

(30) ずれ止め付き鋼管-コンクリート合成構造の耐荷機構に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON RESISTING MECHANISM OF STEEL PIPE AND
CONCRETE COMPOSITE MEMBERS WITH SHEAR CONNECTORS

三上浩* 山田武正** 伊藤久光** 田村富雄***

Hiroshi MIKAMI, Takemasa YAMADA, Hisamitsu ITO, Tomio TAMURA

Steel pipe and concrete composite members have been using recently in various structures such as concrete caissons supported by large caliber steel pipe piles. Shear connectors of flat bars internally and externally welded to the steel pipe will be effective to improve the composite action.

Resisting mechanism of such member has been found to be influenced by :-

- 1) bond strength between concrete and steel pipe
- 2) bearing resistance for both pipe tips and shear connectors
- 3) variation of punching shear depth depending upon
the location of shear connectors

Thus, in order to investigate the effects of above factors, tests of 13 model slabs were carried out with axial compression force only.

This paper describes the results of the tests and discusses the resisting mechanism of these composite members when using shear connectors.

1. はじめに

最近、鋼管とコンクリートを合成した部材が種々の構造物の構成要素として活用されつつある。特に、コンクリートスラブ内に鋼管を埋め込み、鋼管に作用する軸力をスラブに伝達させる構造では鋼管とコンクリートの結合部の一体化をいかに確実にし、荷重伝達を無理なく行い得る構造とするかが重要と考えられる。

これに対処するための一方法として、鋼管の内、外周面に平鋼を溶接し「ずれ止め」とする、ずれ止め付き鋼管の利用が考えられる。この際、鋼管に軸方向押込み力が作用する時の鋼管とコンクリートの結合部における荷重伝達機構や結合部を有するスラブの耐荷挙動は以下のような観点から極めて複雑になるものと予想される。

- (1) 鋼管に作用する軸力の一部はスラブへ埋め込まれた鋼管とコンクリートとの付着によって伝達される。
- (2) 同様に、軸力の一部は鋼管の先端支圧およびずれ止めの支圧によって伝達される。
- (3) ずれ止めの位置や寸法等によってスラブの押抜きせん断面の高さが変化する。

このように、スラブの耐荷機構を考えるにおいて、載荷は埋め込み型でなおかつ荷重が鋼管の軸方向に分散して一様でない、分散型埋め込み載荷状態を考慮せねばならないと思われる。

以上から、本研究ではその1で鋼管とコンクリートの付着と鋼管の先端支圧およびずれ止め各々の有無に着目した合計7体の模型スラブを用いて、これら因子の単独時および複合時での荷重伝達機構およびスラブの耐荷機構に与える影響を調べる。次に、その2でずれ止めの位置や段数と厚さを変化させた6体の模型スラブを用いて、ずれ止め固有の影響を調べる。最後に、両ケースの実験結果と考察に基づき、ずれ止め付き鋼管-コンクリート合成構造の耐荷機構を定性的に述べるものである。

* 工修 三井建設(株)土木技術部 ** 三井建設(株)土木技術部 *** 三井建設(株)技術研究所

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用したコンクリートは粗骨材の最大寸法が10mmのレディミクストコンクリートで試験日の目標強度は240(kgf/cm²)とした。鉄筋

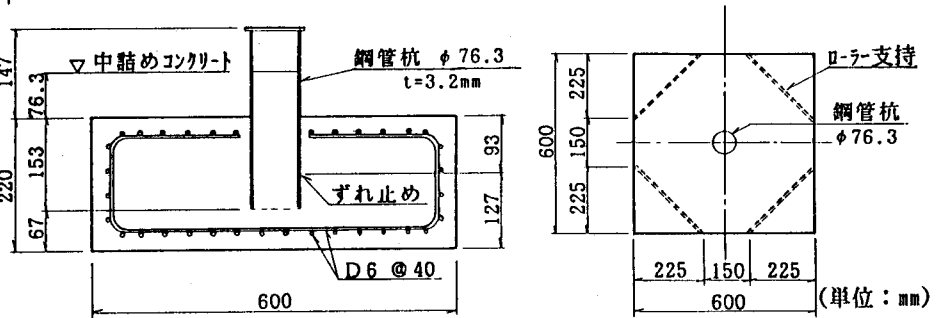


図-1 試験体形状寸法

はすべて異形鉄筋D6(SD30)を使用した。D6の断面積は0.32cm²、引張強度と弾性係数は試験片3本の引張試験の平均値で各々約5900(kgf/cm²)、 2.0×10^8 (kgf/cm²)であった。

2. 2 試験体計画

試験体は図-1に示すように、上、下端筋としてD6鉄筋を40mmピッチで直交して配置したコンクリートスラブ(60cm×60cm×22cm)に、長さ30cmの鋼管(φ76.3, t=3.2mm)を15.3cm(2φ)埋め込み、スラブ天端から鋼管径だけ鋼管内部にコンクリートを中詰めしたものである。

試験体は表-1に示すように、その1では付着と先端支圧およびずれ止めの有無の3つの影響因子の単独時および複合時の組み合わせで計7体(A-1～A-7)、その2では付着と先端支圧がともにある状態で図-2に示すように、ずれ止めの位置、段数、厚さをパラメータとして計6体(B-1～B-6)とした。

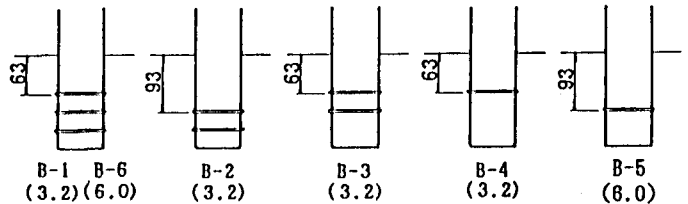
なお、表-1中の○印は該当する因子があることを示している。また、鋼管にパラフィン塗付した場合を鋼管とコンクリート間に付着がない状態とみなした。同様に、鋼管の先端部にリング状の厚さ(高さ)20mmの発泡スチロールを挿入した場合を先端支圧が無い状態とみなした。ずれ止めの厚さはその1ではすべて3.2mmで、その2では3.2mmを標準とし、厚いものは6.0mmとした。ずれ止めはすべて鋼管の外周面のみに溶接した。また、コンクリートの打設は鋼管部を下面として行い、実際の打設方向を再現した。

2. 3 載荷方法および測定

加力は図-1に示すように、コンクリート養生後試験体を反転させ、鋼管を上側にしてスラブを4辺ローラー支持し、アムスラーにより行った。載荷はA-1～

表-1 試験体計画(その1)

	影響因子		
	付着	支圧	ずれ止め
A-1	○		
A-2	○	○	
A-3		○	
A-4	○		○
A-5	○	○	○
A-6		○	○
A-7			○



* () 内はずれ止めの厚さ
(単位: mm)

図-2 試験体計画(その2)

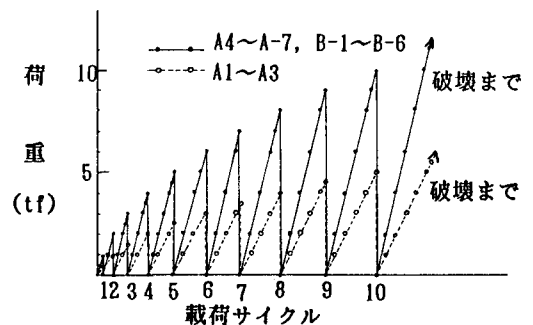


図-3 載荷ルール

A-3 が0.5tf、その他は 1.0tfごとの荷重漸増繰返し载荷とした。载荷ルールを図-3に示す。測定項目および測点数はコンクリートスラブの下面鉛直変位(13点)、鋼管の鉛直変位およびめり込み変位(4点)、鋼管の鉛直および水平ひずみ(20~24点)、下端鉄筋の歪み(12点)とした。

また、実験終了後コンクリートスラブ下面のひびわれ状況を観察し、さらに試験体を1/2 に切断して内部ひび割れの発生状況を観察した。

3. 実験結果および考察

3. 1 破壊荷重

各試験体の試験日におけるコンクリート強度および破壊荷重の一覧を表-2に示す。

その1のA-1,2,3とA-4,5,6,7の結果から、ずれ止めを付けることによって破壊荷重は2倍程度に増加し、ずれ止めによる荷重分散効果が大きいことが伺われる。

また、A-2とA-3の比較より、付着の有無はずれ止めがない試験体では破壊荷重に影響を与えるのに対して、A-4とA-7の比較より、ずれ止めがあるときほど顕著ではないことが判る。さらにA-6とA-7の比較より、ずれ止めがあると先端支圧の有無は破壊荷重には大きな影響を与えないことも判る。これは鋼管と中詰めコンクリートの一体化により、鋼管に作用した荷重が中詰めコンクリートからも伝達されていることを示すものと推察される。

その2の結果から、ずれ止め最上段の位置が高い(スラブ上面に近い)B-1,3,4,6(以下Hグループと称する)が、より低い(スラブ下面に近い)B-2,5(以下Lグループと称する)に比べて大きな破壊荷重を示していることが判る。また、最上段の位置が同じで段数の異なるB-1とB-3や段数が同じでも厚さが異なるB-1とB-6では顕著な差が見られないことから、破壊荷重に対しては、ずれ止めの段数や厚さよりも最上段の位置の影響が強いことが伺われる。

3. 2 鋼管のめり込み変位

図-4に荷重と鋼管のめり込み変位および残留めり込み変位の関係を示した。ここで、残留めり込み変位とは繰返し载荷における荷重開放時の鋼管のめり込み変位を称

表-2 破壊荷重の一覧

試験体 (ϕ 01)	コンクリート強度 (kgf/cm^2)	破壊荷重 (tf)	試験体 (ϕ 02)	コンクリート強度 (kgf/cm^2)	破壊荷重 (tf)
A-1	226	4.0	B-1	263	17.1
A-2	230	6.1	B-2	262	13.0
A-3	230	4.3	B-3	262	16.0
A-4	235	10.2	B-4	267	19.0
A-5	235	11.5	B-5	276	12.2
A-6	240	11.0	B-6	276	16.0
A-7	244	10.0			

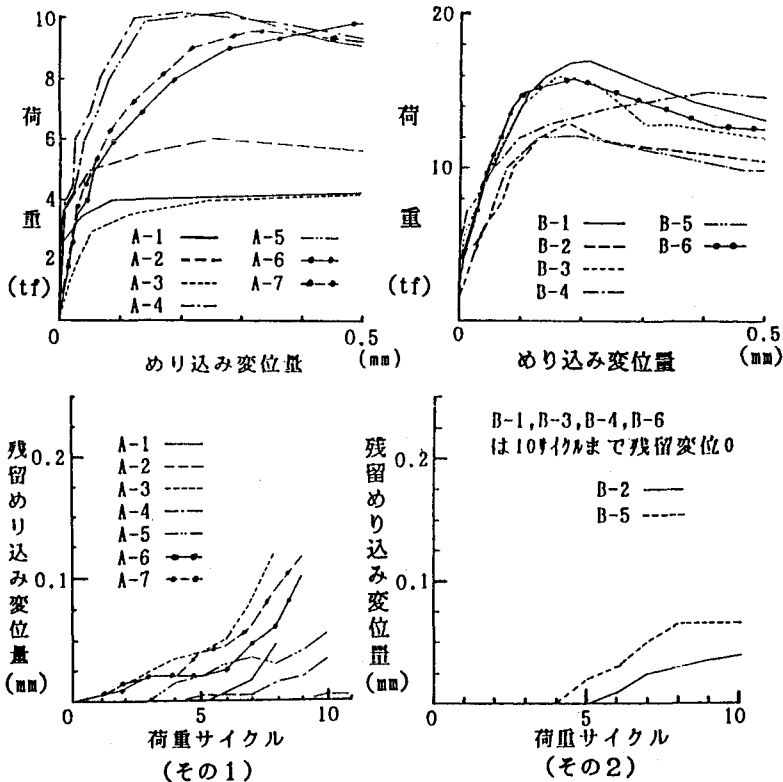


図-4 荷重～めり込み変位、残留めり込み変位

したものである。付着のない(A-3,6,7)は低荷重段階から荷重の増加に伴いめり込み変位が増大し、残留変位も1サイクル目から発生し絶対量も大きい。これに対して、付着のある(A-1,2,4,5)は低荷重段階ではめり込み変位がほとんど見られず、また荷重増加に対する変位の伸びが付着のないものに比べて、終局荷重付近まではかなり抑制されていることが判る。残留変位もA-1,4,5では3~5サイクル、A-2では10サイクルまで生じていない。このように、付着の有無は鋼管のスラブへのめり込み変位量の支配的な影響因子の一つであることが判る。

次に、その2の結果から、最上段ずれ止めの位置が低いLグループ(B-2,5)では低荷重段階からめり込み変位が発生し、残留変位も4~6サイクル目で認められることが判る。これに対して、Hグループ(B-1,3,4,6)のめり込み変位は同一荷重段階でのLグループの変位に比べて小さく、残留変位も10サイクルまで生じていない。このように、最上段のずれ止め位置も鋼管のめり込み変位に対する重要な影響因子であることが判る。また、ずれ止めが1段の場合(A-5,B-5)はずれ止めの厚さの違いでめり込み変位に若干の差が見受けられるが、3段の場合(B-1,6)はずれ止めの厚さによる顕著な差異は見られない。

同様に、A-5,B-1,B-3の相互比較から、ずれ止めが2段以上あると段数の差異によるめり込み変位関係の差異は生じないことが判る。以上から、めり込み変位に与えるずれ止めの厚さや段数の影響はずれ止めが複数段ある場合は顕著には表れないと考えられる。

3. 3 鋼管の鉛直ひずみ分布

図-5(a)~(d)に鋼管の鉛直ひずみ分布を示す。(a)から付着のあるA-1,2ではスラブ上面付近で圧縮ひずみが急激に低下しており、鋼管からの荷重が特に埋め込み上部の鋼管とコンクリートの付着によって伝達されていることが判る。(b)の9tfから、鋼管の鉛直ひずみがずれ止めをまたいで著しく減少していることが判る。これはずれ止めによって荷重伝達が行われていることを示すものと考えられる。また、ずれ止めより下位における鉛直ひずみは先端支圧の有無により相違が見られ、A-4やA-7のように先端支圧のない場合はひずみがほとんど発生していない。

次に、(c)と(d)を基に、HグループとLグループを比較すると、低荷重段階では大差がないものの、荷重が9tfではLグループ

の方が埋め込み部の鋼管鉛直ひずみが大きい。これは図-4に示したように、Lグループはこの荷重レベルで残留変位が発生していることから、鋼管とコンクリートにずれが発生したことに関連しているものと考えられる。さらに、(b)と(d)の9tfのひずみ関係から、ずれ止め段数が1段の場合(A-4,5,6,7,B-5)はずれ止めをまたいだ上下でのひずみ差が比較的大きいのに対して、(c)の9tfや14tfレベルで顕著なように、ず

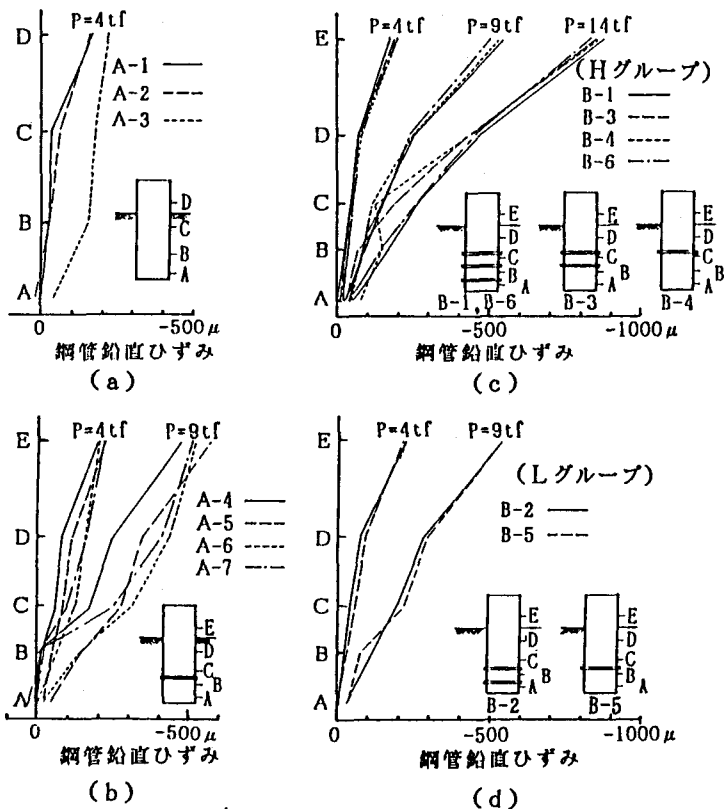


図-5 鋼管鉛直ひずみ分布

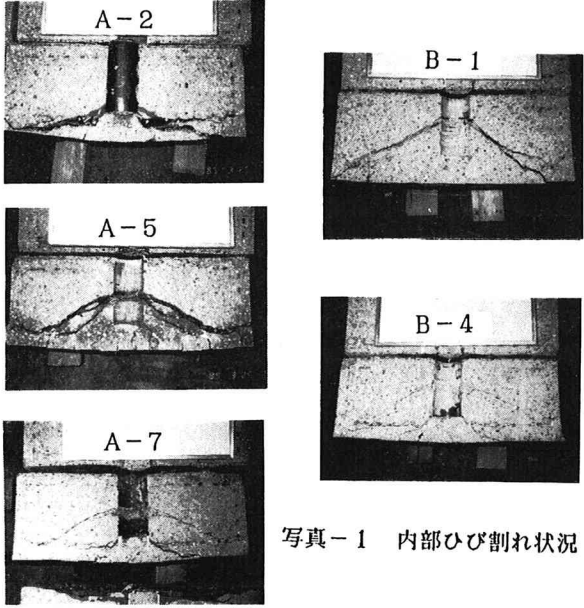
れ止め段数が多い程このひずみ差は小さくなり、ひずみが均等化する傾向にあることが判る。このように、ずれ止めによる荷重の分散度合はずれ止めの段数にも影響されることが判る。

3. 4 内部ひび割れ状況

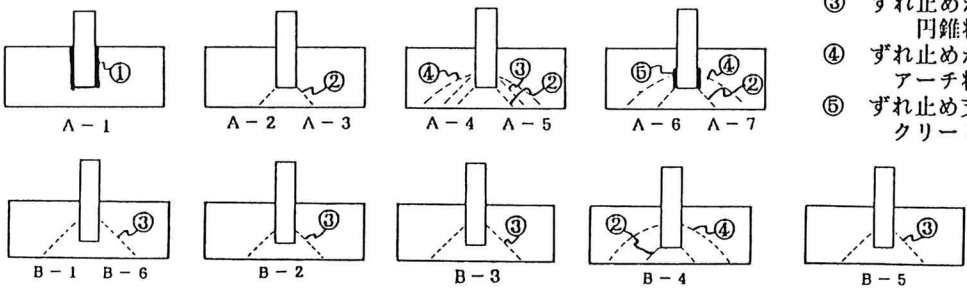
試験体の内部ひび割れ状況を写真－1に示す。また、各試験体の内部ひび割れの概念図を図－6に示す。

ずれ止めのない試験体には鋼管先端からの円錐状ひび割れが確認され、押抜きせん断破壊したものと考えられる。ずれ止めのある試験体では大きく2つのひび割れが確認された。1つは最上段のずれ止めからのひび割れであり、他は鋼管先端からのひび割れである。ただし、これらのひび割れの発生には各影響因子が複雑に関連していることが伺われる。すなわち、鋼管先端からのひび割れは（A-4,5,6,7,B-4）にみられるものの他にはみられない。さらに、最上段のずれ止めから発生しているひび割れには円錐状（B-1,2,3,5,6）のものとアーチ状の2種類がみられ、鋼管先端からのひび割れがみられる（A-4,5,6,7,B-4）ではすべてアーチ状のひび割れが発生している。

また、A-6,A-7 試験体のずれ止め支圧部では一部コンクリートの脆弱化がみられた。これは、付着がないために一段のずれ止め部分に荷重がより集中したためと考えられる。



写真－1 内部ひび割れ状況



図－6 内部ひび割れ概念図

- ① 鋼管外面でのずれ
- ② 鋼管先端からの円錐状ひび割れ
- ③ ずれ止めからの円錐状ひび割れ
- ④ ずれ止めからのアーチ状ひび割れ
- ⑤ ずれ止め支圧部コンクリートの脆弱化

4. 耐荷機構と破壊耐力の検討

4. 1 耐荷機構

この種の鋼管とコンクリートの合成構造では破壊耐力と同様にひび割れ発生荷重の把握も重要であると考えられる。図－7中にひび割れ発生荷重の実験値を示す。ひび割れ発生荷重の実験値は図－8に示す荷重と下端筋のひずみ関係において、線形関係が終了する変曲点の荷重とした。図－7中○印は最上段ずれ止めの位置を示し、ずれ止めのないものは鋼管先端位置を示した。●印はひび割れ発生荷重の実験値を基に、ひび割れが曲げによってスラブ下面に発生したと仮定し、平板理論を適用して仮想載荷点位置（有効スラブ厚）

A-2A-3A-4A-5A-6A-7B-1B-2B-3B-4B-5B-6

Per=5.03.05.04.03.05.08.08.09.07.08.08.0 (tf)

220

630

6300

高位置

中位置

ずれ止めの位置

(単位: mm)

h : 最上段ずれ止めの位置

h' : 仮想載荷点位置

A-2 とA-3 から、付着が

これらは、本構造が分散型埋め込み載荷状態にあることを示し、ひび割れ発生荷重が仮想載荷点位置（有効スラブ厚、すなわち断面係数）とその位置での荷重分散後の荷重強度との大小関係で決定されることを示すものと考えられる。さらに、

図-8から、ずれ止めがある
試験体での下端筋のひずみの傾 (tf)

表-3 破壊機構に対応する因子

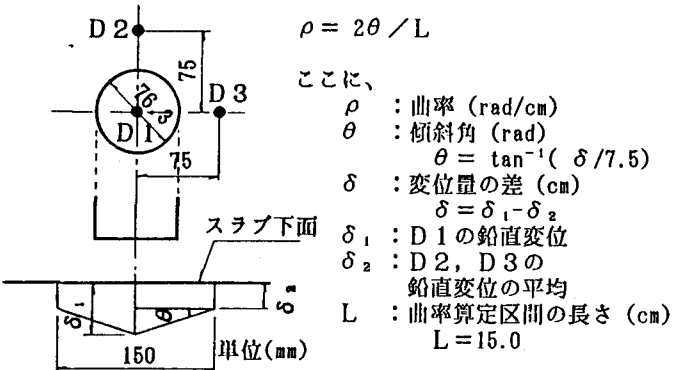
[illegible]

— 200 —

されなかった試験体の破壊機構を”せん断タイプ”と称する。

表－3に破壊機構に対応する因子を取りまとめた。曲げタイプの試験体はすべて鋼管の先端部から円錐状のひび割れが発生し、ずれ止め最上段からのひび割れがアーチ状であることやずれ止めの段数が1段であることが共通している。なお、表中にはスラブの変形曲率も示した。曲率は図－9で定義するように、スラブ下面の鉛直変位量から、特に鋼管直下周辺に着目して求めたものであり、内部ひび割れの発生状況や鉄筋のひずみレベルに対応して、曲げタイプの試験体で一様に大きいことが判る。

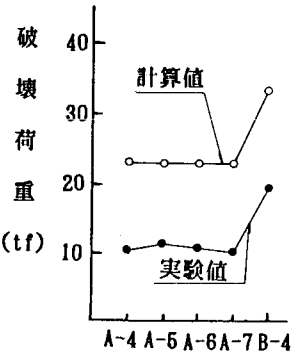
以上から、曲げタイプではずれ止めが1段のため、鋼管先端にも荷重が伝達し、このときに抵抗する断面も小さいためにひび割れが発生し、曲率も増加して、スラブとしては引張り力を鉄筋が負担し、圧縮力をコンクリートが負担する耐荷機構になっているものと考えられる。これに対して、せん断タイプではずれ止めが複数段あるかまたはずれ止めが厚く、ずれ止め周辺での荷重分担割合が大きくなり、鋼管先端部の伝達荷重は小さく、先端部からのひび割れが発生しにくい。そのため、耐荷機構はコンクリートの引張り抵抗に強く依存する押抜きせん断型になり、ひび割れもずれ止めからの広域的な円錐状のひび割れになると考えられる。



図－9 変形曲率

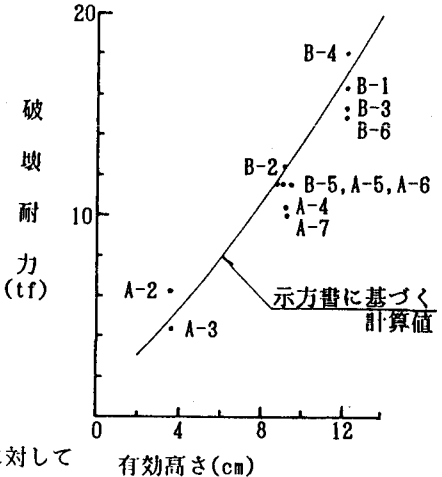
4. 2 破壊耐力

本実験における曲げタイプの試験体について、土木学会のコンクリート標準示方書（以下、示方書と呼ぶ）に準拠して曲げ耐力を計算した結果を図－10に示す。なお、計算にあたってのモデル化はひび割れ発生荷重の検討と同様に行い、仮想載荷点の位置は内部ひび割れの発生状況を参考にして、最上段ずれ止め



図－10 曲げ耐力の計算値と破壊荷重の実験値

図より、計算曲げ耐力は実験値の2倍程度を示し、曲げ破壊に対しては十分に安全であると考えられる。そこで、すべての試験体について、示方書の押抜きせん断耐力の評価式を用いて計算した結果を図－11に示す。評価式の適用にあたり、ずれ止め最上段の位置を仮想載荷点とし、その点から下端筋の中心までを有効高さとした。コンクリート強度は240(kgf/cm²)とし、実験値には $\sqrt{240/f'}$ を乗じて補正を行った。図－11から、本計算手法で比較的精度良く実験値を評価できるものの、実験値を安全側に包含することができないことが判る。この要因の一つに、仮想載荷点位置に全荷重が作用すると考えたことが挙げられる。現実には付着や先端支圧とずれ止めの支圧等による荷重分散が若干残り、ずれ止め位置での荷重は全荷重を下回る荷重強度になっているものと思われる。また、粗骨材の最大寸法が10mmのため、コンクリートのせん断強度が小さいことも要因の一つとして考えられる。



図－11 破壊耐力の計算値と実験値

5. まとめ

今回の実験結果と考察および検討結果を以下に要約する。

- (1) ずれ止めは鋼管からの荷重伝達を確実にし、スラブの破壊耐力を増加させる。
- (2) 付着および先端支圧の有無はずれ止めがあるとスラブの破壊荷重には大きな影響を与えない。
- (3) 最上段ずれ止めの位置がずれ止めの段数や厚さよりも破壊荷重に顕著な影響を与える。
- (4) 鋼管とコンクリートの付着とずれ止め最上段の位置が鋼管のめり込み変位の発生および進展に対する大きな影響因子である。
- (5) 鋼管の鉛直ひずみの分布から、付着や鋼管の先端支圧およびずれ止めが荷重分散に与える影響を定性的に確認することが出来る。
- (6) 試験体の内部ひび割れ状況から、影響因子に関連して内部ひび割れの発生状況も変化することが確認できる。
- (7) ずれ止め段数等に関連して、曲げタイプとせん断タイプの2つの破壊機構が起こり得る。
- (8) 下端鉄筋のひずみ傾向と変位から求めた曲率および内部ひび割れの発生状況は各々良好に対応する。
- (9) 示方書に基づいて、試験体のひび割れ発生荷重と破壊荷重をある程度の精度で評価できると思われる。
特に、破壊荷重は押抜きせん断耐力の評価式を用いて、最上段のずれ止め位置を仮想載荷点とすることで、比較的精度良く評価できる。

末筆ながら、本研究を行うに当たり大変貴重なご意見を頂いた、東京理科大学の辻正哲助教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 浅間達男, 足立義雄「くい頭部とフーチングの結合部の設計」道路, 昭和47年 7月, pp76 ~84
- 2) 足立義雄「くいとフーチングの結合部の剛性」土木技術資料16-10(1974)pp8~14
- 3) 榎並昭他「鋼管杭頭部の支圧及び付着に関する研究」日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)昭和53年 9月, pp2021~2032
- 4) 榎並昭他「鋼管杭の杭頭処理効果に関する実験的研究」日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)昭和52年10月, pp2041~2050
- 5) 小柳治「鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断とその設計上の取扱い」コンクリート工学, vol19, No.8, Aug. 1981, pp3~13
- 6) 高橋義裕, 角田与史雄「RCスラブの厚さ中間部載荷によるせん断強度について」コンクリート工学年次論文報告集 10-3, 1988, pp99~102
- 7) 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫「鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究」土木学会論文報告集1974.9, pp105~115
- 8) 大志万和也, 福井次郎「新しい鋼管杭の杭頭結合方法」土木技術資料 27-1(1985)pp33~39
- 9) 近田康夫, 小堀為雄「杭頭結合部における応力伝達機構と安全性昭査に関する一考察」土木学会第41回年次学術講演会(昭和61年11月) I-40, pp79~80
- 10) 池田尚治他「コンクリート円環柱の耐荷挙動に関する研究」第8回コンクリート工学年次講演会論文集 1986, pp501~504
- 11) 土木学会 コンクリート標準示方書 設計編(昭和61年制定)
- 12) 日本道路協会 杭基礎設計便覧