ダクタル部材への孔あき鋼板ジベル接合の適用に関する研究

- 孔あき鋼板ジベルの力学的特性に関する基礎実験と桁間接合部の載荷実験-

福浦 尚之*1・田中 良弘*2・三桶 達夫*1・加納 宏一*1

Keywords: perfobond shear connecter, UHPFRC, composite structure, direct shear, joint structure, PC girder 孔あき鋼板ジベル, 超高強度繊維補強コンクリート, 複合構造, 直接せん断, 接合構造, PC桁

1. はじめに

近年、高強度コンクリートを用いた構造物が土木・建築の分野で数多く建設されるようになってきており、構造物の高性能化、軽量化及びコストダウンへの高強度コンクリートに対する期待が増している。超高強度繊維補強コンクリート(UHPFRC)は、最密充填されたセメントマトリックスに高強度の短繊維を混入した材料である。

この材料の一つにフランスで開発された反応性粉体コ ンクリート(ダクタル)があり、国内での施工実績が報 告されている¹⁾。このダクタルは、圧縮強度約 200N/mm²、曲げ強度約 40N/mm²(40×40×160mm 供試 体)を有し、その高い材料特性により構造部材の薄厚化、 軽量化を図ることのできる高性能材料である。

構造物の高性能化、軽量化及びコストダウンを図るた めには、材料の高性能化とともに構造上の合理化が重要 である。その有効な方法の一つとして複合構造化がある。 これは、鋼-コンクリート複合構造など異種材料からな る部材同志を組み合わせて構造物を構成したり、プレキ ャスト部材を組み合わせる事により、構造物の各部に要 求される性能を満足する材料を合理的に選定でき、かつ 施工性の向上を図る事ができるためである。

複合構造物の実現のために開発すべき技術の一つとし て、部材間の接合方法が挙げられる。従来より接合方法 として種々の技術があるが、レオンハルトの提案した孔 あき鋼板ジベルは、近年、鋼とコンクリートの接合方法 として広く用いられている²⁾。

ダクタルは鋼繊維を含んだ超高強度コンクリートであ り、孔あき鋼板ジベルとの組み合わせにより、簡易かつ 高い伝達力特性を持つ接合部を構成できる可能性が有る。 本研究では、まず、孔あき鋼板ジベルとダクタルを組み

- *1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室
- *2 技術センター土木技術開発部

合わせた接合の適用性を確認する目的で基礎的な実験を 行い、せん断伝達特性を明らかにする。そして、ダクタ ルの薄肉断面からなる PC 橋梁のプレキャストブロック を経済的に接合する接合工法を、孔あき鋼板ジベルを応 用して考案する。

2. 孔あき鋼板ジベルとダクタルを組み合わ せた接合方法に関する基礎実験

2.1 実験概要

孔あき鋼板ジベルの載荷実験は、従来よりずれせん断型の形式で行われている。本研究は、適用性に関する基礎実験であることから、図-1 に示すような簡易な圧縮型の載荷形式を採用した。表-1 に実験ケース及びコンクリートの強度試験結果、表-2 に配合表、図-2 に試験体諸元及び計測箇所を示す。

従来の孔あき鋼板ジベルは、鋼板孔の両面で2面せん 断耐力が発揮される機構である。本研究では、これ以外 にも鋼板孔に関する一面せん断耐力による接合方法も念 頭においた実験ケースを設定した。また、非常に薄い部 材同志の結合を目的とした接合方法の耐力性状を得るた めに、孔あき鋼板を重ねた引張型の試験を行った。

試験体については、鋼板先端及び載荷板が直接コンク リートとダクタルに力を伝達しないようにクッション材 を設置した。また、全試験体に共通して、鋼板とコンク リート/ダクタル間の摩擦力の伝達を防止するために、 鋼板表面にはポリエチレンフィルムを点接着した。打設 は、型枠内に孔あき鋼板を縦置きして固定した状態で、 荷重載荷面側から縦打ちする方法で行った。

ダクタルは打設後3日間湿潤状態にて静置し、その後 90℃、48時間の熱養生を行ってから試験を行った。コン クリートは早強セメントを使用し、湿潤状態にて静置し て材齢7日で試験を行った。

表-1	実験ケース及び結果
	Summary of specimens and results

実験ケーフ	対象材料	孔径	鋼板厚	せん断面	試験体数	載荷	せん断耐力(kN)			
天映クース		(mm)	(mm)	(面)	(体)	タイプ	試験値			平均值
R φ 30-2-C	タ゛クタル	φ30	12	2	3	圧縮	147	99	95	114
R φ 60-2-C	タ゛クタル	φ60	16	2	3	圧縮	394	397	469	420
R φ 30-1-C	タ゛クタル	φ30	12	1	3	圧縮	35	40	48	41
R φ 60-1-C	タ゛クタル	φ60	16	1	3	圧縮	135	113	102	117
R φ 70-1-T	タ゛クタル	φ70	9	1	3	引張	94	92	119	102
Cφ70-2-C(拘束小)	コンクリート	φ70	16	2	3	圧縮	90	109	90	96
C	コンクリート	φ70	16	2	3	圧縮	171	167	164	167

テストピースの圧縮強度: 202N/mm² (RPC)、47N/mm² (コンクリート)





表-2 配合表 Mix proportions ダクタル配合 単位:kg/m³ a) 珪石微粉末 鋼繊維 水 セメント 減水剤 シリカ,他 φ =0. 2mm, L=15mm 180 1479 24 818 157b)] クリー ト配合 単位 kg/m 細骨材 水 セメント 粗骨材 混和剤 Gmax 175 408 747 965 4 20

9

110

410

 \triangleleft



図-1 載荷方法 Test set-up

a) R ϕ 30-2-C, R ϕ 30-1-C, R ϕ 60-2-C, R ϕ 60-1-C



c) C ϕ 70-2-C





220



図-2 試験体諸元及び計測箇所 Figure of specimens

2.2 実験結果

表-1 に各ケースでのせん断耐力、図-3 に荷重-変位関係を示す。また、図-4 にせん断面の破壊状況を、図-5 にせん断耐力のまとめを示す。

2.2.1 穴廻りの破壊状況

試験終了後、試験体を切断し孔周辺の破壊状況を観察 した(図-4 参照)。鋼板孔部の両面で明瞭なせん断面が 形成されており、2 面せん断破壊が生じている事が確認 できた。せん断面の鋼繊維は切れているものと抜け出し ているものが混ざっていた。鋼板孔内部のダクタルは、 比較的健全であり、圧壊により粉砕されている部分は確 認できなかった。他のすべてのケースについても、孔ま わりの破壊性状は同じであった。

2.2.2 せん断耐力

図-5 より、ダクタルを用いた 2 面せん断タイプのせん断耐力は、同じ孔あき鋼板を用いたコンクリート強度 $f'_c = 47$ N/mm²に対応した既往の重回帰式³⁾での値より も大きな値を示している。コンクリートを対象とした C ϕ 70-2-C、C ϕ 70-2-C"のせん断耐力値が同強度での既往 値を下回っている事と考え合わせると、本ケースではダ クタルの圧縮強度 202N/mm² を反映した大きなせん断耐 力が発揮されている事が分かる。

コンクリートを対象とした C ϕ 70-2-C、C ϕ 70-2-C"の せん断耐力値が、既往値を下回っている理由として、ま ず既往値は比較的マッシブなコンクリート中に埋め込ま れた孔あき鋼板を対象として求められているが、今回実 験では鋼板まわりの拘束がそれほど大きくないために、 既往値を下回っていることが考えられる。このことは、 C ϕ 70-2-C と C ϕ 70-2-C"を比較すると、より拘束の少な い前者の方がせん断耐力値が低くなっている事からも推 察される。

ダクタルを用いた1面せん断タイプのせん断耐力は、 2 面せん断タイプの試験結果と比較して 36% (\$\$ 30)、 28% (\$\$ 60) といずれも半分以下の値であった。1面せん断となることで、せん断面積が半分になるだけでなく、 孔あき鋼板まわりの応力状態が変化し、拘束が弱まった 事が理由と考えられる。



もの町破壊面状況(Rφ30-2 Section of raputure



average shear strengths

3. 孔あき鋼板ジベルによる桁間の接合方法

3.1 接合構造の概念

ダクタルを適用して製作したプレキャスト(PCa)箱桁 ブロックを接合する接合構造の概念図を、図-6 に示す。 接合しようとする PCa ブロックのウェブやフランジ面 に予め直径 5~6 cm の円柱凸部を設けておく。相互の PCa ブロックを従来のウェット/ドライジョイントによ り PC 緊張鋼材により接合した後、円柱凸部に孔あき鋼 板ジベル (PBL) を設置して周囲にダクタルを打設、養 生して完成する。



接合部以外の部材一般部では、鋼繊維の引張抵抗を 10N/mm² 程度期待できる。しかし、プレストレスのみ による従来の接合方法では、接合面で引張応力を伝達で きないため、目開きが生じてしまうことから、フルプレ ストレス(供用時荷重に対して圧縮応力状態)としなく てはならず、部材の引張抵抗を有効に活用することがで きない。考案した接合構造では、接合面において PBL が引張力を伝達するので、フルプレストレスとする必要 がなくなる。そのため緊張材や定着部を縮減することが でき、経済的となる。

3.2 接合部を有する桁の載荷実験

3.2.1 試験体

今回の実験では矩形断面を採用し、試験体の作成にあ たっては実際の施工を反映した。図-7 に示すように 150 ×300×1665mm の矩形断面のダクタル桁を2本製作し、 90℃で 48 時間の熱養生を実施した。桁相互の接合面に 30mm の隙間をあけて、そこにダクタルを打設して養生 し、所定の強度に達したら桁全長にわたり。15.2mmの モノストランド3本で緊張した(導入力:144kN× 3=432kN)。次に、 ϕ 60 の孔を 12 個設けた PBL を事前 に設けたダクタル円柱凸部(φ40)に合うように両側か らセットし、その周囲にダクタルを増打ちして完成した。 PBL のセットに際しては既設ダクタルとの隙間が発生 するのを防止するために、片面にペースト状のエポキシ 樹脂を塗布した。試験体は接合部の耐力実験の位置付け であるために、接合部以外の桁で曲げ破壊が生じないよ うに、超高強度鉄筋(ネジボン D22)で補強した。ダク タルの T.P.強度は、圧縮強度 209N/mm²、曲げ強度は 43.2N/mm²である。図-8 に載荷状況を示す。

3.2.2 実験結果

中央部(接合部)から左右に 75mm の位置における 変位と荷重との関係を図-9 に、桁の中央部付近(セン ターから左右に 75mm の位置)および載荷点それぞれ の上縁、下縁におけるダクタルのひずみと荷重の関係を 図-10 に、接合 PBL の中央の上端、中央、下端における ひずみと荷重の関係を図-11 に示す。

図-10より、載荷点の下縁の引張ひずみは 120kN 付近 において不連続にひずみが増加しており、この時点で載 荷点の下端におけるダクタルにひび割れが発生した。

図-12 は、接合部下端のセットした目開き変位計(長 さ 80mm)の計測から、接合部下端の平均引張ひずみに よる変形を除去して接合面のおける見開きとして求めた ものである。荷重 130kN 付近までは、ほぼゼロの目開 きである。これは、ダクタル桁の載荷点下端において初 期ひび割れが発生した荷重 120kN と同程度である。こ れより、孔あき鋼板ジベルを用いた接続部が引張応力を 伝達し、目開きの増加を抑制することで、桁部材の一般 部と等価な接合部を形成できたものと判断できる。接合 PBL のひずみ分布においても、120kN 程度までは断面 内ひずみ分布は線形であることからもこの判断が妥当で あると考えられる。





図-11 荷重-孔あき鋼板ひずみ Relation between load and PBL strain

その後、ひびわれの発生と共に剛性が低下し、荷重 200~250kN 付近から接合部の目開き変形が増加しはじ めた。接合部の後打ダクタル側面には 4~5 本のひび割 れ程度で顕著なひび割れ幅とはならなかった。

最大荷重は 282kN であり、この時の破壊状況は、ダ クタル突起部のせん断破壊に伴う接合部から 3cm 外側 のダクタル底部の引張破壊であった。

3.3 非線形 FEM 解析

3.3.1 解析モデル





図-12 荷重-目開き Relation between load and openning

40

x1/100

60

mm

80

20

目開き

非線形二次元 FEM により、実験のシミュレーション を実施した。解析に用いたメッシュ図を図-13 に示す。 解析ケースは今回の実験(ケース1)の他に接合部がな い場合の一体とした桁(ケース2)、また従来の接合構 造である PC のみ導入したもの(ケース3)を実施した。 解析は PC 導入のプロセスがあるのでステージ解析とし、 PC 鋼材の先行したひずみ、ダクタルへの圧縮応力を考 慮した。(表-3 参照)ケース2とケース3については、 接合部ダクタル(幅 30mm)要素は圧縮にのみ抵抗する ように引張側の構成則を考慮した。



- ケース1 ケース2 ケース3

40

50



荷重 100kN 付近では他の2ケースに比較して剛性が低

4 まとめ

以下に本研究より得られた知見を示す。

- 1)実験より、ダクタルに孔あき鋼板ジベルを適用した継 手構造は、拘束の小さい薄厚部材間の継手部に対して 実用的なせん断耐力を発揮できことが確認できた。今 後は、実験データの蓄積により、せん断耐力式の設 定・ずれ定数の高精度化、及び解析シュミュレーション による変形性状・破壊進展のメカニズムの解明が必要 である。
- 2) 桁間接合部に PBL を適用した接合方法は、フルプレ ストレスとする必要はなく、従来の方法に比較して使 用限界状態の設計荷重を向上させることができる。ま た、終局時の耐力も向上することができ、緊張材料や 緊張端部のコスト縮減ができる。

参考文献

- 1)田中良弘,武者浩透,大竹明朗,下山良秀:超高強度繊維 補強コンクリートによる PC 歩道橋の設計施工法, コンクリー ト工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1603-1608, 2002.2.
- 2) 土木学会鋼構造委員会: 孔あき鋼板ジベル設計マニュアル (案), 2000.11.
- 3)保坂鐵矢,光木香,他:孔あき鋼板ジベルのせん断特性に 関する実験的研究,土木学会構造工学論文集, Vol.44A, pp.1497-1504, 2002.3.

ダクタルの圧縮側構成則は圧縮強度まで線形の弾塑性 とし、引張側は図-14a)に示す構成則と用いた。引張側 の構成則は、曲げ載荷試験から求めた曲げ応力-ひび割 れ幅の関係から逆解析で引張応力ーひび割れ幅の関係に 変換し、等価検長によりひずみに変換した。

20

鉛直変位

実験と解析の比較

Verification of analysis

30

(mm)

0

0

10

図-15

PBL の引張構成則として、図-14b)に示すような塑性 特性をもつ鋼板が、ダクタル中で完全付着するとしてモ デル化した。剛性が変化するひずみポイントは、図-11 に示す PBL 下縁のひずみの変化点を参考にして決めた。 3.3.2 解析結果

解析の結果を図-15 に示す。ケース1の結果は、実験 結果をよくシミュレートしている。ケース2の接合部の ない桁は最大荷重 220kN 付近までは実験値とよく合致 していて、今回の実験桁は一体桁と同等剛性を示してい ることが分かる。ケース3の従来の接合の場合は、プレ ストレス応力がなくなった後は接合面に目開きがおこり、