

(66) アウトケーブル2方向スラブの実験的研究

東急建設(株) ○梶原 恵治
同 山本 俊彦
北海道大学工学部 上田 正生

1. はじめに

鉄筋コンクリート造で大空間を構成する場合、経済性や構造的な問題(たわみ・振動)から、必然的に限界がある。このため、スラブでは6mを超える場合には、従来、ワッフルスラブやボイドスラブが用いられてきた。また、最近では、アンボンドPC鋼材によるPCスラブ工法がとられる場合も多い。このアンボンドPCスラブ工法は、施工性と経済性に優れているためその適用は年々増大している。しかし、スパンが10mを超える場合には、スラブの厚さが小さいためPC鋼材のライズが十分とれないことから、極めて多量のPC鋼材が必要となり、その経済性、施工性が損なわれる結果となる。この様なことから、10mを超える大スパンスラブでは従来からのワッフルスラブあるいはボイドスラブとする例も多く見られる。しかし、この場合には型枠にかなりの費用を要するため建設費はかなり高くなる。

このため、本研究では、アンボンドPCスラブ工法の施工性と経済性を生かし、更にPC鋼材のライズを十分とることができる、PC鋼材をスラブ躯体の外に配置するアウトケーブル工法による大スパンスラブ工法を開発することを目的とした。

2. アウトケーブル技術の概要

PC鋼材を躯体の外に配置するアウトケーブル方式の構造は、1950年代に橋梁に多く用いられたが、PC鋼材の防錆処置の不完全さから維持補修費がかかりすぎ、その後ほとんど用いられなくなった。しかし、近年アンボンドPC鋼材の防錆性能が飛躍的に向上したことから、あらためてアウトケーブル工法が見直されてきた。

このアウトケーブル工法は、次のような利点を有している。

- ① PC鋼材のライズを大きくとることができるため、PC鋼材を1/3以下程度にすることができ、経済性が向上する。
- ② PC鋼材が少なく効率的に配線されるため、PC鋼材の緊張に伴う2次応力の発生が小さい。このため、柱・壁等に副次的なひび割れ発生がない。
- ③ PC鋼材を躯体外に配線するため、施工性の向上がはかれる。
- ④ ケーブルの取り替え、再緊張等の維持管理が容易になる。

これらのことは、特に大スパンスラブ工法に適している。

一方、この工法で問題となるのは、

- ① 構造材としてPC鋼材を用いた場合の耐火被覆。
- 耐火被覆に対する問題として、一つはPC鋼材に耐火被覆を設けることであるが、もう

一つとしては、P C鋼材は、たわみ制御用にのみ用い構造耐力は鉄筋に負担させる方法である。これは、自重と若干の積載荷重分を鉄筋が負担できるようにするものである。

3. 実験概要

3.1 試験体

図1に試験体形状およびアウトケーブル配置を示す。表1にスラブ・梁・柱の配筋量を示す。試験体は縮尺約1/3とし、スパン4.4m x 4.4m、スラブ厚8cmで、スラブ下にアウトケーブル（アンボンドP C鋼線 5φ）を縦横それぞれ3本を配置して、スラブ下面の9点でスラブの自重に相当する懸垂力を与えている。アウトケーブルのライズは117mmで、初期の懸垂力は9点の合計で約1.8tである。周辺の拘束梁は、B x D = 20 x 44cmである。写真1にアウトケーブル配置状況を示す。

表2に鉄筋およびP C鋼線の材料試験結果を、表3にコンクリートの材料試験結果を示す。材令66日が実験前、材令82日が実験後の値である。

3.2 加力方法

図2に加力方法を示す。試験体の4隅の柱に鉄骨柱を接続し、さらにこの柱をX型の反力梁につないでいる。加力は、油圧ジャッキ4本で行い、等分布荷重を想定して16点載荷とした。載荷点の大きさは、125 x 125mmである。写真2に加力状況を示す。

図3に加力サイクルを示す。加力は、スラブの中央変位 δ による変形制御とし、 $\delta = 10, 20, 40, 80\text{mm}$ をそれぞれ1サイクル行った後、最大耐力を確認するまで加力した。

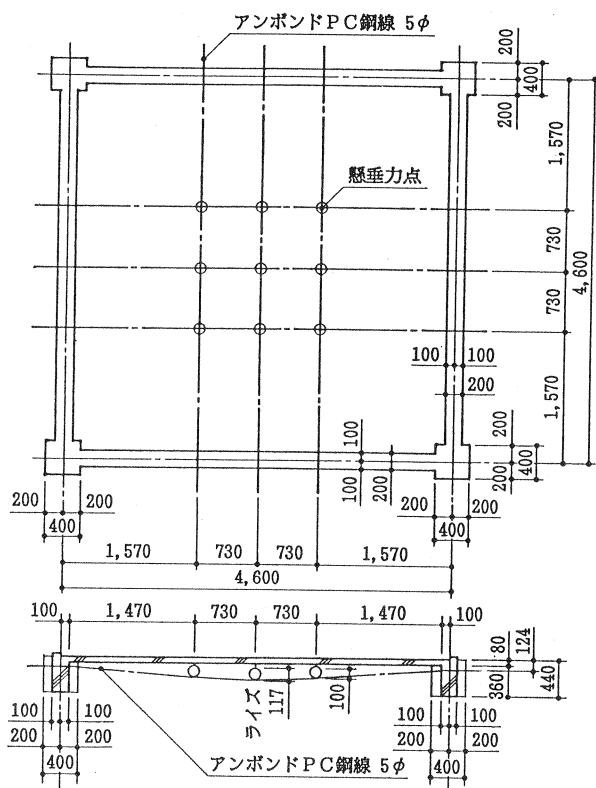


図1 試験体形状・アウトケーブル配置

表1 配筋表

部位	断面形状 (mm)	主筋		せん断補強筋	かぶり (mm)
		上筋	下筋		
スラブ	t=80	D6- ϕ 150	D6- ϕ 150	—	10
梁	200x440	2-D16	2-D16	D10- ϕ 200	20
柱	400x400	12-D16		D10- ϕ 100	20

注) スラブ筋はモチアミ配筋、梁主筋は通し配筋。

表2 鉄筋・P C鋼線材料試験結果

公称径	降伏応力 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kg/cm ²)	伸び率 (%)	断面積 (cm ²)	リレーション (%)
D16	3689	5324	2.03	21.65	1.986	
D10	3665	5446	2.06	19.26	0.713	
D 6	3885	5385	1.96	16.18	0.320	
5φ	16780	18550	2.06	6.5	0.1978	0.55

表3 コンクリート材料試験結果

材令 (日)	養生条件	圧縮強度 (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kg/cm ²)	ポアソン比
7	標準	227	23.2	42.8	2.232	0.206
	現水	207	20.6	42.0	2.264	0.216
28	標準	275	26.1	53.8	2.548	0.202
	現気	291	29.3	47.5	2.400	0.182
66	現気	297	26.2	54.5	2.494	0.107
82	現気	303	30.8	60.5	2.465	0.130

3.3 測定方法

スラブの中央点および 1/4 点、梁の中央点での鉛直変位を測定した。また、梁およびスラブの水平方向の伸縮を変位計にて測定した。スラブおよび梁の主要点での鉄筋・コンクリートの歪と、鉄骨柱の歪を測定した。ジャッキの荷重および PC 鋼線の張力をロードセルで、柱および梁の回転量を傾斜計で測定した。各荷重段階での固有振動数の変化を調査した。ひびわれは、目視により調べた。

4. 実験結果

実験結果一覧を表 4 に、荷重－変形曲線を図 4 に示す。

4.1 実験過程

実験は、以下の様に進行した。

載荷前、アウトケーブルにプレストレスを導入したことにより、スラブに 1.92 mm のむくりが生じた。荷重 11.0 t で、ス

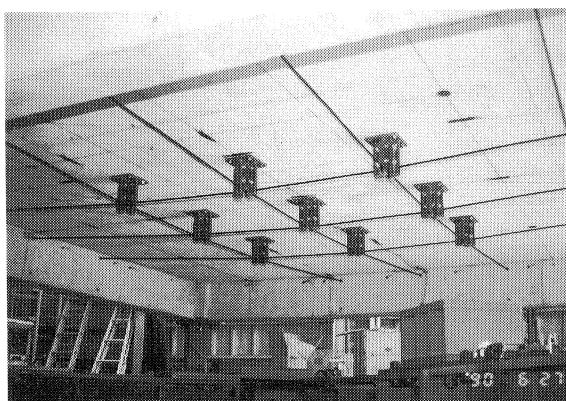


写真1 アウトケーブル配置状況

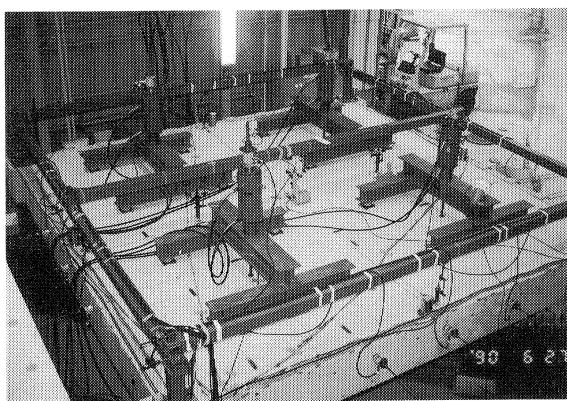


写真2 加力状況

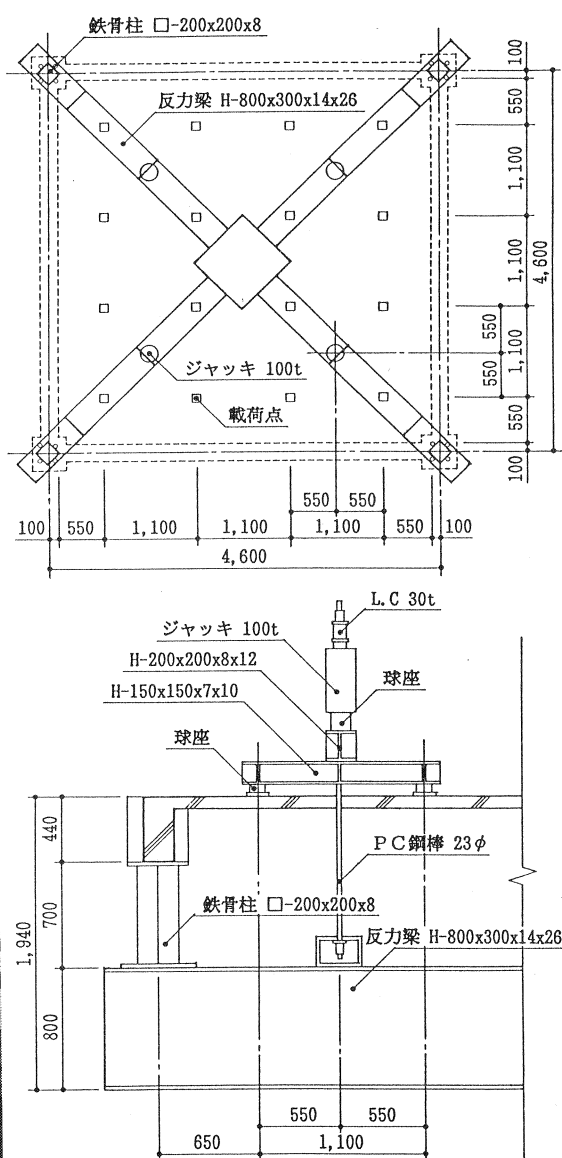


図2 加力方法

スラブ端部上面に曲げひびわれが発生し、その後、内接円状に拡大していった。荷重 18.0t で、スラブ中央下面に曲げひびわれが発生し、その後、スラブ 4 隅へ対角線状に拡大していった。荷重 23.5t ($R=1/272$)で、スラブ端部上筋が曲げ降伏した。荷重 32.8t($R=1/73$)で、スラブ中央下筋が曲げ降伏した。荷重 52.8t($R=1/30$)で、梁中央下筋が曲げ降伏した。荷重 59.6t($R=1/26$)で、最大耐力となり、その後、スラブの 4 隅の載荷点近くでせん断破壊が生じ、耐力が低下した。

4.2 荷重－変形

図 4 に荷重－変形曲線、およびアウトケーブルの懸垂力－変形関係を示す。スラブ中央下面に曲げひびわれが発生するまでは、F E M 弾性解とほぼ同じ剛性を示し、その後、スラブ端部上筋が曲げ降伏して剛性低下した。スラブ中央上筋降伏後に、若干の剛性上昇が見られるが、これはスラブの上筋、下筋が共に降伏して、全断面引張状態となったためと考えられる。

アウトケーブルによる懸垂力は、加力前で 1.83t であるが、最大耐力時では 3.2 倍の 5.85t になり、変形の増加に比例して増大している。これは変形の増加に伴いライズが大きくなっていくことと、P C 鋼線が伸ばされて張力が増大していくことによる。最大耐力時では、スラブ中央部分の荷重の約 20% をアウトケーブルが負担している。

4.3 諸耐力

表 4 にひびわれ発生荷重および鉄筋降伏荷重の実験値と計算値の比較を示す。梁中央曲げひびわれは、計算値がかなり上回っているが、これは、加力前から梁に乾燥収縮ひびわれが入っており、曲げひびわれ発生時の荷重が正確に測定できなかったためである。スラブ端部曲げひびわれは、計算値をやや上回り、その後のスラブ中央曲げひびわれ、スラブ端部上筋曲げ降伏、スラブ中央下筋曲げ降伏は、計算値よりかなり高い値を示した。これは、アウトケーブルが荷重の一部を負担している効果と考えられる。梁中央下筋曲げ降伏は、計算値とよく一致している。

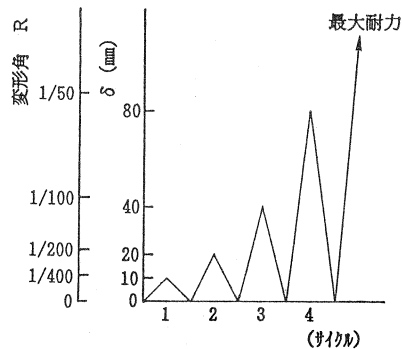


図 3 加力サイクル

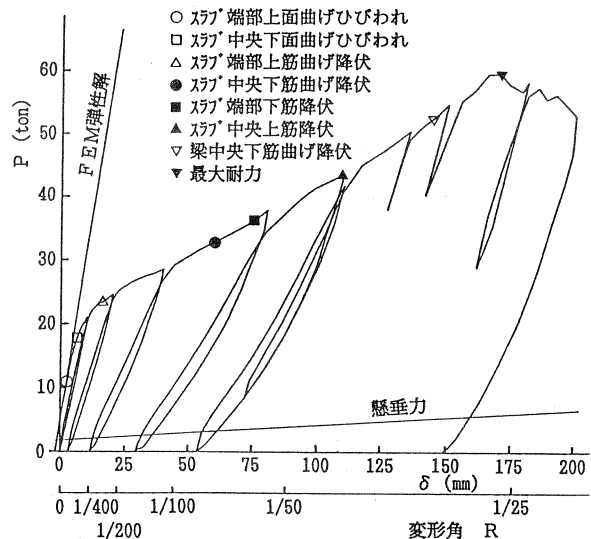


図 4 荷重－変形曲線

最大耐力は、降伏線理論による終局耐力計算値の約 2.5 倍を示した。これは、アウトケーブルの効果と大変形時にスラブの全断面が引張状態となり、耐力が大きく上昇したものと考えられる。

4.4 固有振動数の変化

表 5 に固有振動数の測定結果を示す。プレストレス導入前の値は、F E M 計算値とよく一致している。各加力サイクルでは、スラブにひびわれが入って剛性低下しているにも係わらず、固有振動数の低下が見られなかった。アウトケーブルがダメージを受けたスラブの剛性低下を防ぐ効果があるものと考えられる。

4.5 ひびわれ状況

図 5・図 6 に最終ひびわれ状況を示す。上面は梁に沿って内接円状に生じ、端部のひびわれ幅は大きく拡大している。また、4 サイクル以後スラブの中央部分にひびわれが発生している。これは、大変形時にスラブの全断面が引張状態になったことを示している。アウトケーブルによる懸垂力の影響と考えられる。下面は、中央から 4 隅へ細かいひびわれが発生している。

最大耐力後、4 隅の荷重点付近のスラブの上面にせん断破壊による大きな段差（図 5 の太線部分）が生じた。これは、最大耐力前に梁が曲げ降伏し、それまで 4 辺に流れていた応力が増加しなくなり、以後、荷重の増加による応力の増加分が剛性の高い 4 隅の柱へ流れるようになったためと考えられる。

表 4 実験結果一覧

測定 ステップ	ひびわれ・ 主筋降伏 等	荷重 (t)		中央変位 (mm)	柱回転量 ($\times 10^{-3}$ rad)	梁回転量 ($\times 10^{-3}$ rad)	PC 鋼線張力 (t/本)	懸垂力 (t)
		実験値	計算値					
	P S 導入							
8	(1.13t/本)	0		-1.01	-3.5	-22.8	1.155	
	P S 導入							
14	(2.26t/本)	0		-1.92	-6.3	-45.3	2.272	1.832
	加力装置セット (1.14t)	0						
16				-1.82	-3.8	-46.5	2.261	
	梁中央下面 曲げひびわれ	9.68	*1 17.06	2.04	25.0	23.8	2.293	
	スラブ 端部上面 曲げひびわれ	10.99	*1 9.80	2.64	30.0	35.0	2.303	
	スラブ 中央下面 曲げひびわれ	17.97	*1 14.26	6.49	59.5	98.8	2.343	
58	1 サイクル最大	21.08		10.12	74.0	118.3	2.390	2.061
	スラブ 端部上筋 曲げ降伏	23.45	*1 14.32	16.17	83.0	139.8	2.449	
90	2 サイクル最大	24.66		20.17	86.8	156.0	2.498	2.259
	梁端部曲げせん断ひびわれ	25.43		23.08	88.3	167.8	2.543	
122	3 サイクル最大	28.57		40.48	91.3	292.5	2.769	2.760
	スラブ 中央上筋 曲げ降伏	32.80	*1 20.84	60.41	102.5	425.8	2.978	
	スラブ 端部下筋 降伏	36.33		75.82	114.8	523.0	3.093	
158	4 サイクル最大	37.90		80.55	119.0	551.5	3.128	3.748
	スラブ 中央上筋 降伏	43.76		110.46	136.3	701.8	3.218	
	梁中央下筋 曲げ降伏	52.78	*1 51.10	145.25	159.0	929.0	3.277	
275	最大耐力	59.57	*2 23.99	170.23	174.3	1073.3	3.303	5.850
297	最大変位	52.85		200.43	202.3	1011.3	3.322	

*1 F E M 計算値（アウトケーブル無視）

*2 降伏線理論による終局耐力計算値（アウトケーブル無視）

表 5 固有振動数測定結果

実験段階	固有振動数 (Hz)	比
P S 導入前	16.06	1.00
P S 導入後	16.02	1.00
1 サイクル終了後	17.13	1.07
2 サイクル終了後	17.13	1.07
3 サイクル終了後	16.02	1.00
4 サイクル終了後	17.13	1.07
最大変位後	14.96	0.93
P S 解除後	16.02	1.00
加力装置撤去後	11.79	0.73
F E M 計算値	16.86	1.05

5. まとめ

本実験により、アウトケーブルには以下の効果が認められた。

- (1) アウトケーブルの配線量は、通常のスラブ内配線の $1/3$ としたが、十分な耐力・変形状が得られた。
- (2) アウトケーブルによるスラブの吊り上げ力は、弾性時から終局まで安定しており、スラブ全載荷荷重の約20%を継続して負担した。また、ひびわれが多数発生している大変形時においても、吊り上げ点でのパンチング破壊は見られなかった。
- (3) アウトケーブルスラブは、塑性域での剛性低下が少なく、 $R=1/26$ の大変形まで靱性に富んだ変形状を示した。
- (4) アウトケーブルスラブは、スラブの変形に伴って吊り上げ力が増大していき、スラブの最大耐力を大きく上昇させた。

以上からアウトケーブルスラブの有効性が確認され、大スパンスラブの設計に対する資料が得られた。

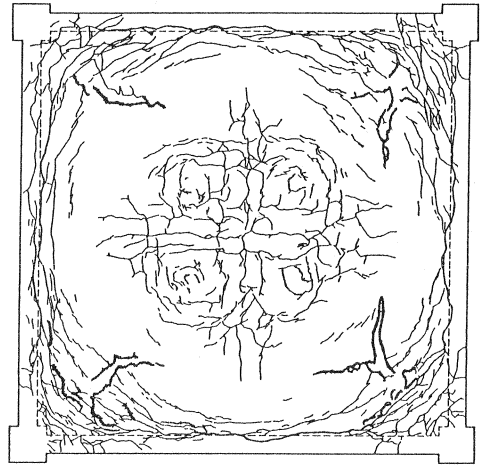


図5 最終ひびわれ状況（上面）

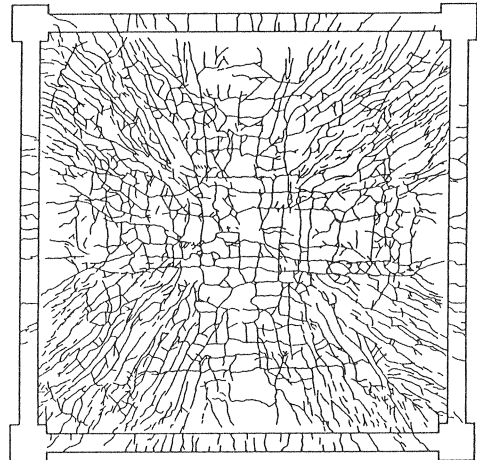


図6 最終ひびわれ状況（下面）

〔参考文献〕

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、昭和63年
- 2) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、昭和62年