

### III-3 コンクリート構造物の高品質・軽量化に関する研究開発

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平12～平14

担当チーム：構造物マネジメント技術

研究担当者：河野 広隆、渡辺 博志

#### 【要旨】

軽量骨材や高炉スラグ微粉末などの材料を用いて製造した高品質軽量コンクリートの塩害耐久性評価方法ならびに、これをPC部材として用いた場合のせん断強度の算定方法について検討を行った。塩分浸透性に関しては、簡易に実施可能で、短期間のうちに塩化物イオンの拡散係数を評価することができる新たな試験方法を提案した。また、これを用いた部材のせん断強度については、せん断ひび割れの発生とともにコンクリートが負担するせん断力が急激に低下するものの、プレストレスを導入することにより実用上ほぼ問題がないことを明らかにした。

キーワード：軽量骨材、高炉スラグ、塩分浸透性、せん断、促進試験法

#### 1. はじめに

近年、吸水率を非常に小さくした新たな軽量骨材の開発が進んでいる。これらの軽量骨材を用いることにより、密度を30%程度小さくしたうえで60MPa程度の高い圧縮強度を有した高強度軽量コンクリートの製造も可能になってきている。高強度軽量コンクリートは、高強度による部材断面の縮小と、コンクリート自身の重量減少により、大幅な自重の減少が可能となり、特にPC上部構造などに適している。このような新たなコンクリート材料は、従来の設計基準などでカバーされていないが、必要とされる強度や耐久性能が満たされることを明示できれば、このような新しい材料の活用が期待される。

高強度軽量コンクリート特有の問題点として、骨材中に空隙が存在するため同一圧縮強度を有する普通コンクリートと比較して耐久性能に劣る可能性があるとともに、圧縮強度に比較して著しく引張強度が小さいことに伴う耐荷性能上の問題点も生じる可能性がある。また、普通骨材を用いたコンクリートと比較して、同一の圧縮強度を得るために必要となる水セメント比は小さくなり、このことは単位セメント量の増加による初期ひび割れの危険性も問題となるところである。このため、これらの不安材料を払拭することが実用化に際して必要である。

このような背景から、軽量かつ高品質のコンクリートのPC部材への実用化を実現するため解決することが必要と考えられる以下の課題について取り組んだ。

- 1) せん断破壊に対する照査方法の確立
- 2) 塩分浸透性の評価方法の確立
- 3) コンクリートの温度ひび割れ危険度の低減対策とその効果の簡易な評価方法の確立
- 4) 圧縮強度推定を目的としたテストハンマー適用の可能性

これらの課題のうち、1)については圧縮強度に対して引張強度の小さい高強度軽量コンクリートでは、せん断に対する安全性を照査する上で、通常暗黙のうちに用いている修正トラス理論が成立しないこと、しかし、設計荷重時に部材下縁にひび割れを発生させない程度のプレストレスを導入しておけば、実用上はほとんど問題がないことを文献1で示した。

また高強度コンクリートに対するテストハンマーの使用に関しては、コンクリートの圧縮強度と反発度の間は直線関係にはないこと、特に高強度域では圧縮強度の変動に応じて、テストハンマーの反発度が鈍感にしか変動しないため、これの使用はあまり適切でないことを文献2で示した。

ここでは、これまでに実施した塩分浸透性の評価方法（新試験方法の提案）、温度ひび割れ危険度の評価方法、PC部材として用いた場合のせん断強度の算定方法についての検討結果を中心に記述することにする。

#### 2. 塩分浸透性に関する研究

##### 2.1 新たな塩分浸透性試験法の実用化

コンクリートの塩分浸透性を評価するための試験

方法として、最も確実な方法は、塩害環境にコンクリート供試体を曝露するか、もしくは塩水中にコンクリート供試体を浸漬し、コンクリート中に浸透した塩化物イオン分布を化学分析によって求め、その結果に基づいて、コンクリートの塩化物イオンの拡散係数を評価するものである。しかし、このような方法では、塩化物イオンの拡散係数が算定できるだけの塩化物イオンがコンクリート供試体に浸透するまで曝露もしくは塩水浸漬を継続しなければならない。配合条件によっても異なるが、特に塩分浸透性を小さくした低水セメント比の配合条件では、浸漬・曝露期間として少なくとも一年間を要するものである。このため、何らかの方法により試験に要する期間を短縮させなければならない。

促進試験方法としては、すでに ASTM に電気泳動を用いたコンクリートの塩分浸透性の評価方法が定められている。しかし、ASTM に定められた試験方法では、6 時間の通電で供試体を通過した電流量をコンクリートの塩化物イオン透過性評価のための指標として用い、コンクリートの塩分浸透性の定性的な評価を行うにとどまっている。しかし、混和材料を大量に用いたコンクリートなどでは、必ずしも通過電流量がコンクリートの塩分浸透性を適切に反映していない場合がある。<sup>3)</sup> すなわち、コンクリートの使用材料によっては、通過電流量が指標として適用できないという問題点を有している。

これは、コンクリート供試体を通過した電流量が、必ずしも塩化物イオンの移動を表したものではないためであると考えられる。従って、コンクリートの塩分浸透性を評価するためには、通過電流量といった間接的な指標ではなく塩化物イオンの移動速度を直接とらえる必要がある。

ここでは、

- ①コンクリートの塩分浸透性の評価に要する時間をできるだけ短縮する。
- ②コンクリートの塩分浸透性を塩分拡散係数の形で定量的に評価する
- ③コンクリート中の塩分の化学分析といったような試験に必要なコスト・労力を極力少なくし、通常の土木技術者でも簡単に実施可能なものとする

を目標とした新たな試験法を考案した。なお、ここで対象としているのは湿潤状態にあるコンクリートの塩分浸透性の評価、すなわち材料のポテンシャルとしての評価である。

## 2. 2 新試験法の原理

コンクリートに電位勾配を与えた場合、単位断面積を単位時間当たり通過する塩化物イオン量  $J$  は、式 1 で与えられる。

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} + cD \frac{zF}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (\text{式 1})$$

ここで

$c$ : コンクリート中の塩化物イオン濃度

$D$ : コンクリートの塩化物イオン拡散係数

$\phi$ : 電位

$F$ : ファラデー定数

$R$ : 気体定数

である。式 1 において右辺第一項目が濃度勾配による塩化物イオンの移動を表し、第二項目が電位勾配を与えたことによる塩化物イオンの移動を示している。移動を示している。

式 1 において、濃度勾配による拡散が、電位勾配による移動に比べて無視しうる、すなわち、第一項目を省略できると仮定する。電位勾配が直線的に変化する場合では、時間経過に伴うコンクリート中の塩化物イオン濃度の変化は、次のように表せる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= -\frac{\partial J}{\partial x} \\ &= -D \frac{zF}{RT} \frac{\Delta \phi}{\Delta x} \frac{\partial c}{\partial x} \end{aligned} \quad (\text{式 2})$$

式 2 から、供試体中の塩化物イオン濃度がある値にある場合、その濃度を持つ点は速度  $k$  で移動する。ここで、 $k$  は次式で与えられる。

$$k = D \frac{zF}{RT} \frac{\Delta \phi}{\Delta x} \quad (\text{式 3})$$

したがって、供試体に電圧を負荷し、供試体に浸透する塩化物イオンの浸透速度を測定することができれば、式 3 から  $D$  を逆算することができる。ここで、コンクリート中の塩化物イオンの移動速度については、硝酸銀溶液を噴霧により塩分浸透箇所が変色する性質を用いて塩分浸透深さを測定し、この塩分浸透速度が時間的にどれだけの速さで移動するかを求めることとした。

## 2. 3 新試験法の試験手順の概要

考案した試験方法の手順を以下に示す。

- ①  $\phi$  10cm で厚さ 5cm の円盤状コンクリート供試体を製作する。なお、供試体の厚さは、骨材の最大

表一 1 示方配合

配合名	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						備考
		W	C	B	S	G	ΔW	
H25	25	160	640	0	694	865	0	
H30	30	160	533	0	734	915	0	
H40	40	160	400	0	784	977	0	
H55	55	160	291	0	825	1028	0	
BF50	40	160	200	200	777	968	0	スラグ置換率 50%
BF70	40	160	120	280	775	965	0	スラグ置換率 70%
H40LN	40	160	400	0	531	888	53	軽量細骨材
H40NL	40	160	400	0	871	431	17	軽量粗骨材
H40LL	40	150	375	0	545	442	72	軽量細骨材+軽量粗骨材

寸法が 20mm 程度を想定したものである。

- ② 供試体をデシケーター内に置き、真空にした後、デシケーター内に注水しそのまま数時間放置する。
- ③ 陽極側に NaOH 水溶液、陰極側に NaCl 水溶液を充填しその間に供試体を設置する。
- ④ 上記の供試体・試験装置を 3 対用意する。
- ⑤ 直流電圧 (36V を標準) をかける。3 対用意した供試体の通電時間として、それぞれ 6 時間、15 時間、30 時間程度を標準とする。
- ⑥ 通電後、円盤状供試体を取り出し、供試体を割裂し割裂面に硝酸銀溶液を噴霧し塩分浸透深さを測定する。
- ⑦ 通電時間と塩分浸透深さの関係から、塩分浸透速度  $k$  を求める。
- ⑧ 塩分浸透速度  $k$ 、円盤状供試体の厚さ  $l$ 、供試体にかけた電圧  $\Delta\phi$  とし、コンクリートの拡散係数  $D$  を式 4 で求める。

$$D = k \cdot \frac{RT}{zF} \cdot \frac{l}{\Delta\phi} \quad (\text{式 4})$$

#### 2. 4 新試験法の妥当性の検証試験

ここでは、新たに考案した試験方法の妥当性について以下の観点から検証を行った。

- ① 通常の浸漬試験で得られる塩化物イオンの拡散係数と新試験法で得られる拡散係数がほぼ同じ値を示すことを確認する
- ② 電気泳動により浸透する塩化物イオンの浸透深さについて、時間とともに一定の移動速度で移動することを確認するとともに、印加する電圧の設定や供試体の個数、通電前の処理方法など、試験操作の違いが及ぼす影響を明らかにする。
- ③ 拡散によってコンクリート中に浸透する塩化物イ

表一 2 コンクリートの圧縮強度  
ヤング係数、密度の試験結果

配合名	密度 g/cm <sup>3</sup>	圧縮強度 MPa	ヤング 係数 GPa
H25	2.41	91.5	41.1
H30	2.42	82.1	40.9
H40	2.39	65.7	39.2
H55	2.40	44.9	35.2
BF50	2.40	71.5	39.5
BF70	2.40	63.9	39.2
H40LN	2.10	55.2	28.8
H40NL	1.90	53.5	21.3
H40LL	1.61	46.1	17.2

オンと電気泳動によってコンクリート中に浸透する塩化物イオンとの間に違いがないかどうか明確にする。

である。

表一 1 は検証試験に用いたコンクリートの配合条件を示したものである。表一 1 において、 $\Delta W$  は軽量骨材を用いた配合について、練り混ぜ中に骨材に吸収される水分を補正するために加えた練り混ぜ水を表して、水結合材比の計算にはこれを含めていない。

表一 2 は標準養生を行った供試体の材齢 28 日における圧縮強度、弾性係数、密度の試験結果を示したものである。

提案した新試験法は、コンクリート供試体を製作した後、水中養生を施し、材齢 2ヶ月、4ヶ月、7ヶ月、13ヶ月目を実施した。ただし、真空放水処理の時間が及ぼす影響を調べるために実施した試験のシリーズのみ、材齢 2 日で脱型した後、三ヶ月間気中養生とした。

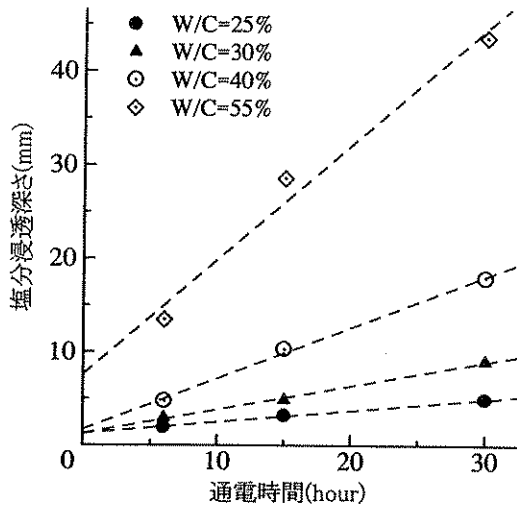


図-1 通电時間と塩分浸透深さ

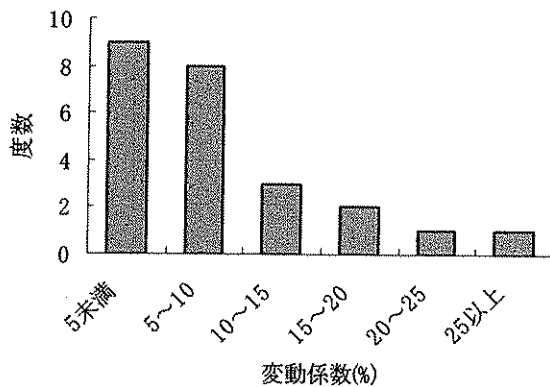


図-2 変動係数の頻度

表-3 供試体の個数と変動係数

配合	供試体 個数	k(mm/h) 平均値	kの変動 係数(%)
H40	3	0.58	9.7
	5	0.58	4.1
BF50	3	0.59	5.0
	5	0.56	4.1

#### 2. 4. 1 供試体個数・試験操作の影響について

供試体の通电時間と塩分浸透深さの測定例を図-1に示す。図-1中に示した点線は、各供試体で測定した塩分浸透深さについて、通电時間の一次式として回帰したときの回帰直線を示したものである。この結果からいえることは、通电時間と塩分浸透深さの測定値の間には、おおむね直線関係が認められ、浸透速度  $k$  (図-1における回帰直線の傾き) が確定できる。ただし、図-1の  $W/C=55\%$  の場合では、多少測定データにばらつきが見られていて、他の配

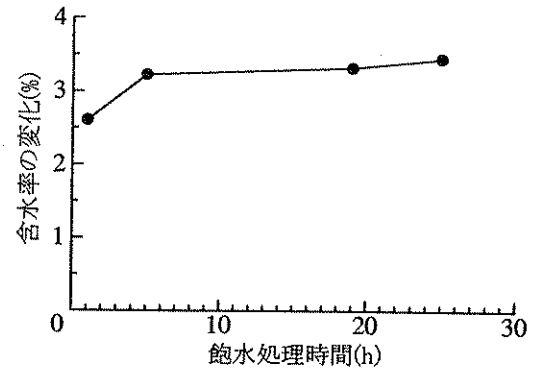


図-3 飽水処理時間と供試体含水率の関係

表-4 真空飽水処理方法

ケース	真空処理時間 (hour)	飽水継続時間 (hour)
1	3	1
2	3	5
3	3	19
4	3	25

合条件での結果と比較して、回帰直線の傾きに誤差が含まれると考えられる。直線性の良否は、本方法で求めようとしている拡散係数の推定誤差に直結する重要なものである。ここでは、全試験回数(直線回帰を行って得られる傾き  $k$  の標準偏差を各々求め、これを変動係数で表した場合の頻度図を図-2に示す。測定は全部で24回実施したが、 $k$  の値に見込まれる変動係数が20%を上回ったのは24回のうち2回である。変動係数の平均は9%であった。

一部の測定については、精度向上を図るために、1ケースあたりの供試体の個数を2個増やし、合計5個の供試体とした。この場合、増やした2供試体の通电時間は、それぞれ1時間および3時間とした。表-3は供試体の個数と浸透速度  $k$  の値、およびその標準偏差を示したものである。この結果によると、供試体を5個とした場合は、 $k$  の変動係数は小さくなるものの、 $k$  の値そのものにはあまり差がないことが分かる。

この結果から、本試験で必要となる供試体の数については、3個で十分であると考えられる。

次に、通电の前処理として実施する供試体の真空飽水処理の時間が試験結果に与える影響について述べる。配合条件がH40のコンクリートを用いた。真空ポンプの作動時間はいずれも3時間で一定とし、その後注水してそのまま安置する時間を表-4の通り変化させた。図-3に飽水処理時間と飽水処理前後の供試体の含水率変化の測定結果を示す。コンク

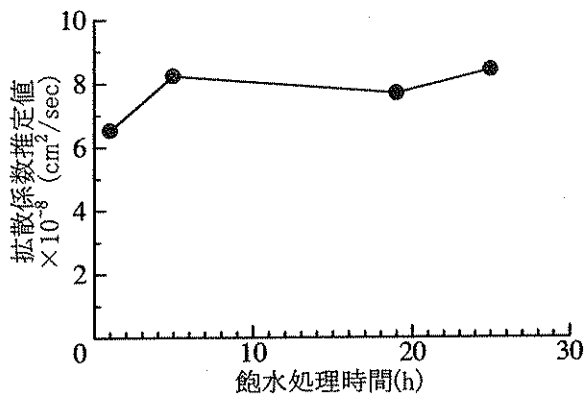


図-4 供試体含水率と塩分拡散係数推定値の関係

リートの含水率変化は、飽水継続時間が5時間までは急激に増加し、5時間経過以降はその増加は緩やかなものとなっている。通電時間6時間および30時間後の塩分浸透深さの差から塩分浸透深さの移動速度を求め、コンクリートの塩分拡散係数の値を推定した結果を図-4に示す。この結果によると、やはり、飽水処理時間が1時間の場合、供試体の飽水が不十分なことが影響していて、塩分拡散係数の値は小さくなっているが、飽水処理が5時間以上の場合、ほぼ一定の塩分拡散係数が求められていることがわかる。

次に供試体に加える電圧が、得られる塩分拡散係数に及ぼす影響について示す。図-5はBF50の配合条件において供試体に加えた電圧を2.4V/cm（供試体厚さ5cmなので供試体両端の電位差が12V）～12V/cm（60V）まで変化させた場合の得られた拡散係数の値を示したものである。この結果によると、加える電位差は試験結果にほとんど影響を及ぼしていないことが分かる。ただし、12V/cmで試験を実施した場合には、図-6に示すように通電中の供試体温度がかなり上昇する。したがって、試験実施において、作業の安全性を確保し、供試体温度上昇の悪影響をなくすことを考えると、12V/cmが上限であると考えられる。一方、加える電位差の加減であるが、あまり電位差が小さいと塩化物イオンの浸透速度が小さくなり、試験に要する時間が長くなるので2.4V/cm程度が下限であると思われる。

#### 2.4.2 得られる拡散係数の妥当性の検証結果

ここでは、通電によって促進させた試験方法で得られる拡散係数と、同一の条件で作成した供試体を塩水中に浸漬し、供試体内部の塩化物イオンの濃度分布を化学分析によって求め、その濃度分布に基づ

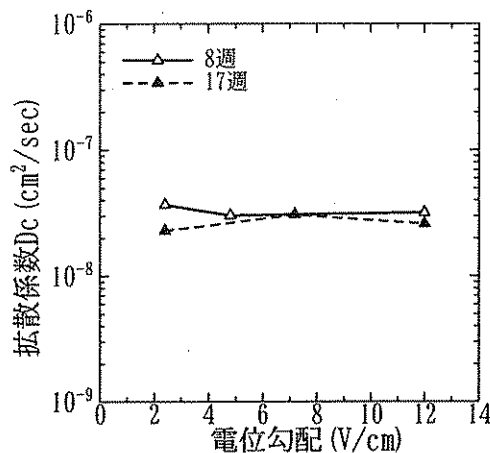


図-5 電位勾配と塩分拡散係数の関係

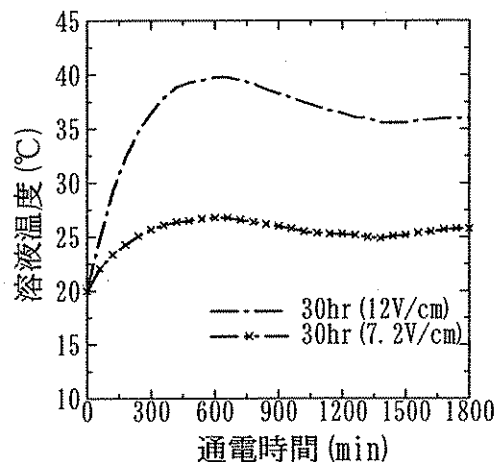


図-6 電位勾配と供試体温度の関係

いて算定される拡散係数の比較を行った。なお、塩分浸漬試験から拡散係数を求める際、Fickの拡散方程式にしたがって塩化物イオンが浸透し、境界条件としてはコンクリートの表面での塩化物イオンを与えた。図-7は両者の方法で得られた塩分拡散係数の値を比較したものであるが、一部の供試体を除いておおむね両者は一致していることが分かる。一部、材齢13ヶ月において促進試験法で得られた塩化物イオンの拡散係数が、浸漬試験で得られた塩分拡散係数よりも大きくなっているが、この理由については今のところ不明である。

#### 2.4.3 コンクリート中の塩化物イオンの状態

コンクリート中に浸透する塩化物イオンについては、一般的にセメントの水和物によって化学的にあるいは、吸着によってその移動が拘束される固定塩分と、拘束されずコンクリート中を自由に移動できる可溶性塩分とに分けることができる。一般的に浸漬試験で得られる塩化物イオンの拡散係数は、上記の可溶性塩分と固定塩分の両者を含めて、全て拡散

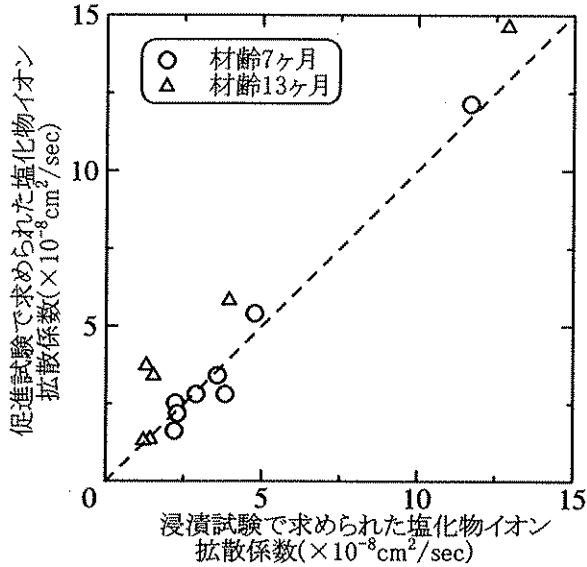


図-7 異なる試験法で得られた塩分拡散係数の比較

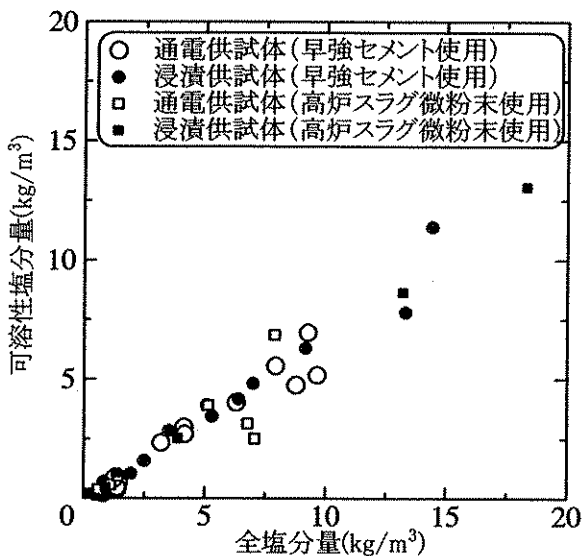


図-8 可溶性塩分と全塩分の分析結果

によってコンクリート中に塩分が浸透すると仮定して求められるものである。

ここで、塩水浸漬試験によってコンクリート中に長時間をかけて浸透した塩化物イオンと、電気泳動によって短時間のうちに強制的にコンクリート中に浸透させた塩化物イオンについて、その可溶性・固定塩分の比率が異なっていれば、得られる塩化物イオンの拡散係数の意味合いも異なったものになる。図-7において両試験方法で得られた拡散係数が見かけ上ほぼ一致していることを示したが、両方法によってコンクリート中に浸透した塩化物イオンの形態が異なっているのであれば、図-7は単なる偶然

の一致であり、意味を成さないものであると考えられる。

ここでは、通电後の供試体および塩分浸漬試験後の供試体について、JCI-SC 4 に準じて塩化物イオンの分析を行い、それぞれについて可溶性塩分と全塩分量を求めた。図-8はその結果を示したものである。この結果によると、通电供試体と塩水浸漬供試体間に大きな差はなく、いずれも可溶性塩分量は全塩分量の75%程度の値となっている。また高炉スラグ微粉末を使用の有無も影響がないことが分かる。

以上の検討結果から、ここに提案した試験方法により、塩害耐久性を評価するために必要となるコンクリートの塩化物イオン拡散係数を簡易に短時間で求めることが可能であると考えられる。

### 3. 高性能軽量コンクリートの温度ひび割れ軽減策とその効果について

#### 3.1 検討方法の概要

本研究では、簡易な室内試験による高性能軽量コンクリートの初期温度ひび割れ評価法について検討した。また、温度ひび割れ軽減を目的として、異なる種類の結合材を用い、これがひび割れ発生を抑制する上でどの程度効果があったかについて実験的検討を行った。ここで、実験方法としては、以下の二通りの方法で行った。すなわち、

- 1) 実物大の模型を作製し、この模型でのひび割れ状況を観察する。
- 2) 小型供試体を製作し、この小型供試体の拘束応力試験結果から温度応力を推定する。

ここで、インパール鋼材を用いた試験供試体は、実物大供試体による試験に比べ、試験実施に必要な労力ならびに試験コストを削減できるメリットがある。このような小型供試体を用いた温度ひび割れ予測方法は、これまでも検討された例がある。しかし、試験方法が煩雑で特殊な試験器具を必要とすること、また小型供試体によって得られた結果が、実際の部材のひび割れをどの程度模擬できているのか明確でないなどの問題点を抱えていて、実際にはあまり用いられていないのが現状である。ここでは、これらの問題点を改善するため、以下の工夫を施している。

- 1) 自己収縮だけでなく、温度応力をとらえるため、拘束鋼材として鉄筋ではなく、線膨張係数の小さいインパール鋼材を用いる
- 2) 供試体に初期水と熱による温度変化を与えるた

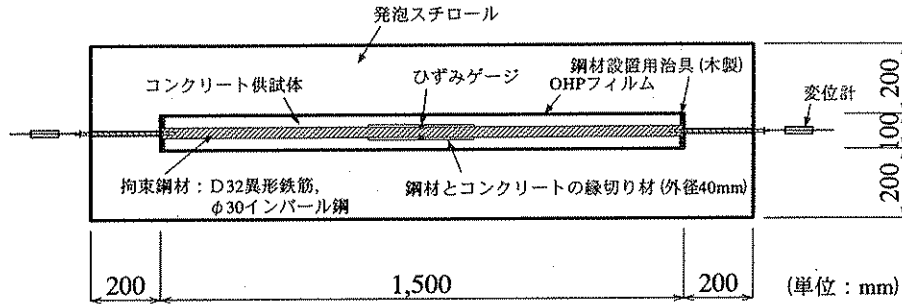


図-9.1 小型供試体による拘束試験概要図

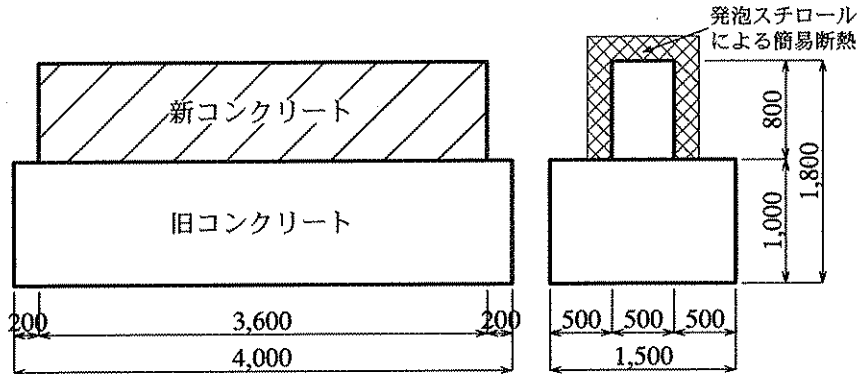


図-9.2 実物大大型供試体概要図

め、断熱性の優れた型枠を使用する

- 3) 拘束鋼材を埋設しない供試体も併せて製作し、  
この自由変形を測定する。

### 3.2 実験方法

試験に用いたコンクリートの配合は単位水量を 160kg/m<sup>3</sup>、水結合材比を 25%とし、セメントの種類は早強セメント (H)、高ピーライトセメント (L)、ならびに早強セメントの 50%をブレン値 6000の高炉スラグ微粉末で置き換えた混合セメント (B)の 3種類とした。小型供試体による拘束試験および、拘束試験による評価の妥当性を検証するため、実物大の大型供試体による温度応力確認試験を実施した。

小型供試体および実物大の大型供試体の概要を図-9に示す。小型供試体のコンクリートに作用している応力は、コンクリート中に埋設したインパール製拘束鋼材 (φ30mm) に貼付したひずみゲージから推定することとした。

なお、この実験では軽量骨材を用いなかった。この理由として、軽量骨材を用いると引張強度が小さくなるため、ひび割れの危険性は大きくなると予想される。しかし、小型供試体による拘束試験を用いたひび割れ予測の精度向上の観点からは、使用骨材の種類は余り大きな影響は及ぼさないと考えられたためです。

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 大型供試体の実験結果

コンクリート打ち込み後の供試体温度の測定結果は早強セメントを用いた場合で約 80℃、高炉スラグ微粉末を混入したセメントを用いた場合で約 70℃、高ピーライトセメントを用いた場合で約 40℃の温度上昇が認められた。

高ピーライトセメントを用いた供試体では、表面にごくわずかなヘアクラックが生じただけであったが、早強セメントを用いた場合は、セメントの水和熱による温度上昇を経た後、外気温とほぼ同じ温度まで供試体が冷めた時点で約 0.5mm 幅のひび割れが供試体を貫通した。高炉スラグ微粉末を使用した供試体では、最高温度に到達したのち部材の温度が低下し始め、その温度が外気よりも 20℃程度熱い状況ですでにひび割れが発生し、最終的には約 1.1mm 程度の幅の貫通ひび割れの発生が認められた。

これらの結果から、早強セメント、ならびに高炉スラグ微粉末を用いた場合は、ほぼ同様もしくは高炉スラグ微粉末を用いた方が、温度ひび割れ抵抗性がやや劣ると考えられる。これに対し、高ピーライトセメントを用いたコンクリートでは、高い温度ひび割れ抵抗性を有していることが確認された。

#### 3.3.2 小型供試体の実験結果

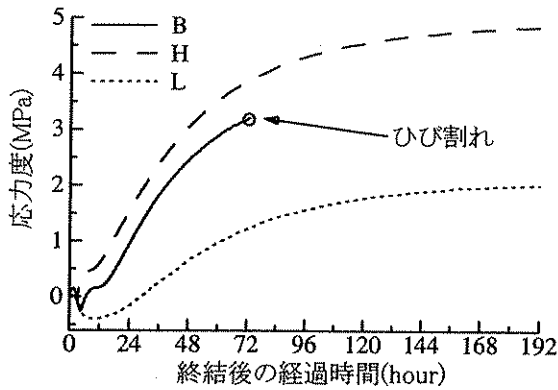


図-10 拘束応力の測定結果

大型供試体で用いたものと同一配合のコンクリートにより、小型供試体の拘束試験を実施した。供試体に発生した応力の履歴を図-10 に示す。なお、縦軸の応力は、小型供試体のコンクリート断面に発生した応力であり、符号は引張を正とした。

この結果から、小型供試体においても高ピーライトセメントを用いた場合に発生応力が小さく、ひび割れを防止する上で有利であることが分かる。

### 3. 3. 3 小型供試体の実験結果を用いたひび割れの推定

小型供試体による拘束応力測定結果から、大型供試体のひび割れを予測する方法について検討結果をいかに示す。

大型供試体において、図-9. 2に示す新コンクリートが完全な弾性体であると仮定し、これに収縮ひずみが一様に  $\varepsilon_a$  だけ発生したと仮定する。この収縮変形を旧コンクリート側が拘束したとする。有限要素法を用いた解析結果によれば新コンクリートのヤング係数を  $E_c$  としたとき、新コンクリートに発生する応力  $\sigma_{lc}$  は次式で近似的に求められる。

$$\sigma_{lc} = K_I \cdot E_c \cdot \varepsilon_a \quad (\text{式3})$$

上式において拘束率  $K_I$  は新コンクリート部分の部材長さとおよび新コンクリートと旧コンクリートのヤング係数比によって決まり、今回の供試体では、0.6程度の値となる。

一方、小型供試体も同様な表現で近似的に発生応力を表すことができる。小型供試体のコンクリート断面に発生する応力を  $\sigma_{llc}$  とすると

$$\sigma_{llc} = K_{II} \cdot E_c \cdot \varepsilon_a \quad (\text{式4})$$

と表せる。拘束率  $K_{II}$  は0.23程度の値となる。従って、小型供試体は大型供試体に比較して40%程度の

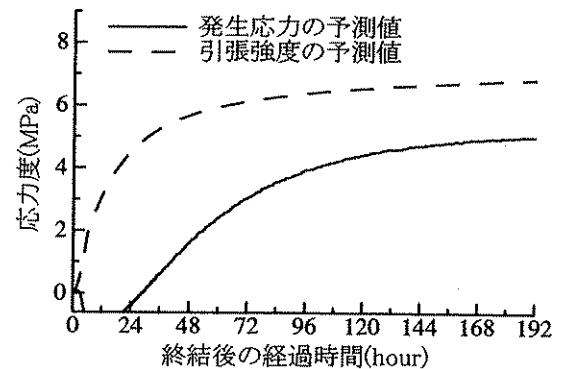
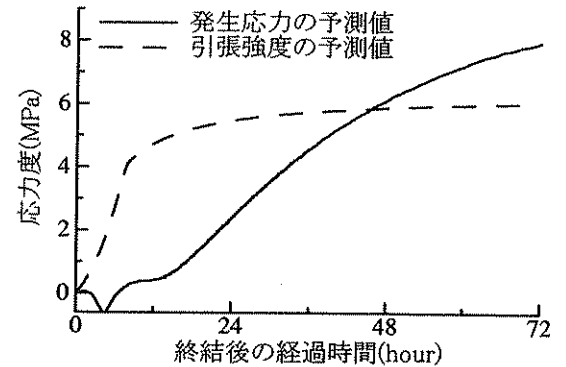
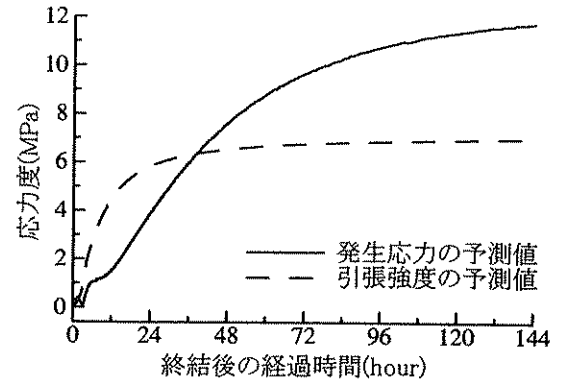


図-11 引張応力と引張強度の予測結果

拘束率しか有していない。すなわち、小型供試体は大型供試体と比較して、同一の収縮ひずみに対して40%の応力しか生じない。このため、小型供試体で測定した応力から大型供試体に発生する応力を推定するためには、小型供試体での応力測定値を2.5倍する必要があると考えられる。

図-11 は材齢の進行に伴う大型供試体の応力の予測値と、コンクリートの引張強度の予測値をプロットしたものである。大型供試体の応力の予測値は、小型供試体で測定した応力を単純に2.5倍したものである。コンクリートの引張強度の予測値は、あらかじめ材料試験により引張強度と有効材齢の関係を求め、この結果から予測されたものである。

この結果によると、早強セメントおよび高炉スラグ微粉末を50%混入した場合は、応力の予測値がコ



ンクリートの引張強度を大幅に上回り、まず間違いなくひび割れが発生すると予測される。

これに対し、高ビーライトセメントを用いたケースでは、発生応力の予測値は引張強度の予測値を下回っていて、ひび割れの発生確率は非常に小さいとの予測結果を得ることができる。

これらの予測結果は大型供試体を実際に製作して得られたひび割れの発生結果と一致しており、妥当な結果が得られたと考えられる。

### 3. 3. 4 推定精度向上のための課題

今回の結果によれば、小型供試体による拘束試験結果から予測されるひび割れ発生状況はおおむね妥当であったが、推定精度を向上させるための課題も残されている。

ここに示した推定方法で、拘束率の算定においてコンクリートを弾性体と仮定しているが、実際にはコンクリートのクリープが生じ、実際の拘束率は弾性体と仮定して得られる拘束率からずれることが想定される。

今後は、コンクリートのクリープの影響が拘束率、ひいては、小型供試体から大型部材への応力の換算に及ぼす影響を明らかにする必要があると考えられる。

## 4. せん断強度に関する検討

### 4. 1 せん断強度算定上の問題点

軽量コンクリートは、同一圧縮強度を持つ通常のコンクリートに比べ、一般的にヤング係数が小さくなるほか引張強度が小さくなる性質をもっている。引張強度が小さい点は、コンクリート部材の引張応力に起因した破壊に対する安全性を照査する上で十分な注意が必要であることを示している。ここでは、特に軽量化のメリットが大きくなるプレストレスト

コンクリート (PC) 上部構造を対象として、PC はり部材のせん断強度特性について、検討を行った。せん断力に対する照査方法 (設計方法) を確立する上で特に重要となる以下の項目を着目点とした検討を実施した。

- 1) 軽量コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりのせん断ひび割れ強度は、同一圧縮強度を持つ普通コンクリートを用いたはりのせん断ひび割れ強度を一律に70%低減することが妥当であるかどうか
- 2) プレストレスを導入した場合も、上記の低減を適用することが妥当であるかどうか
- 3) 修正トラス理論、すなわち、せん断ひび割れ発生後もコンクリートの負担するせん断力は一定に保たれるかどうか
- 4) せん断圧縮破壊時のせん断強度の評価方法はどのようにすればよいか

## 4. 2 載荷試験と考察

### 4. 2. 1 載荷試験の概要

供試体は全部で12体のはり部材で、変化させた要因はコンクリートの使用骨材の組合せ (4種類) と供試体に導入したプレストレス量 (3レベル) である。使用骨材の組み合わせとして、それぞれN (普通骨材使用)、L1 (細骨材のみ軽量)、L2 (粗骨材のみ軽量)、L3 (細骨材粗骨材とも軽量) の記号を用いた。図-12に供試体の概要を示す。

### 4. 2. 2 鉄筋コンクリート部材のせん断ひび割れ強度

図-13に示すとおり、軽量コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりのせん断強度はコンクリートの密度が小さくなるほど低下する。これまで、軽量コンクリートの部材のせん断強度は普通コンクリートの70%に低下するとされていたが、コンクリー

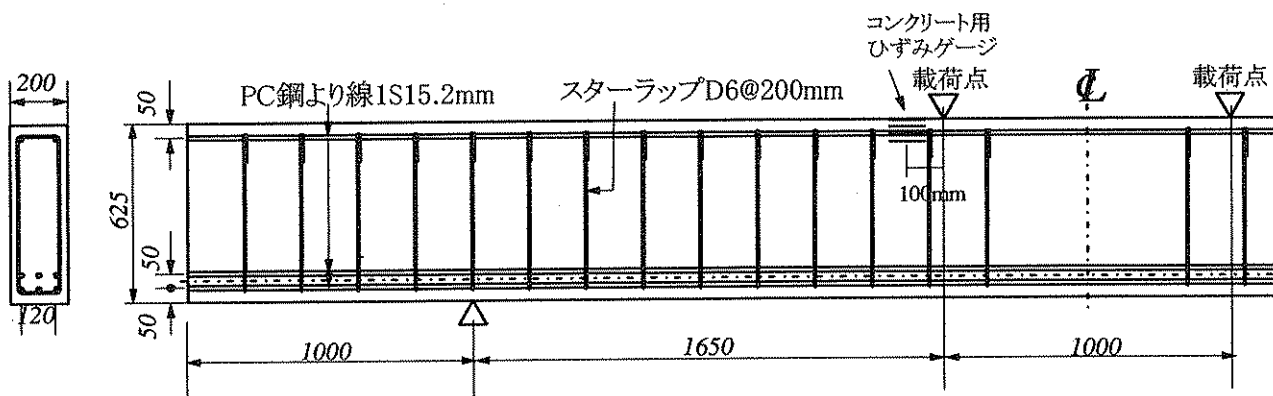


図-12 PCはり供試体 (単位: mm)

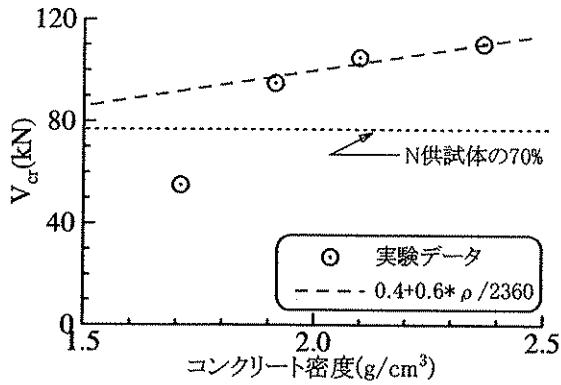


図-1.3 コンクリート密度とせん断ひび割れ強度の関係 (プレストレスなし)

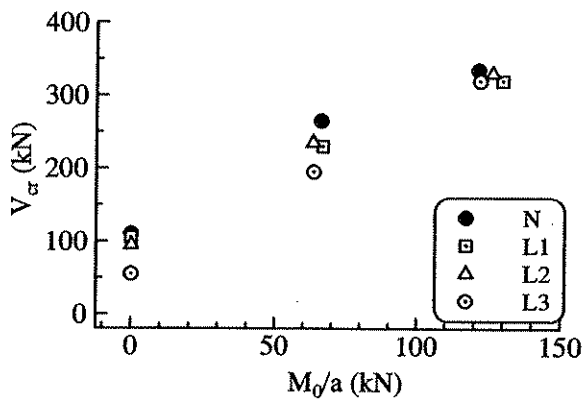


図-1.4 プレストレス量とせん断ひび割れ強度の関係

トの密度によっては、これよりもせん断強度の低下が著しい場合があることが分かる。

#### 4. 2. 3 PC 部材のせん断ひび割れ強度

PC 部材では、プレストレスの導入によってせん断ひび割れ強度が増加し、このせん断ひび割れの増加量は、通常の三角形分布のプレストレスを導入している場合では、デコンプレッションモーメントとせん断スパン長によって比較的良好的な精度で算定することが可能である。

ここで、プレストレスの導入によるせん断ひび割れ強度の増加について、軽量骨材を用いていても普通骨材を用いた場合と同様であるかどうかは、必ずしも明確にはなっていない。

図-1.4はプレストレスによって供試体に与えられたデコンプレッションモーメント( $M_0$ )をせん断スパン長( $a$ )で除したせん断力と、 $V_{cr}$  の関係を示したものである。図中の N は普通骨材、L1 は細骨材のみ軽量骨材、L2 は粗骨材のみ軽量骨材、L3 は細骨

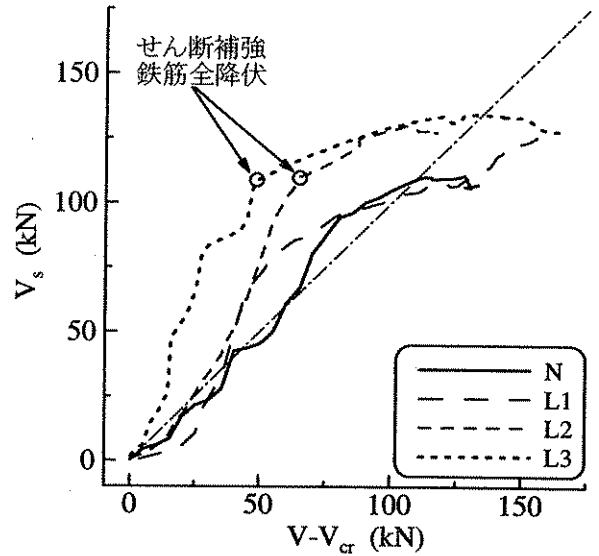


図-1.5  $V-V_{cr}$  と  $V_s$  の関係 (プレストレスなし)

材粗骨材とも軽量骨材を使用したものである。この結果によると、プレストレスの増加に伴うせん断ひび割れ強度の増加に関して、骨材の種類はほとんど影響を及ぼしていないものと考えられる。

#### 4. 2. 4 せん断ひび割れ発生後のコンクリートの負担するせん断力について

図-1.5はプレストレスがない場合のせん断力の負担状況を示したものである。横軸には、部材に作用するせん断力  $V$  からせん断ひび割れ発生時のせん断力  $V_{cr}$  を差し引いたものであり、縦軸はせん断補強鉄筋が負担するせん断力  $V_s$  を表す。

せん断ひび割れ発生後、コンクリートの負担するせん断力が  $V_{cr}$  で一定に保たれ、これを上回るせん断力は全てせん断補強鉄筋でまかなわれるとすると、 $V_s$  と  $V-V_{cr}$  の関係は  $45^\circ$  の直線上にあるはずである。今回の実験結果を見ると、普通骨材を用いた N 供試体ではほぼ  $45^\circ$  の傾きを持った直線上にあるが、それ以外の供試体ではせん断ひび割れ発生後の  $V_s$  の勾配は  $45^\circ$  よりも大きくなっている。このことは、せん断ひび割れ発生後コンクリートの負担するせん断力  $V_c$  に低下が生じ、これをせん断補強鉄筋が補ったことを表している。L1 および L2 供試体では N 供試体と L3 供試体の中間的な結果であったが、軽量粗骨材を用いた L2 の方が  $V_s$  の増加は大きく、L1 よりも  $V_c$  の一時的な低下は著しい結果となった。このように、プレストレスを導入していない供試体では、せん断ひび割れ発生荷重が使用骨材の種類によって変化するとともに、せん断ひび割

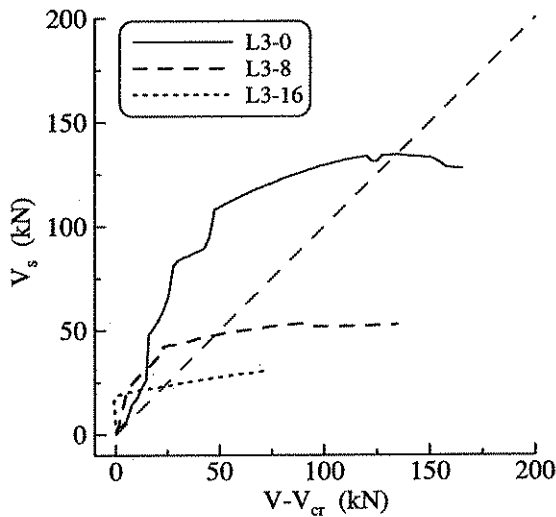
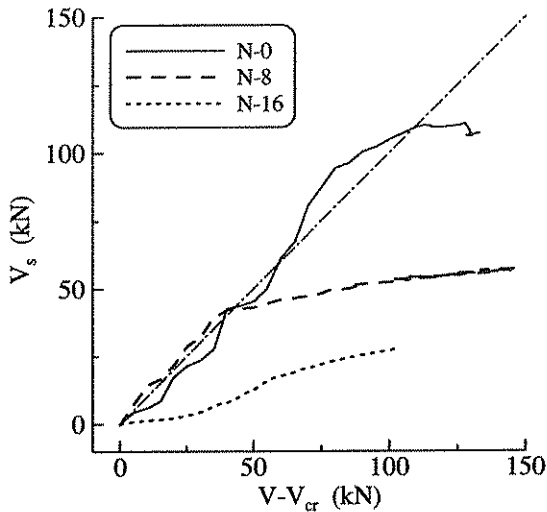


図-16 V-V<sub>cr</sub>とV<sub>s</sub>の関係  
(上: N 供試体, 下: L3 供試体)

れ発生後の  $V_c$  についても使用骨材の種類により大きく変化することが明らかとなった。この原因としては、軽量粗骨材を用いた場合、せん断ひび割れが骨材を貫通し、平滑なひび割れ面を形成していたこと、また、ひび割れ発生後の引張応力の開放が著しいことなどが起因して、せん断ひび割れの発生によってひび割れ面を介した応力の伝達が急速に低下したためと考えられる。

次に、N 供試体および L3 供試体でプレストレスを変化させた場合のせん断ひび割れ発生後の  $V_s$  を求めた結果を図-16に示す。N 供試体は、せん断ひび割れ発生後の  $V_s$  の増加は、せん断力の増加に見合うものとなっていて、修正トラス理論を上回るせん断補強鉄筋の負担は生じていない。これに対し、細骨材粗骨材とも軽量骨材を使用した L3 供試体で

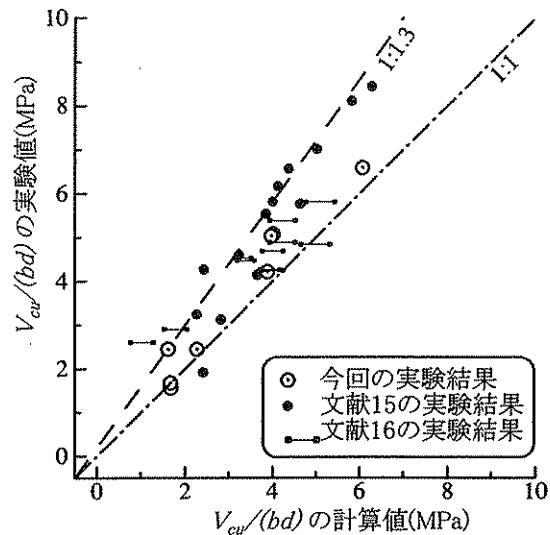


図-17 実験値と計算値の比較

はプレストレスを導入しても、せん断ひび割れ発生後の  $V_s$  の立ち上がりは急であり、一時的な  $V_c$  の低下が生じていることがわかる。ただし、プレストレスの増加につれて、 $V_s$  は小さくなっている。

このように、せん断ひび割れ発生後の  $V_c$  の一時的な低下に伴う  $V_s$  の急激な増加が認められることは、プレストレスを導入しても避けられない。しかし、プレストレス量が増加するにつれ、 $V_s$  そのものが小さくなるため、 $V_c$  の一時的な低下の影響は実際には少なくなるものと考えられる。

#### 4.2.5 せん断圧縮破壊強度について

せん断圧縮破壊となる場合のせん断強度の算定式として、以下の式を提案した。

$$V_{cu} = v_{cu} \cdot bd + C_0 \tan \theta$$

ここで、上記式中の  $v_{cu}$  は二羽によって提案されたディーブーム部材のせん断圧縮破壊強度を表していて、 $C_0$  が導入されているプレストレス力を表す。 $\theta$  はプレストレス導入位置におけるプレストレス力の重心位置と、載荷位置を結ぶ直線の、水平軸となす角を表したものである。

この式によって予測されるせん断圧縮破壊時の強度と、実測結果を比較したものが図-17である。

計算値は実験値に比べて小さくなっていて、その比率はおおよそ1.0~1.3の範囲にあった。このように計算値は安全側の結果を与えるものの、概略的にはプレストレスを導入した矩形断面はりのせん断圧縮破壊時のコンクリートの負担するせん断力を推定

できるものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究において、高強度軽量コンクリートを用いた部材のせん断強度の評価手法、塩分浸透性の簡易促進試験法を開発した。また、初期温度ひび割れを予測するための簡易な試験方法の提案を行った。今回の研究では主として工場で製作されるプレキャスト PC を対象としたため、ポンプ圧送性については特に検討を行わなかった。現場打ちコンクリートへ適用範囲を拡大するためには、今後、ポンプ圧送性に関する検討も必要となろう。

## 参考文献

- 1) 渡辺博志、河野広隆、鈴木雅博、佐藤重一：高強度軽量コンクリートを用いた PC 部材のせん断強度に関する研究」、コンクリート工学論文集、Vol.14、No.1、pp.13-22、2003.1
- 2) 谷口秀明、渡辺博志、藤田学、鈴木雅博：プレストレストコンクリート部材へのテストハンマーの適用性に関する検討、プレストレストコンクリート、Vol.44、No.5、2002.9
- 3) 渡辺博志、河野広隆、田中良樹、渡辺豊：コンクリートの急速塩分透過性試験の適用性、土木技術資料、Vol.44、No.1、2002.1
- 4) 渡辺豊、河野広隆、渡辺博志：コンクリートの急速塩分浸透試験による塩化物イオン拡散係数の算定について、コンクリート工学年次論文集 Vol.24、No.1、pp.663-668、2002.6
- 5) 渡辺博志、河野広隆、渡辺豊：コンクリート供試体の真空飽水処理方法が急速塩分浸透性試験結果に及ぼす影響について、土木学会第 57 回年次学術講演会、第 V 部門、pp.1057-1058、2002.9