

論文

[1156] 地下連続壁のコンクリート打込み時の側圧に関する実験的研究

正会員 万木 正弘 (鹿島建設技術研究所)

正会員 坂田 昇 (鹿島建設技術研究所)

正会員 ○岩井 稔 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

一般のコンクリート工事における側圧は、打上り速度及び凝結時間あるいはコンクリート温度に大きく影響されることから、多くの指針類[1]では側圧を打上り速度とコンクリート温度の関数として与えている。地下連続壁のコンクリートについても、このような算定式を用いて側圧をある程度予測できることを示した報告[2]もあるが、地下連続壁のコンクリートは通常でスランプ18~21cm、打上り速度も3~10m/hと一般のコンクリート工事と比較して条件的にかなり異なっている。さらに最近では、地下連続壁の大型化や高品質化からスランプ24cm以上の高流動コンクリートの使用が検討されているが、それらのコンクリートは高流動性を長時間保持する関係上、凝結時間は始発で10~40時間と一般的なコンクリート(3~6時間)に比較してかなり長くなり、側圧もそれだけ大きくなることが予想される。

地下連続壁のコンクリートの側圧に関しては、今まではこれを実験室で再現することが難しく、実際の工事で実測する以外に検討する手段がなかったため、そのメカニズムや各種要因の影響など不明な点も多かったが、いくつかの実測のデータによれば側圧は打込み後2~4時間で最大値を示し、その値は5~15tf/m²と、打上り速度と凝結時間から予測するよりもかなり小さくなることが示されていた。その原因として、地下連続壁の工事では上部に打込まれたコンクリートの自重によって下方のコンクリートが加压脱水され圧密されるために、比較的早い時期にコンクリートが自立することが考えられた。そこで、これらの挙動をシミュレートできる試験装置を考案・開発し、実際の施工で計測された側圧と比較検討した結果、この装置を用いることにより側圧の最大値をかなりよい精度で推定できる可能性を示した[3]。今回は、当装置の適用性についてさらに検証するとともに、高流動コンクリートを用いた地下連続壁の側圧に関し、各種要因の影響について検討した。

2. 側圧予測試験装置の検討

2. 1 試験装置及び試験方法

使用した試験装置を図-1に示す。試験は、φ30cmの鋼管の内に高さ45cmまでフレッシュコンクリートを入れ、実際のコンクリートの打上り速度に応じた上载荷重を載荷板をとおして順次加えることにより、地下連続壁の打上りを表現し、上载荷重の増加にともなう側圧の変化を鋼管側面2ヶ所に取付けた土圧計により測

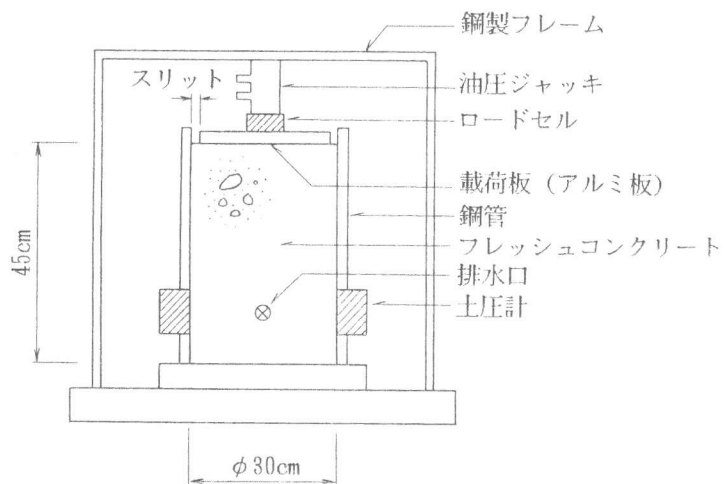


図-1 試験装置

表-1 コンクリートの配合

ケース	セメント の種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				試験結果				
								W	C	S	G	混和剤*2			ブリージング	
												SP	AE	助剤	量 (cm ³ /cm ²)	率 (%)
I	普通	25	42.5	39.8	18.0	—	4±1	179	421	671	1034	—	1.05	0.03	0.20	4.79
II	高炉B	25	37.0	46.0	24以上	60±5	2±1	155	419	798	1016	9.64	—	—	0.20	7.74
															始発 (h:min)	終結 (h:min)
															7:00	9:00
															17:30	19:40

*1 セメントの種類は、普通：普通ポルトランドセメント、高炉B：低発熱型高炉セメントB種

*2 混和剤の種類は、SP：高性能減水剤、AE：AE減水剤、助剤：空気量調整剤

定した。また、載荷によってコンクリート中から排出される水量（以下、排水量と称する）を図-1に示したスリット及び排水口より測定した。温度の影響については、当装置を恒温恒湿室内に設置し、室温を変えることにより温度を変化させた。

2. 2 実測値との比較

今回比較の対象とした実測値は、文献[3]、[4]に示された2つのケースである。配合及

表-2 施工条件

ケース	施 工 条 件
I	地下連続壁 断面：1.2×6.2m 深度：45.5m 測定深度：34.9, 28.9, 24.9m 地盤条件：砂質土層 コンクリート スランブ：18cm 打上り速度：5m/h
II	地下連続壁 断面：2.8×6.0m 深度：135.0m 測定深度：132.5m 地盤条件：泥岩層 コンクリート スランブ：24cm以上 スランブフロー：60±5cm 打上り速度：3m/h

び施工条件はそれぞれ表-1及び表-2に示すとおりであり、ケースIはスランブ18cmの一般的な連続壁のコンクリートを5m/hの速度で約45m打上げたものであり、ケースIIはスランブ24cm以上の高流動コンクリートを3m/hの速度で約135m打上げたものである。セメントの種類は、ケースIで普通ポルトランドセメント、ケースIIで低発熱型高炉セメントB種であり、打込み時の温度は両ケースともほぼ20℃のものである。

当試験装置では、コンクリートからの排水条件も側圧推定に大きな影響を与えることが考えられたため、載荷板を鋼管内径より小さくして設けたスリットの幅と、鋼管側面に設けた排水口の開閉によって排水条件を変えて試験を行い、実測の側圧を最もよく評価できる排水条件について検討を行った。

実験の結果を側圧実測値と比較して図-2及び図-3に示す。実際の施工におけるケースI、IIの地盤条件は砂質土層と泥岩層であり打込まれたコンクリートから地盤への水の移動しやすさに差があると思われたが、試験装置での排水条件は上面のスリット幅20mmとすれば、側圧の上昇、

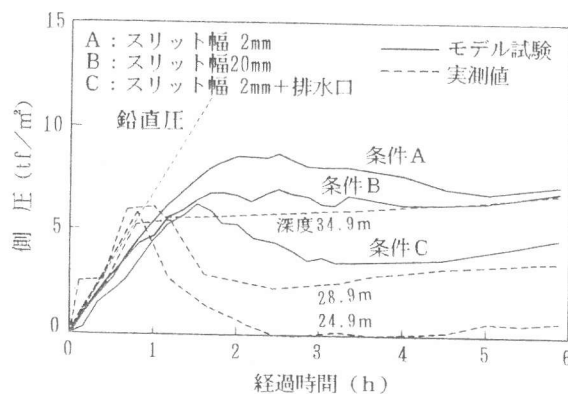


図-2 実験結果と実測値の比較
(ケースI)

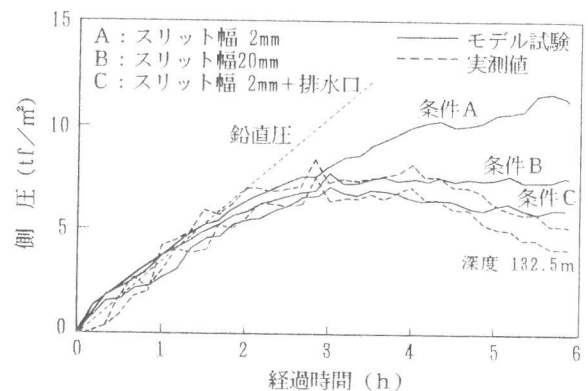


図-3 実験結果と実測値の比較
(ケースII)

下降過程で実測値と多少の違いはあるものの最大値は両方のケースとも実測値とよく合っており、この条件であれば実際の側圧の最大値をかなりの精度で再現できることが分った。そこで、以下の実験では上面スリットの幅を20mmとすることにした。

3. 側圧に影響を及ぼす要因の検討

3. 1 要因及び水準

今回の検討では、従来の側圧算定式で考慮されている打上り速度とコンクリート温度の施工条件の他に、コンクリートの配合要因として、表-3に示す結合材の種類、水結合材比及びスランブを要因とした。ここで、結合材の種類としては、普通ポルトランドセメント及び低発熱型高炉セメントB種の他に、セメントの全てを高炉スラグ微粉末に置き換えた凝結しない配合についても試験を行い、結合材の違いによる凝結時間等の影響を検討することとした。

3. 2 使用材料及びコンクリートの配合

試験に供したコンクリートの使用材料を表-4に、コンクリートの配合及び各配合の試験結果を表-5に示す。打上り速度については、各配合についてそれぞれ3m/h、5m/h及び10m/hの3ケースを実施した。コンクリート温度については、配合No.1について10℃、20℃、30℃の3ケースについて実施した。

3. 3 試験方法

コンクリートの練りまぜには、100ℓ強制式2軸ミキサ(60RPM)を用い、すべての材料を投入

表-3 要因および水準

要 因		水 準
施工条件	打上り速度	3m/h, 5m/h, 10m/h
	コンクリート温度	10℃, 20℃, 30℃
配合条件	結 合 材	普通ポルトランドセメント 低発熱型高炉セメントB種 高炉スラグ微粉末
	ス ラ ン プ	18~21cm, 24cm以上
	水結合材比	35%, 50%

表-4 使用材料

使用材料	
セメント	普通ポルトランドセメント (比重3.16, 比表面積3250cm ² /g) 低発熱型高炉セメントB種 (比重3.00, 比表面積3770cm ² /g)*
ス ラ グ	高炉スラグ微粉末 (比重2.91, 比表面積3800cm ² /g)
細 骨 材	川砂 (大井川産, 比重2.61, FM2.70, 実積率70.2)
粗 骨 材	碎石 (津久井産, 比重2.68, FM6.90, 実積率58.9)
混 和 剤	高性能減水剤 (β-ナフタリンスルホン酸加量・反応性高分子) A E 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物・ポリオール複合体) 空気量調整剤 (アルキルカルボン酸化合物系界面活性剤)

* 低発熱型高炉セメントB種のスラグ置換率は56%

表-5 コンクリートの配合

配合 No.	*1 結合材 の種類	Gmax (mm)	*2 W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				コンク リート 温度 (℃)	試 験 結 果							
								W	*2 C'	S	G		混 和 剤 *3			ブリージング 量 率 (%)	凝結時間		圧縮強度 σ ₂₈ (kgf/cm ²)	
													S P	A E	助剤		始発 (h・min)	終結 (h・min)		
1	普通	20	35.0	45.0	24以上	60±5	4±1	181	517	723	907	8.27	——	——	10	0.02	0.43	20:10	22:00	735
												8.27	——	——	20	0.03	0.64	14:00	15:45	589
												7.24	——	——	30	0.01	0.21	7:30	9:30	626
2	高炉B	20	35.0	45.0	24以上	60±5	4±1	181	517	713	894	6.72	——	——	20	0.24	5.25	22:45	26:20	579
3	スラグ	20	35.0	45.0	24以上	60±5	4±1	181	517	706	886	4.65	——	0.16	20	0.78	17.7	——	——	——
4	普通	20	35.0	45.0	18～21	——	4±1	181	517	723	907	3.62	——	——	20	0.06	1.28	6:00	8:20	644
5	普通	20	50.0	48.0	18～21	——	4±1	181	362	780	979	——	1.08	0.02	20	0.31	6.34	6:30	10:40	418

*1 結合材の種類は、普通:普通ポルトランドセメント、高炉B:低発熱型高炉セメントB種、スラグ:高炉スラグ微粉末

*2 C'は、結合材量を表す

*3 混和剤の種類は、S P:高性能減水剤、A E:A E減水剤、助剤:空気量調整剤

後、配合や混和剤の違いを考慮して、W/C=35%の配合（No. 1～No. 4）については90秒、W/C=50%の配合（No. 5）については60秒それぞれ練り混ぜた。

練上ったコンクリートについて、スランプ、スランプフロー、空気量及びコンクリート温度を測定した。また、コンクリートの性質を調べるため、ブリージング試験（JIS A 1123）、凝結硬化速度試験（ASTM C403）、圧縮強度試験（JIS A 1108）を行った。

側圧のモデル試験は、コンクリートの練上り後30分程度で前述の試験装置内にコンクリートを打込み、装置をセットした後、10分毎に上載荷重を増加し、各荷重段階における側圧及びスリット部より浮上ってきた水量（以下、排水量と略す）を測定した。測定は、側圧が最大値を生じた後も3～4時間測定した。

3. 4 試験結果

(1) 側圧履歴

モデル試験によって測定した側圧履歴の一例を図-4に示す。試験に供したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用い、スランプフロー60cmの高流動コンクリート（配合No. 1）であり、養生温度20℃で凝結の始発が14:00のものである。図より、打上り速度が大きいほど側圧の最大値は大きくなり、また、側圧が最大値に達するまでの時間は短くなった。この傾向は、今回試験を行った他の4配合についても同様であった。また、配合No. 1のコンクリートについて、打上り速度5m/hの条件で、コンクリート温度を10℃、20℃、30℃で試験を行った結果も図-4に示しているが、側圧の最大値にはコンクリート温度の影響はほとんどなく、試験開始後3時間程度で側圧は最大となった。コンクリート温度10℃、20℃、30℃での配合No. 1の凝結の始発時間は、表-5に示すように、20:10、14:00、7:30であり、側圧の最大値となる3時間ではいずれも始発には達していない。凝結時間の長いコンクリートを用い、打上り速度が速い条件下では、コンクリートの始発で表される凝結性状となる以前の段階でコンクリートは自立し、コンクリートヘッドが増加しても側圧はそれ以上作用しなくなるものと考えられる。凝結時間の影響がほとんどないことは、凝結を起こさない高炉スラグ微粉末を用いた場合にも側圧の最大値が現れていることによっても示されている。

(2) 各種要因の影響

モデル実験によって測定した打上り速度と側圧の最大値の関係を図-5に示す。結合材の種類として配合No. 1, No. 2, No. 3を比較すると、普

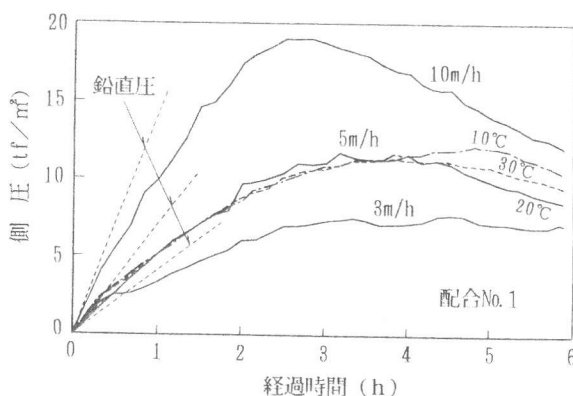


図-4 モデル実験における側圧の履歴

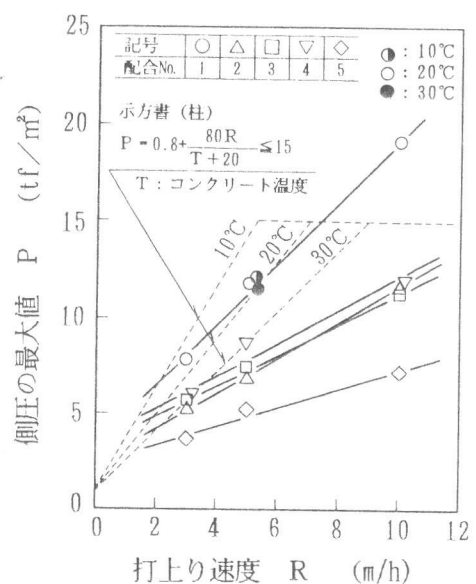


図-5 打上り速度と側圧の最大値との関係

通ポルトランドセメントを用いた配合No. 1が最も側圧が大きく、低発熱型高炉セメントB種を用いた配合No. 2及び高炉スラグ微粉末を用いた配合No. 3は、配合No. 1の60%程度の側圧であった。

水結合材比が側圧に及ぼす影響について検討すると、W/C=35%の配合No. 4の方が、W/C=50%の配合No. 5よりも側圧の最大値は大きくなった。さらに、コンクリートの流動性で比較した場合、スランプフロー60cmの配合No. 1の高流動コンクリートの方が、スランプ18cmの配合No. 5のAEコンクリートよりも側圧の最大値が大きくなった。

このように、側圧の最大値は配合条件によって変化するが、各配合の側圧とブリージング量を比較すると、ブリージング量の少ない方が側圧が大きくなる傾向が認められた。そこで、側圧が最大となるまでの排水量と側圧の最大値との関係について検討した。図-6に示すように、配合条件にかかわらず、打上り速度が同じであれば排水量が多いほど側圧の最大値は小さくなる傾向を示した。また、側圧の履歴と排水量との関係を検討した一例は図-7に示すとおりであり、同一配合の場合、側圧が最大となるまでに排水される水量は、打上り速度にかかわらずほぼ一定という結果が得られた。これらの関係は他の4配合についても同様な傾向が得られており、側圧の最大値はコンクリート中の水分が配合条件によって定まるある一定量排水した時生じるようであった。このことは、コンクリートから排水される量が側圧決定に多大の影響を及ぼしており、各配合条件や施工条件が排水しやすさや保水性に及ぼす影響を明らかにすることにより、側圧の最大値を算定できる可能性のあることを示唆しているものと思われる。

(3) 側圧の最大値の算定

図-5に示すように、打上り速度3~10m/hの範囲で各配合のコンクリートのそれぞれにおいて打上り速度と側圧の最大値はほぼ線形関係を示した。図中に破線で示した直線は、土木学会コンクリート標準示方書施工編（以下、示方書と略す）の側圧算定式（柱の場合）より求めたものである。既往の研究[2]によれば、地下連続壁のコンクリート（スランプ24cm以上の高流動コンクリート、コンクリート温度15℃）の側圧についても示方書の柱の側圧算定式によって安全側の値として予測することが示されている。しかし、モデル試験によって得られた配合No. 1の側圧の場

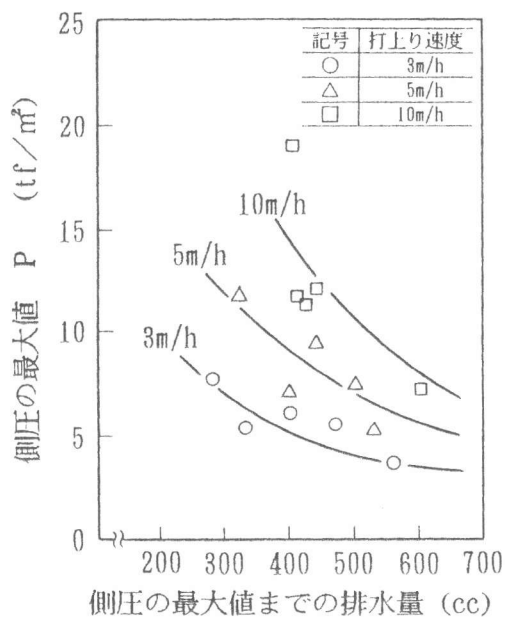


図-6 排水量と側圧の最大値との関係

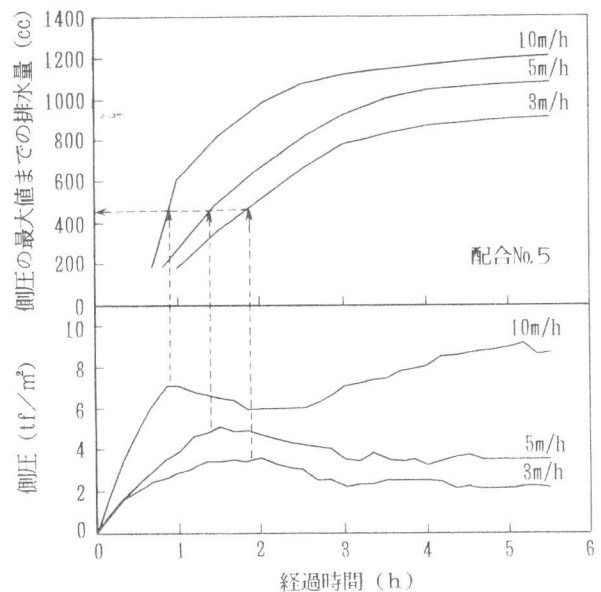


図-7 排水量と側圧の履歴の比較

合、算定式はコンクリート温度10℃では安全側の値を示すが、コンクリート温度30℃の場合では危険側となる。また、算定式の影響因子である打上り速度とコンクリート温度以外の配合条件によって側圧の最大値が大きく変わることが予想されることから、示方書の側圧算定式を地下連続壁のコンクリートに適用することは難かしいものと思われる。

4. まとめ

地下連続壁に高流動コンクリートを用いる場合の側圧を評価するために、モデル試験装置を用いて側圧の予測を行い、側圧に影響を及ぼす要因について検討した。その結果、今回の検討範囲で明らかとなった事項を以下に示す。

- 1) 著者らが開発したモデル試験装置によって、地下連続壁として実際にコンクリートを打上げた場合の側圧を予測できる可能性があることを示した。
- 2) 地下連続壁のように、凝結時間が長いコンクリートを用いて打上り速度が速い条件における側圧の最大値は、側圧が最大値に達するまでのコンクリート中からの排水量に関係し、排水量が多いほど側圧が小さくなる傾向にあった。
- 3) 著者らが開発したモデル試験装置によると、排水量は打上り速度にかかわらずほぼ一定の量であった。

5. おわりに

今回開発した試験装置を用いて、地下連続壁のコンクリートの側圧最大値の大略を把握することができたが、側圧の履歴等、さらに詳細な検討を行うためには、試験装置の大きさ、排水条件、載荷方法等を検討・改良していく必要がある。

また、コンクリートの側圧については地下連続壁に限らず、コンクリート工事の省力化の傾向から、今後詳細に検討していく必要があるものと思われ、試験装置、試験方法の改良を行うとともに、各種コンクリートの側圧についても検討して行く予定である。

[参考文献]

- [1]例えば、昭和61年制定コンクリート標準示方書、土木学会
- [2]木村、岡田、若山、後藤：実大壁による高強度地中連続壁に関する実験的研究、土木学会論文集、第397号/VI-9、1988年9月
- [3]坂田、儀賀、木口、那波：東京湾横断道路地下連続壁実験（その5）－コンクリート打込み時の側圧－、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、1990
- [4]中原、前川：東電富津火力発電所建設工事におけるLNG地下式貯槽工事の連続地中壁、基礎工、1983.7.