

論文 コンクリート充填円形鋼管を用いたプレストレストコンクリート合成桁の力学的挙動

劉 劍萍^{*1}・米倉 亜州夫^{*2}・岩崎 大輔^{*3}

要旨: プレストレスを導入したコンクリート充填鋼管を合成構造部材の引張部に、圧縮部に RC スラブを配置した合成桁、または上記部材間にウェブとして波形鋼板を配置した合成桁に着目し、曲げ載荷した時の力学的挙動について実験的に調べた。鋼管内のコンクリートには PC 鋼棒又は膨張材を用いてプレストレス又はケミカルプレストレスを導入した。その結果、これらのプレストレスの導入によりに三軸拘束効果を生じ、内部コンクリートの見掛け上の圧縮強度と剛性が上昇し、合成桁の曲げ耐力及び靱性が向上することが認められた。

キーワード: 合成桁, 波形鋼板ウェブ, プレストレス, ケミカルプレストレス

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート合成構造が大きな発展を見せている、強度及び靱性が大幅に増大する新しい構造形式の開発が要望されている。

コンクリート充填鋼管の内部コンクリートに PC 鋼棒又は膨張材でプレストレスを与えると、内部コンクリートの強度及び靱性が大幅に増大することが従来の研究より明らかになってきている¹⁾。このようなコンクリート充填鋼管部材を用いて実構造物に应用するための基礎研究として、この種の部材を梁の引張部に、圧縮部に RC スラブを配置した合成桁や死荷重軽減及び施工の向上を図るため、ウェブに波形鋼板を配置した合成桁の力学的挙動について、実験的に検討した。

上記と類似の構造物が、約 10 年前にフランスのモープレ橋で採用されている²⁾。この場合は外ケーブル方式で、鋼管内のコンクリートは充填されているだけで、本研究のように

直接プレストレスが導入されているわけではない。

2. 実験概要

2.1. 使用材料

鋼管 外径Φ 114.3mm で、肉厚 2.7mm または 3.5mm で長さ 1800mm のものを使用した、材料特性は表-1 に示す。

波形鋼板 図-1 に示すように、ウェブとして使用した波形鋼板は三角形断面で、板厚 1.6mm、幅 240mm である。

コンクリート及び膨張コンクリート コンクリートは早強ポルトランドセメント及び最大寸法 20mm の粗骨材を用いた。膨張コンクリートには、膨張材として静的破碎材を用い、膨張材のセメントに対する置換率は 0%、15%と 30%の 3 種類とした。表-2 にコンクリートの配合を示す。

PC 鋼棒及びシース PC 鋼棒は材質 C 種 1 号の直径 23mm のものを用い、シースは PC 鋼棒の直径に合わせて 32mm のものを使った。

*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 工修 (正会員)

*2 広島大学教授 工学部第四類(建設系) 工博 (正会員)

*3 広島大学 工学部第四類(建設系)

2.2 供試体の作製

図-2のように、合成桁の構成モデルとして、波形鋼板ウェブを有するA型供試体とウェブを有しないB型供試体を用いた。充填コンクリートへのプレストレスの導入は、PC鋼棒による場合と膨張コンクリートによるケミカルプレストレスの場合がある。上記コンクリート充填鋼管を作製し、プレストレスを導入した後で、180cm×30cm×10cmの鉄筋コンクリート床版を打設した。A型供試体の波形鋼板は、鋼管に溶接し、RCスラブとの接合は、簡単な接合方法として波形鋼板をスラブコンクリート打設時に、スラブ内に埋め込むことによって、またB型供試体の場合は、鋼管に軸方向配置間隔100mmで、高さ50mm、Φ12mmのスタッドジベルを溶接した、ずれ止め鉄筋の量は道路橋示方書の規定により0.22%として、スラブコンクリート内に埋め込んで接合した。すべて供試体は室内にて7日間湿潤養生を行った。

表-1 鋼管の材料特性

外径 (mm)	肉厚 t(mm)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
114.3	2.7	333	210	0.30
114.3	3.5	379	210	0.27

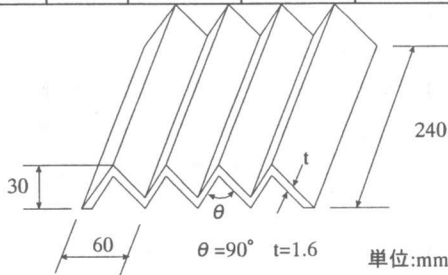


図-1 波形鋼板の断面形状

2.3. 実験方法

曲げ載荷試験は図-3に示すようにスパン1500mm、せん断スパン650mmの2点荷重で単調増加荷重で行った。荷重値、スパン中央の鋼管、PC鋼棒、波形鋼板ウェブおよびコンクリートのひずみ、支点及びスパン中央の鉛

直変位を測定した。最大荷重到達後、梁曲げ試験はしばらく継続したが、その後は徐々に除荷してゆき、その際のひずみ及びたわみを測定した。

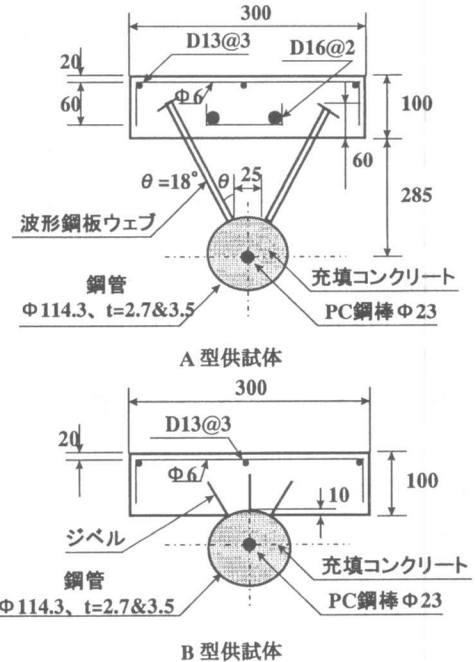


図-2 作成供試体の断面図 (単位:mm)

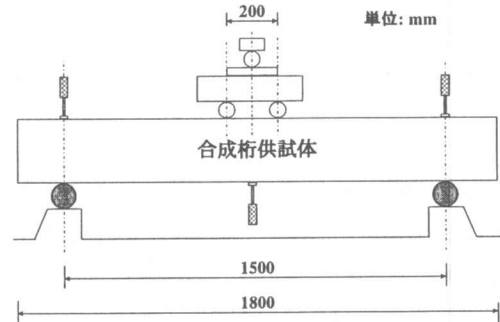


図-3 載荷方法

2.4. 供試体一覧

載荷試験は、A、B両断面を有する合成桁の曲げに対する力学的挙動の検討を目的とし、鋼管の肉厚、内部コンクリートの有効プレストレス量、ウェブの相違を検討項目に実施した。供試体一覧は表-3に示す。

表-2 鋼管内及び床版の普通コンクリート又は鋼管内膨張コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	E	S	G	Ad
普通コンクリート	50	46	190	380	--	767	936	1.50
膨張コンクリート	30	40	155	516	0	641	961	2.58
	30	40	155	439	77.5	641	961	2.58
	30	40	155	361	154.8	641	961	2.58

表-3 供試体一覧

供試体	コンクリート 圧縮強度(N/mm ²)		床版曲げひび 割れ発生荷重 (kN)	ウェブ座屈 発生荷重 (kN)	床版せん断ひび 割れ発生荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	破壊形式	備考 支点部の ウェブ補強
	床版	鋼管内						
A-3.5-P0	36.2	39.8	98	343	333	343	WB	あり
A-3.5-P10	36.2	40.6	118	279	274	279	WB	なし
A-3.5-P30	38.9	42.1	127	279	299	299	SS	なし
B-3.5-P0	35.2	40.5	78	--	206	211	SC	----
B-3.5-P10	34.0	41.7	78	--	227	227	SC	----
B-3.5-P30	29.6	35.8	127	--	232	232	SC	----
A-2.7-E0	30.9	67.6	78	333	313	338	WB	あり
A-2.7-E15	37.0	62.6	98	353	373	373	SS	あり
A-2.7-E30	36.3	53.7	98	353	377	383	SS	あり
B-2.7-E0	30.0	67.4	78	--	195	195	SC	----
B-2.7-E15	28.2	67.6	88	--	--	203	SC	----
B-2.7-E30	32.8	45.5	78	--	233	233	SC	----

脚注:①破壊形式 WB:ウェブ座屈破壊, SS:RCスラブせん断破壊, SC:RCスラブ圧縮破壊

②供試体略記方法例 A-3.5-P10(A-2.7-E15)

A:断面形状 3.5:鋼管肉厚3.5mm P10:有効プレストレス量 10N/mm² E15:膨張材置換率 15%

3. 実験結果及び考察

3.1. 曲げ性状

プレストレスおよびケミカルプレストレスによって、鋼管内部コンクリートが三軸方向拘束状態になった。合成桁の曲げ載荷時の荷重-たわみおよび剛性-モーメント関係を図-4~図-7に示す。梁の曲率および剛性はRCスラブ上縁及び鋼管下縁ひずみより計算して求めた。

$$\phi = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{L} \quad (\text{式1})$$

$$EI = \frac{M}{\phi} \quad (\text{式2})$$

ここで、 ϕ : 曲率, $\varepsilon_t, \varepsilon_c$: 引張縁, 圧縮縁のひずみ, L : 縁端距離, M : 曲げモーメント, EI : 曲げ剛性

プレストレスを導入した場合は、A型、B型供試体とも有効プレストレス量が大きいかほど同一荷重におけるたわみが小さく、同一曲げモーメントにおける剛性が大きい。プレストレスの導入により、供試体の曲げ剛性が向上した。供試体A-3.5-P10は鋼管下縁が降伏した後波形鋼板ウェブの座屈破壊により耐力を失って、終局破壊に至った。A-3.5-P30の場合はウェブの座屈後さらに荷重がやや増大し、最終的にRCスラブがせん断破壊した。ウェブの座屈を防止するため梁支点部の波形鋼板の厚さを2倍にして補強すれば、供試体A-3.5-P0のように、座屈発生荷重が23%程度向上し、供試体全体の曲げ耐力の増加が見られた。しかし、鋼管が降伏した後の変形能力を

みると、有効プレストレス量が大きいほど塑性域の変形が卓越している、これは、鋼管内部コンクリートの導入により三軸圧縮拘束されているため、見掛け上の引張強度が向上したためと考えられる。B型供試体の場合も上記のことと同様な傾向が認められる。

一方、ケミカルプレストレスを導入した場合、支点付近の波形鋼板を補強した供試体 A-2.7-E15 と A-2.7-E30 では置換率が大きいほどすなわち、ケミカルプレストレスが大きいほど、同一荷重におけるたわみが小さくなっている。曲げ耐力の増大はわずかである。これは鋼管の曲げ降伏後ウェブが座屈し、さらに、RCスラブのせん断破壊が生じたためである。しかし、ケミカルプレストレスがある梁の曲げ耐力は、ケミカルプレストレスのない A-2.7-E0 の場合より

12%増大している。これは、コンクリートの膨張が鋼管によって拘束されるため、三軸方向のケミカルプレストレスが導入され、そのため、コンクリートの見掛け上の引張強度と変形能力が増大するためである。

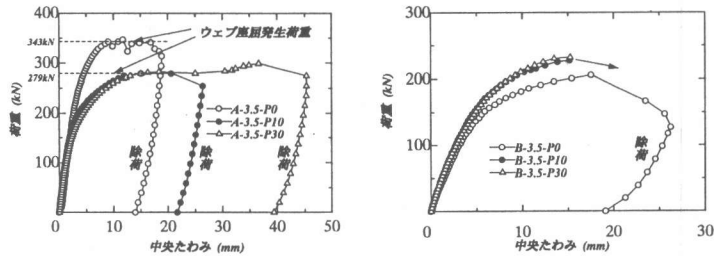


図-4 プレストレスを導入した場合の荷重-たわみ関係

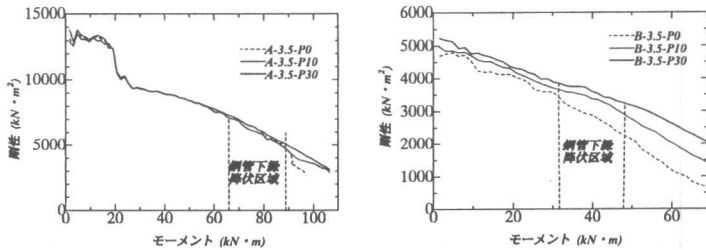


図-5 プレストレスを導入した場合の剛性-モーメント関係

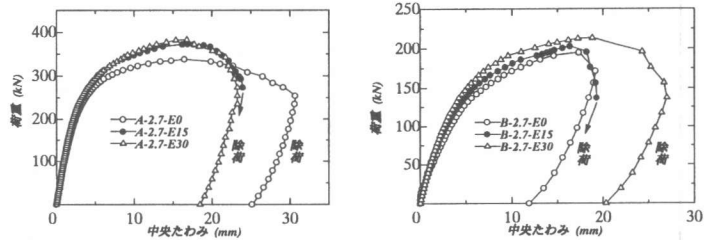


図-6 ケミカルプレストレスを導入した場合の荷重-たわみ関係

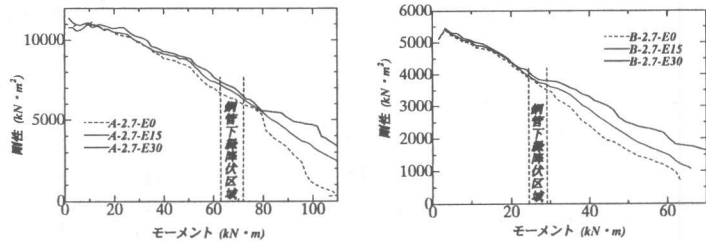


図-7 ケミカルプレストレスを導入した場合の剛性-モーメント関係

3.2. ひずみ分布状況

A型、B型供試体の中央断面のひずみ分布の一例を図-8、図-9に示した。図のように、B型供試体では、荷重初期段階から鋼管が降伏するまでスパン中央断面のひずみ分布が直線的であり、平面保持則が成り立つ。一方、A

型の場合は、全体的なひずみ分布は直線的になっておらず、平面保持則が成立しておらず、完全合成になっていないと考えられる。ただし、波形鋼板を無視すれば、上部の床版と下部の充填コンクリート鋼管を別々に見てみると、ひずみはほぼ直線的な分布を示している。波形鋼板ウェブの場合、梁の垂直方向の応力を伝達することはできるが、曲げによる軸方向力にはほとんど抵抗できないことが影響していると思われる。

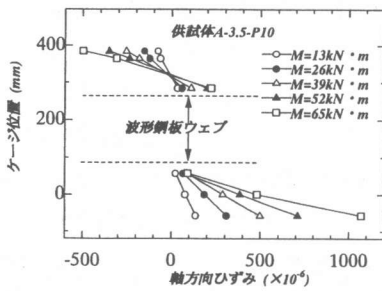


図-8 供試体 A-3.5-P10 のひずみ分布

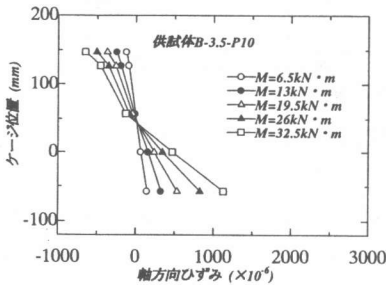


図-9 供試体 B-3.5-P10 のひずみ分布

3.3. 鋼管下縁が降伏時の載荷荷重及び靱性率

有効プレストレス量によって、鋼管下縁ひずみが降伏ひずみに達した時の載荷荷重が異なる。図-10 に示すように、 30N/mm^2 有効プレストレス量を導入した A 型供試体の場合、鋼管下縁が降伏ひずみに達した時の載荷荷重は、 10N/mm^2 プレストレスを導入した場合より 17% も大幅に向上した。また、供試体の靱性率 δ_u / δ_y (δ_u : 終局荷重時のたわみ, δ_y : 鋼管

下縁が降伏する時のたわみ)を調べると、図-11 に示すように、導入プレストレス量が多いほど部材の靱性率が大きい。それは鋼管内部コンクリートにプレストレスを導入すると、変形が鋼管によって拘束されるので、コンクリートは三軸圧縮応力状態となり、その三軸拘束コンファインド効果より、供試体の降伏強度及び塑性変形能力が向上したためと考えられる。

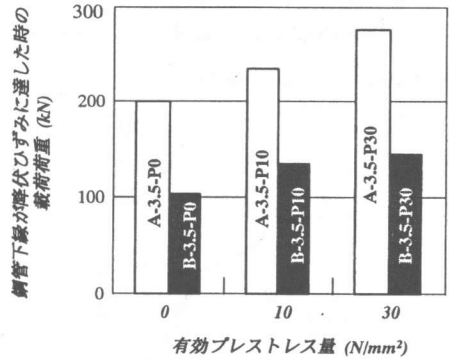


図-10 鋼管下縁が降伏する時の載荷荷重の比較

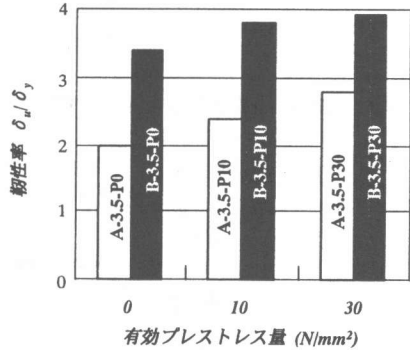


図-11 有効プレストレス量による靱性率の変化

3.4. 波形鋼板ウェブの検討

本実験の A 型供試体の波形鋼板ウェブが曲げモーメントを受ける時の力学的挙動を調べた。図-12 に載荷中の供試体スパン中央ウェブの軸方向と垂直方向のひずみ変化の一例を示す。図のように、破壊までウェブ軸方向のひずみは 70μ しか進展していない、従って、軸力および曲げモーメントにはほとんど抵抗していないと言える。しかし、垂直方向のひずみは荷重の増加とともに増大しており、せん

断に対して抵抗をしていることが示されている。このことから、波形ウェブの軸方向の剛性を0として無視すれば、図-13に示すように、梁理論より算出した軸方向応力の計算値は、断面上縁及び下縁におけるフランジに生じた軸方向応力の実験値とほぼ一致した結果となった。波形鋼板ウェブのこのような特徴により、プレストレスングの際生じる軸方向応力にはほとんど抵抗しないことから、導入プレストレスはウェブに拡散せず、プレストレスの導入効率が良くなる。

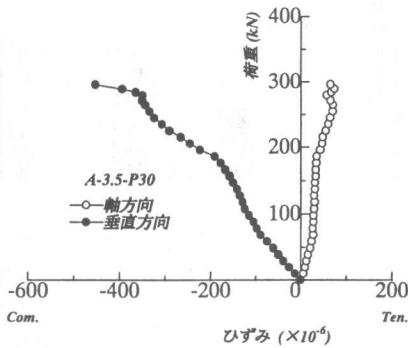


図-12 波形鋼板ウェブの荷重—ひずみ関係

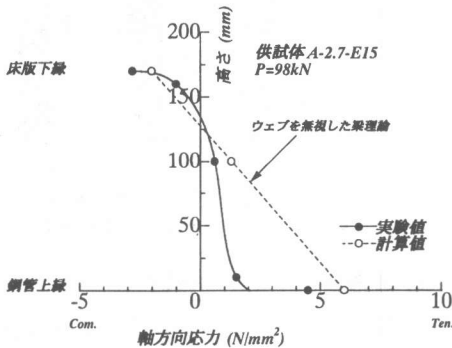


図-13 波形鋼板ウェブ軸方向の応力分布

また、通常の RC 梁の斜めひび割れの場合とは異なり、波形鋼板ウェブが主圧縮応力によって、座屈破壊を生じた。この時に、RC 梁の斜めひび割れの場合の 45° の方向と異なり、図-14のように、波形鋼板ウェブの 135° のせん断座屈破壊が見られた。

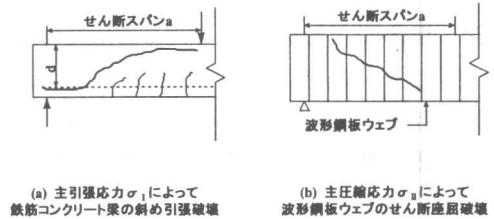


図-14 主引張(圧縮)応力によって生じる破壊性状

3.5. 内部コンクリートの破壊性状

梁曲げ試験後鋼管内部コンクリートを取り出して見ると、導入した有効プレストレス量の違いにより、コンクリートのひび割れ性状が異なった。ここに、表-4に示すように、ケミカルプレストレスを導入した A 型供試体を一例として検討した。ケミカルプレストレスを大きくすることによって、鋼管内部コンクリートのひび割れが抑制され、ひび割れ本数も少なく、ひび割れに対する制御効果がある。

表-4 鋼管内部コンクリートのひび割れ性状

供試体	ひび割れ本数	最大幅 (mm)	平均幅 (mm)
A-2.7-E0	9	0.4	0.23
A-2.7-E15	7	0.2	0.17
A-2.7-E30	5	0.1	0.06

4. まとめ

① 充填鋼管を用いた合成桁では内部コンクリートに導入したプレストレスおよびケミカルプレストレスによって、三軸拘束効果が生じ、合成桁の曲げ剛性が上昇し、曲げ耐力及び靱性もいくらか向上した。

② 波形鋼板ウェブはせん断に抵抗し、曲げには抵抗しない。波形鋼板の座屈破壊を防止することが曲げ耐荷能力を発揮させるのに必要である。

【参考文献】

- 1) 米倉ほか：三次元拘束を受けるコンクリートの力学的特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.2, pp53-58, 1995
- 2) 大浦 誠 Combult, J. シャロール近くのモープレ高架橋，プレストレスコンクリート，34(1), pp63-71, 1992