

(11) 鋼板とコンクリートのサンドイッチ 合成はりの応力解析

STRESS ANALYSIS OF COMPOSITE STEEL-CONCRETE BEAM OF SANDWICH SYSTEM

中村卓次* 長谷部宣男* 中村聡志** 宮本正良***

Takuji NAKAMURA, Norio HASEBE, Satoshi NAKAMURA, Masayosi MIYAMOTO

A practical method of stress analysis for composite steel-concrete beam is considered. The beam of sandwich system is composed of two steel plates between which concrete is placed in. Comparing with the results of experiments, the characters of strength and deformation are clarified. Three methods of analysis are proposed; (1) The composite coefficient m is introduced to beam theory. The analytical values approach experimental ones by changing m from 1 to 4. (2) It is assumed that cracks occur in the direction of 45° from shear-connectors. Equilibrium equation is formulated on this assumption. (3) The truss theory is proposed on the assumption that steel plates are replaced by the upper and lower chord-members and concrete is replaced by the diagonal-members.

1. まえがき

鋼とコンクリートの特性を活かす方法として、鋼板間にコンクリートを充填したサンドイッチ合成はり、表面にクラックが発生せず、破壊までの吸収エネルギーが大きい。この合成はりの簡易な解析方法として、3種の計算を行ない、これまでに行なわれた一連の載荷実験結果^{(1)~(6)}と比較することによって、強度と変形の特性を明らかにすることを試みた。解析方法としては、

- (1) はり理論に鋼とコンクリートのずれを考えた合成係数 m を用いる方法
- (2) コンクリートにずれ止めから 45° にびびわれが発生すると考え、つりあい式をたてる方法
- (3) 鋼板とコンクリートを、トラスの上・下弦材と斜材に置換する方法

について提案する。

(1)では、荷重として集中、分布、曲げのそれぞれについて解析し、 m を1~4と変えて実験値に近い結果を求めた。ここでは、それらをまとめて m の一般的な定め方を考える。(2)については、コンクリートの圧縮域の厚さ C をパラメータとし、(3)では、斜材に置換するコンクリート厚さ C をパラメータとして解析した結果と実験値とを比較する。

* 名古屋工業大学、 ** 運輸省、 *** ㈱日立造船

2. 合成係数mによる方法

(1) 解析方法

はりの微小部分について、つり合い条件と変形の適合条件を満たすようにひずみを定める。このとき鋼板とコンクリートのずれを考えて、引張側鋼板の伸びをm倍する(図1)。

鋼板の特性は、引張側でひずみ硬化を考慮して、 ϵ_u 以後を2次曲線と仮定する。圧縮側は、オイラーの座屈応力 σ_{cr} を用いる。コンクリートの特性は、鋼板に挟まれているので、降伏後も抵抗し続けるとして圧縮域での応力-ひずみ関係は2次曲線と直線を用いる(図2)。せん断力の影響は、最大主応力 σ_k を求めるのにコンクリートの垂直応力を低減することによって考える。せん断応力 τ は、あらかじめ求めることができないので、ひびわれが小さい場合はコンクリートの全断面に一樣に分布するものとする。またひびわれが大きい場合は、コンクリートの圧縮域に一樣に分布するものとする。

断面のつり合い条件は

$$N = N_{su} + N_c + N_{se} \quad (1)$$

$$M = N_{se} \cdot d + N_c \cdot y \quad (2)$$

となり、(1)と(2)を同時に満足する ϵ_u と ϵ_t からたわみを計算する。曲げと伸び変形を考え、

$$\frac{dz}{\rho} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_u}{d} dz, \quad \epsilon dz = \frac{\epsilon_s + \epsilon_u}{2} dz \quad (3)$$

計算にはモールの方法と仮想仕事法を用いる。

(2) 解析結果

解析及び実験の梁の模型については付録に示す。

ST型の短いはりに集中荷重が載荷された場合は、最大荷重、たわみは実験値と一致しないが、引張側鋼板が降伏する時の荷重($P_y=3.6$ tf)と実験の最大荷重とは一致する。弾性域での剛性(荷重/たわみ)はせん断変形を考慮していないため一致しない(図3a)。

ST型の短いはりに分布荷重が載荷された場合は、最大荷重は実験値とほぼ一致する。たわみは、鋼板に取り付けたずれ止めの形式によっても違うが、ST型では $m=2$ が実験値と一致している。ST型は引張および圧縮側鋼板に、T形鋼のずれ止めをモデルの軸に直角方向に取り付けて鋼板とコンクリートを一体化している(図3b)。

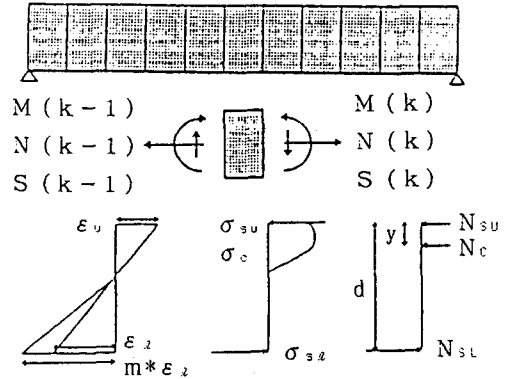


図1 解析方法

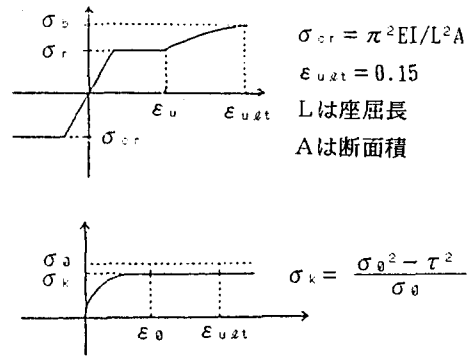


図2 鋼・コンクリートの特性

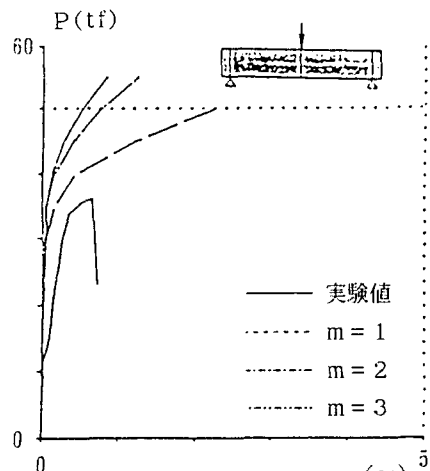


図3a 荷重-たわみ η (cm)
(ST-集中荷重)

SC型の長いはりに集中荷重が載荷された場合は、最大荷重は実験値と一致し、たわみについては $m=1$ で実験値とほぼ一致する(図3c)。

曲げの影響が大きい場合、最大荷重は実験値とよく一致する。せん断の影響が大きい場合は、最大荷重は実験値と一致せず、鋼が降伏するときの荷重と、実験の破壊荷重が一致する。たわみは一般に、集中荷重の場合 $m=1$ または2が実験値とよく一致し、

分布荷重の場合 $m=3$ または4の時よく一致する。これは、引張側鋼板が降伏するモーメント M_y 以上になる部分の長さが、分布荷重の方が長いと考えられる。鋼とコンクリートの合成が十分でないため、 M_y を越える部分の引張側鋼板がすべて伸びるわけではないので、その補正として m を3または4とすればよいと考える。

3. 斜めひびわれを考えた方法

(1) 解析方法

斜めひびわれがずれ止めから 45° の方向に発生すると考え、この微小部分について、つり合い条件を満足するようにひずみを定める(図4)。

せん断力の影響、鋼、コンクリートの特性は、2の解析方法と同じである。圧縮域のコンクリート厚さ C がパラメータとなる。曲げ変形は、

$$\frac{dz}{\rho} = -\frac{\varepsilon_u}{C} dz \quad \text{または} \quad \frac{dz}{\rho} = \frac{\varepsilon_s}{d-C} dz \quad (4)$$

となる。

(2) 解析結果

図5aの短いはりに集中荷重が載荷された場合(ST)は、引張側鋼板が降伏($P_y = 3.5 \text{ tf}$)した後、たわみが急激に増加する。たわみにせん断変形を考慮していないため、解析値の剛性が大きく実験値と一致しない。

図5bの短いはりに分布荷重が載荷された場合(ST)は、圧縮域のコンクリート厚さ $C=4 \text{ cm}$ のとき、最大荷重が実験値に近い。たわみは、降伏前は実験値より小さく、降伏後急増する。

図5cの長いはりに集中荷重が載荷された場合(SC)は、最大荷重、たわみともに、 $C=4 \text{ cm}$ とした時実験値と一致する。

図5dのように、圧縮域コンクリートの厚さ C が

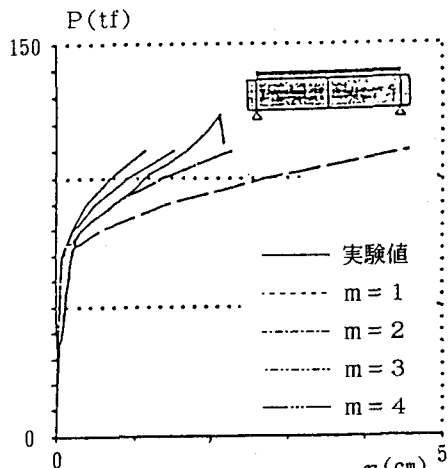


図3b 荷重-たわみ η (cm)
(ST-分布荷重)

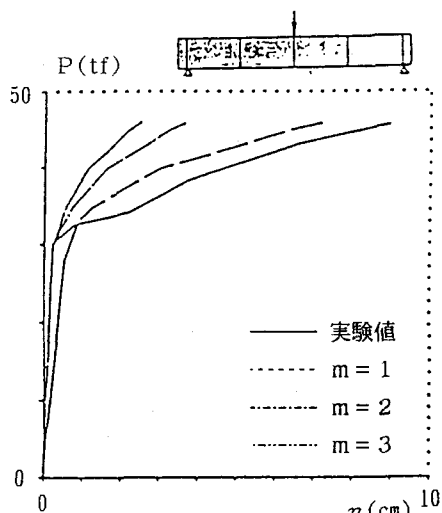


図3c 荷重-たわみ η (cm)
(SC-集中荷重)

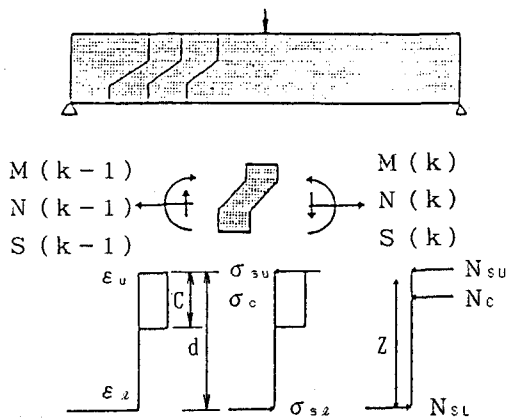


図4 解析方法

増加するとともに最大荷重は増大し、ある値をピークにして減少する。この最大荷重に達するCを用いれば実験値と一致する。

分布荷重の場合に、たわみが一致しないのは、ひびわれを 45° の方向に仮定したためで、実際のひびわれの状態と非常に異なると考えられる。斜めに伸びるひびわれの面に沿って、つりあいを考えることは、曲げモーメント図をモーメントの小さい方から大きい方へシフトさせることと同じと考えられる。そのため、曲げにより発生したひびわれに続いて、斜めにひびわれが伸びる場合、ひびわれの方向を最初から 45° と仮定した場合よりも、たわみは小さくなると考えられる。

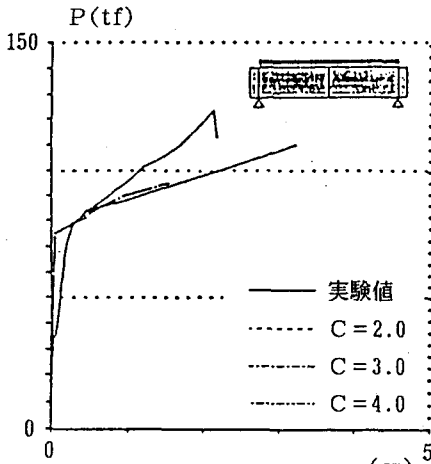


図5b 荷重-たわみ η (cm)
(ST-分布荷重)

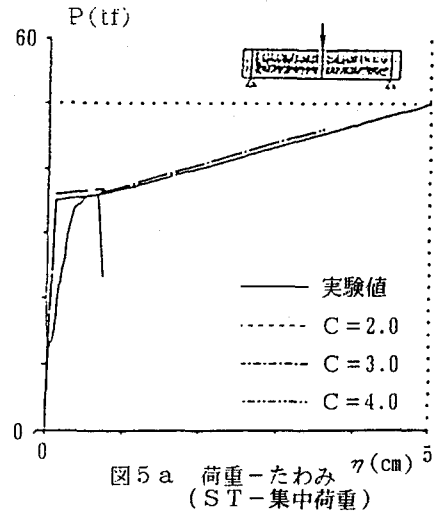


図5a 荷重-たわみ η (cm)
(ST-集中荷重)

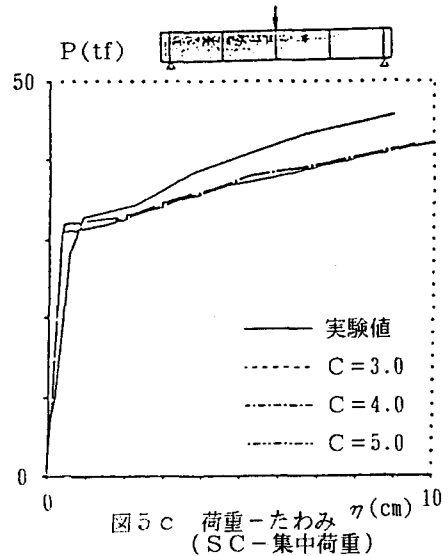


図5c 荷重-たわみ η (cm)
(SC-集中荷重)

4. トラス部材に置換する方法

(1) 解析方法

はりをつラスの上弦材、下弦材、斜材に置換して、マトリクス法によって解析する。置換するはり要素は、まず全長LにわたってAE、EIを一様として、剛性マトリクスを作る。境界条件から変位を求め、要素のひずみを計算して、このAE、EIを補正し、変位が収束するまで繰返し計算する(図6)。

せん断力は、上弦材、下弦材、斜材によって分担

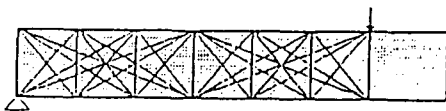


図6 解析方法

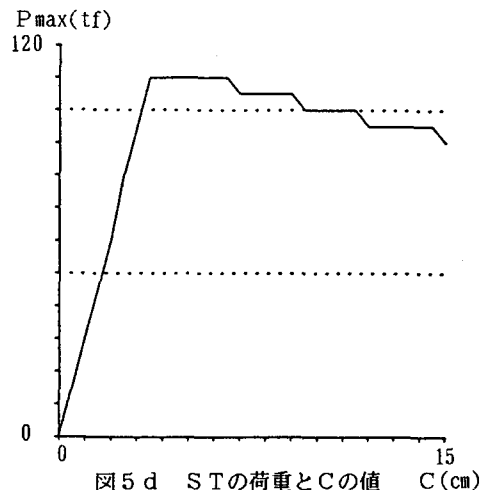


図5d STの荷重とCの値 C (cm)

されるので、2と3の方法のような低減をしない。

斜材のコンクリート厚さCがパラメータとなる。

(2) 解析結果

図7 aの短いはりに集中荷重が載荷された場合 (ST) は、引張側鋼板の降伏によって、たわみが急激に増加して破壊する。たわみは、 $C = 3\text{ cm}$ の場合が、実験値に近くなるが、最大荷重は $C = 4\text{ cm}$ で一致する。

図7 bの短いはりに分布荷重が載荷された場合 (ST) は、最大荷重、たわみとも、斜材の厚さ $C = 4\text{ cm}$ のとき、ほぼ実験値と一致し、弾性域での剛性も一致する。

図7 cの長いはりに集中荷重が載荷された場合 (SC) は、 $C = 6\text{ cm}$ のとき最大荷重、たわみともほぼ実験値と一致し、弾性域での剛性も一致する。

いずれの場合も、弾性域での剛性は実験値とよく一致し、短いはりに集中荷重が載荷されたものを除いて、たわみもよく一致する。引張側鋼板が降伏した後は、計算の収束が悪くなる。パラメータであるコンクリートの斜材の厚さCについては、モデルST型、SC型のような、ずれ止めがはりの軸と直角方向に取り付けられている場合、はりの寸法、ずれ止めの形状から、あらかじめ求めることができる。

5. まとめ

合成係数mによる解析方法では、曲げに比べてせん断の影響が大きい場合、最大荷重については、引張側鋼板の降伏を破壊と考えればよく一致する。はりの高さに比べて長さの短いはり (ST) に、集中荷重が作用する場合は、コンクリートに斜めひびわれが入り破壊しているので、はり理論で解析することはできないと考えられる。最大たわみについては、曲げモーメント図の形によってmを1～4の間で定めることができる。mは引張側鋼板が、降伏曲げモーメント M_y 以上になっている部分の長さ、ずれ止めの形状によって定まると考えられる。分布荷重の場合、 M_y 以上になっている部分の長さは、集中荷重の場合より長い、鋼板とコンクリートのずれによって、この部分が曲げモーメントに見合った伸びをしない。その補正として、 $m = 3$ または 4 を用いる。弾性域での剛性 (荷重/たわみ) は、2～3倍とかなり異なる。合成係数mによって、弾性域で

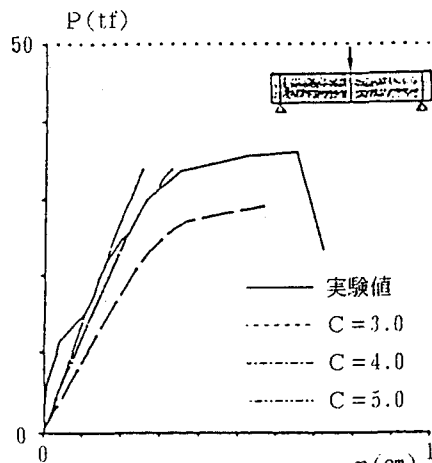


図7 a 荷重-たわみ (ST-集中荷重)

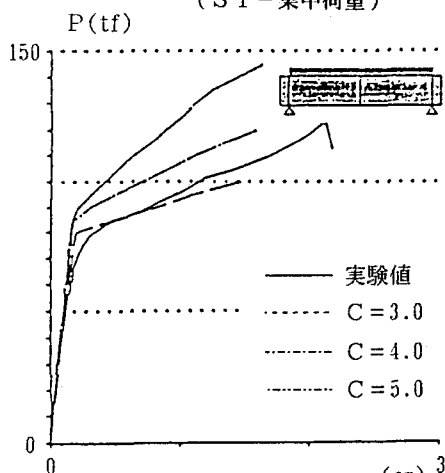


図7 b 荷重-たわみ (ST-分布荷重)

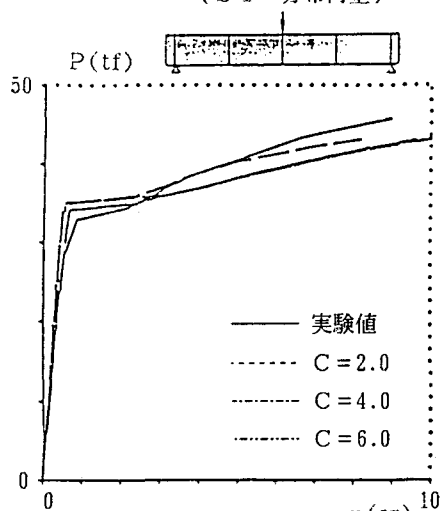


図7 c 荷重-たわみ (SC-集中荷重)

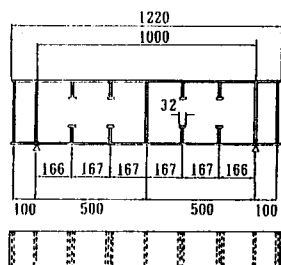
斜めに入るひびわれを考えた解析方法では、荷重が最大値をとるように圧縮域のコンクリート厚さ C を定めれば一致する。はりの高さに比べ長さが短いST型に集中荷重が作用する場合は、コンクリートに斜めひびわれが入り破壊しているので、はり理論で解析することはできないと考えられる。曲げに比べてせん断の影響が大きい場合には、引張側鋼板が降伏するときを破壊と考えると、最大荷重は実験値と一致する。最大たわみについては、計算に用いたひびわれの方向が、実際の斜めひびわれに近いほどよく一致すると考えられる。集中荷重の場合は、ひびわれの形が実際の形に近いためよく一致するが、分布荷重の場合は、実際のひびわれが斜めに伸びる形と異なるので大きな値となる。弾性域での剛性はかなり異なるが、せん断変形を考慮ることによって実験に近くなると考えられる。

付録

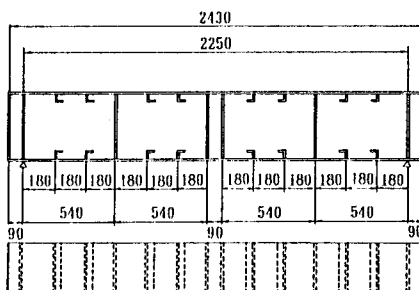
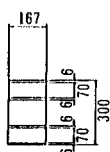
表 コンクリートと鋼の特性

	ST型	SC型
圧縮強さ σ_c (kg/cm ²)	494	271
引張強さ σ_t (kg/cm ²)	21	22.2
曲げ強さ σ_b (kg/cm ²)	59	39.6
剪断強さ σ_s (kg/cm ²)	74	75.7

	S T 型	S C 型
降伏応力 σ_y 上側鋼 下側鋼 (kg/cm^2)	3050	2510 3240
引張強さ σ_b 上側鋼 下側鋼 (kg/cm^2)	4370	3530 4870
ヤング係数 E 上側鋼 下側鋼 (kg/cm^2)	2.01	2.12 1.99



ST型模型



SC型模型



参考文献

- 1) 栖原、西牧、松石、竹下、岩田；
鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物の強度に関する研究（第1報）
日本造船学会論文集、Vol. 141 （1977年6月）
- 2) 同 （第2報）
日本造船学会論文集、Vol. 142 （1977年12月）
- 3) 同 （第3報）
日本造船学会論文集、Vol. 145 （1979年6月）
- 4) 服部、松石、石浜、山本、岩田、北園；
鋼板とコンクリートから成るサンドイッチ式コンポジット構造の最終強度
日本造船学会論文集、Vol. 157 （1985年6月）
土木学会第42回年次学術講演会 （1987年）
- 5) 松石、岩田；
鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物の強度に関する研究（第4報）
日本造船学会論文集、Vol. 164 （1988年11月）
- 6) 松石、岩田；
On the Strength of Composite Steel-Concrete Structures of a Sandwich System (5th-report)
日立造船技術、第49巻第1号 （1988）