

床版下面に人為的にひび割れを入れた床版の カーボン補強押し抜きせん断実験

Experiment about punching shear reinforced carbon of slabs classified crazing into artificially in underside of bridge floor slabs

(株)砂子組 ○正員 近藤 里史 (Satoshi Kondo)
 札幌開発建設部 千歳道路事務所 正員 坂 憲浩 (Norihiko Saka)
 (株)砂子組 非会員 佐藤 和彦 (Kazuhiko Sato)
 (株)砂子組 正員 川村 正之 (Masayuki Kawamura)
 (株)砂子組 正員 佐藤 昌志 (Masashi Sato)

1. はじめに

従来の押し抜きせん断平板載荷試験は、下方へジャッキ等で荷重をかけ押し抜くものであった(図-1)。下面(下鉄筋側)に模擬クラックを入れた供試体の製作は、従来から可能であったが、試験機に供試体をセットする際の工数が無視できないものとなり、このような供試体の試験は、あまり行われてこなかった。

そのような理由から今回、上方へ載荷する押し抜きせん断平板載荷試験機を製作し(図-2)、表-1 に示した模擬クラックを入れた供試体を含む各種実験ケースを、上方へ載荷する試験機を用いて試験した。

その結果十分実用に供し得ると判断できたため、ここではプレーンコンクリート・標準配筋・クラック有り/無しのケースについて注目し、実験結果を報告する。

2. 試験機概要

製作した試験機はH300×300×10×15の鋼材で組み立て、200 tf、ストローク20 cmのジャッキを用いた。供試体は両翼をH300で挟んでボルトで固定し、平面図(図-4)の縦幅2500 mmは、該当現場の床桁間隔を模している。ジャッキには、500×250 mmの輪荷重を想定した鋼製載荷板を持たせた。

供試体は図-2にあるように、上鉄筋と下鉄筋を逆転させた配置で製作し、そのままバックフォーで吊りあげ試験機にセットした。

3. 実験ケース

ここではプレーンコンクリート・標準配筋・クラック有り/無しのケースについて注目するため、Case-1, 2, 3, 6を取り上げる。

取り上げる実験ケースはいずれも通常コンクリートであり、Case-1 が基本ケースとなる。該当現場は過去の示方書に基づいた設計で、配力筋が現在の約半分となっているため(標準配筋)、Case-3 では比較の目的で、配力筋を追加した。

Case-2 は、基本形Case-1の下鉄筋側(床版下面に相当)に150×150 mmの格子状模擬クラックを、下鉄筋かぶり深さで入れたものである(図-5)。模擬クラックは製作時にビニールシートを挟んで形成させた。Case-6 はそれをさらにカーボンで補強したものである(図-6)。

炭素繊維は幅15 cm、厚さ0.111 mmとなる。全面張

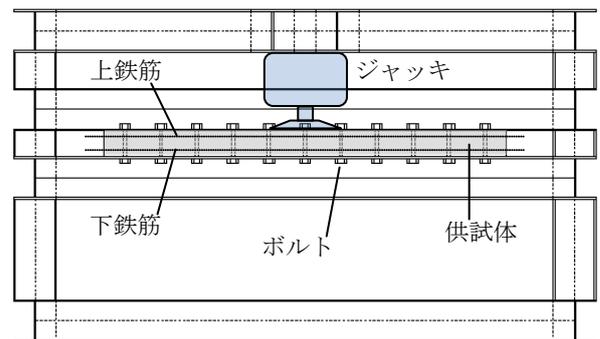


図-1 従来の押し抜き平板載荷試験

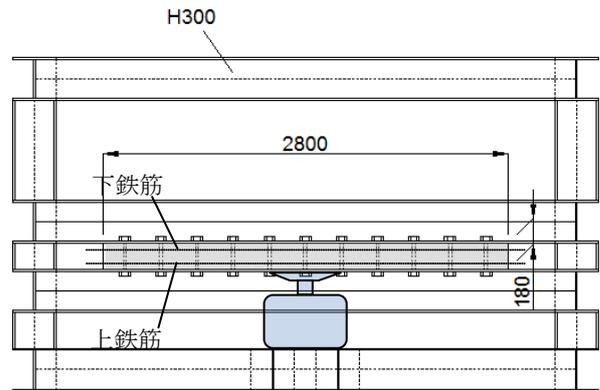


図-2 試験機 (立面図)

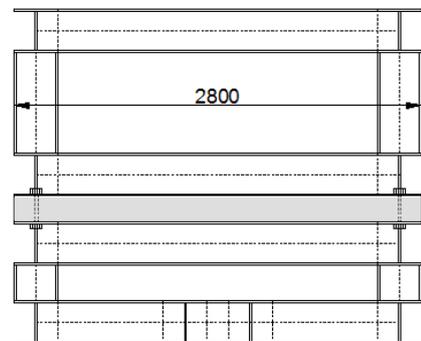


図-3 試験機 (側面図)

にしなかったのは、実際の現場では排水効果のために、炭素繊維シートにも隙間が必要と考えられるからである。30 cm間隔で、炭素繊維シートも格子上に配置した。

4. 各供試体の押し抜きせん断耐力

図-7 に、Case-1, 2, 3, 6 の载荷時における平板中央変位とジャッキ荷重の関係 (P-δ 曲線) を示す。

図中の黒点線は、ジャッキ荷重に対して中央変位がほぼ線形に挙動していると考えられる範囲を示し、P-δ 曲線が歪み軟化を示した時点、実験による押し抜きせん断耐力とした。

図中赤点線は、コンクリート標準示方書設計編¹⁾の押し抜きせん断耐力推定式によるもので、以下となる。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_\gamma \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (式 1)$$

ここに、

$$f_{pcd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}} \quad (N/mm^2)$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4}, \quad \beta_d > 1.5 \text{ では } \beta_d = 1.5.$$

$$\beta_p = (100p)^{1/3}, \quad \beta_p > 1.5 \text{ では } \beta_p = 1.5.$$

$$\beta_\gamma = 1 + 1/(1 + 0.25 u/d)$$

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)

u : 載荷面の周長 (mm)

u_p : 設計断面の周長で、載荷面から $d/2$ 離れた位置で算定する。

d : 有効高 (mm)

p : 二方向の鉄筋の鉄筋比の平均。

γ_b : 1.3

表-2 载荷試験結果

| ケース | 押し抜きせん断耐力(kN) | 終局耐力(kN) | 終局変位(mm) |
|--------|---------------|----------|----------|
| Case-1 | 350 | 480 | 55 |
| Case-2 | 350 | 520 | 70 |
| Case-3 | 415 | 520 | 65 |
| Case-6 | 450 | 600 | 60 |

表-2 の試験結果によれば、押し抜きせん断耐力は模擬クラックの有無に関わらず Case-1, 2 で変わらず、Case-3 では配力筋の追加により耐力は約 20%、炭素繊維補強では約 30%増加する。

Case-1, 2, 3 の実験的な押し抜きせん断耐力は、示方書推定式(式 1)による結果と一致する。Case-1, 2 で、下鉄筋かぶりに入れた模擬クラックの有無に関わらず耐力が変わらないのは、下鉄筋のかぶりを無視した有効高を採用する、示方書の考えと一致する。

Case-6 については、炭素繊維の弾性係数を鋼材と同等と仮定して鉄筋換算しても、厚 0.111 mm による鉄筋比の増加は微々たるものなので無視すると、有効高 d も変わらず、Case-6 のみ示方書推定式から外れる。

この理由を(式 1)で考察すると、(見かけ上の)コンクリート設計強度が増加したか、設計断面の周長 u_p が増加したかの、どちらかである。

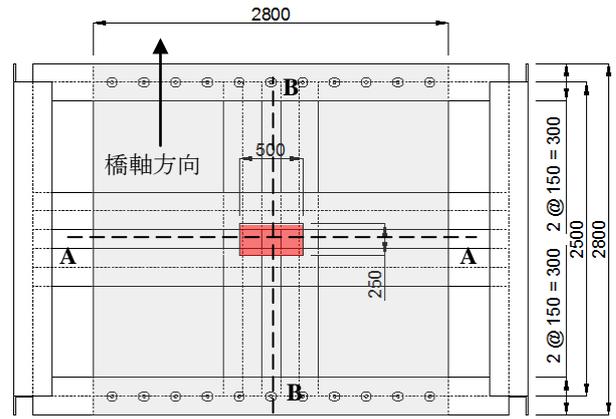


図-4 試験機 (平面図)

表-1 実験ケース

| ケース | 鉄筋 | コンクリート | 疑似クラック | 補強 |
|--------|-------|-----------|--------|--------|
| Case-1 | 標準配筋 | プレーン | 無 | 無 |
| Case-2 | 標準配筋 | プレーン | 有 | 無 |
| Case-3 | 配力筋追加 | プレーン | 無 | 無 |
| Case-4 | 標準配筋 | ビニロン繊維入 | 無 | 無 |
| Case-5 | 標準配筋 | クラックハスター入 | 無 | 無 |
| Case-6 | 標準配筋 | プレーン | 有 | カーボン繊維 |



図-5 Case-2



図-6 Case-6

5. 押し抜きせん断コーンの検討

図-8 に、実験から得られた<A-A>、<B-B>断面の押し抜きせん断コーンの状況を示す。両断面は図-4 に示したものである。図-8 の 250 と 500 mm の寸法値は、載荷板の幅を表す。

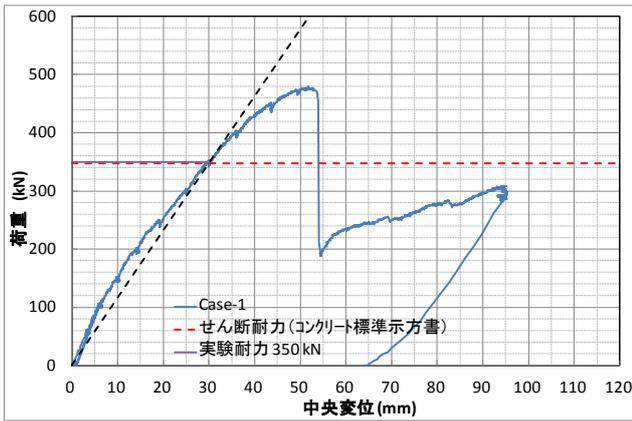


図-7-(a) P- δ Case-1

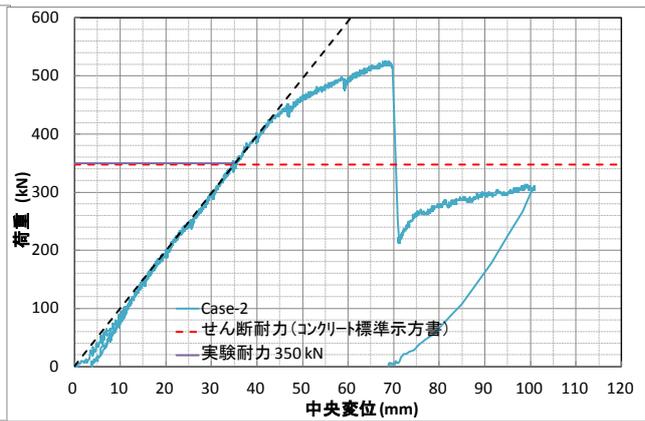


図-7-(b) P- δ Case-2

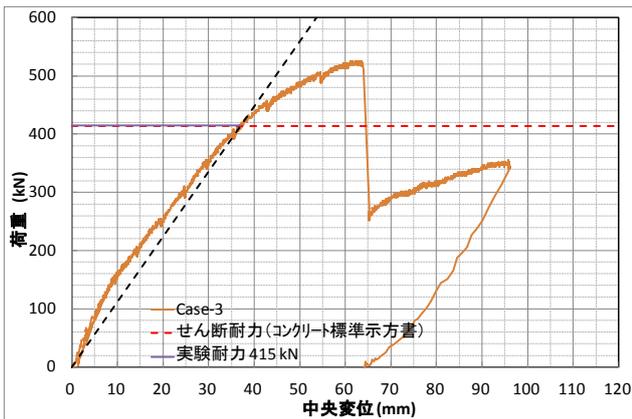


図-7-(c) P- δ Case-3

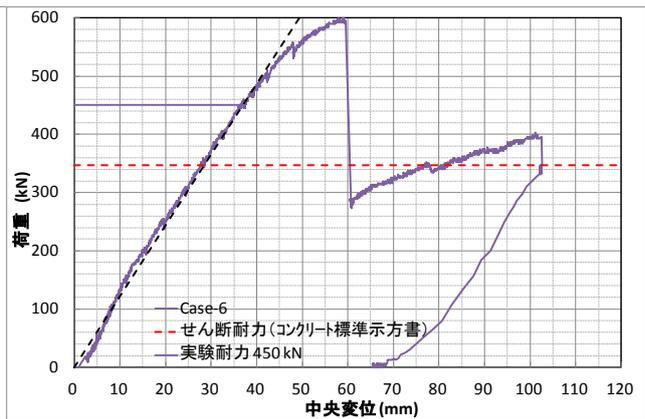


図-7-(d) P- δ Case-4

コンクリート示方書の推定式は、 45° のせん断コーンの力学モデルに基づいているので、図-8 の寸法値①、②の半分が $d/2$ に相当する。①、②は、上鉄筋と下鉄筋の間で取った²⁾。寸法値③は押し抜き幅である。

実験的に得られた有効荷重周長を表-3 に示す。ここで有効荷重周長とは(式 1)の u_p の事で、有効荷重幅は荷重板幅 + d で定義する。表中の $d/2$ は、①と②の平均を用いた。周長比は、示方書推定式による理論値との比較となる。

取り上げた全てのケースで有効荷重周長は、理論値と変わらないものとなる。また図-8 の Case-6 の押し抜き形状は、炭素補強シートを無視し、有効高を下鉄筋までとするのが妥当な事を示唆する。

6. みかけ上の設計基準強度の検討

図-9 に全体の P- δ 曲線を示す。炭素繊維補強の Case-6 の P- δ 曲線の直線部の傾きは、他のケースの直線部の傾きの 1.1 倍の大きさがあ、明らかにみかけの弾性係数は増大している。これはみかけ上の設計基準強度の増加を示唆する。そこで Case-1 と Case-6 の押し抜きせん断耐力比 1.3 を、(式 1) で設計基準強度に換算すると、1.7 倍となる。

この結果と炭素繊維補強量とは、明らかに関連があるはずであるが、カーボン補強ケースは一つのみのため、当実験からの定量化は困難である。

表-3 有効荷重周長比

| ケース | 断面 | $d/2$ (mm) | 有効荷重幅 (mm) | 有効荷重周長比 |
|--------|-----|---------------|---------------|---------|
| Case-1 | A-A | 89 | 428 | 1.00 |
| | B-B | 52 | 604 | |
| Case-2 | A-A | 33 | 315 | 0.99 |
| | B-B | 103 | 705 | |
| Case-3 | A-A | 71 | 392 | 1.00 |
| | B-B | 70 | 640 | |
| Case-6 | A-A | 88 | 425 | 1.00 |
| | B-B | 53 | 605 | |

※ 理論値： $d/2=70$ mm, 有効荷重幅 390×640 mm, 有効荷重周長 $u_p = (390 + 640) \times 2 = 2060$ mm.

7. 終局変位, 終局耐力, 押し抜き幅

終局変位の結果では、模擬クラック有り・炭素繊維無しの Case-2 の終局変位が、模擬クラック無し・配筋筋追加の Case-3 なみに大きい事に注目できる。

Case-3 では下鉄筋かぶりを模擬クラックで分断したので、下鉄筋がかぶりコンクリートに拘束される事なく、より多くの作用力を負担したため終局変位が伸びたとも考えられるが、鉄筋歪み等は計測しなかったため、やはり当実験からの検証は困難である。

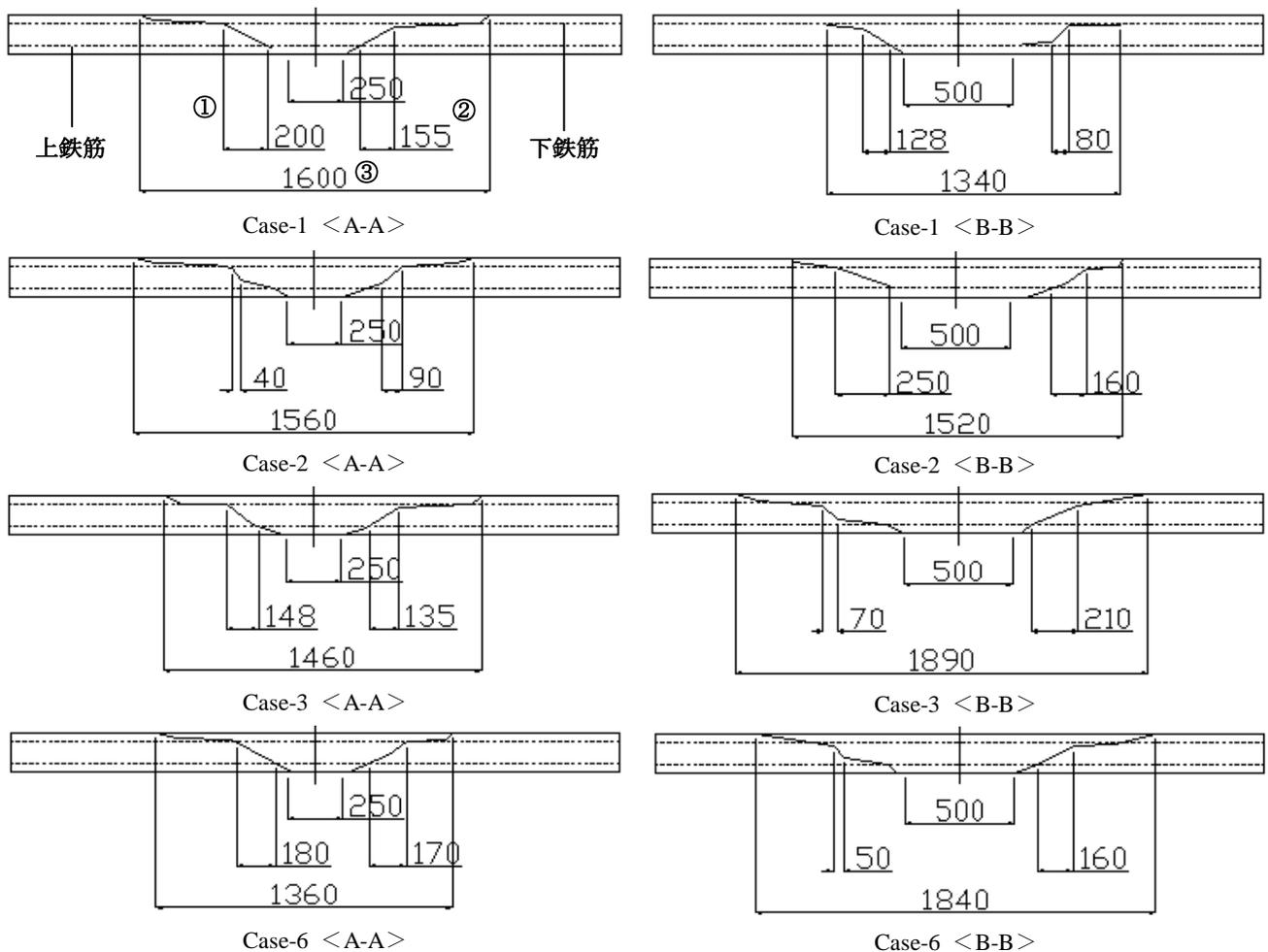


図-8 押し抜きせん断コーン

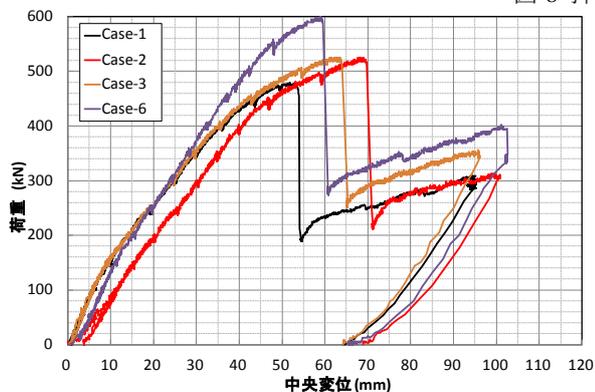


図-9 P- δ 曲線 (Case-1, 2, 3, 6)

一方 Case-6 は一番耐力が大きいにも関わらず、終局変位は大きくない。この原因は、押し抜きせん断耐力に達した時点で、作用力は無補強コンクリートの耐力を越えており、終局時は炭素繊維の破断で決まったからだと考えられる。終局変位が大きくならないのは、みかけの弾性係数の増大によるもので、炭素繊維補強量と関連し、Case-1 と同程度のものとなったのは偶然と思われる。

押し抜き幅は、Case-1, 2 で 1500 mm 前後、Case-3, 6 で 1600 mm 前後となっている。配力筋の追加や炭素繊維補強により、作用力がより広範に分散され、耐力の増加とともに押し抜き幅が広がる傾向が見られる。これはクラックの発生密度の結果とも一致する。

8. まとめ

- (1) 模擬クラック有りの供試体で、下鉄筋かぶりを無視した有効高を採用する、コンクリート示方書推定法と一致する結果が得られた。
- (2) 炭素繊維シート補強は、みかけのコンクリート設計基準強度を増加させ、示方書推定式の他の要因には、大きく影響しないと考えられる。
厚 0.111 mm の炭素繊維シートで、設計基準強度の増加は 1.7 倍となったが、当実験からは、補強量とみかけの強度増加の関係を定量化する事は、出来なかった。

[参考文献]

- 1) コンクリート標準示方書，土木学会コンクリート委員会他，2013 年。
- 2) PC 床版の押し抜きせん断耐力評価式に関する一考察，奥村征史他，コンクリート工学年次論文報告集，