

報告 水中不分離性コンクリートの側圧評価実験

杉本 俊介^{*1}・前田 哲宏^{*2}・佐野 清史^{*3}・坂田 昇^{*4}

要旨: 鋼コンクリート構造より成る半円形セル型仮締切り工の中詰めコンクリートにおいて、使用する水中不分離性コンクリートの打上り速度によっては過大な側圧が生じるため、二重鋼矢板あるいはセルが変形することが懸念された。鋼矢板の設計に用いた最大側圧の妥当性を検証するため、打ち上がり速度を1m当たり45分、60分および90分に変化させた場合の水中不分離性コンクリートの側圧特性を実験で確認した。その結果、最大側圧は打上り速度が速くなるほど大きくなる傾向があり、既往の側圧推定式に準じて側圧係数減少開始時間や側圧減少係数を考慮して整理でき、設計に用いた最大側圧値が妥当であることがわかった。

キーワード: 水中不分離性コンクリート, 側圧, 側圧推定式, 打上り速度

1. はじめに

鋼コンクリート構造より成る半円形セル型仮締切り工（直径16.3m, 厚さ65cm, 平均深さ50m）の中詰めコンクリートにおいて、使用する水中不分離性コンクリートの打上り速度によっては過大な側圧が生じ、二重鋼矢板あるいはセルが変形することが懸念された。しかし、コンクリートの側圧に関する研究や実構造部における測定例は数多くの報告があるものの、水中不分離性コンクリートの側圧に関する研究は極めて少ない¹⁾。

本実験は、気温25～30℃の環境下で製造された水中不分離性コンクリートを約1時間運搬し、水温10℃程度の冷水下に打込む施工条件において、コンクリートの打上り速度が及ぼす二重鋼矢板への側圧の影響を把握するとともに、側圧推定式について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験方法

実験方法を図-1に示す。加圧の手順例を図-2に示す。水中不分離性コンクリートの一回の打込み厚さを1mとし、打上り速度を45分、

60分および90分の3水準に変化させた場合の側圧特性を調べるため、打上り高さ19mを想定した実験とした。

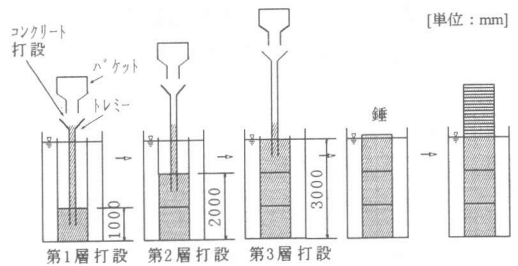


図-1 実験方法

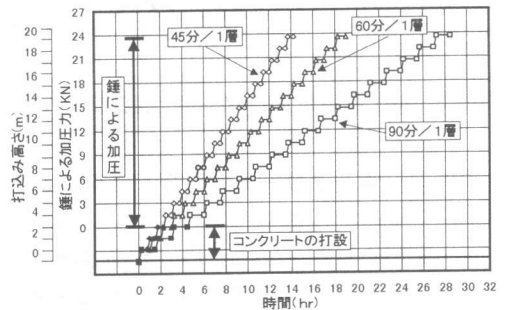


図-2 加圧の手順

*1 鹿島・東洋JV奥只見発電所増設工事事務所副所長（正会員）

*2 電源開発(株)総合試験所建設材料グループ（正会員）

*3 東洋建設(株)美浦研究所材料研究室長（正会員）

*4 鹿島技術研究所土木技術研究部材料・施工グループ主任研究員 工博（正会員）

実験は、水温を $10 \pm 2^\circ\text{C}$ に保持した水槽内に40cm角の高さ3mの型枠を敷鉄板上にボルトで固定し、打上がり高さ3mまでを1m毎に所定の時間間隔で温度 $25 \sim 32^\circ\text{C}$ のコンクリートをトレミーで打込み、その後コンクリート質量と等価な錘(170kg, 16枚)を打上がり高さ19mに相当するまで順次載荷して、型枠の側圧を計測した。側圧の測定位置を図-3に示す。測定箇所は、土圧計(ダイヤフラム構造、容量 $0.49\text{N}/\text{mm}^2$ 、精度 $0.001\text{N}/\text{mm}^2$)5ヶ所と、ひずみゲージ(長さ6mm)15ヶ所とした。ひずみ測定値から側圧への換算は、図-4に示す1/4モデルによる2次元フレーム計算による型枠に発生するひずみと側圧との関係を用いた。なお、コンクリート温度は型枠内のコーナで上中下の3箇所に設置した熱電対を用いて測定した。測定間隔はいずれも5分間隔とした。コンクリートの打込みはトレミー(8インチ管)を用いて行い、打込み開始時はプランジヤーを取付け、打込み中はトレミーの下端をコンクリート中に約25cm突っ込んだ状態とした。

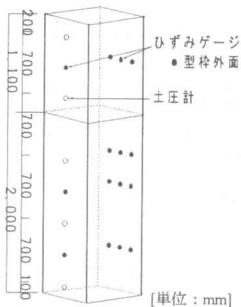


図-3 側圧測定位置

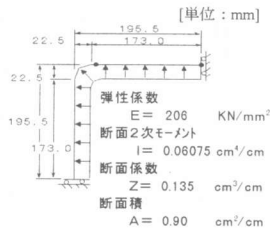


図-4 解析モデル

2.2 コンクリートの配合と製造方法

コンクリートの使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。耐寒・防凍剤は 20°C における凝結始発時間が15時間以下となるように用いたものである。配合条件は、材齢28日設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ (配合強度 $31\text{N}/\text{mm}^2$ 以上)であり、水結合材比44%, スランプフロー $50 \pm 3\text{cm}$ 、空気量 $3 \pm 1.5\%$ とした。

コンクリートの製造は、水平二軸型強制練りミキサ(容量100ℓ)を用いて行った。1バッチの

練混ぜ量は70ℓとし、各層について3~4バッチ練混ぜ順次コンクリートをバケットに投入し、それぞれ練上がり温度と同等の 25°C (打上がり速度45分, 60分の実験)あるいは 30°C (打上がり速度90分の実験)の雰囲気中に60分間静置した後、側圧実験用型枠内に打ち込んだ。

表-3にコンクリートの試験項目と試験方法を示す。

表-1 使用材料

種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント [記号:C] (密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3260\text{cm}^2/\text{g}$)
フライアッシュ	フライアッシュ [記号:FA] (密度 $2.24\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3950\text{cm}^2/\text{g}$, 強熱減量 0.8%)
細骨材	奥只見産砕砂(最大径5mm, 密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 0.76% , 実積率 67.5% , 粗粒率 2.63)
粗骨材	八王子産砕石(最大径20mm, 密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 1.03% , 実積率 60.5% , 粗粒率 6.84)
混和材料	水中不離性混和剤(セルロース系) [記号:UW]
	高性能AE減水剤(ホリカルボン酸系) [記号:SP]
	耐寒・防凍剤(窒素系) [記号:PS]

表-2 コンクリートの配合

*1 W/P (%)	s/a (%)	目標 スランプ フロー (cm)	目標 空気量 (%)	単位量 (上段: kg/m^3 下段: kg/m^3)									
				W	C	FA	S	G	UW	SP剤	PS剤		
44.0	40	50 ± 3	3 ± 1.5	220	425	75	629	924	2.53	2.0	*2	1.0	*2
				220	134	33	233	350	-	-	-	-	

*1: $P = C + FA$ *2: $P \times \%$

(注) 打上がり速度90分の実験では、SP剤の使用量は $P \times 1.5\%$

表-3 コンクリートの試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプフロー	JSCE-F503-1990
空気量試験	JIS A 1128-1993
凝結始発時間	「コンクリート用化学混和剤」(JIS A 6204-1993)の附属書1「コンクリートの凝結時間試験方法」に準じた。ただし、凝結時間測定用供試体は、 30°C あるいは 25°C の雰囲気条件下に1時間まで静置した後、 20°C と 10°C の雰囲気条件下で試験を行った。
圧縮強度試験 (気中および水中作製)	JIS A 1108-1993 に従った。但し、水中作製供試体の作り方は、JSCE-F504-1990 に従った。
コアの圧縮強度試験およびヤング係数の測定 (打上がり速度 60分のみ)	側圧測定用試験体から、材齢3週に垂直方向に径10cm, 高さ3mのコアを2本採取して、高さが約20cmとなるように切断し、これを供試体とした。但し、打継ぎ部については、その箇所を挟んで上下10cmの位置で切断し、高さが約20cmの供試体となるようにした。 なお、試験時にひずみを測定し、最大応力の3分の1における割線係数を求めてヤング係数とした。

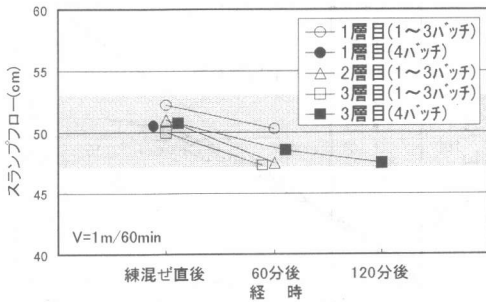


図-5 スランプフローの経時変化

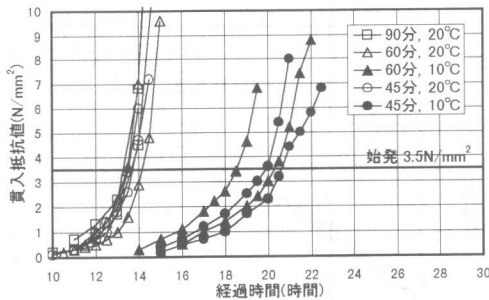


図-6 凝結始発時間

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの性質

(1) フレッシュコンクリートの性質

練混ぜから60分経過したコンクリートのスランプフローは図-5に示すように所要の品質を満足し、支障なく打込むことができた。凝結始発時間は図-6に示すように、雰囲気温度20°Cでは約13~14時間であり、配合等による差はなかった。雰囲気温度10°Cでは約18.5~21時間であった。

(2) 硬化コンクリートの性質

材齢28日における水中作製供試体の圧縮強度は、気中作製供試体の圧縮強度44.6N/mm²の0.89~1.0倍であった。材齢28日のコア供試体の圧縮強度は図-7に示すように38.2~54.3N/mm²であり、平均値は48.1N/mm²であった。ヤング係数は27KN/mm²程度であった。また、側圧実験用試験体のコンクリート打継ぎ部分は強度低下も認められず、十分な強度を有する構造体コンクリートであった。

3.2 側圧測定結果と考察

(1) 温度および側圧の経時変化について

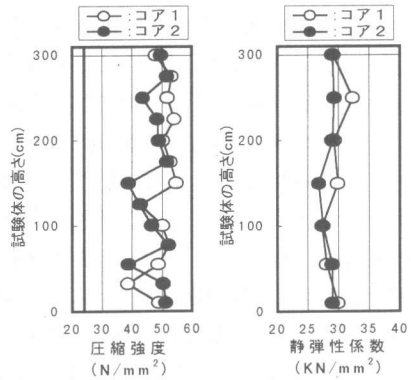


図-7 コア供試体の圧縮強度とヤング係数

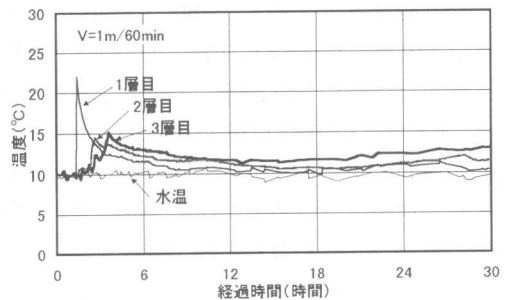


図-8 コンクリート温度と水温の経時変化

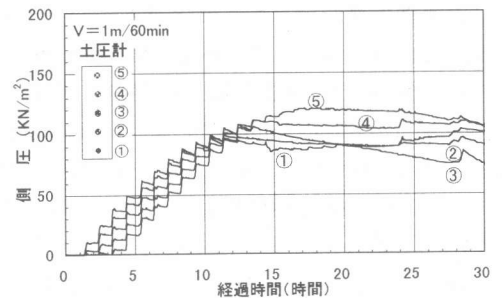


図-9 土圧計による側圧測定結果

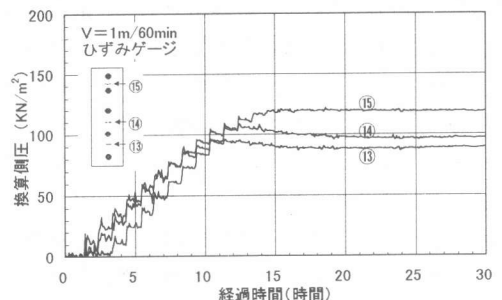


図-10 ひずみゲージによる換算側圧結果

コンクリート温度および水温の経時変化の一例を図-8に示す。また、土圧計による側圧測定結果の一例を図-9に、ひずみ測定値から側圧に換算した結果のうち、土圧計設置側に取り付けられたひずみゲージ⑬、⑭、⑮について図-10に示す。コンクリート温度は打込み後徐々に水温と同じ10℃近くまで低下した。側圧は、打継ぎ時間毎で階段状に上昇し、計測位置の違いによる差が計測結果に認められる。しかし、側圧とコンクリートの上載圧の関係として整理すると図-11および図-12に示す例のようである。全実験ケースを整理すると、上載圧の上昇とともに、側圧は液圧として線形に増加する。その後、上載圧50~110kN/m² (打設開始後4~8.5時間)程度で側圧の増加は徐々に低減し、上載圧90~200kN/m² (打設開始後7~17時間)で最大側圧に達した後、若干の側圧減少傾向を示した。なお、測定値と液圧計算値とがほぼ合致していることから、本測定値が十分な信頼性を有しているものといえる。

(2) 最大側圧値

最大側圧値とコンクリート打設速度の関係を図-13に示す。最大側圧は、コンクリートの打設速度が速いほど最大側圧が大きくなる傾向が認められるが、打込み速度V=1m/90minから1m/60minまでの最大側圧の増加よりも、1m/60minから1m/45minまでの最大側圧の増加は少ないようである。また、最大側圧値は、型枠上方に比べ下方の位置にある土圧計ほど小さい。一般に、コンクリートをある一定の時間間隔で打ち上げていく施工法では、最大側圧値は型枠下方の最大側圧値のほうが型枠上方と比べて大きくなるのに対して、本実験では逆の結果となっている。この理由として、最大側圧は測定位置から上方のコンクリートの厚さ(以下、コンクリートの上載厚さと記す)の影響が考えられる。すなわち、本実験では、コンクリートの上載厚さが小さい測定点では、上載厚さが大きい測定点と比較して、錘をコンクリートの代わりに上載した影響や型枠との付着力による側圧低減効果が小さいため、側圧が大きくなったものと考えられる。

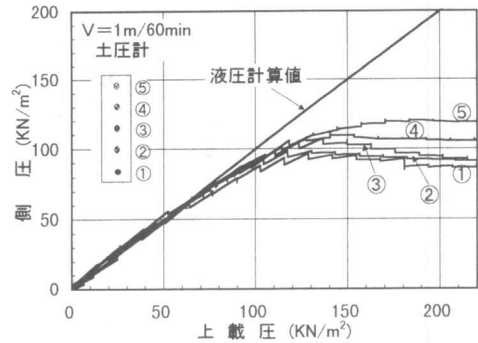


図-11 側圧と上載圧の関係(土圧計)

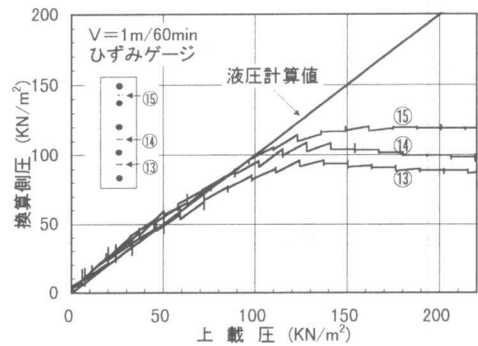


図-12 換算側圧と上載圧の関係(ひずみゲージ)

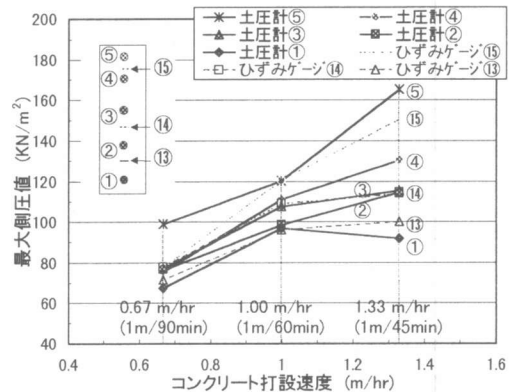


図-13 最大側圧とコンクリート打設速度の関係

コンクリートの上載厚さが大きくなる実施では、本実験での最大側圧の最小値よりも、さらに小さな値となると予想される。錘をコンクリートの代わりにして上載する方法で実験する場合、最大側圧値がやや大きく測定されるおそれがあることに注意する必要があるといえる。

図-14は、全計測点における最大側圧を、コンクリートの上載厚さとの関係として整理したも

のである。図中には、各コンクリート打設速度のデータから求めた回帰直線を併せて示している。コンクリートの上載厚さが小さい位置における最大側圧のばらつきはやや大きいものの、最大側圧はコンクリートの上載厚さに比例関係して減少する傾向にあるといえる。なお、コンクリート打上がり高さをさらに厚くして本実験を再現した場合、最大側圧がコンクリートの上載厚さに比例して減少を続けることは考え難く、各打設速度ごとにある値に漸近していくものと考えられる。

以上のように、本実験では、上方に位置するコンクリートの性状が、最大側圧に影響を与える一因であり、最大側圧は必ずしもコンクリートの打設速度と比例関係にないことが明らかとなった。これらの要因と最大側圧との関係を詳細に検討することは、最大側圧発生メカニズムを解明することに繋がり、今後の課題である。

(3) 側圧の時間変化と側圧推定式

図-15は、土圧計による各計測位置での側圧を打設速度で除した値と、計測位置にあるコンクリートが練混ぜられてからの時間との関係で示したものである。V=1m/60minと1m/45minの最大側圧発生時間は、土圧計①～④では10～12時間であった。V=1m/90minでは、7～10時間であり、他のものと傾向が異なった。また、土圧計⑤では各打設速度によって10～17時間とばらつきが大きかった。なお、コンクリート打設速度によって側圧/打設速度の値に差が生じているのは、前述のコンクリートの上載厚さによる影響によるものと考えられる。

次に、側圧の時間変化を調べる目的で、既往の文献1)の側圧推定式にコンクリートを練混ぜてから打込みまでの時間を考慮した式(1)および式(2)を用い、各測定値に対して回帰分析を行った結果を図-16に示す。側圧係数 a は0.025、側圧係数減少開始時間 T_s は5.75時間となった。また、式(2)において、最大側圧となるコンクリートを練混ぜてからの経過時間を求めると14.2時間となった。なお、最大側圧となる時間は凝結始発時間(20°C)とほぼ一致し、側圧係数減少開始時間は凝結開始時間(20°C)の約40%であった。

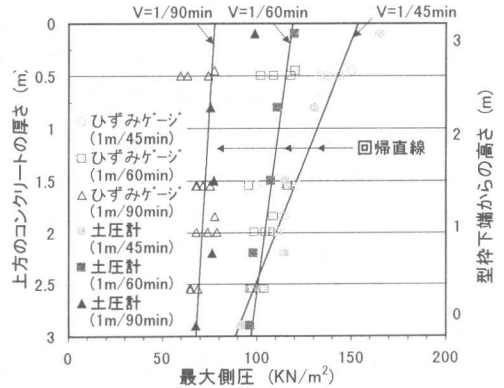


図-14 最大側圧とコンクリート上載厚さの関係

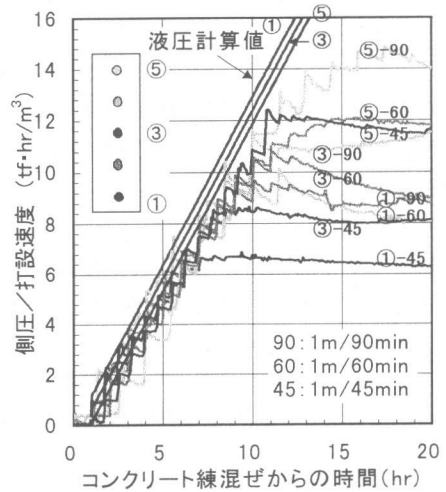


図-15 各測定位置における側圧/打設速度

$t \leq T_s$ のとき

$$P = (\gamma_c - \gamma_w) \cdot V \cdot (t - t') \quad \text{式(1)}$$

$t > T_s$ のとき

$$P = \{1 - a \cdot (t - T_s)\} \cdot \gamma_c \cdot V \cdot (t - t') - \gamma_w \cdot V \cdot (t - t') \quad \text{式(2)}$$

ここに、

P : 側圧 (kN/m²)

t : コンクリートを練混ぜてからの経過時間 (hr)

V : 打設速度 (m/hr)

γ_c : コンクリートの単位体積質量 = 22.6 kN/m³

γ_w : 水の単位体積質量 = 9.81 kN/m³

T_s : 側圧係数減少開始時間 (hr) = 5.75

a : 側圧係数 (1/hr) = 0.025

t' : コンクリートを練混ぜてから打設までの時間 (1hr)

図中に、最大側圧値近傍の側圧上昇傾向を捉える

ため、側圧係数を $a=0.025$ に固定し、最大側圧値がほぼ計測結果を包絡するように求めた、側圧係数減少開始時間 $T_s=6.50\text{hr}$ の場合の曲線、ならびに既往の側圧推定式に側圧係数減少開始時間 $=7.5\text{hr}$ とした場合の曲線をあわせて示した。本実験で得られた回帰曲線による最大値や包括曲線による側圧上昇傾向は、既往の側圧推定式¹⁾によるものとほぼ一致しているといえる。

コンクリート打設速度と最大側圧値の関係で示すと図-17のようである。本実験結果で得られた回帰曲線により算定される最大側圧値は、(2)で述べた理由や側圧推定式は最大側圧値とコンクリート打設速度が比例関係にあると仮定していることから、やや安全側の値であるといえる。したがって、本実験結果で得られた回帰曲線は、本配合のコンクリートにおける側圧推定式として問題がないと考えられる。

(4) 残留応力

型枠の残留応力を調べるために、錘載荷終了後も継続して計測を行った結果、最大ひずみ発生後に1割程度のひずみの低減が見られたが、その後は一定値を示し、コンクリートの凝結終了後にも、型枠には最大発生応力に相当する残留応力が残ることが確認された。

5. まとめ

- (1)コンクリート打込み開始からの側圧は液圧として線形に増加し、打込み開始後4~8.5時間程度で側圧の増加は徐々に低減し、その減少率は1時間あたり約2.5%であった。その後打込み開始後7~17時間で最大側圧に達した。
- (2)コンクリート打込み速度が速くなるほど最大側圧値が大きくなる傾向にあった。
- (3)コンクリートの上載厚さが大きくなるに従い、最大側圧が小さくなる傾向にあった。本実験のように、ある高さから錘で載荷した場合、側圧には側圧測定点から錘を載荷するコンクリート上面までのコンクリートの上載厚さが影響するため、それを考慮した評価が必要となる。
- (4)コンクリート凝結終了後にも、型枠には最大側圧に相当する残留応力が残る。

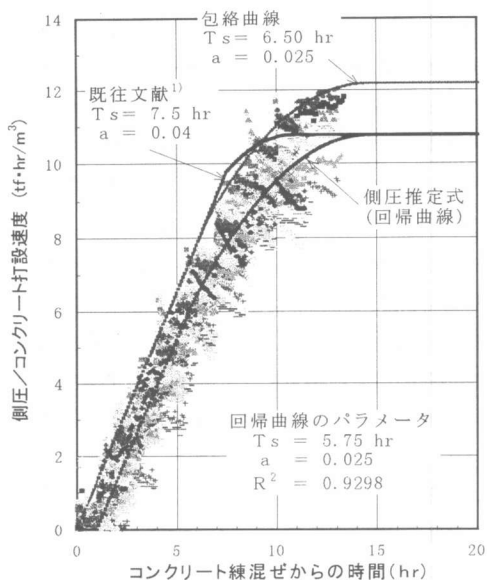


図-16 全データをを用いた回帰曲線

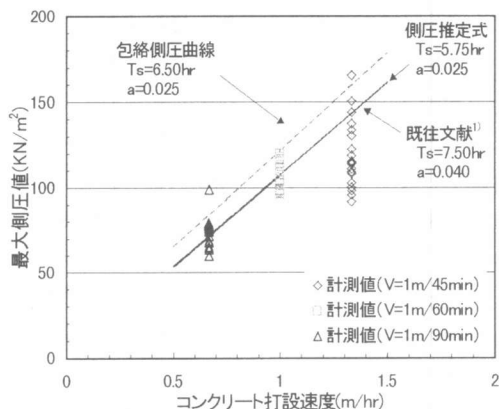


図-17 各側圧曲線による最大側圧の推定値

(5)最大側圧値は、既往の側圧推定式に準じて側圧係数減少開始時間や側圧減少係数を考慮して整理できる。

なお、既往の側圧推定式により求め、二重鋼矢板の設計に用いた最大側圧値の妥当性が検証できた。

参考文献

- 1)コンクリートライブラリー67, 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案), 土木学会, 平成3年5月