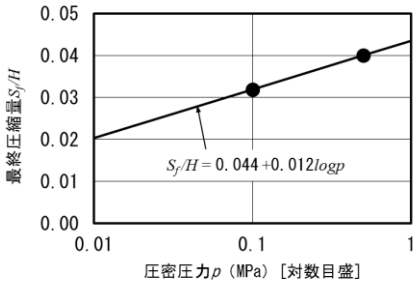
(2) 最終圧縮量

図－12 に，最終圧縮量と圧密圧力の関係を示す。最終圧縮量と圧密圧力の関係は，式(3)で表されるものとしている。式(2)で算出した真空脱水時の間隙水圧 u_{ave}(MPa)を，式(3)の加圧脱水時の圧密圧力 p(MPa)に置き換える[7),8)]ことにより各層の最終圧縮量が求められる。ここで，係数 b および c は，文献[9]の結果から，b = 0.044, c = 0.012 としている。

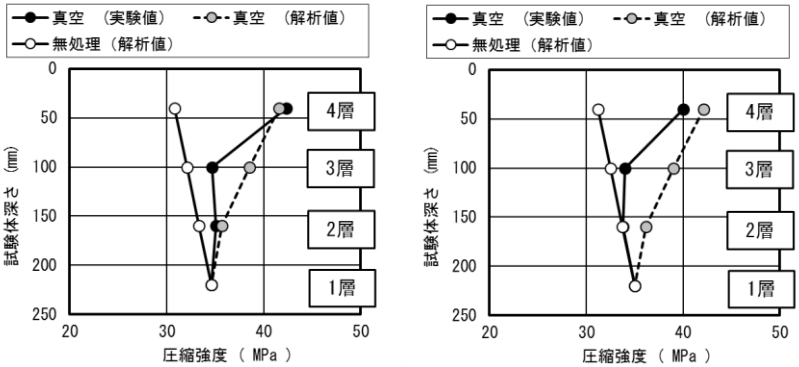
$$S_f / H = b + c \times \log p \qquad (S_f / H \geqq 0) \qquad (3)$$



図－11　間隙水圧分布 [7)]

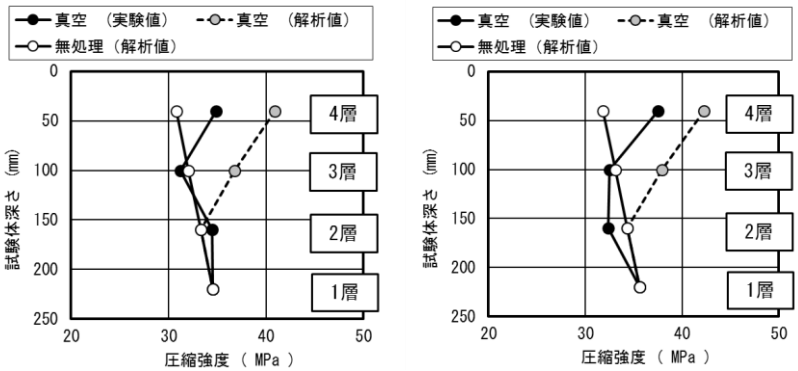


図－12　最終圧縮量と圧密圧力の関係 [9)]



(a)　貫入抵抗値 300N　　(b)　貫入抵抗値 450N

図－13　圧縮強度分布の実験値と解析値の比較（継続時間 5 分）



(a)　貫入抵抗値 300N　　(b)　貫入抵抗値 450N

図－14　圧縮強度分布の実験値と解析値の比較（継続時間 3 分）

ここで，S_f　：最終圧縮量(cm),

H　：層厚(cm),

p　：圧密圧力(MPa),

b,c：係数（b=0.044，c=0.012）

(3) 圧縮強度分布

圧縮強度分布は，文献 [6)]より，セメント水比の一次式である式(4)に単位セメント量および単位水量を代入して求める。真空脱水処理後の単位水量は，各層において圧縮した分（式(3)中の S_f）だけ水が減少したものとして，無処理の単位水量から差し引くことによって求められる。単位セメント量は，深さ方向にほとんど移動しないことが分かっており [6)]，ここでは，調合表の値（301kg/m^3）を用いた。

$$\sigma_c = d\times C/W - e \qquad (4)$$

ここで，σ_c　：圧縮強度(MPa),

C/W：セメント水比,

d,e　：係数

（d=41.9，e=40.0）

なお，無処理の試験体の圧縮強度分布は，最下層（1 層）を真空脱水処理したコンクリートの圧縮強度と同値とし，上層に行くに従い一定の勾配で直線的に減少すると仮定した。これは，文献 [1)]の実測値に基づいており，その勾配（圧縮強度/深さ）は 30MPa の試験体では 0.021 となっている。

4.2 解析結果の検討および考察

図－13 および図－14 に，それぞれ継続時間 5 分および 3 分の圧縮強度分布の実験値と解析値の比較を示す。図(a)および(b)は，それぞれ真空脱水処理開始時の貫入抵抗値が 300N および 450N の値を示す。

図－13(a)によれば，4 層においては実験値と解析値は極めて良く一致しているが，3 層および 2 層においては実験値の方が小さな値となっている。これは，上層から 40mm の位置に鉄筋が配置されているため，この鉄筋がコンクリートの鉛直変位を拘束することによって真空脱水による圧密効果が低下した [3)]ことが考えられる。なお，3 層および 2 層の解析値に対する実験値の比はそれぞれ 90%および 98%となっている。

図－13(b)によれば，3 層および 2 層では図(a)と同様な傾向がみられ，4 層においても実験値の方が小さな値となっている。この理由として，処理開始時期がブリーディング終了後で若干時間が経過しており，コンクリートが凝結しはじめていることから間隙水圧の上昇が阻害されていることが考えられる。

処理継続時間を 3 分とした図－14(a)および(b)によれば，5 分の場合と異なり，4 層および 3 層ともに解析値と比較して実験値が小さくなっている。この理由として，

継続時間5分と3分の間隙水圧の差は**図－11**によればわずかではあるが，3 分では処理時間が短く十分に脱水されていないことが考えられる。また，3 層以深においては，継続時間を5分とした**図－13**と同様に，鉄筋の影響が明瞭に現れている。なお，参考値として，圧縮強度分布の時刻歴の解析値を**図－15**に示す。同図より，時間の経過に伴い,上層から圧縮強度が上昇する様子が分かる。

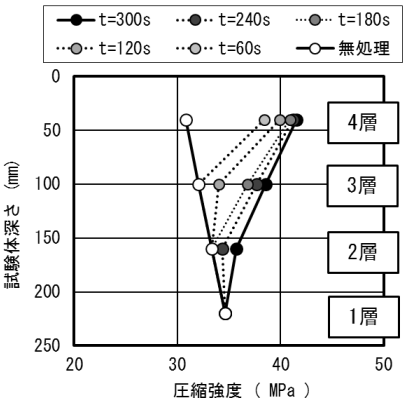
5. まとめ

1) 表層の材齢28日の反発硬度は,真空脱水処理の継続時間を3分間とした場合より5分間とした場合のほうが大きくなった。ただし，継続時間が7分間と長い場合は，継続時間5分間の試験体より小さくなった。
2) スラブ筋を設置して真空脱水処理を行った試験体は,真空脱水処理の開始時期にかかわらず，スラブ筋より上部の圧縮強度の改善効果が明確に見られた。一方，スラブ筋より下部の圧縮強度の改善効果は相対的に小さくなるものの，圧縮強度が低下するような傾向は見られなかった。
3) 上層の圧縮強度は，反発硬度の結果と同様，真空脱水処理の継続時間が 3 分，5 分の順で大きくなり，継続時間が長い 7 分では，5 分の場合より小さくなる傾向となった。
4) 圧密理論を用いた解析モデルを適用し，圧縮強度分布の解析値と実験値を比較した結果，ブリーディング終了時に真空脱水処理を開始し，5 分間継続する方法が最も効果的であることが確認された。また，どの試験体も鉄筋より下層の実験値は解析値と比較して小さくなった。これは，鉄筋がコンクリートの鉛直変位を拘束したことによる脱水効果の低下が原因と考えられる。

以上の結果より，スラブ筋を設置したコンクリート床スラブの真空脱水処理は，施工時間も考慮すると，ブリーディングがほぼ終了した時点で開始し，5 分間継続するという従来の方法が望ましいと考えられる。

謝辞

本実験でご協力を得た三浦芳雄氏((株)横河ブリッジ・橋梁営業本部・営業二部・部長)，光田浩氏((株)横河ブリッジ・技術計画室・技術計画第一部長)，高嶋豊氏((株)横河ブリッジ・技術計画室・技術計画課・課長)，西山景也氏(東建コーポレーション(株))，村松功朗氏・筒井文康氏((株)健和)および山口武志氏(山口技研)に謝意を表する。



図－15　圧縮強度分布の時刻歴の解析値
（貫入抵抗値 300N）

参考文献

1) 畑中重光，和藤浩，三島直生，松村昭夫：真空脱水処理工法によるコンクリート床スラブの表層および内部強度性状改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.558，pp.7-14，2002
2) 畑中重光，和藤浩，三島直生，松村昭夫：真空脱水コンクリートの品質に及ぼす処理マットおよび真空度の影響，日本建築学会構造系論文集，No.588，pp.13-19，2005
3) 和藤浩，村松昭夫，山口武志，三島直生，畑中重光：真空脱水コンクリートの品質改善効果に及ぼすスラブ筋の影響に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演慷慨集，A1，pp.363-364，2012
4) 坂本英輔，畑中重光，服部宏己，三島直生：真空脱水処理過程におけるコンクリート中の空気泡の挙動に関する可視化実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1233-1238，2004
5) 和藤浩，畑中重光，三島直生，松村昭夫：真空脱水締固め工法の処理開始時期の簡易判定手法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，p.1079-1084，2003
6) 畑中重光，服部宏己，坂本英輔，三島直生：圧密理論を適用した真空脱水コンクリート中の圧縮強度分布の発生メカニズムに関する研究,日本建築学会構造系論文集,第 596 号,pp.1-8,2005
7) 服部宏己，畑中重光，三島直生，坂本英輔：圧密理論を適用した真空脱水工法の脱水メカニズムに関する基礎的研究,日本建築学会構造系論文集,第 585 号,pp.7-13,2004
8) 谷村剛嗣，梅崎健夫，塩野敏昭：等方応力状態から真空圧密を受けた粘土の非排水せん断特性，土木学会年次学術講演会，第 54 回, pp.112-113, 1999
9) 服部宏己，畑中重光，坂本英輔，三島直生：圧密理論を適用した脱水メカニズムに関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.26，No.1，pp.1227-1232,2004